

ТАШАНТА КАК ПЕРСПЕКТИВНЫЙ АСТРОПУНКТ ГОРНОГО АЛТАЯ: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ АСТРОКЛИМАТА

© 2024 г. Л. А. Больбасова¹, Е. А. Копылов^{1,2}, С. А. Потанин^{2,3}

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

²Институт астрономии РАН, Москва, Россия

³Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга,
МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

Поступила в редакцию 16.03.2024 г.

После доработки 13.05.2024 г.

Принята в печать 04.06.2024 г.

Для пункта Ташанта 49°43'4" с. ш., 89°11'31" в. д., Горный Алтай, представлены данные непрерывных измерений астроклиматических параметров приземного слоя, среднемесячные значения облачности, качества осадков и взвешенного водяного пара из базы атмосферного реанализа ERA5, а также первичные измерения высотного распределения турбулентности. Результаты показывают уникальные астроклиматические и эксплуатационные условия, которые, вероятно, делают его одним из лучших мест РФ для обсерваторий субмиллиметрового и оптического диапазона.

Ключевые слова: астроклимат, атмосферные эффекты, телескоп

DOI: 10.31857/S0004629924070099 EDN: ITZPYG

1. ВВЕДЕНИЕ

Основные достижения астрономии тесно связаны с совершенствованием наблюдательного оборудования. Для обеспечения более эффективной работы обсерватории астрономическое оборудование должно быть установлено на площадке с лучшими астроклиматическими условиями. Астроклиматические исследования, направленные на поиск наиболее подходящих мест для строительства новых обсерваторий, вновь приобрели актуальность с развитием технологий терагерцового диапазона [1]. Возможности спутниковых атмосферных наблюдений сделали эти исследования масштабными [2–4]. К настоящему моменту в РФ отсутствуют телескопы, работающие в субмиллиметровом диапазоне длин волн, но активно проводятся исследования астроклимата для выбора места размещения подобных инструментов, а также оптического диапазона [5–6].

При поиске места для астрономической обсерватории необходимо учитывать множество факторов, включая атмосферную турбулентность, облачность, выпадающий водяной пар, аэрозольное/пылевое загрязнение, высотную и приземную скорость ветра, интенсивность выпадения осадков, световое и радио загрязнение, а также транспортную доступность и возможность развития инфраструктуры. В частности, для телескопов, работающих в субмиллимет-

ровом диапазоне, для определения атмосферного пропускания в различных представляющих интерес спектральных диапазонах важны такие параметры атмосферы, как осаждаемый в атмосфере водяной пар, тогда как при проектировании телескопа, а также при его эксплуатации важны ветер и температура [7].

О перспективности региона Горного Алтая с точки зрения астроклимата указывалось в работах [8–9]. В частности, выделялся пункт Ташанта на основе распределения взвешенного водяного пара в регионе по данным атмосферного реанализа [10]. В 2023 г. Институт астрономии РАН инициировал кампанию по исследованию астрономического потенциала данного пункта. В представленной работе суммируются результаты непрерывных четырехмесячных измерений астроклиматических параметров приземного слоя: скорости ветра и атмосферной турбулентности, а также высотного профиля турбулентности. Приводятся сравнительные данные из базы атмосферного реанализа параметров астроклимата ERA5: содержание взвешенного водяного пара, количество осадков и покрытие облачностью.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Ташанта (географические координаты 49°43'4" с. ш., 89°11'31" в. д.), населенный пункт

Кош-Агачского района, располагается юго-востоке Республики Алтай России у границы РФ с Монголией в одноименном урочище на берегу реки Ташантинки. С востока от Ташанты находится хребет Чихачева, с запада — Сайлюгемский хребет.

Содержание взвешенного водяного пара в атмосфере над участком является основным показателем для измерения качества места наблюдения в диапазоне миллиметровых волн. Его содержание в атмосфере экспоненциально уменьшается с увеличением высоты до 2000 м. Следовательно, участок должен быть расположен на территории с сухим климатом и на достаточно большой высоте. Поэтому целесообразным является располагать обсерваторию на высоте более 2000 м над уровнем моря и/или в чрезвычайно сухом месте для уменьшения содержания водяного пара, а также турбулентности атмосферы. При этом важным фактором является доступность площадки для строительства и эксплуатации. Площадка должна быть как можно более ровной, кроме того, очень важны хорошие геологические условия для фундамента антенны, достаточное электроснабжение и необходимые условия проживания и логистики, а также транспортная доступность. Указные факторы в полном объеме присущи выбранному пункту. Его высота расположения 2170 м над уровнем моря; также известно, что данный район характеризуется сухим климатом. При этом он находится на ровной местности, и через Ташанту проходит федеральная трасса Р256 (М52) «Чуйский тракт».

Измерения проводились непрерывно в течение четырех месяцев с ноября 2023 г. по февраль 2024 г. с помощью сертифицированного ультразвукового термоанемомурбомера «МЕТЕО-2», расположенного на высоте 10 м, позволяющего измерять скорость приземного ветра и структурную постоянную показателя преломления атмосферы как основную величину, характеризующую уровень турбулентности атмосферы. Оценка качества астрономического видения проводилась с помощью мобильного датчика дифференциальных дрожаний, описанного в работе [11].

