Секция А. Астрофизика и физика Солнца. БШФФ-2026. С. 177–180.

УДК 520.16
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-177
ORCID 0000-0002-1682-8182

СОВРЕМЕННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ И МИЛЛИМЕТРОВЫЕ ТЕЛЕСКОПЫ: ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТДЕЛЬНЫХ АСТРОПЛОЩАДОК И ВОЗМОЖНОСТИ НАБЛЮДЕНИЙ

А.Ю. Шиховцев[1], П.Г. Ковадло[1], А.А. Леженин[1], М.Ю. Шиховцев[1], В.С. Градов[2]

[1]Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия, Ashikhovtsev@iszf.irk.ru
[2]Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук, Новосибирск, Россия

MODERN OPTICAL AND MILLIMETER TELESCOPES: CHARACTERISTICS OF INDIVIDUAL ASTRONOMICAL SITES AND POSSIBILITIES OF OBSERVATIONS

A.Yu. Shikhovtsev[1], P.G. Kovadlo[1], A.A. Lezhenin[1], M.Yu. Shikhovtsev[1], V.S. Gradov[2]

[1]Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, Ashikhovtsev@iszf.irk.ru
[2]Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia

Аннотация. В настоящей работе рассматриваются отдельные астроклиматические характеристики для выбранных астроплощадок и методы их оценки. Эти исследования актуальны в приложении к концепции проекта Евразийских субмиллиметровых телескопов (ESMT). Приводятся результаты апробации ранее созданного эмпирического метода коррекции значений осажденного водяного пара (реанализ ERA-5), учитывающего рельеф местности для выбранных астроплощадок (на плато Чахнантор, пик Хулугайша, Ташанта и г. Джуфудаг). Для пика Хулугайша за 2023 и 2024 г. рассчитаны сезонные изменения оптической толщи атмосферы на частоте 100 ГГц. Приведены детализированные поля осажденного водяного пара вокруг Саянской солнечной обсерватории и п. Хулугайша с горизонтальным разрешением 1 км, полученные с применением адаптированной модели WRF. С помощью этой модели удается оценивать эффект осушения воздуха над горными вершинами (для разных астроплощадок), определять степень влияния отдельных атмосферных возмущений на разрешение (оптических) телескопов.

Ключевые слова: телескопы, астроклимат, ESMT.

Abstract. In the study, the individual astroclimatic characteristics for chosen sites and estimating methods are discussed. This aspect is important for the concept of the Eurasian Submillimeter Telescopes (ESMT) project. The results of testing a previously developed empirical method for correcting precipitable water vapor values (ERA-5 reanalysis) are presented. This method takes into account the terrain for selected astronomical sites (the Chajnantor Plateau, Khulugaysha Peak, Tashanta, and Mt Jufudag). Seasonal variations in the atmospheric optical thickness at 100 GHz are calculated for Khulugaysha Peak for 2023 and 2024. Detailed fields of precipitable water vapor around the Sayan Solar Observatory and Khulugaysha Peak are presented with a horizontal resolution of 1 km, obtained using an adapted WRF model. This model makes it possible to estimate the effect of air dehydration over mountain peaks (for different astronomical sites) and determine the influence of individual atmospheric disturbances on the resolution of optical telescopes.

Keywords: telescopes, astroclimate, ESMT

ВВЕДЕНИЕ

Развитие наземной астрономии связано с созданием новых телескопов, функционирующих в оптическом, инфракрасном, миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах спектра. Научные результаты, полученные по данным наблюдений на 4 м солнечном телескопе DKIST [Rimmele et al., 2020], касающиеся физики тонкой структуры Солнца, свидетельствуют об актуальности создания крупноапертурного солнечного телескопа и на территории России. В настоящее время в России реализуется Национальный гелиогеофизический комплекс РАН (НГК РАН) [Жеребцов, 2020], в рамках которого, наряду с другими инструментами, создается Крупный солнечный телескоп КСТ-3 с диаметром апертуры питающего зеркала 3 м. Система планирования наблюдений на КСТ-3, по нашему мнению, должна быть гибкой, не жестко привязанной к конкретным наблюдательным задачам. Система должна учитывать:

— ограничения по качеству изображений. Для выполнения наблюдений принципиальным является соответствие технических характеристик системы адаптивной оптики и возможностей достижения высоких значений параметра Штреля (степени коррекции изображений) условиям быстроменяющейся атмосферной оптической турбулентности;

