

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСАЖДЕННОГО ВОДЯНОГО ПАРА, ОПТИЧЕСКОЙ ТОЛЩИ И ОБЛАЧНОСТИ В СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ЕВРАЗИИ

© 2024 г. В. Б. Хайкин^{1,4}, А. Ю. Шиховцев^{2,*}, А. П. Миронов^{3,4}

¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, Россия

²Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия

³Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга

МГУ им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия

⁴Институт астрономии РАН, Москва, Россия

*E-mail: Ashikhovtsev@iszf.irk.ru

Поступила в редакцию 03.08.2023 г.

После доработки 19.10.2023 г.

Принята в печать 23.10.2023 г.

Одной из важнейших задач исследования астроклимата возможных мест размещения Евразийских субмиллиметровых телескопов является изучение статистик осажженного водяного пара, оптической толщи и покрытия неба облачностью. В настоящей работе изучены статистики осажженного водяного пара и общей облачности в северной части Евразии с помощью реанализа ERA-5. Статистики оптической толщи на волне 3 мм получены с применением модели Лиебе по реанализу ERA-5 для региона расположения БТА. Наиболее благоприятными астроклиматическими зонами Евразии наряду с Тибетом и восточным Памиром являются отдельные районы Саян, горного Алтая и горного Дагестана. В работе выполнена верификация данных реанализа ERA-5 с помощью данных радиозондирования, данных ГНСС измерений и радиометрических измерений за 2021 г.

Ключевые слова: астроклимат, оптическая толща, осажженный водяной пар

DOI: 10.31857/S0004629924020126 **EDN:** KSBXIO

1. ВВЕДЕНИЕ

Новые одиночные миллиметровые и субмиллиметровые (мм/субмм) телескопы сегодня как никогда востребованы в Евразии, так же как и их включение в глобальную сеть радиотелескопов, реализуемому в рамках проекта Телескопа горизонта событий (известного как Event Horizon Telescope — ЕНТ) для исследования сверхмассивных черных дыр, расположенных в центрах нашей и ближайших галактик [1]. В связи с высоким интересом к появлению новых мм/субмм телескопов в Евразии актуальным является исследование астроклимата возможных астроплощадок для их размещения и развитие субТГц приемных технологий [2–5]. В целях развития наземной астрономической инфраструктуры существуют планы по созданию Евразийских субмиллиметровых телескопов (ESMT): предусматривается строительство трех высокоэффективных мм/субмм телескопов класса 15–21 м в Узбекистане (предпочтительно на горе Акташтау, 3282 м над уровнем моря) 900 м выше плато Суффа, в России (выше 3000 м над уровнем моря) и на Тибетском плато в Китае (выше 5000 м над уровнем моря). Выбраны достижимые диапазоны работы новых

телескопов. В России и Узбекистане телескопы должны обеспечить наблюдения в полосе частот от 100 до 350 ГГц, на Тибетском плато диапазон частот может быть задан существенно шире: от 100 до 1500 ГГц [6].

Большое внимание в настоящее время уделяется изучению астроклимата возможных мест размещения крупных наземных миллиметровых и субмиллиметровых телескопов в Евразии, а также мониторингу астроклиматических характеристик в существующих обсерваториях [7, 8]. В частности, международными инициативными коллективами ученых выполняются обширные астроклиматические исследования с целью определения оптимальных астропунктов для размещения миллиметрового или субмиллиметрового телескопа в Евразии. Российским научным фондом поддержаны два научных проекта, направленных на поиск места и развитие методических основ: “Комплексное исследование астроклимата возможных мест размещения Евразийских СубММ Телескопов (ESMT) в РФ” и “Астрооптические свойства и структура турбулентной атмосферы: концепция размещения крупного телескопа”.

Для эффективной работы крупного субмиллиметрового телескопа в многолучевом режиме требуется комплексное изучение астроклимата возможных мест его размещения. Понятие астроклимат включает в себя статистики атмосферной прозрачности, облачности, влагосодержания атмосферы, водосодержания облаков, скорости ветра, показателей турбулентности, в том числе высотного профиля мелкомасштабной турбулентности и качества астрономических изображений — астрономического видения (seeing). Исследования атмосферы и астроклимата также требуют развития методов измерений и репрезентативной оценки статистических характеристик [9–13].

Одной из важнейших задач исследования астроклимата возможных мест размещения мм/субмм телескопов является изучение статистик осажженного водяного пара (величины, часто обозначаемой как PWV) и облачности. Наиболее удобным и доступным способом изучения распределения PWV с масштабом порядка 30 км в настоящее время является использование данных реанализа Европейского центра среднесрочного прогноза погоды (ERA-5). Базы данных реанализа атмосферы широко используются в исследованиях астроклимата регионов и отдельных астропунктов [14]. В работе [15] с помощью реанализа MERRA-2 сделана попытка выявить на карте мира области с $PWV < 5$ мм для высот выше 2000 м с целью поиска мест размещения будущих телескопов нового поколения генерации ngEHT. Для каждой перспективной области рассчитывались усредненные за 10 лет статистические характеристики осажженного водяного пара и водозапас облаков. Помимо PWV авторы также оценили спектры оптической толщи $\tau(f)$ и яркостную температуру $T_b(f)$. Наряду со статистиками PWV и оптической толщи $\tau(f)$ в работе [15] были определены статистики пути в жидко-капельной воде. С учетом существующей инфраструктуры авторами было определено 45 перспективных мест размещения телескопов ngEHT, среди которых стоит отметить новые места возможного размещения — Иракский Курдистан (высота 2000 м), север Калифорнии (высота 3500 м), бывший штат Индии Джамму и Кашмир (4000 м), долины которого на северо-востоке примыкают к Гималаям, достигающим в районе Пир Панджал высоты 5000 м.

В предшествующей работе нами был предложен метод оценки (коррекции) значений осажженного водяного пара по данным реанализа атмосферы, учитывающий рельеф местности [16]. С применением этого метода были изучены особенности про-

странственного распределения PWV и доли общей облачности (TCC) для Северного Кавказа и сопредельных территорий, не включенных в детальное рассмотрение в работе [15].

В настоящей работе с помощью реанализа ERA-5 исследуются особенности распределения PWV и TCC в северной части Евразии, в том числе для высот более 2500 м, т.е. для условий высокогорной местности, предпочтительной для размещения мм/субмм телескопов. Помимо статистик осажженного водяного пара мы также оценили характерные значения оптической толщи $\tau(f)$, которая для ясного неба определяется содержанием водяного пара и кислорода в атмосфере. Облачная атмосфера с жидко-капельной водой, как правило, малопригодна для субмиллиметровых наблюдений на одиночном наземном телескопе, и потому мы ограничились анализом PWV в условиях ясной атмосферы, с минимизацией TCC как необходимым, но недостаточным условием выбора подходящего места.