Для оценки доли облачности, количества осадков и взвешенного водяного пара привлекались среднемесячные данные из атмосферного реанализа ERA5, включающие ночные и дневные значения. Значения, полученные с помощью реанализа ERA5, представляют собой обобщенную оценку параметров атмосферы и не исключают проведения наземных измерений. Отметим, что в настоящее время использование атмосферных реанализов в исследованиях астроклимата стало общепринятым [4, 10,

12–13]. Помимо этого, с июня 2023 г. была установлена беспроводная метеостанция Weathercloud, измеряющая основные метеорологические величины.

3. КОЛИЧЕСТВО ОСАЖДЕННОГО ВОДЯНОГО ПАРА, ОСАДКОВ И ПОКРЫТИЯ ОБЛАЧНОСТЬЮ ПО ДАННЫМ РЕАНАЛИЗА ERA5

Данные атмосферного реанализа ERA5 для пункта Ташанта рассматривались в сравнении с данными для Специальной астрофизической обсерватории РАН (координаты 43°39'12" с. ш., 41°26'30" в. д.), которая указывалась как возможный вариант для размещения телескопа субмиллиметрового диапазона [14], и для пункта Кош-Агач (координаты 49°89' с. ш., 88°22' в. д.), названного перспективным в работе [9].

Астрономические наблюдения в субмиллиметровом диапазоне длин волн в первую очередь требуют, чтобы атмосферные эффекты, влияющие на поглощение на этих длинах волн, были сведены к минимуму. Основным фактором, способствующим непрозрачности атмосферы, является водяной пар, который очень эффективно поглощает свет в субмиллиметровом диапазоне. Количество осаждаемого водяного пара (PWV, precipitable water vapor) должно быть как можно меньшим. Содержание воды в атмосфере над участком является основным показателем качества астропункта для наблюдения в субмиллиметровом и инфракрасном диапазонах длин волн [3, 7].

На рис. 1 представлены медианные значения за пять лет 2019–2023 гг. количества осаждаемого водяного пара над тремя пунктами для каждого месяца года по данным атмосферного реанализа ERA5.

Эта зависимость с меньшими значениями для лета и большими для зимы типична для атмосферы средних широт. При этом в существующих астрономических обсерваториях РФ на этих высотах медианные значения для летнего периода превышают 10 мм [12, 15]. Отметим низкие значения (около 2 мм) для зимних месяцев в пунктах Горного Алтая. Из сравнения на рис. 1 хорошо видно преимущество пунктов Горного Алтая по сравнению с CAO РАН: количество осаждаемой воды меньше в два раза в летний период, 4.3 мм и 2.1 мм, соответственно, а в зимние месяцы — на 40%. Сравнение данных для пунктов Ташанта и Кош-Агач показывает незначительные различия, при этом можно отметить меньшее значение около 10% над пунктом Ташанта в зимний период.

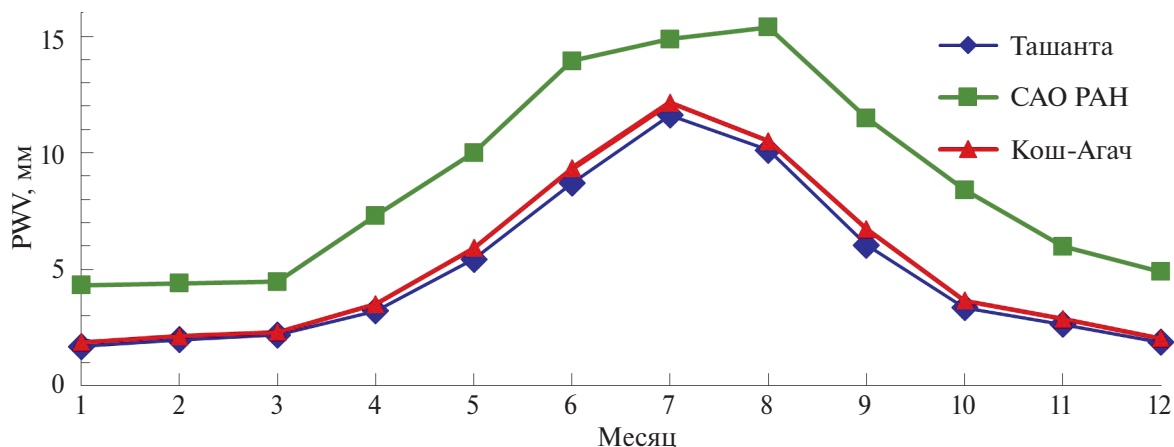


Рис. 1. Медианные значения количества осаждаемого водяного пара за 2019–2023 гг.

Вода, содержащаяся в атмосфере в виде осадков, отражает или преломляет и ослабляет излучение. Поэтому важен поиск самого сухого места для установки инструментов миллиметрового и субмиллиметрового диапазона. На рис. 2 приведены медианные значения за пять лет для каждого месяца общего количества осадков (total precipitation) для трех указанных выше пунктов по данным реанализа ERA5. Аналогично с количеством осаждаемого водяного пара преимущества пунктов Горного Алтая очевидны по сравнению с CAO РАН. Практически нулевые значения характеризуют эту местность с сентября по май. Для мая месяца разница в количестве осадков между CAO РАН и пунктами Горного Алтая достигает трех раз. Низкие значения количества осадков указывают на сухой климат, который характерен для Горного Алтая и безусловно является еще

одним фактором благоприятным для астрономических наблюдений. При этом также имеется преимущество пункта Ташанта по сравнению с Кош-Агач с июня по ноябрь и в марте-апреле.

