

УДК 520.16, 551.55

Статистические оценки содержания водяного пара и оптической толщи атмосферы по данным реанализа и радиозондирования применительно к миллиметровым телескопам

А.Ю. Шиховцев[✉], П.Г. Коваadlo*

*Институт солнечно-земной физики СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а*

Поступила в редакцию 19.07.2023;
после доработки 09.10.2023;
принята к печати 10.10.2023

Для миллиметровых и субмиллиметровых телескопов одной из ключевых атмосферных характеристик, определяющих поглощение излучения, является осажденный водяной пар. Точное определение этой характеристики в пределах больших по площади регионов представляет собой одну из главных астроклиматических проблем. Настоящая работа посвящена уточнению оценок содержания осажденного водяного пара для разных пунктов на основе обработки данных реанализа ERA5 и радиозондирования. Апробирован ранее предложенный метод коррекции значений осажденного водяного пара, учитывающий характерный вертикальный масштаб водяного пара и относительный перепад высот узлов сетки. Кроме того впервые получено пространственное распределение оптической толщи атмосферы в ночное время для России и сопредельной территории на длине волны 3 мм, усредненное за декабрь – февраль 2013–2022 гг. Результаты работы являются основой для выбора астроплощадки под строительство нового крупного миллиметрового телескопа в рамках проекта евразийских субмиллиметровых и миллиметровых телескопов.

Ключевые слова: астроклимат, атмосфера, водяной пар, миллиметровое излучение, слои инверсий; astroclimate, atmosphere, water vapor, millimeter radiation, inversion layers.

Введение

При изучении характеристик состояния атмосферы за длительные временные интервалы существенное внимание уделяется температурному и влажностному режимам, повторяемости ясного неба, восстановлению вертикальных профилей скорости ветра и интенсивности мелкомасштабной турбулентности [1–5]. Возможности астрономических миллиметровых и субмиллиметровых наблюдений определяются во многом содержанием водяного пара в атмосфере.

Для планирования наблюдений и снижения затрат при реализации научных программ на субмиллиметровых и миллиметровых телескопах в целом необходимо оценивать содержание водяного пара, в том числе его распределение по высотам, и оптическую толщину атмосферы (τ) на разных длинах волн [6–8]. Изучение астроклимата в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах актуально

в связи с проблемой поиска подходящей астроплощадки для размещения нового крупного телескопа, запланированного в рамках проекта евразийских субмиллиметровых и миллиметровых телескопов наземного базирования [9].

Известно, что эквивалентная длина пути луча в атмосфере [10] изменяется под действием водяного пара и зависит от положения луча зрения телескопа. Эта изменчивость приводит к необходимости получения оценки так называемого осажденного водяного пара PWV (precipitable water vapor) в столбе атмосферы, а также интегральных характеристик влажности воздуха в выбранные наиболее оптимальные временные интервалы [11]. Оценка ослабления излучения по заданному лучу зрения телескопа в режиме квазиреального времени, а также статистических характеристик, описывающих состояние атмосферы за длительные временные интервалы, представляет собой важнейшую задачу, в том числе при наблюдении холодных звезд. В частности, в астрономических наблюдениях наземного базирования, связанных с поиском небольших экзопланет, вращающихся вокруг холодных звезд, возникает неблагоприятный атмосферный эффект из-за водяного

* Артем Юрьевич Шиховцев (artempochta2009@ambler.ru); Павел Гаврилович Коваadlo (kovadlo2006@rambler.ru).

пара в атмосфере. Сильное поглощение излучения холодных звезд, спектральное распределение энергии которых достигает максимума в ближнем инфракрасном диапазоне (1 и 5 мкм), препятствует обнаружению таких планет [12]. С целью мониторинга и краткосрочного прогнозирования благоприятных атмосферных ситуаций с осажденным водяным паром на уровне ниже 3,0–4,0 мм развиваются специальные методы оценки и разрабатываются средства измерений, чувствительные к низкому интегральному содержанию водяного пара [13].

Цель настоящей работы — получение статистических характеристик осажденного водяного пара и оптической толщи с помощью предложенного нами ранее метода, учитывающего рельеф.

Материалы и методы

В настоящей работе исследования выполнены в пределах макрорегиона, ограниченного 30 и 60° с.ш., 30 и 130° в.д. Для оценки статистик PWV за длительный временной интервал использованы данные реанализа атмосферы ERA5 с горизонтальным разрешением $0,25 \times 0,25^\circ$ [14]. Коррекция оценок PWV в столбе атмосферы (из реанализа) выполнялась с учетом данных радиозондирования атмосферы (на станции Минеральные Воды) и эпизодических наблюдений на Большом телескопе альт-азимутальном (БТА), где ранее методом узкополосной фотометрии были получены оценки содержания водяного пара [15].

