

АДАПТИВНАЯ И ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОПТИКА

УДК 520.16, 551.511.6

## Статистический анализ содержания водяного пара на Северном Кавказе и в Крыму

А.Ю. Шиховцев<sup>1</sup>, В.Б. Хайкин<sup>2</sup>, А.П. Миронов<sup>3</sup>, П.Г. Ковадло<sup>1\*</sup>

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

<sup>2</sup>Специальная астрофизическая обсерватория РАН  
369167, п. Нижний Архыз, Буковское кладбище, 4

<sup>3</sup>Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ (ГАИШ МГУ)  
119234, г. Москва, пр. Университетский, 13

Поступила в редакцию 18.10.2022 г.

Приведены результаты исследований содержания осаждаемого водяного пара в столбе атмосферы для пика Терскол (Приэльбрусье), Кисловодска, пос. Научный (Крым), г. Шеки (Азербайджан) и с. Хунзах (Дагестан). Выполнен сравнительный анализ изменений содержания осаждаемого водяного пара, оцененного по данным измерений ГНСС-станций и реанализа ERA-5. Использование реанализа ERA-5 позволило выявить новые пункты, перспективные для размещения миллиметровых/субмиллиметровых телескопов. Показано, что с учетом сравнительно низкого покрытия неба общей облачностью наиболее перспективны для размещения российского миллиметрового/субмиллиметрового телескопа на Северном Кавказе Рутульский и Агульский районы горного Дагестана (горы Хорай (3521 м), Каталнац (3780 м) и Карах (2876 м) с окрестностями, гора Синдаку (2849 м) с окрестностями).

*Ключевые слова:* телескоп, астроклимат, осаждаемый водяной пар, реанализ ERA-5, ГНСС, спутниковая геодезия; telescope, astroclimate, precipitable water vapor, ERA-5 database, GNSS, GPS, satellite geodesy.

### Введение

В настоящее время новые крупные миллиметровые/субмиллиметровые телескопы востребованы в Евразии, как одиночные, так и в составе глобальной сети Event Horizon Telescope (EHT). Создание миллиметровых/субмиллиметровых телескопов запланировано в рамках концепции Евразийских Субмиллиметровых Телескопов (ESMT) [1–3]. С использованием крупных миллиметровых/субмиллиметровых радиотелескопов решаются следующие задачи [2]:

- 1) изучение звездообразования;
- 2) поиск новых химических соединений, включая органические молекулы, в космосе;
- 3) исследование эффекта Сюняева–Зельдовича в скоплениях галактик (этот эффект связан с уменьшением яркости реликтового излучения в радиодиапазоне в направлениях на скопления галактик с горячим межгалактическим газом вследствие взаимодействий фотонов реликтового излучения с электронами межгалактического газа);
- 4) поиск первичных (космологических) молекул в ранней Вселенной;

5) исследование сверхмассивных черных дыр, расположенных в центрах ближайших галактик.

Концепция ESMT предполагает отказ от нереалистичной идеи использования радиотелескопа RT-70 в Узбекистане в миллиметровом/субмиллиметровом диапазоне в случае его достройки в силу низкой ожидаемой антенной эффективности в диапазоне волн короче 7 мм. В рамках концепции ESMT предложено построить три новых высокоэффективных миллиметровых/субмиллиметровых радиотелескопа класса 15–21 м:

- 1) в Узбекистане на плато Суффа (39°37' с.ш., 68°26' в.д., 2400 м н.у.м.) или на близлежащей горе Акташтау на высоте 3383 м н.у.м.;
- 2) в России на высоте более 3000 м н.у.м.;
- 3) на Тибетском нагорье в Китае на высоте более 5000 м н.у.м.

Изучение астроклимата возможных мест размещения субмиллиметрового телескопа в Евразии началось в 2012 г. [4, 5]. Настоящая работа продолжает исследование мест для размещения субмиллиметрового телескопа в России с оптимальными астроклиматическими характеристиками, в частности интегральным содержанием водяного пара (Precipitable Water Vapor, PWV). Астроклиматические характеристики места наблюдения включают содержание водяного пара в атмосфере, оптическую толщину и ее изменения, показатели облачности и количество ясных дней (ночей), показатели качества изображений и др.

\* Артем Юрьевич Шиховцев (artempochta2009@ Rambler.ru); Владимир Борисович Хайкин (vkhstu@mail.ru); Алексей Павлович Миронов (almir@physics.msu.ru); Павел Гаврилович Ковадло (kovadlo2006@ Rambler.ru).

## Характеристика пунктов измерений

Для повышения эффективности миллиметровых/субмиллиметровых телескопов и улучшения качества получаемых изображений в условиях реальной атмосферы могут применяться методы адаптивной оптики (АО) [6]. В настоящее время они широко используются для улучшения качества изображений крупных оптических телескопов VLT, Keck, Subaru, Gemini и др. Ранее эти методы активно развивались для астрономических телескопов РФ [7–9].