С целью определения достоверности полученных результатов в настоящей работе проведено тестирование и проверка данных (верификация) реанализа ERA-5 в пределах выбранного региона с помощью данных радиозондирования, сравнения с данными PWV станций глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) и измерениями радиометра водяного пара (РВП).

2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ. ВЕРИФИКАЦИЯ ДАННЫХ РЕАНАЛИЗА ERA-5

С целью верификации данных реанализа ERA-5 мы использовали данные радиозондирования атмосферы (РЗ) Центральной аэрологической обсерватории в г. Долгопрудный, данные ГНСС станции в Менделееве и двух ГНСС станций вблизи г. Долгопрудный, а также данные измерений, выполненных с помощью радиометра водяного пара (РВП) в Менделееве. В настоящее время признано, что данные РВП и РЗ являются лучшими способами оценки атмосферных характеристик. РЗ имеет самую высокую точность, но выполняется не чаще 1–2 раз в сутки, что ограничивает возможности верификации данных на малых временных масштабах. РВП работает непрерывно в пункте размещения, но дает высокую погрешность в периоды выпадения осадков.

На рис. 1 приведена карта расположения используемых ГНСС станций. Коды и координаты ГНСС станций показаны в табл. 1.

В настоящем исследовании с целью сравнения вариаций содержания водяного пара в атмосфере

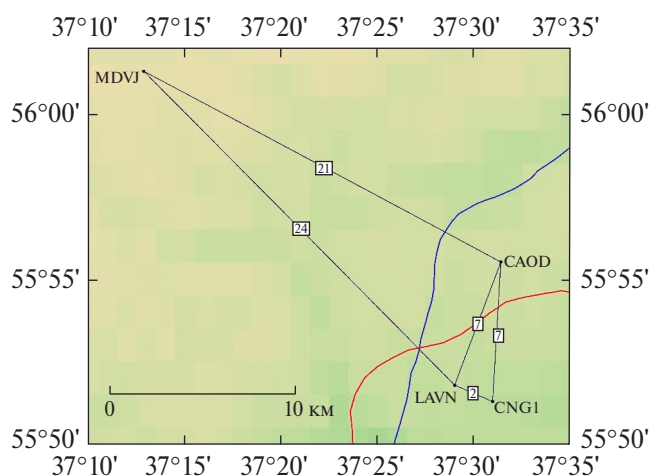


Рис. 1. Карта расположения используемых ГНСС станций. Общепринятые обозначения станций MDVJ — Менделеево, LAVN — ГБУ Мосгоргеотрест, 7 км от Долгопрудного, CAOD — станция радиозондирования в Долгопрудном, CNG1 — Центр геодезии, картографии, 7 км от Долгопрудного.

мы использовали данные РВП Института прикладной астрономии Российской академии наук (ИПА РАН) [17–19]. В частности, были использованы данные натурных экспериментов, в ходе которых РВП был установлен на крыше здания Всероссийского научно-исследовательского института физико-технических и радиотехнических измерений (ВНИИФТРИ) в Менделееве [18, 19]. Методика оценки показаний РВП и результаты верификации с помощью данных РЗ приведены в работе [20].

С целью оценки осажженного водяного пара по данным ГНСС станций мы использовали стандартный подход, основанный на расчете задержки распространения ГНСС сигнала от спутника к приемнику, обусловленной тропосферной рефракцией. Этот метод позволяет непрерывно измерять PWV с помощью ГНСС приемника с задержкой обработки результатов измерений, по продолжительности составляющей несколько недель, что связано с доступом к информации о точных эфемеридах спутников. Метод основан на простой линейной зависимости PWV от влажной составляющей задержки ГНСС-сигнала ZWD :

$$PWV = \Pi \cdot ZWD,$$

где $ZWD = ZTD - ZHD$, ZTD — полная измеряемая задержка в зените, ZHD — гидростатическая задержка в зените (вычисляемая по метеопараметрам). Коэффициент пропорциональности Π определяется константами рефракции и средневзвешенной температурой атмосферного водяного пара T_m . Вертикальный профиль температуры $T(z)$ интегрально “взвешивается” профилем парциального давления водяного пара $p_w(z)$ [21, 22]. Коэффициент Π приблизительно равен 0.15, но в зависимости от локации, высоты и сезона он может изменяться на величину до 20%. Обработка фазовых измерений задержки сигнала с двухчастотных ГНСС приемников [21] проводилась с помощью методик, реализованных в пакете программ GAMIT/GLOBK [23], в дальнейшем значения PWV корректировались с помощью модели, описанной в работе [24].

На рис. 2 приведены изменения осажженного водяного пара PWV в январе 2021 г., оцененные по данным реанализа ERA-5 для ближайшего узла сетки к Менделееву, по данным измерений ГНСС станций в Менделееве и Долгопрудном, измерений с помощью РВП в Менделееве и данным РЗ в Долгопрудном. Анализ рис. 2 показывает, что данные РВП в Менделееве содержат значительные помехи. Анализируя данные ближайшей метеостанции в Тушине, расположенной в 25 км по прямой видимости от Менделеева, можно отметить, что эти помехи могут быть связаны с осадками. В периоды осадков радиометр водяного пара существенно завышает значения осажженного водяного пара в виде резких максимумов, отличающихся на 10–20 мм относительно некоторых фоновых значений.