Корректность использования данных реанализа ERA5 для оценки статистик PWV подтверждается результатами верификации [16, 17]. Реанализ позволяет оценивать как усредненные характеристики содержания водяного пара за относительно небольшие временные интервалы, так и некоторые референсные статистические значения PWV за достаточно длительные временные интервалы, соответствующие некоторому статистическому ансамблю атмосферных состояний.

Величину PWV, как правило, оценивают на основе ряда моделей атмосферы, полуэмпирических данных реанализа или с помощью различных средств измерений, включая радиозондирование атмосферы, спутниковые системы навигации, радиометры водяного пара [18–21]. Несмотря на широкий спектр доступного инструментария, оценки PWV в столбе атмосферы с высоким пространственным и временным разрешением, а также продолжительности временных интервалов с минимальными значениями удельной влажности воздуха в разное время суток остаются важными задачами [11, 22].

Ранее в работе [22] для уточненной оценки значений PWV (для горных вершин) мы разработали эмпирический метод. Суть его состоит в коррекции значений PWV путем учета средних перепадов высот узлов сетки. В частности, значение PWV на некоторой высоте определяется экспоненциальной функцией следующего вида:

$$PWV = PWV_0 \exp\left(\frac{-0,439\Delta z}{H_{\text{eff}}}\right), \quad (1)$$

где PWV_0 — приземное значение осажденного водяного пара; H_{eff} — вертикальный масштаб водяного пара; z — высота над подстилающей поверхностью. В методе учитывается зависимость значений PWV (которая определена на одной или нескольких ближайших станциях радиозондирования атмосферы) от разницы высот между опорным и соседними узлами Δz , а также H_{eff} [23]. За величину H_{eff} мы принимаем такую высоту атмосферного слоя, в пределах которого содержание водяного пара уменьшается пропорционально фактору $1/e$ относительно некоторого выбранного высотного уровня.

Подчеркнем, что величина Δz , соответствующая некоторому опорному узлу сетки (из реанализа), определяется в пределах локальной области вокруг этого опорного узла:

$$\Delta z = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M z_{\text{nod}}(0) - z_i(\Delta x, \Delta y), \quad (2)$$

где $z_{\text{nod}}(0)$ — высота опорного узла; $z_i(\Delta x, \Delta y)$ — высота смежного узла, смещенного по горизонтали на расстояния $\Delta x, \Delta y$; M — количество узлов вокруг опорного узла. Смещения Δx и Δy обычно составляют около 120 км, конкретная их величина уточняется путем минимизации дисперсии между модельными и измеренными значениями PWV в пунктах измерений:

$$\sum_{i,j,k=1}^{T,D,G} (PWV_{i,j,k}(\text{mes}) - w_{i,j} PWV_{i,j,k}(\text{ERA5}))^2 \approx 0, \quad (3)$$

где i, j и k — соответственно индексы широты, долготы и времени; w — искомый весовой коэффициент для каждого опорного узла; T — длина временного ряда; D и G определяют широту и долготу; суммирование производится как по времени, так и пространству.

Результаты и обсуждение

Результаты оценки вертикального масштаба водяного пара

Для уточнения значений PWV необходимо знать статистики H_{eff} и характерные особенности изменений статистики. Приведем пример расчета вертикального профиля послойно-интегрированных значений PWV для станции радиозондирования Минеральные Воды:

$$PWV(\Delta P) = \frac{1}{\rho g} \int_{p_i}^{p_j} q(P) dP, \quad (4)$$

где PWV определяется между двумя изобарическими уровнями P с индексами i, j ; ρ — плотность

воздуха; g — ускорение свободного падения; q — массовая доля водяного пара.

На рис. 1 показан пример вертикального профиля послойно-интегрированных значений PWV для ст. Минеральные Воды.