Применение методов АО в субмиллиметровом диапазоне наиболее эффективно при невысоком содержании осажденного водяного пара в столбе атмосферы при слабых фазовых флуктуациях и вызванных ими наклонах волнового фронта. Поэтому решению задач АО на крупных субмиллиметровых телескопах типа ESMT должен предшествовать статистический анализ интегральной влажности и оптической толщи в субтерагерцовом диапазоне волн.

В настоящей работе значения PWV в столбе атмосферы вычислены для пяти станций ГНСС (глобальной навигационной спутниковой системы), расположенных в астрономических обсерваториях в западной и восточной частях Северного Кавказа (коды KISL и TRSK), в горном Дагестане (код HUNZ) и на южном склоне Северного Кавказа в Азербайджане (код SEKC), а также в Крыму (код SAIC). Результаты сравниваются с данными реанализа ERA-5 за 2018–2021 гг. с целью верификации данных.

В табл. 1 приведены основные сведения о пунктах, для которых оценивалась статистика PWV.

Хунзах – высшая точка расположения базовой станции ГНСС в горном Дагестане (ст. HUNZ). Село Хунзах находится в 15–20 км от горы Акаро на Хунзахском плато, которое представляет для нас практический интерес с точки зрения астроклиматических характеристик и транспортной доступности.

В целом, по нашим оценкам, в Дагестане и на Северном Кавказе наиболее перспективны по интегральному влагосодержанию и облачности Агульский и Рутульский районы, а именно горы Карах (2876 м) и Хорай (3521 м), а также высокогорные селения Рича (2100 м) и Цахур (2000 м).

Станция SEKC расположена в г. Шеки в Азербайджане, в предгорье, рядом с одним из перспективных астроклиматических горных районов Дагестана (между горами Хорай и Шалбуздаг). Анализ изменений содержания осажденного водяного пара на этой станции будет использован при адаптации схемы привязки данных ERA-5 к рельефу и поможет оценить преимущества астроклимата близлежащего горного района Дагестана.

## Используемые данные и методы определения содержания осажденного водяного пара в столбе атмосферы

Для определения PWV мы использовали данные реанализа последнего поколения ERA-5. Реанализ ERA-5 дает возможность получать средние часовые значения содержания осажденного водяного пара для заданного узла сетки. Для вышперечисленных площадок измерений были выбраны средние часовые значения PWV за отдельные годы. В связи с тем, что реанализ ERA-5 ограничен по пространственному разрешению, а также плохо учитывает условия пересеченного рельефа, мы привязывали данные PWV к высотам вершин гор согласно формуле [10]:

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

Таблица 1

Сведения о пунктах, для которых оценивалась статистика осажденного водяного пара

Пункт	Код	Координаты	Высота, м	Организация
Обсерватория «Пик Терскол», Приэльбрусье, КЧР, Россия	TRSK	43,2749826° с.ш. 42,5004662° в.д.	3121,9	ГАИШ МГУ
Кисловодская горная астрономическая станция (ГАО РАН), урочище Шатджатмаз, КЧР, Россия	KISL	43,7416734° с.ш. 42,6629366° в.д.	2095,3	ГАИШ МГУ
Крымская астрономическая станция ГАИШ МГУ им. М.В. Ломоносова (КАС МГУ), пос. Научный, Республика Крым, Россия	SAIC	44,7297042° с.ш. 34,0160434° в.д.	626,1	ГАИШ МГУ
Село Хунзах, Республика Дагестан, Россия	HUNZ	42,5455282° с.ш. 46,7070740° в.д.	1687,4	НПК Индустриальные геодезические системы
Город Шеки, Азербайджан	SEKC	41,2201767° с.ш. 47,1751499° в.д.	726,7	IGS (International GNSS Service)

где  $PWV_0$  — исходное значение содержания водяных паров в столбе атмосферы в реанализе ERA-5;  $\delta z = z - z_0$  — разница высот, определяемая разностью между абсолютной высотой места  $z$  и высотой подножия горы  $z_0$ . С высотой атмосферное давление и влажность воздуха уменьшаются. Для учета уменьшения доли водяного пара с высотой используется экспоненциальная зависимость в выражении (1).

Для сравнения с реанализом ERA-5 в настоящей работе также используется ГНСС-метод измерения содержания осаджденного водяного пара по тропосферной задержке. Как показано в [11–13], методы, основанные на анализе спутниковых данных, могут быть успешно использованы для проверки других методов восстановления  $PWV$ , основанных на атмосферных моделях.