Для численной оценки различий между оценками осажженного водяного пара, выполненными с привлечением различных методов, мы получили следующие статистические характеристики:

- среднее и медианное значения;
- среднее квадратическое отклонение, характеризующее разброс значений PWV_i относительно среднего значения PWV :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (PWV_i - PWV)^2}{N}};$$

Таблица 1. Коды и координаты ГНСС станций

Код	Долгота, ° в. д.	Широта, ° с. ш.	Высота, м	Комментарий
MDVJ	37.2145105	56.0214942	257.108	ВНИИФТРИ, Менделеево, 21 км от Долгопрудного
LAVN	37.4832163	55.8632811	209.622	ГБУ Мосгоргеотрест, 7 км от Долгопрудного
CNG1	37.5160435	55.8550313	191.699	Центр геодезии, картографии, 7 км от Долгопрудного

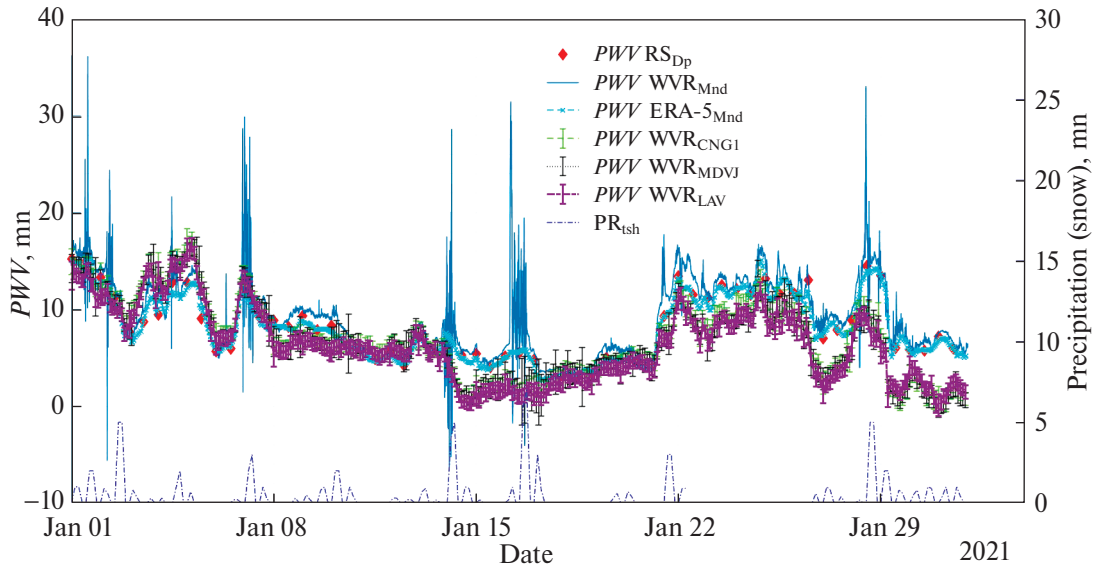


Рис. 2. Изменения PWV [мм] в январе 2021 г., оцененные по данным реанализа Era-5 в Менделееве ($PWV\ ERA-5_{Mnd}$), по данным измерений ГНСС станций ($PWV\ GNS_{MDVJ}$, $PWV\ GNS_{LAVH}$, $PWV\ GNS_{CNG1}$), ВРП в Менделееве ($PWV\ WVR_{Mnd}$) и данным радиозондирования в Долгопрудном ($PWV\ RS_{Dp}$). Синей пунктирной линией показаны изменения уровня осадков по данным измерений на станции Тушино.

в) среднее квадратическое отклонение, характеризующее разброс значений PWV относительно референсных значений данных радиозондирования $PWV_i(r)$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (PWV_i(r) - PWV_i)^2}{N}};$$

г) средняя ошибка

$$ME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (PWV_i(r) - PWV_i)}{N}};$$

д) средняя абсолютная ошибка

$$MAE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (PWV_i(r) - PWV_i)^2}{N}};$$

е) разность средней и абсолютной ошибок

$$AD = MAE - ME.$$

Статистические характеристики PWV , оцененные с применением разных методов, за полный 2021 г. и за январь 2021 г., когда атмосфера характеризуется наибольшей радиопрозрачностью, показаны в табл. 2 и 3 соответственно. Вычисленные коэффициенты корреляции Пирсона между временными изменениями PWV показаны в табл. 4.

Анализ табл. 2 и 3 показывает, что наилучшая сходимость наблюдается между данными радиозондирования и реанализом ERA-5. Различия между

величинами PWV , оцененными по реанализу ERA-5 и данным радиозондирования в терминах MAE , не превышают 1.4 мм, а $RMSE \sim 1$ мм. Для оценки временной синхронизации изменений содержания водяного пара в атмосфере мы рассчитали коэффициенты корреляции Пирсона. Результаты корреляционных расчетов между PWV , полученных различными методами, показаны в табл. 4.

Высокую временную синхронизацию изменений осажженного водяного пара, полученных с применением различных методов, можно видеть на рис. 3, демонстрирующем диаграмму рассеяния коэффициентов корреляции Пирсона. Необходимо подчеркнуть, что на фоне высоких коэффициентов корреляции (более 0.9) атмосферные ситуации с низким содержанием водяного пара описываются несколько хуже в сравнении с ситуациями, когда PWV превышает 5–7 мм. Другими словами, анализ диаграммы показывает, что при относительно сухой атмосфере, когда PWV составляют менее 5–7 мм, разброс значений, определяемых разными методами, увеличивается.

Анализируя статистические характеристики PWV , можно отметить, что реанализ ERA-5 позволяет с высокой точностью восстанавливать интегральную характеристику в тропосфере-нижней стратосфере, а именно осажженный водяной пар. Реанализ ERA-5 может быть использован для диагностики изменения содержания водяного пара в атмосфере для приведенных пунктов и на более длительной временной шкале, с 1940 г. по настоящее время.

Таблица 2. Статистические характеристики PWV , оцененные с применением разных методов, за полный 2021 г. ERA5-M — данные реанализа ERA-5 для ближайшего узла сетки к Менделееву, CAO-D — станция радиозондирования, п. Долгопрудный, ERA5-D — данные реанализа ERA-5 для ближайшего узла сетки к п. Долгопрудный, MDVJ, LAVH и CNG1 — данные ГНСС станций Менделеево, ГБУ Мосгоргеотрест и Центра геодезии и картографии соответственно

Код	Среднее, мм	σ , мм	RMSE, мм	Медиана, мм	MAE, мм	ME, мм	AD, мм
MDVJ	13.8	1.1	3.6	11.7	3.0	0.0	3.0
ERA5-M	13.9	—	1.6	11.3	1.4	0.0	1.4
CAO-D	13.8	—	—	11.3	0.0	0.0	0.0
ERA5-D	14.0	—	—	11.4	1.3	0.1	1.2
LAVH	13.5	0.9	—	11.2	2.8	−0.4	3.2
CNG1	14.3	0.8	—	12.2	2.9	0.5	2.4

Таблица 3. То же, что и табл. 2, но для января 2021 г. WVR-M — РВП в Менделееве

Код	Среднее, мм	σ , мм	RMSE, мм	Медиана, мм	MAE, мм
MDVJ	6.8	6.6	2.5	−1.4	3.9
ERA5-M	7.9	7.3	0.8	−0.4	1.2
CAO-D	8.3	7.8	0.0	0.0	0.0
ERA5-D	7.9	7.3	0.7	−0.3	1.1
LAVH	6.4	6.1	2.6	−1.9	4.5
CNG1	7.0	6.6	2.3	−1.3	3.6
WVR-M	9.0	8.7	1.1	0.7	0.4

