

АДАПТИВНАЯ И ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОПТИКА

УДК 520.16, 551.511.6

Оптическая толща атмосферы над пиком Терскол

А.Ю. Шиховцев^{✉ 1}, В.Б. Хайкин², П.Г. Ковадло¹, Р. Барон^{3*}

¹Институт солнечно-земной физики СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а

²Специальная астрофизическая обсерватория РАН
369167, пос. Нижний Архыз, Буковское кладбище, 4

³National Institute of Information and Communications Technology, NICT
184-8795, 4-2-1, Nukui-Kitamachi, Koganei, Tokyo, Japan

Поступила в редакцию 17.08.2021 г.;
после доработки 7.09.2022 г.;
принята к печати 15.09.2022 г.

Приводятся оценки оптической толщаты атмосферы над пиком Терскол. Оптическая толща представлена в виде величины, зависящей от коэффициентов поглощения, определяемых в основном водяным паром и кислородом. Расчеты выполнены при ясном небе без учета аэрозольных компонент. Рассмотрены вариации водяного пара как основного фактора, определяющего ослабление излучения в атмосфере в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах спектра. Оценена средняя оптическая толща атмосферы с применением моделей MPM Liebe и MOLIERE (в конфигурациях JPL и HITRAN) для частот 100, 150 и 225 ГГц.

Ключевые слова: телескоп, астроклимат, осаждаемый водяной пар, оптическая толща, реанализ ERA-5; telescope, astroclimate, precipitable water vapor, optical thickness, ERA-5 database.

Введение

Водяной пар является одним из основных атмосферных газов, определяющих климатические изменения и физические процессы в атмосфере. Он играет ключевую роль в радиационном балансе Земли, испарении, влагопереносе и конденсации [1]. На основе данных о содержании и вариациях водяного пара в атмосфере разрабатывают подходы к прогнозированию осадков и засух [2, 3], изучают физические связи между водяным паром и температурой поверхности океана, например в периоды проявления Эль-Ниньо [4].

Оптическая толща определяется с учетом содержания водяного пара в столбе атмосферы от земной поверхности до заданной высоты. В оценках этой характеристики часто используют величину осаждаемого водяного пара PWV (Precipitable water vapor). Интересно отметить результаты исследований раздельного и комбинированного влияния осаждаемого водяного пара и аэрозолей на солнечное излучение в глобальном масштабе [5]. Авторы работы [5] использовали данные CERES (SYN1deg Ed4A), представляющие собой совокупность результатов спутниковых наблюдений (MODIS и геостационарные спутники). Данные об оптической толще получены для частоты 600 ТГц (0,5 мкм). Делается

вывод о том, что комбинированное воздействие осаждаемого водяного пара и аэрозолей на излучение слабее, чем сумма индивидуальных воздействий. Этот эффект наиболее выражен в районах с высокими концентрациями аэрозолей и водяного пара. В среднем за год под действием атмосферного аэрозоля излучение ослабляется до 18%; среднее значение процента ослабления в глобальном масштабе относительно невелико и составляет 2,3%. Для Саянской солнечной обсерватории излучение ослабляется за счет аэрозоля на 0,5–2%, для Специальной астрофизической обсерватории — на 6–7%.

Ослабление излучения из-за присутствия водяного пара оценивается выше, в среднем ~12,1%. В среднегодовом выражении эффект от водяного пара для Саянской солнечной обсерватории составляет 9–11%, для Специальной астрофизической обсерватории — 10–16%. Комбинированное воздействие осаждаемого водяного пара и аэрозолей на излучение несколько меньше оценок, полученных раздельно, и составляет 9–15% для Саянской солнечной обсерватории, 16–20% для Специальной астрофизической обсерватории. В длинноволновой области спектра ослабление может быть выше за счет наличия линии поглощения водяного пара для частоты 416 ТГц (0,72 мкм).

Ситуация изменяется в худшую сторону в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн, и поэтому оптическая толща атмосферы является основной величиной, рассматриваемой при выборе места, подходящего для строительства мил-

* Артем Юрьевич Шиховцев (artempochta2009@rambler.ru); Владимир Борисович Хайкин (vkhstu@mail.ru); Павел Гаврилович Ковадло (kovadlo2006@rambler.ru); Philippe Baron (baron@nict.go.jp).

лиметровых и субмиллиметровых телескопов наземного базирования [6–8].

Для определения содержания водяного пара в столбе атмосферы используют данные радиозондирования атмосферы, измерений радиометров и спектрометрических станций глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [9–11]. При оценке осаждаемого водяного пара также применяются спутниковые системы измерений, в частности MODIS/Aqua-Terra, SCIAMACHY и MERIS ENVISAT, GOME/ERS-2, GOME-2/Metop [12], радиометрические системы длинноволнового инфракрасного или микроволнового диапазонов спектра, например ATOVS (<http://wdc.dlr.de/sensors/ovs>), включающую датчик инфракрасного излучения высокого разрешения и усовершенствованный блок микроволнового зондирования, на спутниках серии NOAA и Aqua. Наиболее широко используемый спектрометр MODIS работает в диапазоне длин волн от 0,4 до 14,4 мкм и размещен на спутниках Aqua и Terra [13].