Облачность является важным параметром для астрономической обсерватории. На рис. 3 представлены медианные значения за пять лет для каждого месяца года покрытия общей облачностью (TCC, total cover cloud) для трех указанных выше пунктов по данным реанализа ERA5.

Общее покрытие облачностью не превышает 60% ни для одного месяца года для пункта Ташанта. Хорошо видно преимущество пункта Ташанта с сентября по апрель по сравнению с CAO РАН, в том числе по сравнению с пунктом Кош-Агач с февраля по апрель, июнь-июль, с сентября по декабрь. И только августе процент облачности в CAO РАН

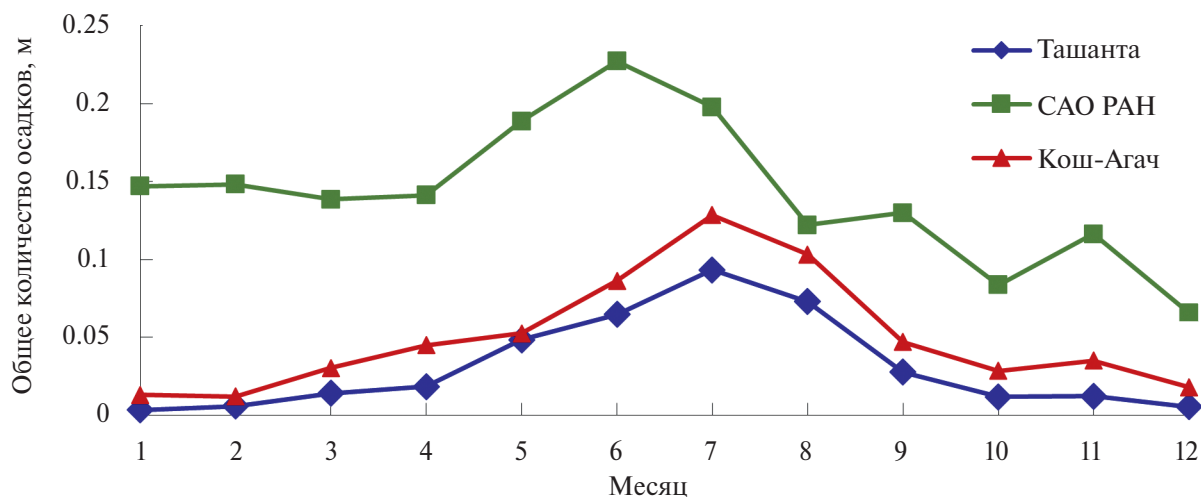


Рис. 2. Медианные значения общего количества осадков за 2019–2023 гг.

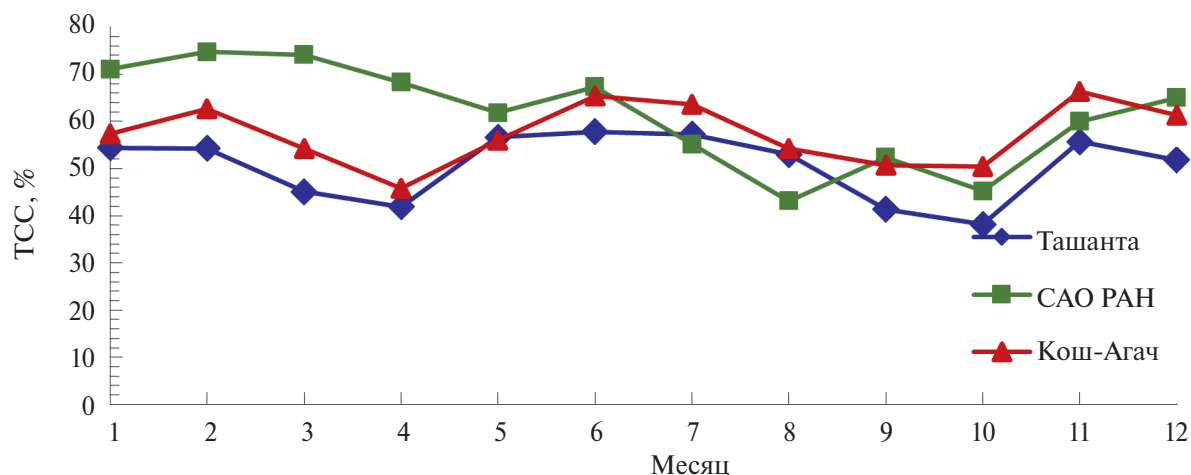


Рис. 3. Медианные значения покрытия облачностью за 2019–2023 гг.

меньше. Отметим тенденцию к уменьшению облачности в районе CAO РАН, связанную с изменением климата [12].