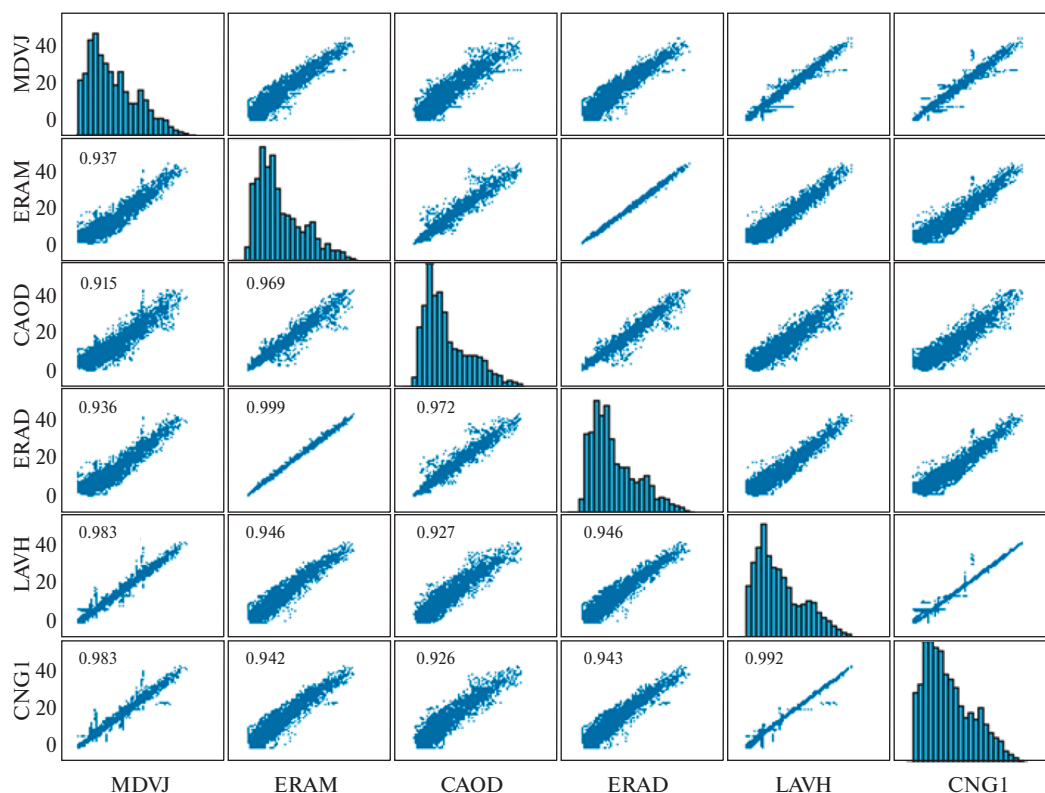


Рис. 3. Диаграмма рассеяния коэффициентов корреляции Пирсона для осажженного водяного пара за 2021 г. На рисунке показаны значения PWV [мм], определенные по различным данным. По диагонали приведены гистограммы, описывающие распределения согласующихся во времени коэффициентов Пирсона корреляции между значениями осажженного водяного пара PWV . MDVJ — Менделеево, LAVH — ГБУ Мосгоргеотрест, CAO-D — станция радиозондирования в Долгопрудном, CNG1 — Центр геодезии, картографии, ERA5-M и ERA5-D — узлы сетки реанализа, ближайшие к Менделееву и Долгопрудному.

Таблица 4. Коэффициенты корреляции Пирсона

	Код	1	2	3	4	5	6	7	Примечание
		MDVJ	ERA5-M	CAO-D	ERA5-D	LAVH	CNG1	WVR	
1	MDVJ	1.0							2021
2	ERA5-M	0.94	1.00						2021
3	CAO-D	0.92	0.97	1.00					2021
4	ERA5-D	0.94	1.00	0.97	1.00				2021
5	LAVH	0.98	0.95	0.93	0.95	1.00			2021
6	CNG1	0.98	0.94	0.93	0.94	1.00	1.00		2021
7	WVR-M*	0.76	0.98	0.93	0.98	0.78	0.79	1.00	Январь, 2021

* Из-за большого количества помех различной природы коэффициенты корреляции Пирсона для данных радиометрических измерений оценены только по январю 2021 г.

3. ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЛАЧНОСТИ, ОСАЖДЕННОГО ВОДЯНОГО ПАРА И ОПТИЧЕСКОЙ ТОЛЩИ АТМОСФЕРЫ

В исследованиях атмосферы в приложении к астрономическим телескопам, а также при диагностике атмосферы на относительно коротких временных интервалах, важнейшей задачей является определение характера пространственных распределений астроклиматических характеристик. В частности, для оценки возможностей проведения астрономических наблюдений в мм/субмм диапазоне необходимо оценивать статистические характеристики облачности, содержания водяного пара и оптической толщи атмосферы в интересующем диапазоне волн. С точки зрения проведения мм/субмм

наблюдений на территории России и сопредельных государств наилучшее наблюдательное время с низким содержанием водяного пара в атмосфере приходится на холодный период года и ночное время суток. Учитывая это обстоятельство, ниже мы приводим результаты статистической оценки атмосферных характеристик, полученных для ночного времени с декабря по февраль за период 2013–2022 гг.

С применением данных реанализа ERA-5 получены пространственные распределения доли общей облачности и осажденного водяного пара в северной части Евразии, усредненные с декабря по февраль за период 2013–2022 гг. (рис. 4 и рис. 5 соответственно). На рисунках в пределах выбранного макрорегиона приведены астропункты, использу-