Статистики осаждаемого водяного пара могут быть оценены и на основе ассимилированных данных реанализа атмосферы, включая базу данных пятого поколения ERA-5 (European center for medium-range weather forecast ReAnalysis). Сравнение данных реанализов атмосферы с данными измерений показывает, что средние квадратические отклонения в значениях осаждаемого водяного пара не превышают 1–2 мм [14–16]. Так, например, в работе [1] при сравнении данных наблюдений на 246 ГНСС-станциях с данными ERA-5 среднее квадратическое отклонение, усредненное по всем станциям, составило 1,7 мм. Сравнение значений ERA-5 с данными 78 станций радиозондирования показало, что среднее квадратическое отклонение равно 1,9 мм. Средний коэффициент корреляции оказался высоким (0,96).

Выполненное нами [17] сравнение часовых значений осаждаемого водяного пара по данным реанализа ERA-5 и измерений на ГНСС-станциях показало, что связь между внутрисуточными вариациями осаждаемого водяного пара в обоих случаях оказалась достаточно тесной над пиком Терскол. Средний коэффициент корреляции между этими величинами был равен 0,71 (уровень значимости 5%). В условиях ясной и малооблачной погоды коэффициент корреляции возрос. Наибольший коэффициент корреляции наблюдался над горным Дагестаном, характеризующимся более высокой повторяемостью ясной и малооблачной погоды. В частности, максимальный коэффициент корреляции (0,94) наблюдался на ст. Хунзах.

Настоящая статья продолжает начатый ранее цикл работ по изучению астроклимата в возможных местах размещения евразийских субмиллиметровых телескопов (ESMT) [6–8, 17, 18] с использованием данных реанализа. Цель работы – изучить короткопериодные вариации осаждаемого водяного пара на основе данных реанализа ERA-5 и дать первичную оценку оптической толщи атмосферы для отдельных мест (с точки зрения медианных значений

PWV [17] и высокой повторяемости ясного неба [18]) в регионе расположения Специальной астрофизической обсерватории и телескопа БТА на склоне горы Пастухова. Район горы Пастухова и ее вершина, к сожалению, не обладают высокими астроклиматическими показателями, необходимыми для размещения ESMT [17]. Как показано в [17, 18], более высокие астроклиматические показатели на Северном Кавказе характерны для Агульского района Дагестана. Оценки оптической толщи в этом районе в настоящее время ведутся по данным реанализа и с использованием ГНСС-станции, установленной в с. Чираг (2200 м) на склоне горы Курапдаг (3724 м). Указанный район, по нашему мнению, является астроклиматически перспективным.

Метод оценки оптической толщи атмосферы

Для определения статистических характеристик оптической толщи атмосферы мы использовали данные современного реанализа ERA-5 [19, 20]. Они позволяют определять значения осаждаемого водяного пара PWV по хорошо известной формуле

$$PWV = K_{ref} PWV_0 \exp\left(\frac{0,439\delta z}{1000}\right), \quad (1)$$

где PWV_0 – исходное содержание водяного пара в столбе атмосферы в реанализе ERA-5; δz – высота вершины горы относительно средней высоты узлов сетки на рассматриваемой площади; K_{ref} – коэффициент пропорциональности, выбираемый на основе сравнения данных реанализа ERA-5 с данными референсных измерений. Так, для пика Терскол принималось, что среднее квадратическое отклонение значений PWV по данным ERA-5 от значений PWV, полученных по данным наблюдений на ГНСС-станциях, должно быть минимально. Годовой ход часовых значений осаждаемого водяного пара по данным реанализа ERA-5 показан на рис. 1.

Сравнение данных реанализа ERA-5 с наблюдениями на ГНСС-станции показало оптимальное значение $K_{ref} = 0,789$ для пика Терскол [17]. Анализ рис. 1 показывает, что содержание водяного пара в столбе атмосферы летом существенно возрастает по сравнению с зимой. Однако на пике Терскол даже летом наблюдаются благоприятные атмосферные условия: значения PWV уменьшаются до 2–3 мм.

Оптическая толща атмосферы представлена в виде аддитивной величины:

$$\tau(f, h, PWV, Q) = \alpha(f) \exp(-h / h_0) + \beta(f) PWV + \beta(f) Q, \quad (2)$$

где h – высота над уровнем моря, км; h_0 – удельная опора поглощения в кислороде, равная 5,3 км; Q – водосодержание облаков, кг/м². Удельные коэффициенты поглощения сухого воздуха α , водяного пара β и облачности γ зависят от частоты f .