— ограничения по облачности. Важнейшей составляющей является разработка методик диагностики и прогноза облачного покрова над телескопом (по конкретным лучам зрения). На этом пути необходимо развивать численную систему расчета атмосферных характеристик, учитывающую мезо- и микромасштабные атмосферные явления и процессы;

— ограничения по атмосферной прозрачности и световому потоку. При наблюдениях на телескопе, вероятно, будет задействоваться целый ряд сложнейших астрономических приборов одновременно. Для обеспечения наблюдений важно оценивать распределение светового потока в оптической схеме телескопа, выбрать оптимальные спектральные линии (наименее искаженные в атмосфере и представляющие наибольший интерес с точки зрения физики Солнца).

— появление «внезапных» целей (зарождение и эволюция мощной солнечной вспышки, сложных, неклассических, солнечных активных областей, областей, ассоциируемых с явлением мелкомасштабных магнитных пересоединений и др.).

Как результат, система планирования должна выбирать оптимальный научный эксперимент с учетом конкретной солнечной активности, возможностей адаптации с применением адаптивной оптики в текущих атмосферных условиях и методов пост-обработки изображений. Работа системы планирования, как представляется, будет зависеть от того насколько своевременно и точно будут диагностированы и спрогнозированы атмосферные условия.

Помимо оптического диапазона электромагнитного спектра, для исследований космических объектов используется и миллиметровый/субмиллиметровый диапазон. В этом диапазоне ключевым наземным инструментом является решетка ALMA с регулируемой конфигурацией, с помощью которой получены уникальные научные результаты, включая новые данные по формированию экзопланет, протопланетных дисков вокруг молодых звезд, аккреции вещества и др. [Leroy, 2015; Benisty, 2021]. Решетка ALMA стала основополагающей также в глобальной сети Event Horizon Telescope EHT (Телескопе горизонта событий). Телескоп горизонта событий представляет собой глобальное объединение радиотелескопов в определенной пространственной конфигурации, использующее метод радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами. С помощью EHT (ALMA (Чили), APEX (Чили), IRAM (Испания), James Clerk Maxwell Telescope (Гаваи), Submillimeter Array (Гаваи), Submillimeter Telescope / Heinrich Hertz Telescope (США, г. Грэхем), Large Millimeter Telescope "Alfonso Serrano" (Мексика), South Pole Telescope (Антарктида) впервые в мире получены изображения сверхмассивных черных дыр в центре галактики M87, а затем и Стрельца A*.

При этом важнейшим звеном планирования наблюдательного времени на астрономических телескопах (их работы, в целом) является оценка (предсказание) атмосферных характеристик релевантных для астрономических наблюдений (атмосферной прозрачности, облачности, ветрового режима, мелкомасштабной турбулентности, осажденного водяного пара PWV и др.). Важно, что полученные изображения на EHT являются *единичными*, для получения длинных серий изображений эту сеть необходимо развивать. В смысле положений субмиллиметровых телескопов на Земле определенным белым пятном является территория северной части Евразии: здесь нет сети таких телескопов. В последнее десятилетие появилась концепция проекта Евразийских субмиллиметровых телескопов (Eurasian Submillimeter Telescopes (ESMT), предусматривающего создание новых телескопов, работающих в миллиметровом/субмиллиметровом диапазоне, включая территорию России [Khaikin, 2022; Балега, 2022; Балега, 2024; Bubnov et al., 2015]. Фактически речь идет о перспективе создания сети нового поколения ngEHT или, возможно, о сети, аналогичной EHT, развернутой на базе Россия – Китай – Узбекистан – локации, включение которых обеспечит достаточное заполнение uv-плоскости (каждая пара телескопов, расположенных в заданных координатах, дает всего две дуги на uv-плоскости в течение некоторого промежутка времени). Поиск конкретных астроплощадок является, по-прежнему, актуальной задачей. Потребности заполнения uv-плоскости и повышения разрешения мм/субмм изображений формирует актуальность выбора и исследований астроклимата новых пунктов [Shikhovtsev, 2025; Больбасова и Копылов, 2023], как статистического ансамбля атмосферных состояний, характеризующего возможности проведения астрономических наблюдений.