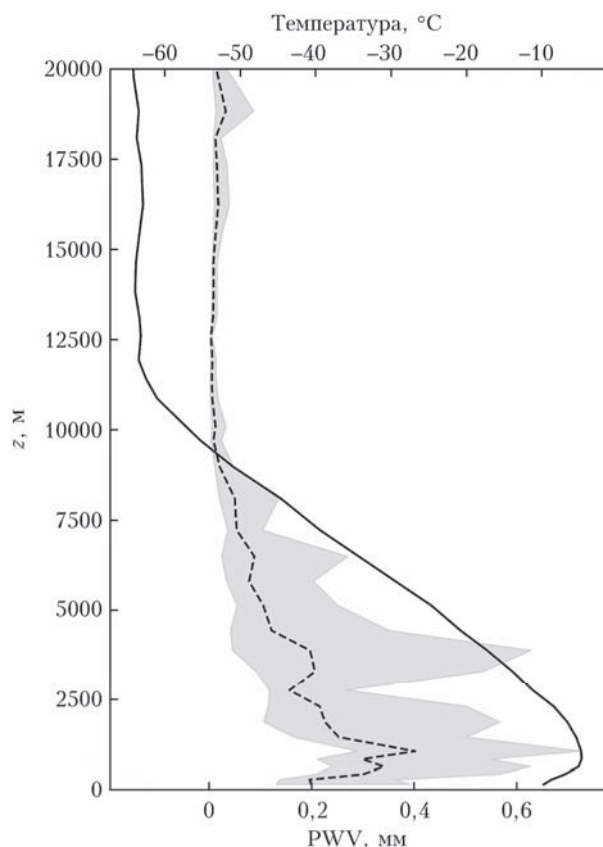


Рис. 1. Усредненный вертикальный профиль послойно-интегрированных значений PWV менее 7,0 мм в январе 2023 г. (пунктирная кривая) для станции радиозондирования Минеральные Воды. Заливкой показан характерный разброс значений PWV. Сплошная кривая — вертикальный профиль температуры воздуха

Анализ рис. 1 показывает, что в атмосфере формируются слои инверсий как температуры воздуха, так и послойно-интегрированных значений осажженного водяного пара. В январе для Минеральных Вод характерно инверсионное распределение температуры воздуха в нижнем атмосферном слое (от подстилающей поверхности до 700–900 м). С наличием инверсионных слоев мы связываем появление локальных максимумов содержания водяного пара на отдельных высотных уровнях под этими слоями (около 500 и 900 м). Интегрируя вертикальные профили, показанные на рис. 1, сверху вниз, мы получили кумулятивные функции и оценили H_{eff} .

Вертикальный профиль интегральных значений PWV аппроксимируется экспоненциальной зависимостью со средним значением $H_{\text{eff}} = 1600$ м (стандартное отклонение H_{eff} составляет ~ 200 м). Экспоненциальная зависимость хорошо описывает

($R^2 = 0,97$) восстановленный профиль только в нижних атмосферных слоях (до высоты около 6000 м), которые содержат 82,5% водяного пара относительно общего PWV.

Анализ профилей показывает, что H_{eff} изменяется в пространстве и времени и зависит от характера распределений скорости ветра, температуры и влажности воздуха с высотой. Амплитуда изменений на коротких временных интервалах велика, и по существу этот масштаб затруднительно использовать для оценки вариации PWV в режиме реального времени. Несмотря на это, при статистическом усреднении по ансамблю атмосферных состояний (при условии выполнимости гипотезы эргодичности усреднение по ансамблю эквивалентно усреднению по времени) диапазон изменений H_{eff} сужается.

Оценки H_{eff} , полученные по данным как радиозондирования, так и реанализа ERA5, находятся в хорошем согласии с результатами для астроплощадок с высокими астроклиматическими показателями, включая низкие значения приземной скорости ветра и интенсивности турбулентности [24, 25]. Например, H_{eff} в месте расположения астрономической обсерватории Сан-Педро-Мартин близок к 1800 м [24], а на плато Чакхантор — к 1537 ± 19 м [26].

Сравнение расчетных значений осажженного водяного пара, полученных различными методами

Исходные значения PWV, доступные из реанализа ERA5, завышены. Для того чтобы показать, насколько улучшаются оценки PWV с применением метода коррекции, учитывающего рельеф, мы сравнили временные изменения этой величины, полученные с использованием других методов. На рис. 2 показаны изменения PWV в месте расположения БТА с 2011 по 2021 г.

Анализ изменений PWV в разные годы показывает, что исходные значения этой величины в реанализе ERA5 завышают содержание водяного пара в столбе атмосферы над местом расположения БТА. В летний период наблюдается наибольшая разница между значениями PWV, определенными разными методами, — до 2–2,5 мм. Учет перепада высот и H_{eff} позволяет корректно воспроизводить вариации PWV. Среднее абсолютное отклонение между значениями, оцененными путем интегрирования и полученными с учетом референсных значений H_{eff} , для отдельных лет не превышает 1,0 мм, а для лета оно $\approx 0,5$ мм. В зимний период на фоне низкого содержания водяного пара в атмосфере значения PWV, полученные с применением обозначенных методов, близки.