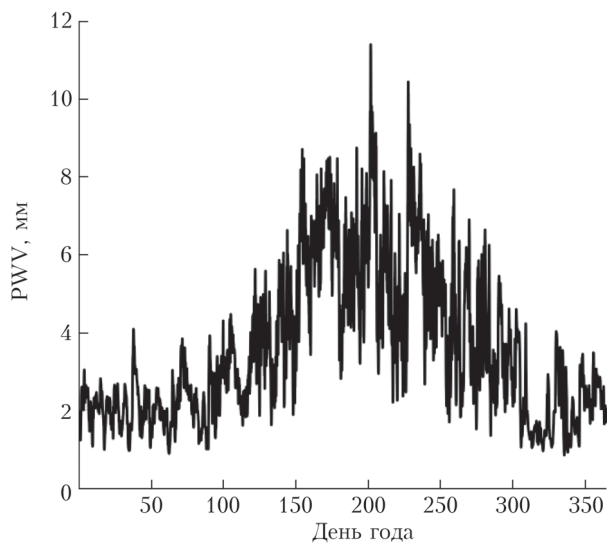


Рис. 1. Годовой ход осажденного водяного пара по данным реанализа ERA-5 за 2019 г.

Как показано в работе [21], значения удельных коэффициентов снижаются с высотой, зависят от сезона, метеорологических (климатических) особенностей места и времени суток. Здесь становится важным знание усредненных значений удельных коэффициентов для конкретного места, а также отдельно ночью и днем. Мы рассматриваем ясные и малооблачные условия, практически подходящие для коротковолновых миллиметровых и субмиллиметровых наблюдений, считая, что $\gamma(f) = 0$. Кроме значительного поглощения в облаках и других гидрометеорах, собственное радиоизлучение облаков дает сильные помехи, на порядки превышающие чувствительность радионастроимых приемников, что катастрофически снижает чувствительность радиотелескопа по потоку и яркостной температуре.

Коэффициенты удельного поглощения излучения влажного воздуха рассчитывались по средним профилям температуры и влажности воздуха для зимы и лета с применением модели MOLIERE (Microwave Observation Line Estimation and Retrieval). Модель MOLIERE включает в себя модель переноса миллиметрового и субмиллиметрового излучения в условиях ясного неба и разработана для измерений различными приемными устройствами [22]. Поскольку водяной пар связан с поглощением излучения в линиях, то коэффициенты удельного поглощения оценивались в нескольких конфигурациях модели. В первых двух конфигурациях мы использовали базы данных JPL и HITRAN для оценки коэффициентов поглощения сухого воздуха $\alpha(f)$ и водяного пара $\beta(f)$. Для сравнения полученных оптических толщин мы также использовали известную атмосферную модель распространения миллиметровых волн MPM Liebe [23, 24], опирающуюся только на метеорологические характеристики: атмосферное давление, температуру и влажность воздуха. Затухание излучения в диапазоне от 1 до 1000 ГГц рассчитывалось путем суммирования индивидуальных линий поглощения кислорода

и водяного пара, а также нерезонансного спектра поглощения кислорода, азота и водяного пара [25]. На рис. 2, *a* и *б* показаны спектры затухания излучения, рассчитанные моделью MPM Liebe на уровне 680 гПа (в нижней части пограничного слоя атмосферы на высоте около 100 м) и на уровне 400 гПа (около 4,1 км) соответственно.