Задачи настоящей работы состоят в том, чтобы:

— получить усредненное пространственное распределение осажденного водяного пара, которое могло бы являться основой для выбора дополнительных локаций с потенциально высокой атмосферной радиопрозрачностью;

— показать насколько точно можно оценивать атмосферные характеристики в приложении к поиску новых астроплощадок под наземные инструменты. В частности, возможно ли использовать данные реанализа ERA-5 для оценки содержания водяного пара в атмосфере (особенно, в условиях сухой атмосферы) и оптической толщи. Использование этих данных, адаптированных к конкретной астроплощадке дает возможность получать необходимый куб данных для описания астроклимата;

— продемонстрировать результаты применения мезомасштабной модели WRF к задаче повышения пространственной детализации полей атмосферных характеристик.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Исследования основаны на использовании глобальных данных реанализа ERA-5, доступных ежечасно с 1940 г. на различных изобарических уровнях в атмосфере. Первичные данные реанализа ERA-5 и расчетные характеристики, основанные на использовании этих данных, уточняются с использованием данных натурных измерений для выбранных локаций (астроплощадок). Данные измерений включают в себя:

— мачтовые измерения характеристик турбулентности с помощью ультразвуковых анемометров;

— данные измерений оптических характеристик атмосферы, определяемых из искажений изображений в фокальных плоскостях телескопов, прошедших турбулентную атмосферу;

— данных ГНСС измерений и измерений радиометров (в части уточнения величины PWV).

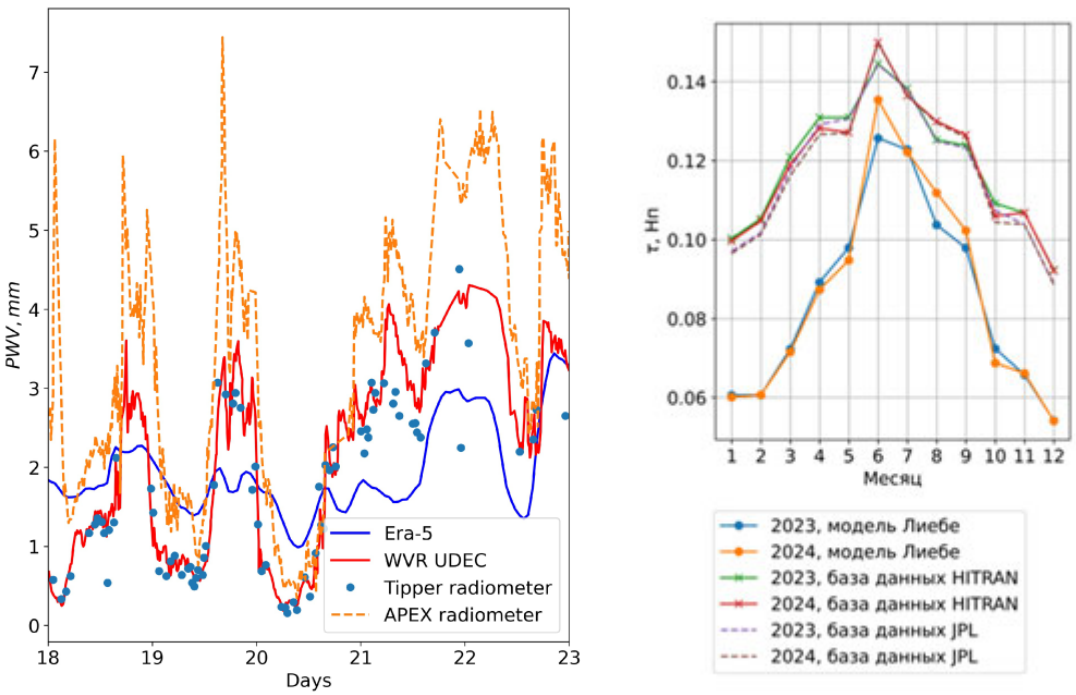

Рис. 1. а) Изменения значений осажденного водяного пара по скорректированным данным реанализа ERA-5 (синяя линия) и радиометрическим данным на плато Чахнантор. б) Сезонные изменения медианных значений оптической толщи атмосферы для пика Хулугайша по модели Лиебе и базам данных HITRAN и JPL в 2023 и 2024 гг. для 100 ГГц. В зимний период годовые хода этой величины демонстрируют очень низкое атмосферное поглощение на уровне 0,06 Нп

РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве результатов можно отметить следующие:

— Предложен метод для коррекции значений осажденного водяного пара (ERA-5), основанный на учете рельефа местности. Метод успешно апробирован для высокогорного плато Чахнантор (Chajnantor) в чилийской пустыне Атакама, с абсолютными высотами ~ 5000 м над уровнем моря [Shikhovtsev et al., 2022]. Сравнение показало, что расчетные значения PWV отклоняются от измеренных (с помощью радиометров) на характерную величину порядка 1 – 2 мм (среднее абсолютное отклонение) (Рис.1 а)). В последние годы с применением этого метода уточнены значения PWV и оптических толщин атмосферы для ряда перспективных локаций – пика Хулугайша, Ташанты, г. Джуфудаг. Пример расчета оптической толщи атмосферы для уникальной астроплощадки, пика Хулугайша с использованием модели Лиебе и баз данных HITRAN и JPL показан на Рис.1 б).

— Получен большой объем расчетных значений оптических толщин атмосферы на разных частотах по результатам обработки вертикальных профилей метеорологических характеристик над п. Ташанта, п. Хулугайша и Специальной астрофизической обсерваторией. В работе [Shikhovtsev et al., 2025] показаны диаграммы для разных частот, позволяющие по медианным значениям PWV оценивать оптические толщины. В перспективе, планируется применить методы машинного обучения для создания модели, связывающей метеорологические характеристики и значения оптических толщин атмосферы на разных частотах.

Результирующее усредненное пространственное распределение 5 процентили PWV в зимний сезон приведено на Рис.2.

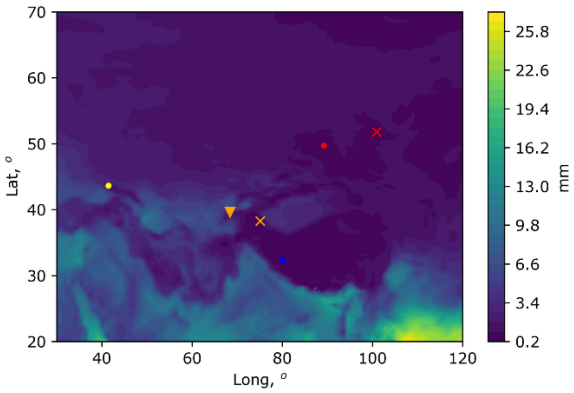

Рис. 2. Пространственное распределение 5 процентили PWV в январе, уточненное для выбранного макрорегиона. Минимальные значения PWV соответствуют синим областям

— Еще один результат связан с возможностью детализации пространственных распределений PWV и определением некоторых характерных закономерностей в пространственно-временных изменениях влажностного атмосферного пограничного слоя. На Рис.3 показан пример пространственного высоко детализированного распределения PWV с разрешением по горизонтали 1 км, полученный по результатам адаптации и применения мезомасштабной модели WRF.

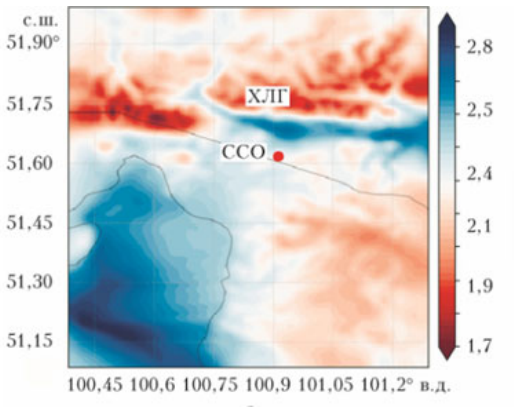

Рис. 3. Пример пространственного распределения значений PWV в мм для региона расположения Саянской солнечной обсерватории (ССО) и пика Хулугайша (ХГЛ) с горизонтальным разрешением 1 км

Анализ этого и аналогичных распределений в другие временные интервалы позволяет определить области, где влажностный атмосферный пограничный слой имеет наименьшую толщину, оценивать эффективную толщину атмосферы и оценивать эффект осушения атмосферы над горными вершинами, который ассоциируется как перепадом высот, так и мезомасштабными движениями атмосферы с горизонтальными масштабами до 1 км. Полученные результаты подтверждены данными натурных измерений [Хайкин и др., 2025]. Детализированные поля температуры и скорости ветра в свою очередь актуальны для параметризации мелкомасштабной турбулентности и оценки углового разрешения наземных оптических телескопов.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-72-10043, https://rscf.ru/project/24-72-10043/.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Балега Ю.Ю., Батаев Д.К-С., Бубнов Г.М., Вдовин В.Ф., Землянуха П.М., Лолаев А.Б., Леснов И.В., Марухно А.С., Марухно Н.А., Муртазаев А.К., Хайкин В.Б., Худченко А.В. Прямые измерения атмосферного поглощения излучения субтерагерцового диапазона волн на Северном Кавказе // Доклады Российской академии наук. 2022. Т. 502, № 1. С. 5–9.