Таким образом, метод, учитывающий разницу высот между опорным и соседними узлами сетки, а также H_{eff} , дает возможность корректно оценивать содержание водяного пара в разных узлах

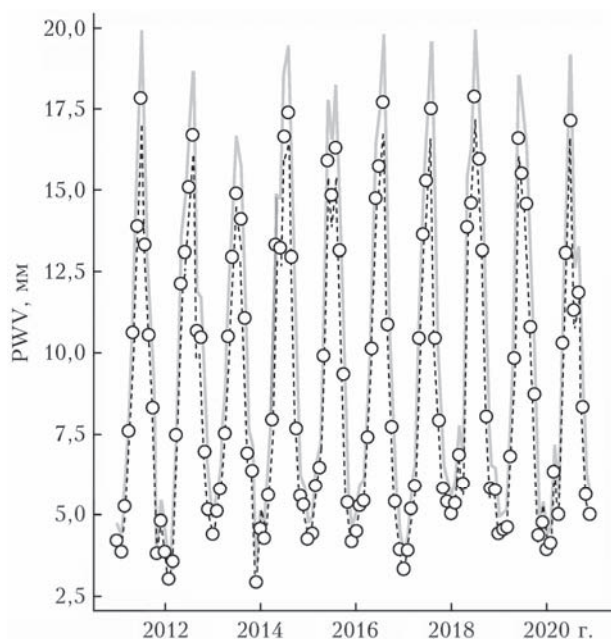


Рис. 2. Динамика PWV в месте расположения БТА: исходные значения (сплошная кривая); опорные значения, полученные путем интегрирования вертикальных профилей массовой доли водяного пара с учетом приземного атмосферного давления (пунктирная кривая) и рельефа (H_{eff}) (точки)

сетки на большой территории и выявлять пространственные области с пониженными значениями PWV.

Вариации осажженного водяного пара и оптической толщи атмосферы на БТА и пике Терскол за 2013–2022 гг.

С применением метода коррекции, учитывающего рельеф местности, мы оценили вариации осажженного водяного пара за 2013–2022 гг. на БТА и пике Терскол, демонстрирующие некоторые фоновые закономерности в пределах макрорегионов, перспективных для миллиметровых и субмиллиметровых наблюдений.

В таблице показаны медианы и средние значения PWV на БТА и пике Терскол, полученные за рассматриваемый период. Видно, что в переходные сезоны медианы PWV достаточно велики: они изменяются от 3,0 до 6,8 мм на пике Терскол и от 5,3 до 11,4 на БТА. Наибольших значений медианы достигают в теплый период года: в июне – августе они составляют 15,7 и 8,8 мм на БТА и пике Терскол соответственно. В декабре – феврале медианы PWV уменьшаются до 4,6 и 2,6 мм на БТА и пике Терскол соответственно.

В сравнении с оценками, полученными с применением метода узкополосной фотометрии для БТА [15, 27], данные реанализа ERA5 несколько завышают содержание водяного пара в атмосфере. Это связано как с его недостаточным пространственным разрешением, так и с калибровкой изме-

Медианы и средние значения PWV, мм, на БТА и пике Терскол (00:00 по местному времени)

Месяц	Пик Терскол		БТА	
	Медиана	Среднее	Медиана	Среднее
I	2,4	2,4	4,4	4,4
II	2,5	2,5	4,7	4,7
III	3,0	2,9	5,3	5,4
IV	3,8	3,8	7,1	7,0
V	5,9	6,1	10,9	10,8
VI	8,8	8,9	15,4	15,2
VII	8,9	8,8	15,9	15,7
VIII	8,8	8,4	15,7	15,9
IX	6,8	6,5	11,4	12
X	4,8	4,1	7,9	8,5
XI	3,1	2,8	5,3	5,7
XII	2,8	2,5	4,6	5,0

ренных характеристик с данными радиозондирования при низкой относительной влажности воздуха. Полученные ранее нами результаты [28] показали, что в месте расположения БТА «двухмодовый» характер внутригодовых изменений содержания водяного пара с локальным минимумом в июле выражен только в отдельные годы. При усреднении данных за 2013–2022 гг. минимум PWV в июле, ассоциируемый нами с нерегулярной крупномасштабной адвекцией сравнительно более сухих воздушных масс, практически незаметен: наблюдаются только отдельные ночи с пониженными значениями (до 7,0–8,0 мм и менее).

Расчет оптической толщи атмосферы

Данные о вариациях содержания водяного пара служат основой для моделирования изменений τ , которую мы рассматриваем в виде аддитивной величины:

$$\tau(\lambda, z, \text{PWV}, Q) = a(\lambda) \exp(-z/Z_0) + \beta(\lambda) \text{PWV} + \gamma(\lambda) Q, \quad (5)$$

где Z_0 – вертикальный масштаб кислорода, или характеристическая высота кислорода, в атмосфере (5,3 км); Q – водосодержание облаков, кг/м³. Первое и второе слагаемые обуславливает ослабление излучения за счет кислорода и водяного пара соответственно. Удельный коэффициент поглощения $\gamma(\lambda)$, как и коэффициенты $a(\lambda)$ и $\beta(\lambda)$, зависит от длины волны излучения λ , а его значения определяют поглощение излучения за счет водосодержания облаков. Используя модель Лиебе [29, 30] и оцененные по данным реанализа значения PWV, мы смоделировали изменения τ на $\lambda = 3$ мм в 00:00 по местному времени (рис. 3).