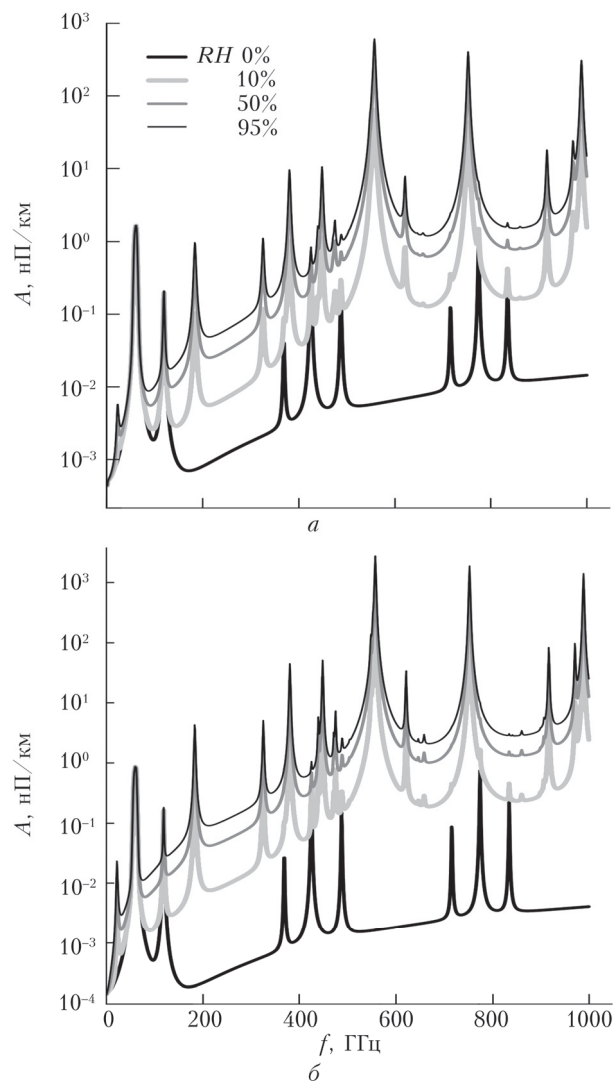


Рис. 2. Спектры затухания радиоволн, рассчитанные моделью MPM Liebe (в pyMPM-модуле Python): *a* – $T_{\text{возд}} = 17^\circ\text{C}$, $P_{\text{атм}} = 680$ гПа; *б* – $T_{\text{возд}} = 2^\circ\text{C}$, $P_{\text{атм}} = 400$ гПа (на высоте $\sim 4,1$ км над пиком Терскол)

Как видно из рис. 2, затухание в начале субмиллиметрового диапазона на высоте около 4,1 км на порядок меньше, чем в приземном слое, за счет снижения температуры и содержания водяного пара в воздухе. Спектры, приведенные на рис. 2, демонстрируют зависимость амплитуды затухания волн в диапазоне от 0 до 1000 ГГц от относительной влажности воздуха *RH*. С ростом *RH* амплитуда затухания существенно возрастает. В этой связи наибольшая амплитуда затухания соответствует нижним атмосферным слоям, в которых влажность воздуха максимальна.

Таблица 2

Расчетные коэффициенты $\alpha(f)$ и $\beta(f)$ с применением моделей MOLIERE (базы данных JPL, HITRAN) и MPM Liebe для излучения 150 ГГц

h , км	α , нП	β , нП/мм	α , нП	β , нП/мм
	Лето		Зима	
JPL				
0	0,08	0,03	0,08	0,02
1	0,08	0,03	0,07	0,02
2	0,08	0,02	0,07	0,02
3	0,07	0,02	0,07	0,02
4	0,07	0,02	0,07	0,02
HITRAN				
0	0,08	0,03	0,07	0,03
1	0,08	0,03	0,07	0,02
2	0,08	0,03	0,07	0,02
3	0,07	0,02	0,07	0,02
4	0,07	0,02	0,07	0,02
MPM Liebe				
0	0,02	0,03	0,02	0,03
1	0,03	0,03	0,03	0,03
2	0,03	0,03	0,03	0,03
3	0,04	0,03	0,04	0,02
4	0,04	0,03	0,04	0,02

Таблица 3

Расчетные коэффициенты $\alpha(f)$ и $\beta(f)$ с применением моделей MOLIERE (базы данных JPL, HITRAN) и MPM Liebe для излучения 225 ГГц

h , км	α , нП	β , нП/мм	α , нП	β , нП/мм
	Лето		Зима	
JPL				
0	0,07	0,06	0,07	0,06
1	0,07	0,06	0,06	0,05
2	0,07	0,05	0,06	0,05
3	0,06	0,05	0,06	0,04
4	0,06	0,05	0,06	0,04
HITRAN				
0	0,07	0,07	0,06	0,06
1	0,07	0,06	0,06	0,05
2	0,07	0,06	0,06	0,05
3	0,06	0,05	0,06	0,05
4	0,06	0,05	0,06	0,04
MPM Liebe				
0	0,02	0,08	0,02	0,06
1	0,03	0,07	0,03	0,06
2	0,03	0,07	0,03	0,06
3	0,03	0,07	0,03	0,06
4	0,03	0,07	0,03	0,05

Таблица 1

Расчетные коэффициенты $\alpha(f)$ и $\beta(f)$ с применением моделей MOLIERE (базы данных JPL, HITRAN) и MPM Liebe для излучения 100 ГГц

h , км	α , нП	β , нП/мм	α , нП	β , нП/мм
	Лето		Зима	
JPL				
0	0,14	0,01	0,13	0,01
1	0,13	0,01	0,13	0,01
2	0,13	0,01	0,12	0,01
3	0,12	0,01	0,12	0,01
4	0,11	0,01	0,11	0,01
HITRAN				
0	0,14	0,01	0,12	0,01
1	0,13	0,01	0,12	0,01
2	0,13	0,01	0,12	0,01
3	0,12	0,01	0,12	0,01
4	0,12	0,01	0,11	0,01
MPM Liebe				
0	0,05	0,01	0,05	0,01
1	0,06	0,01	0,06	0,01
2	0,07	0,01	0,06	0,01
3	0,07	0,01	0,07	0,01
4	0,01	0,01	0,07	0,01

Отметим, что парциальное давление водяного пара и абсолютная влажность быстро падают с высотой [26, 27]: в нижнем 5-километровом слое атмосферы содержится ~90% водяного пара. Уменьшение влажности воздуха с высотой особенно выражено в ясных и малооблачных условиях, в которых абсолютная влажность быстро уменьшается в атмосферном слое до 3 км, а выше уже мало меняется. На рис. 2 также приведены спектры затухания излучения при нулевой относительной влажности, которая соответствует атмосферному слою с парциальным давлением водяного пара $e = 0$ гПа. Суммируя амплитуды затухания для различных слоев атмосферы, можно оценить коэффициенты $\alpha(f)$ и $\beta(f)$ для конкретного места. С понижением температуры воздуха поглощение A также уменьшается за счет конденсации водяного пара при достижении точки росы.