ГНСС-метод использует линейную зависимость содержания  $PWV$  от влажной составляющей задержки ГНСС-сигнала  $ZWD$ :

$$PWV = \Pi \cdot ZWD, \quad (2)$$

где  $ZWD = ZTD - ZHD$ ,  $ZTD$  — измеренное значение полной задержки,  $ZHD$  — гидростатическая задержка в зените (вычисляемая по метеопараметрам). Коэффициент пропорциональности  $\Pi$  определяется константами рефракции и средневзвешенной температурой атмосферного водяного пара  $T_m$ , при этом профиль температуры  $T(z)$  интегрально «взвешивается» профилем парциального давления водяного пара  $p_w(z)$  [14–16].

В результате обработки фазовых измерений двухчастотных сигналов с ГНСС-приемников получена оценка тропосферной задержки и высоты водяного столба [15, 16]. Обработка осуществлялась пакетом программ GAMIT/GLOBK, предназначенным для высокоточных геодезических вычислений по радионавигационным спутниковым измерениям [17], на комплексе хранения и обработки астрономических данных ГАИШ МГУ [18]. Для более точной оценки содержания осаджденного водяного пара измеренные значения тропосферной задержки сигнала корректировались в соответствии с моделью [19].

## Оценка содержания осаджденного водяного пара по данным реанализа ERA-5 и ГНСС-станций

Анализ данных измерений содержания осаджденного водяного пара в разных местах, подходящих для наблюдений в миллиметровом/субмиллиметровом диапазонах астрономических объектов, показывает, что  $PWV$  существенно изменяется как на коротких, так и на длинных временных промежутках [20–27]. Если рассматривать содержание водяного пара в столбе атмосферы, то наилучшие условия в большинстве мест наблюдаются только в отдельные сезоны года.

Для определения характера изменений содержания водяного пара в столбе атмосферы мы оценили медианы и средние значения содержания осаджденного водяного пара за год для ГНСС-станций TRSK, KISL [28–30], SAIC, HUNZ и SEKC (табл. 2).

На рис. 1 показаны изменения содержания осаджденного водяного пара по данным реанализа ERA-5 и ГНСС-станции на пике Терскол в 2019 г. Значения  $PWV$  в реанализе ERA-5 приведены к высоте по формуле (1). Среднее годовое  $PWV$  составляет 4,31 мм, среднее годовое значение медианы — 3,49 мм. Анализируя изменения  $PWV$ , можно отметить высокую синхронность вариаций в течение года, определенных по данным реанализа и ГНСС-станций. Наибольшие отклонения между ними соответствуют вариациям в высокочастотном диапазоне. Отклонение  $B$  между среднегодовыми значениями медиан, оцененных по данным измерений ГНСС-станций и реанализа ERA-5, составило 0,74 мм. Для зимы и лета  $B = 1,08$  и 0,33 мм соответственно. Таким образом, архив ERA-5 в среднем занижает содержание  $PWV$ .

В сравнении с пиком Терскол  $PWV$  в месте расположения Большого телескопа азимутального (БТА) выше. Годовое медианное значение для БТА с 2011 по 2020 г. составляет 6,20 мм (в декабре — феврале медианные значения уменьшаются

Таблица 2

Медианные и средние значения содержания осаджденного водяного пара в тропосфере (мм), вычисленные по данным реанализа ERA-5 и ГНСС-станций

Станция	Медиана	Среднее	Медиана	Среднее	Медиана	Среднее
	год		лето		зима	
<i>Реанализ ERA-5</i>						
TRSK	3,49	4,31	7,98	7,77	2,19	2,17
KISL	6,85	8,28	15,31	14,92	3,97	4,01
SAIK	13,53	15,00	23,05	23,54	6,77	6,78
SEKC	13,76	15,20	23,74	23,78	8,09	8,09
HUNZ	9,08	10,48	16,53	16,94	4,64	4,68
<i>ГНСС-данные</i>						
TRSK	4,39	5,05	8,00	8,10	2,44	3,25
KISL	8,72	9,75	16,01	15,73	5,14	5,39
SAIK	11,86	13,24	20,92	21,15	7,99	8,08
SEKC	16,35	18,25	29,18	29,10	9,17	9,17
HUNZ	9,66	11,65	20,67	20,52	5,72	5,85