Таким образом данные атмосферного реанализа ERA5 подтверждают, что регион Горного Алтая является регионом с низким значением взвешенного водяного пара, с сухим климатом, при этом половина времени характеризуется ясным небом, что делает его перспективной площадкой для астрономических наблюдений. Месяцы с октября по апрель могут стать лучшими для проведения астрономических наблюдений в субмиллиметровом диапазоне волн.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ: СКОРОСТЬ ВЕТРА

Величина скорости приземного ветра критична для астрономических телескопов, в том числе для радиотелескопов. Температура и ветер являются переменными, требующими особого внимания при планировании установки и эксплуатации радиотелескопов с большой апертурой, для оценки ветровой нагрузки на конструкцию и наведение антенны. Параметры скорости и направления ветра актуальны не только для проектирования телескопов и вспомогательной инфраструктуры, но и представляют интерес для эксплуатации астрономических телескопов, поскольку градиенты температуры, а также скорость ветра могут влиять на точность наведения телескопов, особенно он если не защищен купольным зданием. Воздействие ветровой нагрузки может привести к ошибкам наведения, снизить чувствительность и разрешение телескопа и в конечном итоге повлиять

на его характеристики. Например, требования, предъявляемые к конструкции антенн телескопа ALMA миллиметрового и субмиллиметрового диапазона, чтобы антенны соответствовали своим характеристикам при полной тепловой нагрузке и силе ветра до 6 м/с для работы в дневное время. Для ночных условий, при отсутствии тепловой нагрузки от солнечного освещения, антенны должны отвечать всем требованиям к работоспособности при силе ветра до 9 м/с с проверкой наведения каждые 10 минут [7]. Таким образом, при выборе точного местоположения большого телескопа без защитного купола необходимо иметь данные о скорости ветра. Такая информация важна для извлечения требований как к характеристикам при проектировании конструкции, так и при эксплуатации.

На рис. 4 представлены гистограммы распределения скорости ветра для каждого месяца отдельно, измеренные в режиме 24/7 ультразвуковой станцией «МЕТЕО-2» с частотой 10 Гц и усреднением на интервале 10 минут.

Хорошо видно, что гистограммы смещены в сторону низких значений. Наиболее частое значение приземной скорости ветра равно 2 м/с для всех представленных месяцев. При этом 90% времени скорость ветра не превышает 7 м/с, что также является преимуществом Ташанты как астропункта.

Что касается направления ветра, на рис. 5 показана роза ветров по данным метеостанции с 11 июня 2023 г. по 4 июня 2024 г. Преобладающее направление ветра демонстрирует некоторую изменчивость с выделением юго-восточного направ-

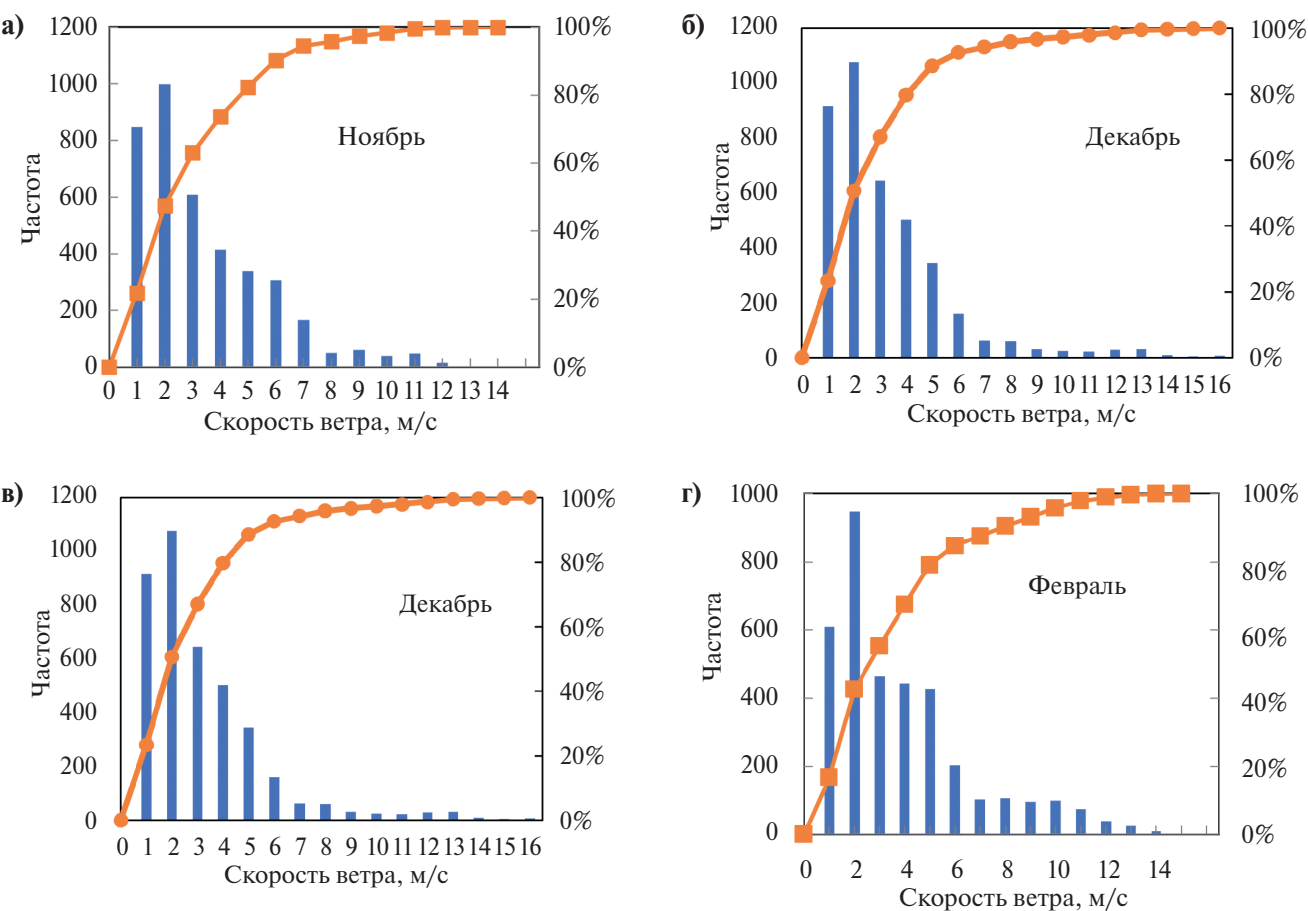


Рис. 4. Гистограммы распределения скорости ветра: а — ноябрь, б — декабрь, в — январь, г — февраль.