Расчетные значения коэффициентов оптической толщи $\alpha(f)$ и $\beta(f)$

Для оценки оптической толщи атмосферы с применением моделей MOLIERE и MPM Liebe были рассчитаны коэффициенты $\alpha(f)$ и $\beta(f)$ для разных высот в атмосфере (табл. 1–3). Коэффициенты рассчитаны с учетом того, что осаждаемый водяной пар пропорционален интегралу удельной влажности воздуха по высоте (атмосферному давлению).

Используемые модели дают разные оценки коэффициентов поглощения. В настоящем исследовании мы рассматриваем случаи с PWV < 5 мм как наиболее благоприятные для коротковолновых миллиметровых и субмиллиметровых наблюдений.

Для 100 ГГц вариации расчетных значений оптической толщи, когда PWV < 5 мм, показаны на рис. 3. Количество наблюдательного времени

в году при данном условии в месте расположения пика Терскол, по нашим оценкам, равно 59%.

Средние значения оптической толщи составляют 0,09 (в конфигурациях JPL и HITRAN) и 0,07 (MPM Liebe); среднее квадратическое отклонение близко к 0,01. В распределении вероятности повторяемости значений 75-й процентиль соответствует 0,09 как для конфигурации JPL, так и для конфигурации HITRAN. Для модели MPM Liebe 75-й процентиль принимает меньшее значение – 0,08.

Вариации оптической толщи на частоте 150 ГГц при PWV < 5 мм показаны на рис. 4. Расчеты по модели MOLIERE в конфигурациях JPL и HITRAN указывают на то, что средние оптические толщины для 150 ГГц близки друг к другу и составляют около 0,10. Модель MPM Liebe

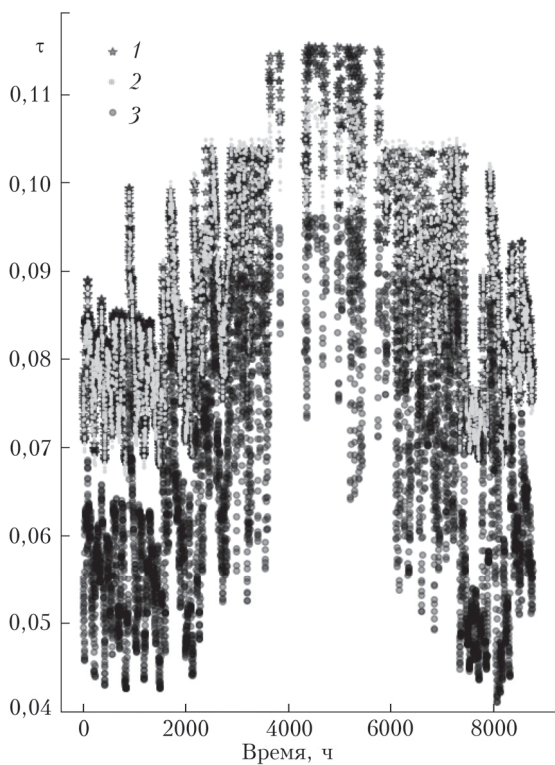


Рис. 3. Вариации оптической толщи атмосферы для 100 ГГц над пиком Терскол в наблюдательные часы (PWV < 5 мм): 1 – база данных JPL; 2 – база данных HITRAN; 3 – модель MPM Liebe