Балега Ю.Ю., Столяров В.А., Баранов С.А., Савинков А.С., Гунбина А.А., Леснов И.В., Марухно А.С., Минеев К.В., Алешков В.М., Медведев А.В., Кошелец В.П., Тарасов М.А., Худченко А.В., Ростокин И.Н., Вдовин В.Ф. О некоторых подходах к реализации субтерагерцового радиотелескопа на территории Российской Федерации // Всероссийская открытая научная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн»: Труды. Муром, 2024. С. 49–58.

Больбасова Л.А., Копылов Е.А. Сезонные вариации параметров астроклимата для обсерватории Терскол // Астрономический журнал. 2023. Т.100, № 7. С.621-629.

Жеребцов Г. А. Комплекс гелиогеофизических инструментов нового поколения // Солнечно-земная физика. 2020. Т. 6, № 2. С. 6 – 18.

Хайкин В.Б., Миронов А.П., Шиховцев А.Ю., Макоев Г.А., Водзяновский Я.О., Худченко А.В., Землянуха П.М., Копылов Е.А. Статистики осажденного водяного пара на новых астропунктах северо-восточной Евразии // Журнал радиоэлектроники. 2025. №. 9.

Benisty M., Bae J., Facchini S., Keppler M., Teague R., Isella A., Kurtovic N.T., Pérez L.M., Sierra A., Andrews S.M. A Circumplanetary Disk around PDS70c // ApJL. 2021. V. 916. L2.

Bubnov G.M., Abashin E.B., Balega Yu.Yu., Bolshakov O.S., Dryagin S.Yu., Dubrovich V.K., Marukhno A.S., Nosov V.I., Vdovin V.F., Zinchenko I.I. Searching for New Sites for THz Observations in Eurasia // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. 2015, V. 5, P. 64–72.

Khaikin V.B., Shikhovtsev A.Yu., Shmagin V.E., Lebedev M.K., Kopylov E.A., Lukin V.P., Kovadlo P.G. Eurasian Submillimeter Telescopes (ESMT) project. Possibility of submm image quality improvement using adaptive optics // Zhurnal radioelektroniki [Journal of Radio Electronics]. 2022. №7.

Leroy A.K., Bolatto A.D., Ostriker E.S., Rosolowsky E., Walter F., Warren S.R., Meyer J.D., Hodge J., Meier D.S., J. Ott ALMA reveals the molecular medium fueling the nearest nuclear starburst // ApJ. 2015. V. 801, №1. 25.

Rimmele, T. R., Warner, M., Keil, S. L., Goode, P. R., Knölker, M., Kuhn, J. R., Rosner, R., McMullin, J. P., Casini, R., Lin, H., Wöger, F., von der Lühe, O., Tritschler, A., Davey, A., de Wijn, A., Elmore, D. F., Fehlmann, A., Harrington, D. M., Jaeggli, S. A., Rast, M. P., Schad, T. A., Schmidt, W., Mathioudakis, M., Mickey, D. L., Anan, T., Beck, C., Marshall, H. K., Jeffers, P. F., Oschmann, J. M., Beard, A., Berst, D. C., Cowan, B. A., Craig, S. C., Cross, E., Cummings, B. K. The Daniel K. Inouye Solar Telescope – Observatory Overview // Sol Phys. 2020. V.295. 172.

Shikhovtsev, A.Y., Kovadlo, P.G., Khaikin, V.B., Kiselev, A.V. Precipitable Water Vapor and Fractional Clear Sky Statistics within the Big Telescope Alt-Azimuthal Region // Remote Sens. 2022. V.14. 6221.

Shikhovtsev A.Y., Kovadlo P.G., Baron P. Candidate Sites for Millimeter and Submillimeter Ground-Based Telescopes: Atmospheric Rating for the Eurasian Submillimeter Telescopes Project // Sensors. 2025, V. 25. 2144.