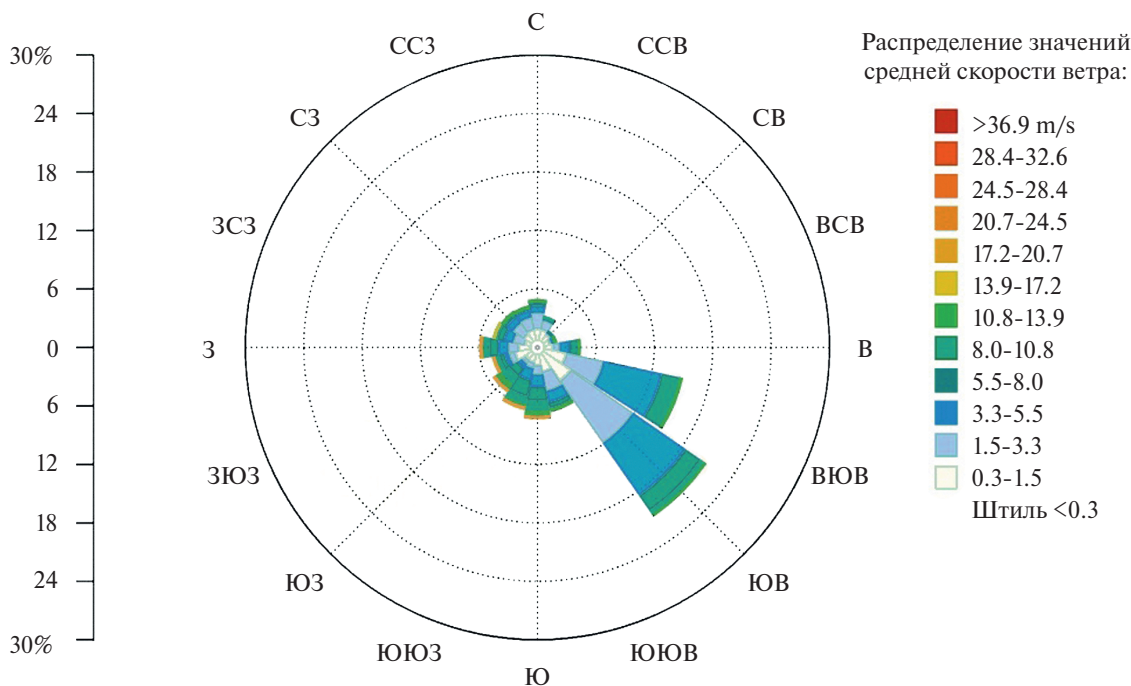


Рис. 5. Роза ветров в пос. Ташанта в период с 11 июня 2023 по 04 июня 2024 г.