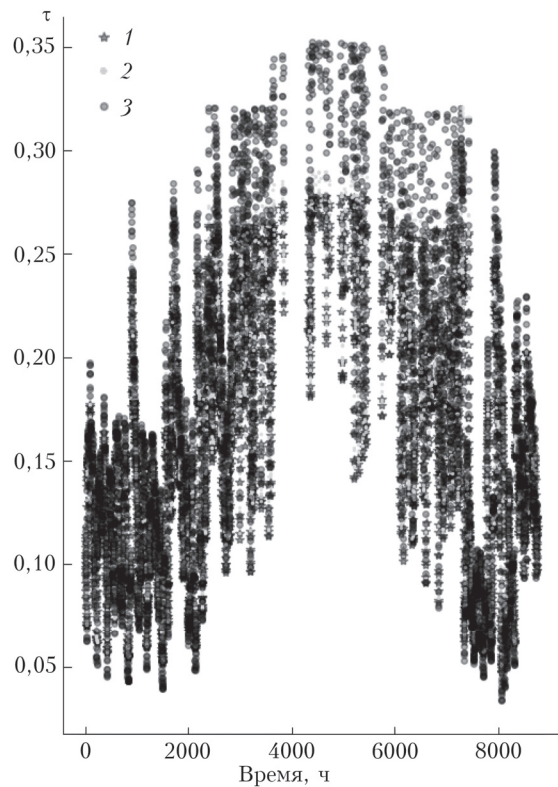


Рис. 5. То же, что и на рис. 3, для 225 ГГц

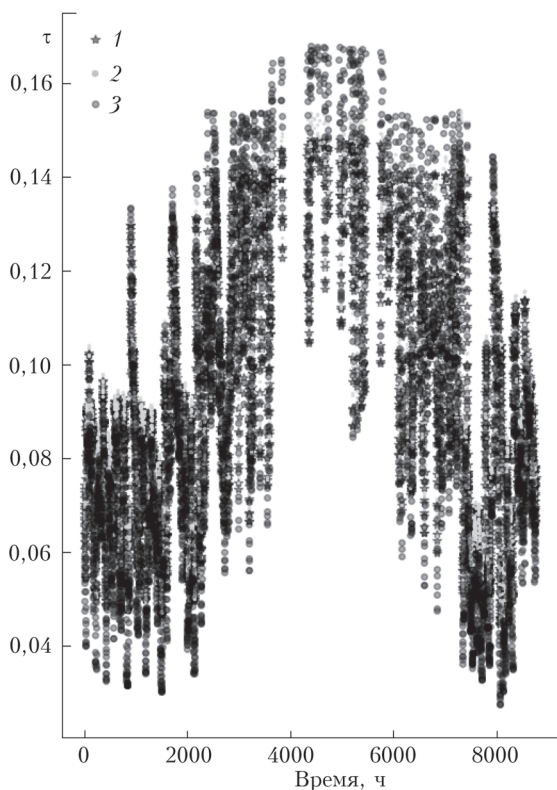


Рис. 4. То же, что и на рис. 3, для 150 ГГц

несколько занижает среднюю оптическую толщину, ее значение составляет 0,09; 75-й процентиль соответствует 0,11 (в конфигурации JPL), 0,12 (HITRAN) и 0,12 (MPM Liebe).

Средние значения оптической толщины для 225 ГГц (рис. 5) составили 0,16 (JPL и HITRAN) и 0,18 (MPM Liebe) для пика Терскол (PWV < 5 мм); 75-й процентиль соответствует 0,20 (JPL и HITRAN) и несколько выше для модели MPM Liebe – 0,23. Среднее квадратическое отклонение значений оптической толщины также оказалось выше для модели MPM Liebe (0,07) в сравнении с JPL (0,05) и HITRAN (0,06). В сравнении с частотой 150 ГГц на частоте 225 ГГц средние квадратические отклонения возросли до 0,02 (JPL), 0,03 (HITRAN) и 0,03 (MPM Liebe).

На точность полученных оценок оптической толщины влияет ограниченность пространственного разрешения исходных данных. В моделях луч зрения разбивается на отдельные небольшие участки, в пределах каждого из которых температура, влажность воздуха и коэффициенты поглощения рассматриваются как постоянные величины. Эти небольшие участки ассоциируются с атмосферными слоями, через которые распространяется излучение. Ошибки, связанные с предположением о постоянстве атмосферных характеристик в этих слоях, мы оцениваем от 3 до 19%. Наибольший вклад в эти ошибки дает нижний слой атмосферы, содержание водяного пара в котором наибольшее. Кроме этого на ошибку определения оптической толщины влияет

точность оценки температуры и удельной влажности воздуха на разных высотах в атмосфере (в реанализе ERA-5), которые используются в моделировании распространения излучения. Характерные отклонения температуры воздуха, оцениваемой в реанализе ERA-5, от температуры воздуха, измеренной радиозондами, обычно составляют 2–3 °С. Учитывая это, а также характерные отклонения в удельной влажности воздуха (до 30%), мы определили ошибку, связанную с неточностями оценки метеорологических параметров. Например, при таких условиях в модели MOILERE в конфигурации JPL средняя относительная ошибка оценки оптической толщи составила 3,4% в зимний сезон и возросла до 8,5% в летний. Для отдельных временных интервалов эта ошибка может возрастать до 20% и более, особенно в условиях высокой влажности атмосферы.

Заключение

Таким образом, на основе данных реанализа атмосферы ERA-5 можно сделать следующие выводы:

1. Доля наблюдательного времени, когда PWV < 5 мм, в месте расположения пика Терскол составляет около 59% в году. Наибольшее количество часов с низким содержанием водяного пара в столбе атмосферы приходится на зиму и переходные сезоны. Летом количество наблюдательных часов (часовых значений PWV < 5 мм) существенно уменьшается.