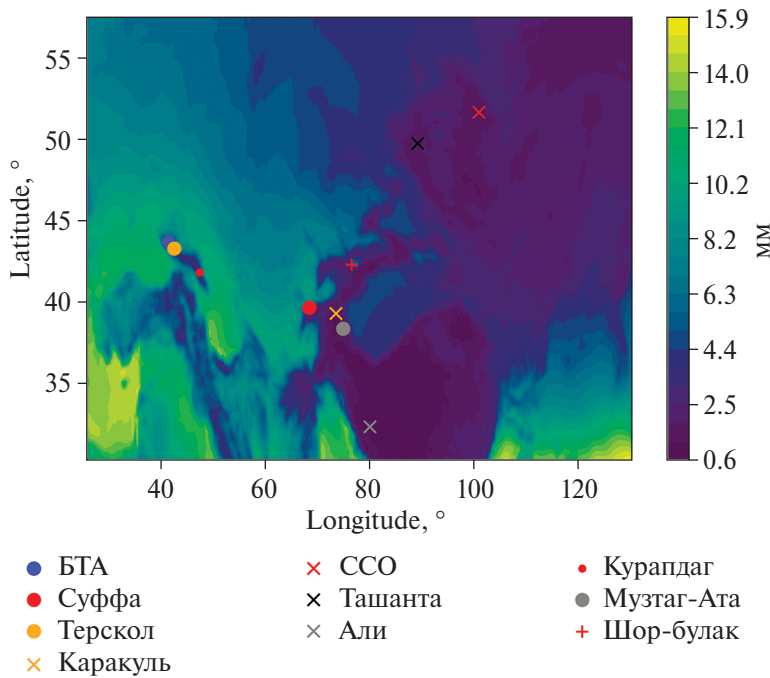


Рис. 4. Пространственное распределение осажденного водяного пара PWV [мм] в ночное время в северной части Евразии для высот более 2500 м, усредненное с декабря по февраль за период 2013–2022 гг.

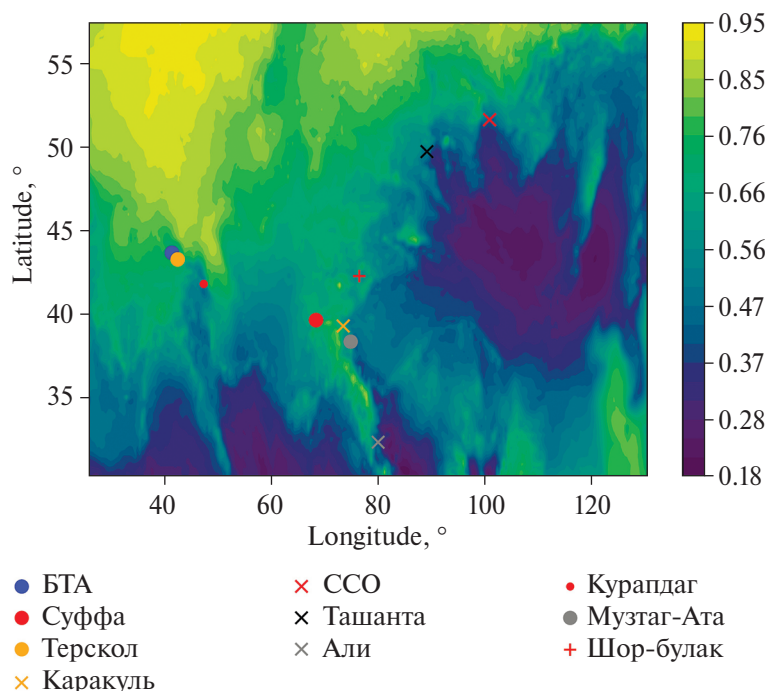


Рис. 5. Пространственное распределение доли общей облачности в ночное время в северной части Евразии для высот более 2500 м, усредненное с декабря по февраль за период 2013–2022 гг.

емые для проведения оптических наблюдений (места расположения Большого телескопа азимутального, БТА Специальной астрофизической обсерватории, обсерватории Пик Терскол и Саянской солнечной обсерватории) и перспективные для мм/субмм астрономических наблюдений в РФ: Саянская солнечная обсерватория, горные районы Дагестана, южная часть Чуйской степи, в меньшей степени, но с удовлетворительными характеристиками: обсерватория Пик Терскол. Синий цвет и его оттенки соответствуют областям с наименьшим содержанием водяного пара в столбе тропосферы — нижней стратосферы и потенциально с наилучшей атмосферной радиопрозрачностью.

В пределах представленного макрорегиона выделяются определенные области с устойчиво пониженными значениями осажженного водяного пара. В частности, на территории России пониженные значения водяного пара наблюдаются над Северным Кавказом, в пределах которого наилучшие астроклиматические характеристики отмечаются в ряде районов горного Дагестана. Анализируя продолжительность солнечного сияния, покрытие неба облачностью, атмосферную возмущенность, оптическую нестабильность земной атмосферы [25–27], можно выделить астроклиматически перспективные астропункты: г. Курапдаг в Агульском и г. Хорай в Рутульском районах Дагестана [28].

В пределах рассматриваемого макрорегиона наименьшие значения осажженного водяного пара соответствуют достаточно протяженной области, вытянутой преимущественно с юга на север вдоль 73 в. д. Южнее озера Каракуль расположены два астропункта Музтаг-Ата (38.33° с. ш., 74.90° в. д., 4526 м над уровнем моря) и Али (32.30° с. ш., 80.05° в. д., 5050 м над уровнем моря), для которых в настоящее время проводятся детальные натурные астроклиматические исследования атмосферы [29]. Эти астропункты характеризуются высокой повторяемостью атмосферных ситуаций, когда осажженной водяной пар по величине составляет менее 2 мм. Анализируя распределения атмосферных характеристик, можно отметить, что астропункт Али выглядит предпочтительнее других мест расположения (где организованы измерения) с точки зрения покрытия неба облачностью и содержания водяного пара в атмосфере в холодный период года [28].

Обсерватория Суффа в декабре-феврале локализуется на периферии области с низкими значениями осажженного водяного пара: она находится в некоторой локальной “ложбине” пониженных значений осажженного водяного пара. Для обсерватории приведенное к высоте места медианное значение осажженного водяного пара в декабре-феврале близко к 2.7–3.0 мм. Анализируя облачность в зимний период, также можно отметить, что обсерватория, хоть и находится под воздействием слабой “локальной

зоны” с относительно пониженными значениями ТСС с запада, но характеризуется достаточно высокой долей общей облачности ~ 0.63 . Существенно более высокие астроклиматические показатели имеет гора Акташтау, примыкающая к плато Суффа [28].

Помимо обозначенных астроплощадок, анализ пространственных распределений позволяет выделить еще одну перспективную область с точки зрения низких значений осажженного водяного пара и низких значений общей облачности, соответствующих ночному времени — вблизи озера Каракуль в Северной части Памира (включая пункты на полуострове и острове Северный). Окрестности вблизи озера Каракуль характеризуются высокой продолжительностью солнечного сияния и высокой прозрачностью атмосферы. В пределах этой обширной области также можно отметить пункты с высокими астроклиматическими показателями, такие как Музтаг-Ата в Восточном Памире и Шор-Булак в Таджикистане на северо-востоке Памира. Анализ пространственных распределений осажженного водяного пара указывает на то, что астропункты вблизи озера Каракуль, а также Музтаг-Ата и в меньшей степени Шор-Булак находятся вблизи “оси” области пониженных значений PWV . В то же время обсерватория Суффа находится на периферии этой области и воздушные массы часто характеризуются сравнительно высоким содержанием водяного пара.