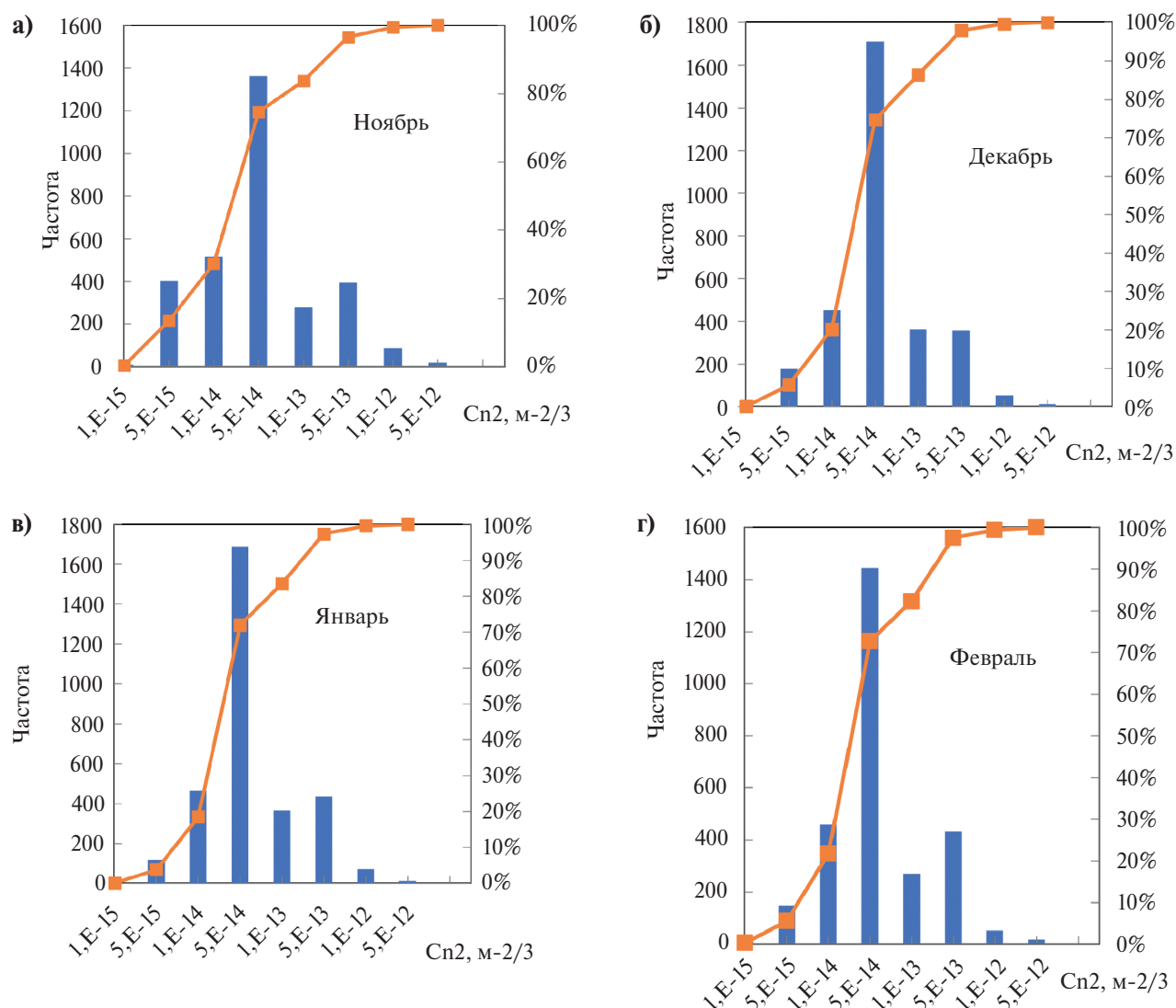


Рис. 6. Гистограммы распределения значений структурной постоянной показателя преломления: а — ноябрь, б — декабрь, в — январь, г — февраль.

ления, при этом 9% времени имеет место штиль, а средняя скорость за время наблюдений составила 3.5 м/с.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ: АТМОСФЕРНАЯ ТУРБУЛЕНТНОСТЬ

Важнейшей астроклиматической характеристикой, в том числе для телескопов субмиллиметрового диапазона, является качество получаемых изображений, определяемое турбулентностью атмосферы Земли. Неоднородности показателя преломления земной атмосферы искажают волновой фронт приходящего субмиллиметрового излучения, что, как и у оптических волн, ограничивает разрешение и чувствительность, вызывая задержку приходящего излучения от астрономического объекта,

которая меняется во времени [16]. Эти флуктуации задержки также оказывают измеримое воздействие на длинах волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазона, но обычно гораздо меньшее, чем воздействие водяного пара. Другим эффектом атмосферной турбулентности являются флуктуации взвешенного водяного пара. Колебания атмосферного шумового излучения, вызванные колебаниями содержания воды в атмосфере, будут ограничивать чувствительность телескопа [17].

Структурная постоянная показателя преломления часто используется как мера величины турбулентности атмосферы. Следует отметить, что оптическая турбулентность приземного слоя обычно больше, чем ее высотное значение. На рис. 6 представлены гистограммы распределения значений

структурной постоянной показателя преломления для каждого месяца отдельно, измеренные в режиме 24/7 ультразвуковой станцией «МЕТЕО-2» с частотой 10 Гц и усреднением на интервале 10 минут.

Отметим, что все полученные гистограммы имеют сходство, и наиболее вероятное значение $5 \cdot 10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$ одинаково для всех рассмотренных месяцев, что свидетельствует о стабильности турбулентных условий данной площадки. Величина структурной постоянной показателя преломления не превышает $10^{-13} \text{ м}^{-2/3}$ 70% времени для всех представленных месяцев.

На рис. 7 представлен суточный ход структурной постоянной показателя преломления атмосферы, дни были выбраны произвольно.

Хорошо видны более высокие дневные значения по сравнению с ночными. Отметим, что период повышенных значений днем сменяется низкими $7 \cdot 10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$. Другими словами, не все дневные значения превышают ночные, равные $1.5 \cdot 10^{-14} \text{ м}^{-2/3}$. Это означает что даже днем возможны кратковременные периоды получения качественных изображений.

Первые измерения по оценке атмосферного качества астрономического видения при помощи

мобильного датчика дифференциальных дрожаний были проведены в октябре 2023 г. Измерения проводились с высоты 1.5 метра ввиду отсутствия возможности поднять прибор выше, при температуре воздуха от -10°C до -14°C и скорости ветра 2–5 м/с. Непрерывный ряд наблюдений размеров атмосферных изображений был получен примерно с 4:10 до 6:00. На рис. 8 представлен ход атмосферного качества астрономического видения.

Был зафиксирован период около 10 минут, когда размер изображений приближался к $0.5''$, а также периоды выбросов до $\beta > 3''$. Для проведения дальнейших работ по исследованию сезонной изменчивости уровня атмосферной турбулентности в 2024 г. в Ташанте будет установлен стационарный астроклиматический пост на высоте 4 метра над уровнем земли.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выбор хорошего места очень важен для наземной астрономии. На основе данных глобального реанализа ERA5 в этой статье изучались астроклиматические условия над территорией пункта Ташанта с точки зрения осаждаемого водяного пара, покрытия облачностью, количества осадков.