2. С применением модели MOILERE в конфигурациях JPL и HITRAN, а также модели MPM Liebe, хорошо описывающей спектры поглощения, по крайней мере, для частот ниже 400 ГГц, выполнены расчеты оптической толщи атмосферы в месте над пиком Терскол. В моделировании учитывалось нерезонансное молекулярное поглощение (континуум N₂, O₂, H₂O, CO₂), что важно для нижней и средней тропосферы, а также поглощение в резонансных дискретных линиях на строго определенных частотах. Получено, что для 100 ГГц средние значения оптической толщи составляют 0,09 (в конфигурациях JPL и HITRAN) и 0,07 (по модели MPM Liebe). Оптические толщи рассчитаны для PWV < 5 мм. Для 150 ГГц средние значения оптической толщи примерно равны друг другу (0,10 в конфигурациях JPL и HITRAN и 0,09 по модели MPM Liebe). Оптическая толща, рассчитанная по модели MPM Liebe, несколько выше рассчитанной по модели MOILERE для излучения на частоте 225 ГГц. Средние оптические толщи для пика Терскол для 225 ГГц равны 0,16 (JPL, HITRAN) и 0,18 (MPM Liebe).

Стоит отметить, что хорошее совпадение результатов применения модели MPM Liebe с данными радиометрических измерений лежит в основе оригинального метода согласованного определения интегральной влажности и эффективной оптической толщи атмосферы [28]. В перспективе мы планируем улучшить качество привязки осажденного водя-

ного пара, оцениваемого по реанализу, к условиям выбранных астроплощадок не только с учетом сетевых данных радиозондирования атмосферы для блажащих станций [17], но и с учетом измерений радиометров [29, 30].

Благодарности. Авторы выражают глубокую благодарность за ценные замечания анонимному рецензенту настоящей работы.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (грант № 22-72-00049, <https://rscf.ru/project/22-72-00049>).

Список литературы

1. Zhu D., Zhang K., Yang L., Wu S., Li L. Evaluation and calibration of modis near-infrared precipitable water vapor over china using GNSS observations and ERA-5 reanalysis dataset // *Remote Sens.* 2021. V. 13, N 14. P. 2761. DOI: 10.3390/rs13142761.
2. Manandhar S., Lee Y.H., Meng Y.S., Yuan F., Ong J.T. GPS-Derived PWV for rainfall nowcasting in tropical region // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2018. V. 56, N 8. P. 4835–4844. DOI: 10.1109/TGRS.2018.2839899.
3. Zhao Q., Ma X., Yao W., Liu Y., Yao Y. A drought monitoring method based on precipitable water vapor and precipitation // *J. Clim.* 2020. V. 33. P. 10727–10741. DOI: 10.1175/JCLI-D-19-0971.1.
4. Wang X., Zhang K., Wu S., Li Z., Cheng Y., Li L., Yuan H. The correlation between GNSS-derived precipitable water vapor and sea surface temperature and its responses to El Niño–Southern Oscillation // *Remote Sens. Environ.* 2018. V. 216. P. 1–12. DOI: 10.1016/j.rse.2018.06.029.
5. Obregyn M.B., Serrano A., Costa M.J., Silva A.M. Global spatial and temporal variation of the combined effect of aerosol and water vapour on solar radiation // *Remote Sens.* 2021. V. 13. P. 708. DOI: 10.3390/rs13040708.
6. Marchiori G., Rampini F., Tordi M., Spinola M., Bressan R. Towards the Eurasian Submillimeter Telescope (ESMT): Telescope concept outline and first results // *Ground-Based Astronomy in Russia. 21st Century, 21–25 September, 2020, Nizhny Arkhyz, Russia.* P. 378–383. DOI: 10.26119/978-5-6045062-0-2_2020_378.
7. 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), Moscow, 2020.* P. 47–51. DOI: 10.1109/RMC50626.2020.9312233.
8. 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/TTHZ.2014.2380473.
9. Balega Y., Bubnov G., Glyavin M., Gunbin 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.