“Менее глубокие” области меридиональной ориентации (в сравнении с Али и Музтаг-Ата), но с устойчиво низким содержанием водяного пара в тропосфере — нижней стратосфере (на уровне 2 мм и менее для горных вершин) формируются в субрегионах расположения Саянской солнечной обсерватории, в частности в районе Пика Хулугайша и районе АПП Ташанта в Чуйской степи на высоте 2200 м. Указанные районы наряду с горным Дагестаном рассматриваются нами как перспективные астропункты для проведения астрономических наблюдений как в радио-, так и в оптическом диапазонах спектра. Вывод о том, что астроклиматические показатели обсерватории Суффа существенно уступают не только астропунктам Али и Музтаг-Ата, но и лучшим районам горного Дагестана (г. Курапдаг, г. Хорай), пику Хулугайша и АПП Ташанта, ранее сделанный в работе [28], подтверждается в настоящей работе. Вывод о перспективности Восточного Памира и, в частности, Шор-Булака, а также удовлетворительных возможностях Пика Терскол ранее сделан в работе [30]. Наши астроклиматические исследования равнинного и горного Крыма не по-

казали потенциала для развития мм/субмм астрономии в Крыму [31], но миллиметровая астрономия до волны 3–2 мм может в Крыму успешно развиваться, в частности на горе Роман-Кош [28] и в районе полигона НГУ “Карадаг” [32].

4. ФУНКЦИИ ВЕРОЯТНОСТИ ПОВТОРЯЕМОСТИ ОПТИЧЕСКОЙ ТОЛЩИ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ И РЕАНАЛИЗА ERA-5

Используя данные о содержании водяного пара в атмосфере, мы оценили изменения оптической толщи атмосферы T для места расположения Большого телескопа азимутального Специальной астрофизической обсерватории РАН. Оптическая толщина атмосферы рассматривалась нами как аддитивная величина

$$\tau(f, z, PWV, Q) = a(f) \exp(-z / Z_0) + \beta(f) PWV + \gamma(f) Q,$$

где z — высота над уровнем моря в км, Z_0 — характерная высота кислорода в атмосфере, равная 5.3 км, Q — водосодержание облаков в кг/м². Первое и второе слагаемые определяют ослабление излучения за счет кислорода и водяного пара соответственно. Удельный коэффициент поглощения $\gamma(f)$, как и коэффициенты $a(f)$ и $\beta(f)$, зависит от частоты f , а его значения определяют поглощение излучения за счет водосодержания облаков.

Используя модель Лиебе и оцененные значения осажженного водяного пара PWV по данным реанализа ERA-5 с применением методики, изложенной в работе [33], мы смоделировали изменения оптической толщи атмосферы на длине волны 3 мм в срок 0:00 ч местного времени в течение 2013–2022 гг. Оценки выполнены для “рабочих” атмосферных условий, при значениях осажженного водяного пара менее 7 мм (преимущественно для зимнего периода).

При оценке места и диагностики атмосферных условий одним из эффективных способов является анализ формы функций вероятности повторяемости значений оптической толщи атмосферы. С применением данных реанализа атмосферы ERA-5 мы рассчитали функцию вероятности повторяемости часовых значений оптической толщи, характерную для срока 00 часов местного времени. Функция вероятности повторяемости часовых значений оптической толщи для длины волны излучения 3 мм, оцененная по данным реанализа ERA-5, для места расположения БТА показана на рис. 6. Для той же длины волны в целях сравнения мы привели

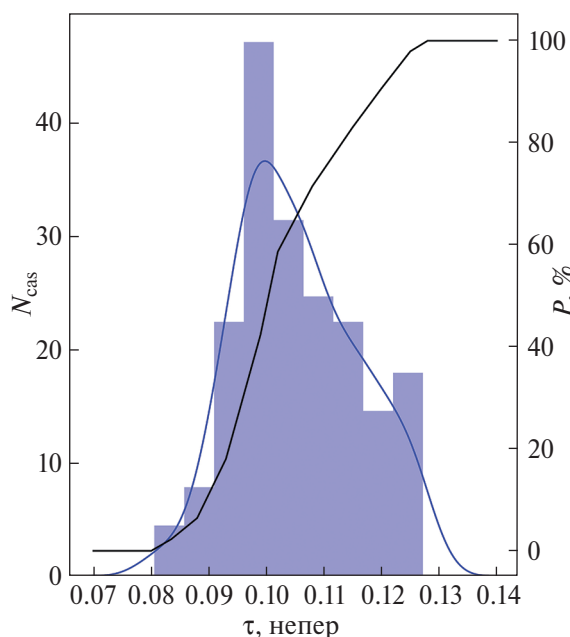


Рис. 6. Функция вероятности повторяемости часовых значений оптической толщи для длины волны излучения 3 мм, оцененная по данным реанализа ERA-5, для места расположения Большого телескопа азимутального. Черная линия соответствует накопленной вероятности повторяемости, синяя линия — ядерной оценке плотности распределения.

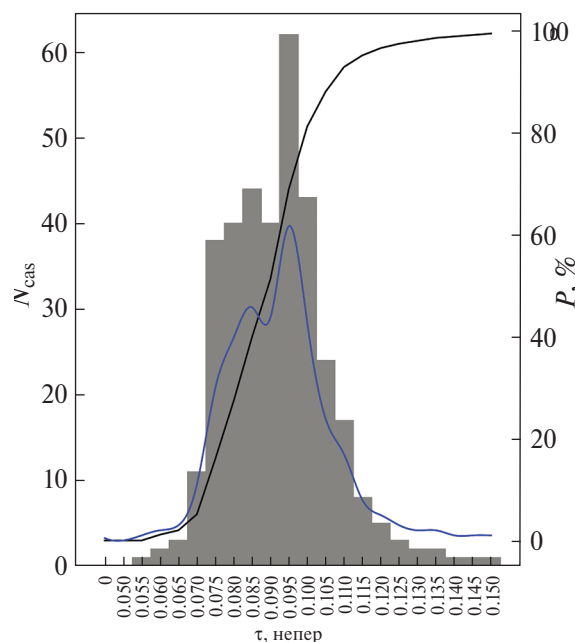


Рис. 7. Функция вероятности повторяемости значений оптической толщи для длины волны излучения 3 мм, полученная по данным радиометрических измерений, адаптированная из работы Бубнова [34], для места расположения Большого телескопа азимутального. Черная линия соответствует накопленной вероятности повторяемости, синяя линия — ядерной оценке плотности распределения.