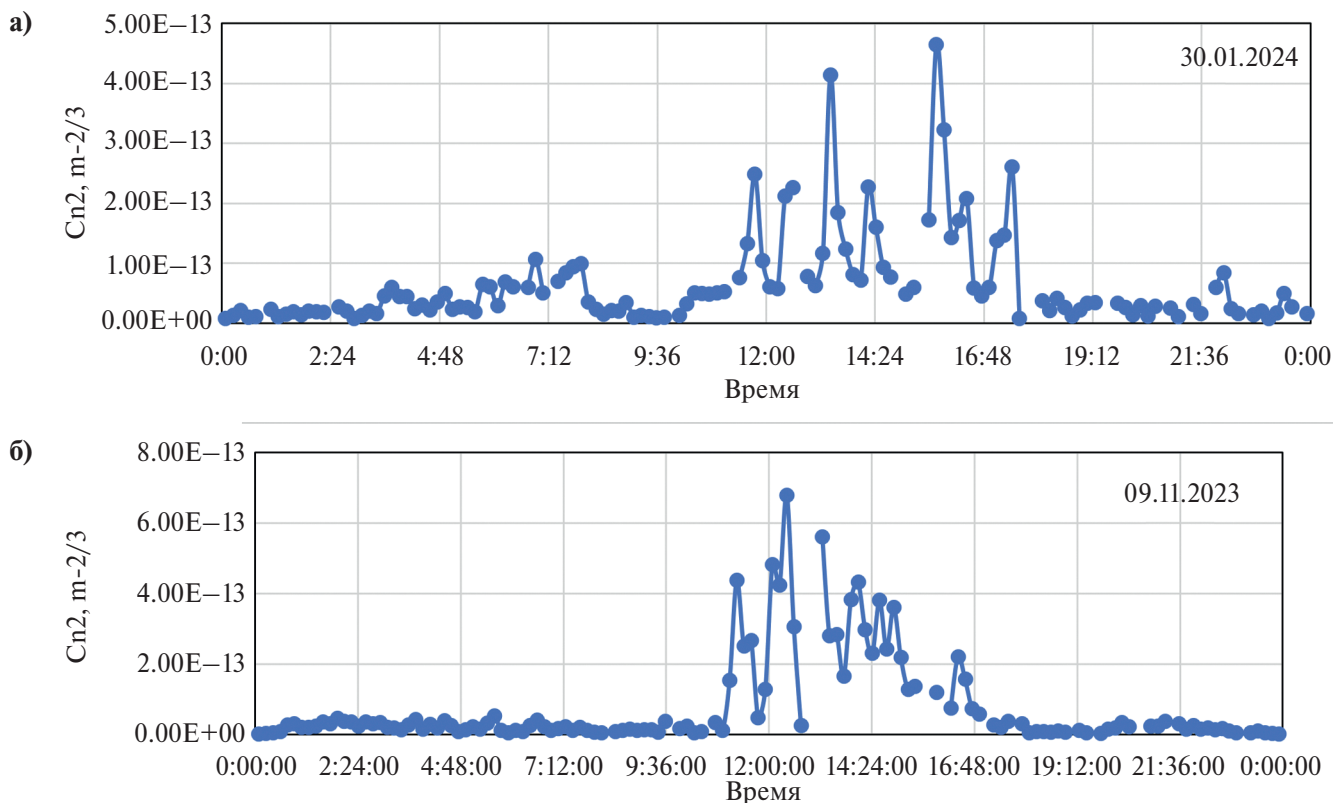


Рис. 7. Суточный ход значений структурной постоянной показателя.

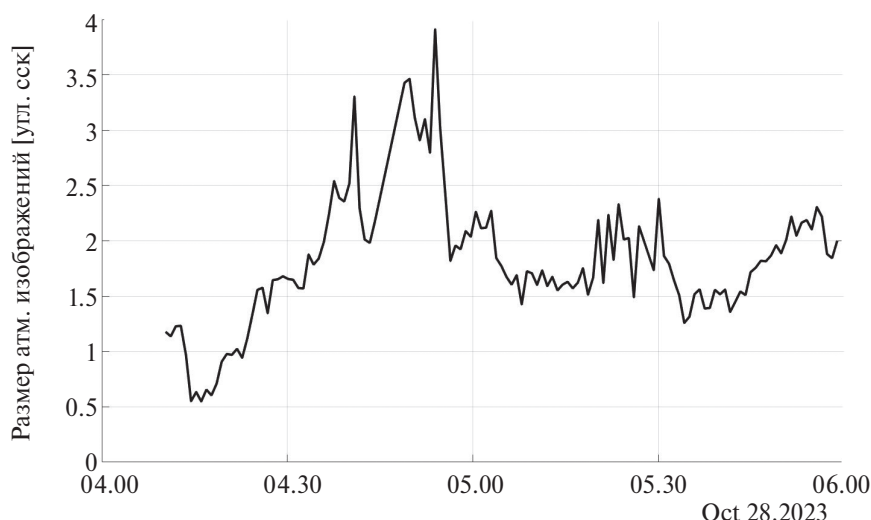


Рис. 8. Оценка качества астрономического видения по данным измерений в ночь с 27 на 28 октября 2023 г. у села Ташанта.

Также анализировались данные измерений скорости ветра и турбулентности. Эти первичные результаты показывают, что Ташанта, как астропункт, имеет потенциал по созданию новой астрономической площадки и преимущества по сравнению с существующими обсерватории в РФ на аналогичной высоте.