10. Ziv S.Z., Yair Y., Alpert P., Uzan L., Reuveni Y. The diurnal variability of precipitable water vapor derived from GPS tropospheric path delays over the Eastern Mediterranean // *Atmos. Res.* 2021. V. 249. P. 05307. DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.105307.
11. Zhang W., Zhang H., Liang H., Lou Y., Cai Y., Cao Y., Zhou Y., Liu W. On the suitability of ERA5 in hourly GPS precipitable water vapor retrieval over China // *J. Geod.* 2019. V. 93. P. 1897–1909. DOI: 10.1007/s00190-019-01290-6.
12. Torres B., Cachorro V.E., Toledano C., Ortiz de Gastero J.P., Berjyn A., de Frutos A.M., Benmouna Y., Laulainen N. Precipitable water vapor characterization in the Gulf of Cadiz region (southwestern Spain) based on Sun photometer, GPS, and radiosonde data // *J. Geophys. Res. Atmos.* 2010. V. 115, N 18. P. D18103. DOI: 10.1029/2009JD012724.
13. Ситнов С.А., Мохов И.И. Содержание водяного пара в атмосфере над Европейской частью России в период летних пожаров 2010 г. // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана.* 2013. Т. 49, № 4. С. 414.
14. Wang S., Xu T., Nie W., Jiang C., Yang Y., Fang Z., Li M., Zhang Z. Evaluation of precipitable water vapor from five reanalysis products with ground-based GNSS observations // *Remote Sens.* 2020. V. 12. P. 1817. DOI: 10.3390/rs12111817.
15. Jiang J., Zhou T., Zhang W. Evaluation of satellite and reanalysis precipitable water vapor data sets against radiosonde observations in Central Asia // *Earth Space Sci.* 2019. V. 6. P. 1129–1148. DOI: 10.1029/2019EA000654.
16. Zhao Q., Yao Y., Yao W., Zhang S. GNSS-derived PWV and comparison with radiosonde and ECMWF ERA-Interim data over mainland China // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2019. V. 182. P. 85–92. DOI: 10.1016/j.jastp.2018.11.004.
17. 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. DOI: 10.15372/AOO20220110; 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 3. P. 168–175.
18. Shikhovtsev A.Y., Kovadlo P.G., Khaikin V.B., Nosov V.V., Lukin V.P., Nosov E.V., Torgaev A.V., Kiselev A.V., Shikhovtsev M.Y. Atmospheric conditions within big telescope alt-azimuthal region and possibilities of astronomical observations // *Remote Sens.* 2022. V. 14. P. 1833. DOI: 10.3390/rs14081833.
19. ECMWF Reanalysis v5 (ERA-5). Germany, 2022. [Electronic resource]. URL: <https://ecmwf.int/en/forecasts/dataset/ecmwf-reanalysis-v5> (last access: 10.01.2022).
20. Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Harahara S., Horanui 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., Radnoti G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S., Thépaut J.-N. The ERA-5 global reanalysis // *Quant. J. Roy. Meteorol. Soc.* 2020. V. 146, N 730. P. 1999–2049.
21. 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 Conf. (RMC), Moscow, 2020. P. 229–232. DOI: 10.1109/RMC50626.2020.9312314.
22. 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.
23. Liebe H.J. MPM — an atmospheric millimeter-wave propagation mode // *Int. J. Infrared Millimeter Wave.* 1989. V. 10, N 6. P. 631–650.
24. Liebe H.J., Hufford G.A., Cotton M.G. Propagation modeling of moist air and suspended water/ice particles at frequencies below 1000 GHz. Proc. NATO. AGARD, 1993. 10 p.
25. Захаров А.И., Кувалкин Е.С. Программная реализация методики расчета затухания радиосигнала в атмосферных газах для спутниковой связи // *Вестн. Балт. фед. ун-та им. И. Канта. Сер.: Физ.-мат. и техн. науки.* 2019. Т. 1. С. 18–27.
26. Tatarskii V.V., Tatarskaia M.S., Westwater Ed.R. Statistical retrieval of humidity profiles from precipitable water vapor and surface measurements of humidity and temperature // *J. Atmos. Ocean. Technol.* 1996. V 1. N 13. P. 165–174.
27. Shyam A., Gohil B.S., Basu S. Retrieval of water vapour profiles from radio occultation refractivity using artificial neural network // *Ind. J. Radio Space Phys.* 2013. V. 42, N 6. P. 411–419.
28. 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. выс. уч. зав. Радиофиз.* 2019. Т. 62, № 12. С. 920–931.
29. Арсаев И.Е., Быков В.Ю., Ильин Г.Н., Юрчук Э.Ф. Радиометр водяного пара — средство измерений радиояркостной температуры атмосферы // *Измерительная техника.* 2017. Т. 60, № 5. С. 60–65.
30. Marukhno A.S., Bubnov G.M., Vdovin V.F., Voziakova O.V., Zemlyanukha P.M., Zinchenko I.I., Mingaliev M.G., Shatsky N.I. Analysis of the millimeter-band astroclimate at the Caucasus mountain observatory // 7th All-Russian Microwave Conf. (RMC), Moscow, 2020. P. 184–188. DOI: 10.26119/978-5-6045062-0-2_2020_184.

A.Yu. Shikhovtsev, V.B. Khaikin, P.G. Kovadlo, P. Baron. Optical thickness of the atmosphere above peak Terskol.

The paper describes the results related to variations in precipitable water vapor at the peak Terskol site. Applying MPM Liebe model and MOLIERE model and using JPL and HITRAN configurations, we estimated optical thickness of the atmospheric column above peak Terskol for 100, 150 and 225 GHz.