Анализ рис. 3 указывает на то, что ослабление излучения в атмосфере неоднородно по пространству. Астроплощадки с высокими астроклиматическими показателями локализуются в пределах областей с пониженными значениями τ . Отдельно выполнены оценки τ для БТА и пика Терскол (рис. 4, цв. вкладка).

Анализ рис. 4 показывает, что в зимний период среднее $\tau \approx 0,10$ и $0,08$ Нп на БТА и пике Терскол

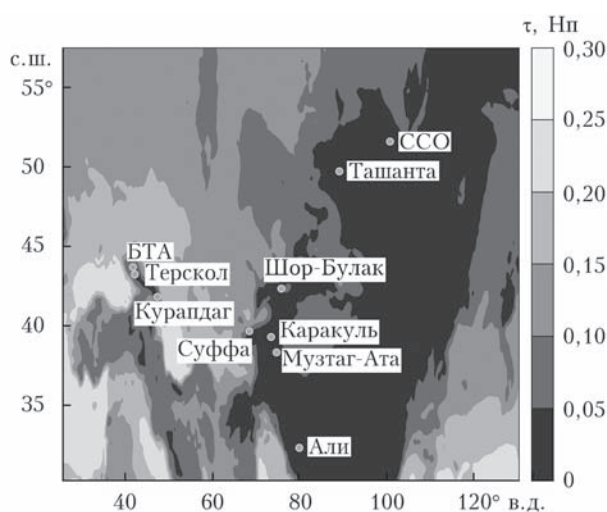


Рис. 3. Пространственное распределение оптической толщи атмосферы ($PWV < 5$ мм) и пункты, лучшие по астроклиматическим показателям, включая PWV за 2013–2022 гг.

соответственно. Наибольшее ослабление излучения наблюдается в летний период: на БТА и пике Терскол значения τ возрастают до 0,125 Нп и более при увеличении PWV . Место расположения БТА характеризуется умеренным ростом значений τ от зимы к лету: $\approx 0,011$ Нп/мес. Темп уменьшения τ от лета к зиме более высокий: $\approx -0,017$ Нп/мес. Количество часов наблюдений при $\tau < 0,13$ Нп составляет $\sim 47\%$ от всех наблюдений в году.

Атмосфера над пиком Терскол характеризуется большей сухостью, чем на БТА, а медианы PWV уменьшаются за счет более низких температур воздуха и, вероятно, воздействия нижележащих слоев термической инверсии, подавляющих вертикальный обмен водяным паром.

Количество наблюдательных часов при $\tau < 0,13$ Нп ($\lambda = 3$ мм) на пике Терскол существенно больше, чем в месте расположения БТА: $\approx 65\%$ в году. Вероятность повторяемости значений $\tau < 0,13$ Нп в теплый период оценивается нами в среднем в 18–20%, а в отдельные годы (2017, 2018, 2022 гг.) она уменьшается до 11–14%. Полученные нами оценки PWV и τ наиболее близки к характеристикам, измеренным с помощью МИАП-2, за исключением случаев с аномально высоким содержанием водяного пара в атмосфере [31].

Темп линейного роста τ от зимы к лету на пике Терскол составляет порядка 0,013 Нп/мес. От лета к зиме эта величина по модулю близка к зимнему темпу и равна $-0,014$ Нп/мес. Стоит отметить, что в сравнении с БТА над пиком Терскол с конца декабря по январь (начало февраля) формируется область устойчиво низких значений τ , время существования которой невелико: около 1 мес. Наличие этой области подтверждается более высоким зимне-весенним темпом роста τ от месяца к месяцу для пика Терскол.

Заключение

С помощью метода, учитывающего рельеф местности, на основе данных реанализа ERA5 выполнена статистически репрезентативная оценка содержания водяного пара в атмосфере на БТА и пике Терскол. Показано, что метод корректно воспроизводит вариации осаждаемого водяного пара. Среднее абсолютное отклонение между измеряемыми и расчетными значениями PWV не превышает 1 мм. В месте расположения БТА наименьшее значение PWV в течение года наблюдается в холодный период года, медиана для декабря – февраля составляет 4,6 мм. Над более высоким астропунктом, пиком Терскол, содержание водяного пара в зимний период уменьшается в 1,77 раза, медиана PWV равняется 2,6 мм. В сравнении с БТА над пиком Терскол с конца декабря по январь (начало февраля) формируется область устойчиво низких значений оптической толщи атмосферы, время существования которой невелико: около 1 мес. В период существования этой области можно ожидать появления сравнительно более глубоких локальных минимумов в содержании водяного пара.