функцию вероятности повторяемости значений оптической толщи (рис. 7), полученную по данным радиометрических измерений в 2014 г., адаптированную из работы Бубнова [34]. На рисунках, помимо функций вероятности повторяемости, также показаны накопленные вероятности повторяемости и оценки плотности распределения. Ядерные оценки плотности распределения полезны при оценках плотностей случайных значений оптических толщин, для которых эффект выбора разбиения на интервалы и влияния на характер функции распределений минимален: анализируются гладкие функции.

Анализ функций распределения указывает на то, что полученные формы подобны друг другу, а характерные моменты распределений близки. В частности, полученное медианное значение оптической толщи атмосферы по результатам анализа данных ERA-5 составляет 0.105 Нп (на длине волны 3 мм), при значениях осажженного водяного пара менее 7 мм. Выполненные оценки оптической толщи для БТА оказались близки к данным, приведенным в работе [35].

Медианное значение оптической толщи атмосферы по данным радиометрических измерений на волне 3 мм несколько ниже и составляет 0.095 Нп, что связано с выбором атмосферных условий про-

ведения измерений (ясная и малооблачная погода). Полученные распределения характеризуются правосторонней асимметрией. Коэффициенты асимметрии для распределений, полученных по данным реанализа и радиометрическим измерениям, составляют соответственно: 0.24 и 0.20. Такие коэффициенты указывают на то, что в месте расположения БТА часто наблюдаются атмосферные ситуации с повышенным содержанием водяного пара в атмосфере и высокими значениями оптической толщи.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Проблема поиска новых мест и диагностики атмосферы для целей размещения крупных оптических и мм/субмм телескопов наземного базирования весьма актуальна. С целью выявления новых пунктов, подходящих для миллиметровых наблюдений и статистической оценки характеристик атмосферы над ними, в настоящей работе получены следующие результаты:

1. Подтверждено, что способ коррекции значений осажженного водяного пара, определенных по реанализу ERA-5 с учетом рельефа местности [16], обеспечивает высокую временную синхронизацию между изменениями PWV , а также близость оценок статистических моментов распределений, определенных

с применением различных методов. Метод коррекции дает возможность параметризовать и уточнить значения PWV для горных вершин, используя данные реанализа, описывающие вариации содержания водяного пара для некоторой территории.

Различия между величинами PWV , оцененными по реанализу ERA-5 и данным радиозондирования в терминах средней абсолютной ошибки, не превышают 1.4 мм, а среднее квадратическое отклонение составляет ~1 мм. Коэффициенты корреляции Пирсона между временными рядами PWV не уменьшаются менее 0.9.

2. Выполненные исследования указывают на то, что при выборе места, подходящего для миллиметровых и особенно субмиллиметровых наблюдений, необходимо выбирать горные вершины выше 3000 м, находящиеся в областях с пониженным содержанием водяного пара и с низкой долей покрытия неба облачностью. Как правило, такие места локализуются вблизи границ с относительно резкими изменениями атмосферных характеристик по горизонтали (например, при переходе из области низких значений к области высоких значений PWV). Высотным исключением в РФ является, по нашему мнению, уникальный климатический район Чуйской котловины (степи) (отдельные горные вершины с высотами близкими к 2500 м), имеющий все характерные признаки горной пустыни.

На основе анализа пространственных распределений осадочного водяного пара и доли общей облачности, усредненных для ночного времени за период с 2013 по 2022 г., выявлены оптимальные пространственные области с высокими астроклиматическими показателями. Показано, что области с пониженным содержанием водяного пара в тропосфере — нижней стратосфере, вытянутые преимущественно в меридиональном направлении, и низкой долей покрытия общей облачностью включают в себя места расположения Саянской Солнечной обсерватории (пик Хулугайша) и АПП Ташанта. На Северном Кавказе высокие астроклиматические показатели демонстрируют пункты горного Дагестана (в качестве референсных пунктов нами выбраны г. Курапдаг, г. Хорай и вершины плато Гуниб). Одни из лучших астроклиматических показателей демонстрируют астропункты, находящиеся в обширной области пониженных значений PWV , соответствующие темно-синему цвету на рис. 4. Наилучшие астроклиматические условия в терминах TSS и PWV наблюдаются над астропунктом Али на плато Тибет в Китае. В пределах этой обширной области следует отметить такие пункты с высокими

астроклиматическими показателями, как Музтаг-Ата, озеро Каракуль и Шор-Булак.

3. С применением модели Лиебе найдена форма функции вероятности повторяемости часовых значений оптической толщи для длины волны 3 мм для места расположения Большого телескопа альт-азимутального, характерная для срока 00 часов местного времени. При атмосферных условиях, когда значения $PWV < 7$ мм, полученная функция вероятности повторяемости часовых значений оптической толщи подобна по форме функции, определенной по данным радиометрических измерений. Медианное значение оптической толщи атмосферы по результатам анализа данных ERA-5 составляет 0.105 непер на длине волны 3 мм, подчеркнем, при значениях осадочного водяного пара менее 7 мм. Медианное значение оптической толщи атмосферы по данным радиометрических измерений для той же длины волны близко к полученной нами оценке и составляет 0.095 непер. В реальной атмосфере в районе БТА, когда значения PWV изменяются в широких пределах (по нашим оценкам средние часовые значения PWV могут возрастать до 10 мм в зимний сезон), величина оптической толщи атмосферы несколько увеличивается.

4. Полученные в настоящей работе выводы подтверждаются результатами измерения осадочного водяного пара с помощью ГНСС станций, установленных в районах г. Курапдаг, пика Хулугайша и АПП Ташанта.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность руководителю сети Аэрогеодезия (<https://hive.geosystems.aero/>) С.Д. Сорокину за помощь в установке ГНСС станций на г. Курапдаг, пике Хулугайша и АПП Ташанта, а также Ф.Р. Сулеймановой за визуальные наблюдения облачности в небе над с. Чираг с целью получения статистики ясного неба в районе г. Курапдаг.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке гранта РФФ № 23-72-00041.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. K. Akiyama, A. Alberdi, W. Alef et. al., *Astrophys. J. Lett.* **930**, L12 (2022).
2. Ю.Ю. Балега, Д.К.-С. Батаев, Г.М. Бубнов и др., Доклады Российской академии наук. Физика, технические науки **502**, 5 (2022).