Преимущества астроклимата пункта Ташанта включают низкое (≤ 3.5 мм) с октября по апрель содержание взвешенного водяного пара и на 40% ниже в летние по сравнению с наблюдаемым в астрономических обсерваториях в средних широтах РФ; высокий процент ($>50\%$) безоблачного времени, что сопоставимо с лучшими участками средних широт, сухой климат с малым количеством осадков. К выгодным условиям площадки относятся стабильность атмосферных условий, низкая приземная скорость ветра (средние значения 2–4 м/с) и уровень турбулентности.

Эти преимущества необходимо дополнить транспортной доступностью. В результате уникальные астроклиматические и эксплуатационные условия, вероятно, делают пункт Ташанта одним из лучших мест РФ для наблюдений в миллиметровом, субмиллиметровом и среднем инфракрасном диапазонах длин волн.

В заключение подчеркнем, что распространение астрономического сигнала через атмосферу представляет собой доминирующий источник систематических ошибок, поэтому требуются непрерывные измерения астроклиматических параметров не только на этапе выбора места расположения телескопа, но и в процессе эксплуатации.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Раздел 3 выполнен за счет гос. задания ИОА СО РАН, разделы 4 и 5 выполнены при финансовой поддержке проекта Российского научного фонда № 23-72-00041.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы признательны за содействие при проведении работ директору МКОУ «Ташантинская основная общеобразовательная школа» Едильбаеву Елдару Байбахытовичу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ю. Ю. Балега и др., Известия вузов. Радиофизика 63, № 7, 533–566 (2020).
2. M. J. Rioja, R. Dodson, Astron. and Astrophys. Rev. 28, 1–79 (2020).
3. P. Tremblin, N. Schneider, V. Minier, G. Al. Durand and J. Urban, Astron. and Astrophys. A65, 548 (2012).
4. Yong Zhao, Fan Yang, Xiaodian Chen, Xian Zhang, Jifang Ma, Xianghui Kong, Xiaoting Fu, Ruiyue Li, Yong Wei, Zhonghua Yao, Fei He, Jun Pan and Licai Deng, Astron. and Astrophys. A34, 663 (2022).
5. В. Б. Хайкин, А. Ю. Шиховцев, В. Е. Шмагин, М. К. Лебедев, Е. А. Копылов, В. П. Лукин, П. Г. Ковadlo, Журнал радиоэлектроники 7, 73 (2022).
6. I. I. Zinchenko, A. V. Lapinov, V. F. Vdovin, P. M. Zemyanukha, T. A. Khabarova, Applied Sciences 13(21), 11706 (2023).

7. A. Otarola, C. De Breuck, T. Travouillon, S. Matsushita, L.-Å. Nyman, A. Wootten, S. J. E. Radford, M. Sarazin, F. Kerber, and J. P. Pérez-Beaupuits, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 131, 998, 131 045001 (2019).
8. В. И. Бурнашев, *Земля и вселенная* 6, 78–90 (2010).
9. Е. Ю. Мордвин и др., *Известия Российской Академии Наук. Серия физическая* 86, № 3, 452–456 (2022).
10. A. Yu. Shikhovtsev, M. A. Ibragimov, K. E. Kirichenko, E. A. Kopylov, P. G. Kovadlo, *Proc. SPIE* 12780, 127800R (2023).
11. С. А. Потанин, М. В. Корнилов, А. Д. Саввин, Б. С. Сафонов, М. А. Ибрагимов, Е. А. Копылов, М. А. Наливкин, В. Е. Шмагин, Л. Х. Ху, Н. Т. Тао, *Астрофизический бюллетень* 77, № 2, 241–249 (2022).
12. L. A. Bolbasova, A. Yu Shikhovtsev, S. A. Ermakov, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* 520, 3, 4336–4344 (2023).
13. Ming-Shuai Li, Rui Li, Na Wang, Xing-Wu Zheng, *Research in Astronomy and Astrophysics* 20, 12, 20 (2020).
14. Ю. Ю. Балега, Д. К.-С. Батаев, Г. М. Бубнов, В. Ф. Вдовин и др., *Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки* 502, № 1, 5–9 (2022).
15. А. Ю. Шиховцев, В. Б. Хайкин, А. П. Миронов, П. Г. Ковадл, *Оптика атмосферы и океана* 35, № 01, 67–73 (2022).
16. B. Nikolic, R. C. Bolton, S. F. Graves, R. E. Hills and J. S. Richer, *Astron. and Astrophys.* A104, 552 (2013).
17. L. T. Maud, R. P. J. Tilanus, T. A. van Kempen, M. R. Hogerheijde, et al., *Astron. and Astrophys.* A121, 605 (2017).

TASHANTA AS A PROMISING ASTROPOINT OF THE ALTAI MOUNTAINS: THE FIRST RESULTS OF THE ASTROCLIMATE STUDY

L. A. Bolbasova¹, E. A. Kopylov^{1,2}, S. A. Potanin^{2,3}

¹*Zuev Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch, Russian Academy of Science, Tomsk, Russia*

²*Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

³*Sternberg Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

For the Tashanta point, 49°43'4"N, 89°11'31"E, Gorny Altai, data from continuous measurements of astroclimatic parameters of the surface layer, monthly average values of the total cloud cover, suspended water vapor from the ERA5 atmospheric reanalysis database and primary measurements of the altitude distribution of turbulence are presented. The results show unique astroclimatic and operational conditions, which probably make it one of the best places in the Russian Federation for submillimeter and optical range observatories.

Keywords: astroclimate, atmospheric effects, telescope