С применением модели Лиебе и данных реанализа ERA5 получены статистически репрезентативные оценки оптической толщи атмосферы на длине волны 3 мм для места расположения БТА и пика Терскол. При значениях $PWV < 7,0$ мм оптическая толщина изменяется от 0,07 до $\sim 0,13$ Нп и от 0,09 до $\sim 0,13$ Нп для пика Терскол и БТА соответственно.

Впервые получено пространственное распределение оптической толщи атмосферы на длине волны 3 мм над Россией и сопредельной территорией для ночного времени, усредненное за декабрь – февраль 2013–2022 гг. Результаты анализа пространственного распределения этого параметра позволили определить, что наиболее перспективными для размещения миллиметрового телескопа являются горные вершины Дагестана, районы западнее и юго-западнее с. Ташанта, астроплощадки вблизи Саянской солнечной обсерватории (включая пик Худугайша) и пункты к северу и северо-западу от с. Шор-Булак.

Финансирование. Исследование выполнено при поддержке РНФ (№ 22-72-00049) (<https://rscf.ru/project/22-72-00049/>). Блок верификации вариаций влажности воздуха выполнен при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (П.Г. Ковадло).

Список литературы

1. Marukhno A.S., Bubnov G.M., Vdovin V.F., Voziakova O.V., Zemlyanukha P.M., Zinchenko I.I., Mingaliyev M.G., Shatsky N.I. Analysis of the millimeter-band astroclimate at the Caucasus mountain observatory // 7th All-Russian Microwave Conference (RMC) 2020. P. 184–188. DOI: 10.26119/978-5-6045062-0-2_2020_184.
2. Balega Y., Bubnov G., Glyavin M., Gumbina A., Danilevsky D., Denisov G., Khudchenko A., Lesnov I.,