3. Ю.Ю. Балега, А.М. Барышев, Г.М. Бубнов и др., Известия высших учебных заведений. Радиофизика **633**, 537 (2020).
4. В. Кошелец, К. Рудаков, А. Худченко и др., Краткие сообщения по физике ФИАН **48**, 47 (2021).
5. K.I. Rudakov, A.V. Khudchenko, L.V. Filipenko, et. al., Applied Sciences **11**, 10087 (2021).
6. В.Б. Хайкин, А.Ю. Шиховцев, В.Е. Шмагин и др., Журнал Радиоэлектроники **7**, 1684 (2022).
7. X. Qian, Y. Yao, H. Wang et. al., Publ. Astron. Soc. Pacif. **132**, 125003 (2020).
8. S. Doleman, L. Blackburn, J. Dexter, In Proceedings of the Bulletin of the American Astronomical Society **51**, 256 (2019).
9. A. Potekaev, N. Krasnenko, L. Shamanaeva, Atmosphere **12**, 1347 (2021).
10. Y.V. Molozhnikova, M.Y. Shikhovtsev, O.G. Netsvetaeva et al., Appl. Sci. **13**, 8171 (2023).
11. L.A. Bolbasova, E.K. Kopylov, Atmosphere **14**, 1264 (2023).
12. V.E Panchuk, V.L Afanas'ev, Astrophysical Bulletin **66**, 2, 233–254 (2011).
13. Iu.K. Bergner, A.V. Krat, M.A. Pogodin et al., Astrofizicheskie Issledovaniia **10**, 52–60 (1978).
14. L.A. Bolbasova, A.Yu. Shikhovtsev, S.A. Ermakov, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **520**, 4336 (2023).
15. A.W. Raymond, D. Palumbo, S.N. Paine, Astrophys. J. Suppl. Ser. **253**, 5 (2021).
16. A.Y. Shikhovtsev, P.G. Kovadlo, V.B. Khaikin et al., Remote Sensing **14**, 6221 (2022).
17. Г.Н. Ильин, В.Ю. Быков, В.Г. Стэмповский, А.М. Шишкин, Труды ИПА РАН **27**, 210 (2013).
18. Г.Н. Ильин, А.В. Троицкий, Известия высших учебных заведений. Радиофизика **60**, 326 (2017).
19. В.Ю. Быков, Г.Н. Ильин, Д.М. Караваев и др., Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского **680**, 205 (2021).
20. С.Б. Розанов, А.С. Завгородний, В.Л. Воронов, Труды ВРК-2022, 55 (2022).
21. M. Bevis, S. Businger, T. A. Herring et. al., J. Geophys. Res. **97**, 15787 (1992).
22. M. Bevis, S. Businger, S. R. Chiswell et. al., J. Appl. Meteor. **33**, 379 (1994).
23. T.A. Herring, M.A. Floyd, R.W. King, S.C. McClusky Global Kalman filter VLBI and GPS Analysis Program, GLOBK Reference Manual, Release 10.6 (Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences, Massachusetts Inst. Technol., Cambridge, MA, 54, 2018).
24. J. Boehm, B. Werl, H. Schuh, J. Geophys. Res. **111**, B02406 (2006).
25. A. Yu. Shikhovtsev, P.G. Kovadlo, A.V. Kiselev et al., Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **493**, 723 (2020).
26. П.Г. Ковадло, О.С. Кочеткова, А.Ю. Шиховцев, Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле **3**, 88 (2010).
27. П.Г. Ковадло, “Результаты астроклиматических исследований по наблюдениям Солнца и оптическая нестабильность земной атмосферы”, диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.03.03 “Физика Солнца”, Иркутск, 279 (2001).
28. V.B. Khaikin, A.Yu. Shikhovtsev, A.P. Mironov et al., Proceedings of Science **072**, 8 (2022).
29. J. Xu, M. Li, A. Esamdin et. al., Publ. Astron. Soc. Pacif. **134**, 015006 (2022).
30. A.V. Lapinov, S.A. Lapinova, L.Y. Petrov et al., Proc. SPIE **11453**, 114532O (2020).
31. А.Ю. Шиховцев., В.Б. Хайкин, А.П. Миронов и др., Оптика атмосферы и океана **35**, 1, 67 (2022).
32. И.Т. Бубукин, И.В. Ракуть, М.И. Агафонов и др., Известия высших учебных заведений. Радиофизика **65**, 791 (2022).
33. А.Ю. Шиховцев, В.Б. Хайкин, П.Г. Ковадло и др., Оптика атмосферы и океана **35**, 11, 956 (2022).
34. Г.М. Бубнов, “Исследования поглощения волн миллиметрового диапазона в атмосфере земли и материалах криогенных рефлекторов”, диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 “Радиофизика”, Нижний Новгород, 133 (2022).
35. A.S. Maruhno, G.M. Bubnov, V.F. Vdovin et al., Ground-based astronomy in Russia. 21st century. Proceedings of the All-Russian Conference, 184–188 (2020).

STATISTICS OF PRECIPITABLE WATER VAPOUR, OPTICAL THICKNESS AND CLOUD COVER WITHIN THE NORTHERN PART OF EURASIA

V. B. Khaikin^{a,d}, A. Yu. Shikhovtsev^b, A. P. Mironov^{c,d}

^a*Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences, Nizhnij Arkhyz, Zelenchukskiy Region, Karachai-Cherkessian, Russia*

^b*Institute of Solar-Terrestrial Physics, the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia*

^c*Sternberg Astronomical Institute of Moscow State University, Moscow, Russia*

^d*Institute of Astronomy, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

One of the most important tasks in astroclimatic studies of possible locations for the Eurasian Submillimeter Telescopes is estimating statistics of precipitable water vapour, optical thickness and cloud cover. In this paper, the statistics of precipitable water vapour and total cloud cover within Northern part of Eurasia are studied using ERA-5 reanalysis. Optical thickness statistics at a wavelength of 3 mm were obtained using the Liebe model from the ERA-5 reanalysis for the region where the BTA is located. The most favorable astroclimatic zones of Eurasia include Tibet and the Eastern Pamirs, certain regions of the Sayan Mountains, Altai and Mts within Dagestan. Also we verified the ERA-5 reanalysis data using radiosonde data, GNSS measurement data and radiometric measurements for 2021.

Keywords: astroclimate, optical thickness, precipitable water vapour