- Marukhno A., Mineev K., Samsonov S., Shanin G., Vdovin V. Atmospheric propagation studies and development of new instrumentation for astronomy, radar, and telecommunication applications in the subterahertz frequency range // *Appl. Sci.* 2022. V. 12. P. 5670. DOI: 10.3390/app12115670.
3. Bubnov G.M., Abashin E.B., Balega Y.Y., Bolshakov O.S., Dryagin S.Y., 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 Trans. Terahertz Sci. Technol.* 2015. V. 5, N 1. P. 64–72. DOI: 10.1109/THZ.2014.2380473.
 4. Бубнов Г.М., Григорьев В.Ф., Зинченко И.И., Землянуха П.М., Ильин Г.Н., Кабанов Д.М., Носов В.И., Вдовин В.Ф. Согласованное определение интегральной влажности и эффективной оптической толщины атмосферы в миллиметровом диапазоне длин волн с использованием широкополосных радиометров // *Изв. вузов. Радиофиз.* 2019. Т. 62, № 12. С. 920–931.
 5. Shikhovtsev A.Yu., Kovadlo P.G., Khaikin V.B., Nosov V.V., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V., Kiselev A.V., Shikhovtsev M.Yu. Atmospheric conditions within Big Telescope Alt-azimuthal region and possibilities of astronomical observations // *Remote Sens.* 2022. V. 14. P. 1833. DOI: 10.3390/rs14081833.
 6. Bolbasova L., Shikhovtsev A., Ermakov S.A. Statistics of precipitable water vapour above the sites of the 6-m Big Telescope Alt-azimuthal and new 3-m Large Solar Telescope using ERA5 data // *MNRAS.* 2023. V. 520, N 3. P. 4336–4344. DOI: 10.1093/mnras/stad300.
 7. Bolbasova L.A. Atmospheric stability above 6-m Big Telescope Alt-azimuthal site // *Proc. SPIE.* 2022. V. 12341. P. 123410W. DOI: 10.1117/12.2644895.
 8. Bolbasova L.A., Kopylov E.A. Long-term trends of astroclimatic parameters above the Terskol observatory // *Atmosphere.* 2023. V. 14. P. 1264.
 9. Khaikin V., Lebedev M., Shmagin V., Zinchenko I., Vdovin V., Bubnov G., Edelman V., Yakopov G., Shikhovtsev A., Marchiori G., Tordi M., Duan R., Li D. On the Eurasian Submillimeter Telescopes project (ESMT) // 7th All-Russian Microwave Conference (RMC) 2020. P. 47–51. DOI: 10.1109/RMC50626.2020.9312233.
 10. Чукин В.В. Исследование атмосферы методом электромагнитного просвечивания. СПб.: Изд-во РГМУ, 2004. 107 с.
 11. Marin J.C., Ortiz F., Cure M. Forecasting the precipitable water vapour along lines of sight in the Chajnantor region from a WRF simulation // *MNRAS.* 2023. V. 522. P. 457–465. DOI: 10.1093/mnras/stad961.
 12. Valdes E.A.M., Morris B.M., Demory B.-O. Monitoring precipitable water vapour in near real-time to correct near-infrared observations using satellite remote sensing // *Astron. Astrophys.* 2021. V. 649. P. A132. DOI: 10.1051/0004-6361/202039629.
 13. Baker A.D., Blake C.H., Sliksi D.-H. Monitoring telluric absorption with CAMAL // *PASP.* 2017. V. 129. P. 085002. DOI: 10.1088/1538-3873/aa77ab.
 14. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horanyi A., Munoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., De Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R.J., Holm E., Janiskova M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoi G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thepaut J.-N. The ERA5 global reanalysis // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 2020. V. 146, N 730. P. 1999–2049.
 15. Bergner I.K., Krat A.V., Pogodin M.A., Morozova S.M., Panchuk V.K., Chuntanov G.A. Study of the moisture content and transmittance of the daytime atmosphere in the region at the site of the Large Telescope // *Astrofizicheskie Issledovaniia.* 1978. V. 10. P. 52–60.
 16. Шиховцев А.Ю., Хайкин В.Б., Миронов А.П., Ковадло П.Г. Статистический анализ содержания водяного пара на Северном Кавказе и в Крыму // *Оптика атмосф. и океана.* 2022. Т. 35, № 1. С. 67–73; Shikhovtsev A.Yu., Khaikin V.B., Mironov A.P., Kovadlo P.G. Statistical analysis of the water vapor content in North Caucasus and Crimea // *Atmos. Ocean. Opt.* 2022. V. 35, N 2. P. 168–175.
 17. Миронов А.П., Хайкин В.Б., Макоев Г.А. Валидация ГНСС метода измерений осажженного водяного пара с помощью радиозондирования // *Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: Материалы XXIX Международ. симп. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2023. С. A388–A391.*
 18. Bubnov G., Vdovin V., Khaikin V., Tremblin P., Baron P. Analysis of variations in factors of specific absorption of sub-terahertz waves in the Earth's atmosphere // 7th All-Russian Microwave Conference (RMC) 2020. P. 229–232. DOI: 10.1109/RMC50626.2020.9312314.
 19. Арсаев И.Е., Быков В.Ю., Ильин Г.Н., Юрчук Э.Ф. Радиометр водяного пара – средство измерений радиояростной температуры атмосферы // *Измерительная техника.* 2017. Т. 60, № 5. С. 60–65.
 20. Швецов А.А., Беликович М.В., Красильников А.А., Куликов М.Ю., Кукин Л.М., Рыскин В.Г., Большаков О.С., Леснов И.В., Щитов А.М., Фейгин А.М., Хайкин В.Б., Петров И.В. Спектрорадиометр 5-миллиметрового диапазона для исследования атмосферы и подстилающей поверхности // *Приборы и техника эксперимента.* 2020. № 6. С. 100–104. DOI: 10.31857/S0032816220050377.
 21. Wang X., Chen F., Ke F., Xu C. An empirical grid model for precipitable water vapor // *Remote Sens.* 2022. V. 14. P. 6174. DOI: 10.3390/rs14236174.
 22. Shikhovtsev A.Yu., 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. P. 6221. DOI: 10.3390/rs14246221.
 23. Елисеев А.В., Тимажев А.В., Хименес П.Л. Вертикальный масштаб для профилей водяного пара и соединений серы в нижней тропосфере // *Оптика атмосф. и океана.* 2022. Т. 35, № 7. С. 572–580; Eliseev A.V., Timazhev A.V., Jimenez P.L. Scale heights of water vapor and sulfur compounds in the lower troposphere // *Atmos. Ocean. Opt.* 2022. V. 35, N 6. P. 782–792.
 24. Otarola A., Hiriart D., Perez-Leon J.E. Statistical characterization of precipitable water vapor at San Pedro Martir Sierra in Baja California // *Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica.* 2009. V. 45. P. 161–169.
 25. Otarola A.C., Querel R., Kerber F. Precipitable Water Vapor: Considerations on the water vapor scale height, dry bias of the radiosonde humidity sensors, and spatial and temporal variability of the humidity field // *arXiv:1103.3025.* 2011. DOI: 10.48550/arXiv.1103.3025.
 26. Cortes F., Cortes K., Reeves R., Bustos R., Radford S. Twenty years of precipitable water vapor measurements in the Chajnantor area // *Astron. Astrophys.* 2020. V. 640. P. A126. DOI: 10.1051/0004-6361/202037784.
 27. Panchuk V.E., Afanas'ev V.L. Astroclimate of Northern Caucasus – myths and reality // *Astrophys. Bull.* 2011. V. 66, N 2. P. 233–254.
 28. Шиховцев А.Ю., Хайкин В.Б., Ковадло П.Г., Барон П. Оптическая толща атмосферы над пиком Терскол // *Оптика атмосф. и океана.* 2022. Т. 35, № 11. С. 956–962; Shikhovtsev A.Yu., Khaikin V.B., Kovadlo P.G.,

- Baron P.* Optical thickness of the atmosphere above the Terskol Peak // *Atmos. Ocean. Opt.* 2023. V. 36, N 1. P. 78–85. DOI: 10.1134/S1024856023020148.
29. *Baron P., Mendrok J., Yasuko K., Satoshi O., Takamasa S., Kazutoshi S., Kosai S., Hideo S., Urban J.* AMATERASU: Model for atmospheric TeraHertz radiation analysis and simulation // *J. Nat. Inst. Inform. Commun. Technol.* 2008. V. 55, N 1. P. 109–121.
30. *Liebe H.J.* MPM — an atmospheric millimeter-wave propagation mode // *Int. J. Infrared Millim. Waves.* 1989. V. 10, N 6. P. 631–650.
31. *Бубнов Г.М.* Исследования поглощения волн миллиметрового диапазона в атмосфере земли и материалах криогенных рефлекторов: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Нижний Новгород: Ин-т прикладной физики РАН, 2022. 133 с.

A.Yu. Shikhovtsev, P.G. Kovadlo. Statistical estimations of the vapor content and optical thickness of the atmosphere using reanalysis and radiosounding data as applied to millimeter telescopes.

Possibilities of astronomical millimeter and submillimeter observations strongly depend on the precipitable water vapor (PWV), which determines the radiation absorption. The precise determination of PWV within large regions is one of key astroclimate problems. In this work, we refine estimates of PWV content for different sites based on processing ERA5 reanalysis and radiosounding data and test the previously proposed technique for correcting PWV values taking into account the characteristic water vapor vertical scale and relative altitude difference of grid nodes. In addition, the spatial distribution of the nighttime atmospheric optical thickness at a wavelength of 3 mm averaged over December – February 2013–2022 was derived for the first time for Russia and the adjacent territory. Our results can serve the basis for selecting an astronomic site for a new large millimeter telescope within the Eurasian Sub-Millimeter and Millimeter Telescope Project.

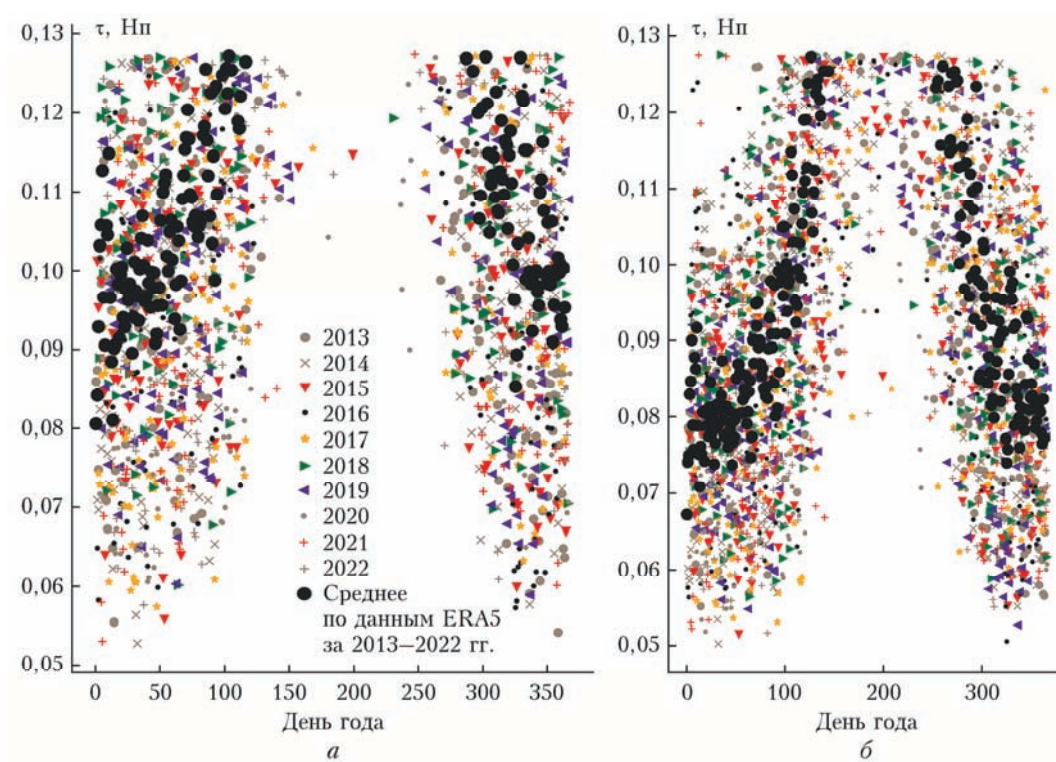


Рис. 4. Динамика оптической толщи атмосферы ($PWV < 7$ мм) в месте расположения БТА (а) и на пике Терскол (б)