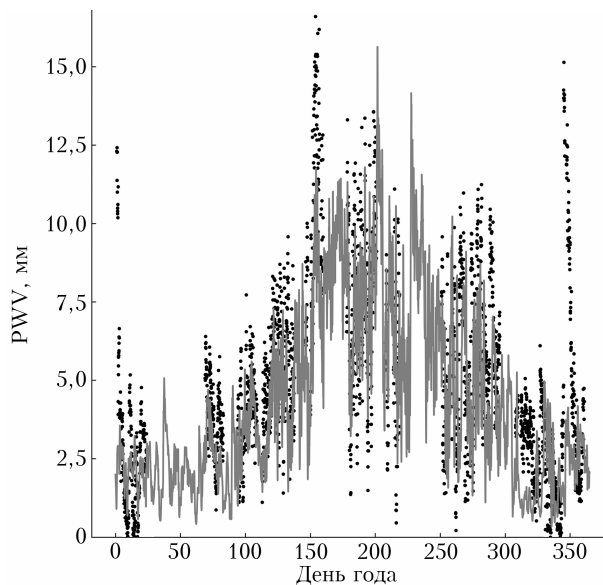


Рис. 1. Изменения содержания осадочного водяного пара в 2019 г. по данным ERA-5 (серая кривая) и ГНСС (точки) на ст. TRSK

до 3,5–4,0 мм, в летние месяцы возрастают до 11,0–12,0 мм). В этом районе наилучшие условия наблюдаются на горе Баши, зимой медианные значения PWV составляют 1,2–1,5 мм.

Для сравнения мы рассчитали изменения содержания PWV в Кисловодске (рис. 2).

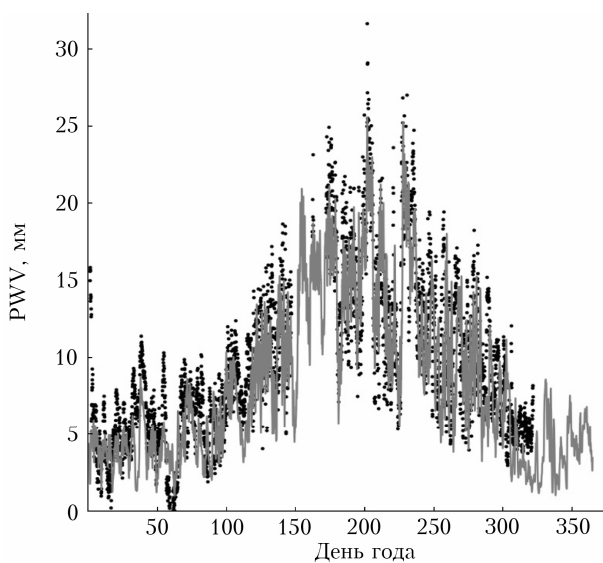


Рис. 2. То же, что и на рис. 1, для 2019 г. на ст. KISL

PWV в Кисловодске существенно выше, чем на пике Терскол. Среднее годовое значение содержания осадочного водяного пара в Кисловодске – 8,28 мм (медиана 6,85 мм). Результаты расчетов показывают, что PWV по данным реанализа в среднем меньше значений, измеренных на станциях ГНСС. Отклонения между среднегодовыми значениями медиан, а также средними медианными значениями зимой и летом составили 1,47; 1,38 и 0,81 мм соответственно.

Данные наших исследований указывают на наличие обширной зоны пониженных значений PWV на Кавказе. Зона охватывает такие пункты, как пик Терскол, гора Баши, и распространяется по направлению к Дербенту. В этой связи оценим отклонения между содержанием водяного пара, определенным по данным реанализа и данным станции ГНСС в г. Шеки (Азербайджан), по рис. 3.

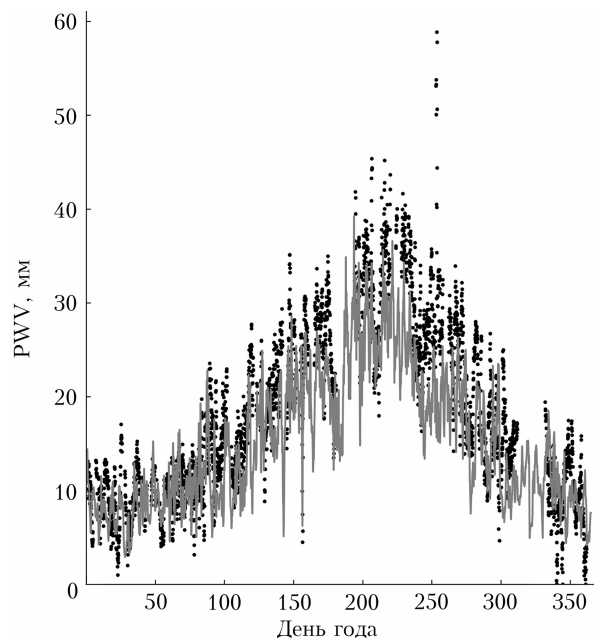


Рис. 3. То же, что и на рис. 1, для 2018 г. на ст. SEKC

Несмотря на то, что в предгорном районе Шеки PWV достигает высоких значений, видно, что данные реанализа ERA-5 удовлетворительно описывают изменения влагосодержания атмосферы в этом районе. Отклонения между медианами PWV, определенными по данным ГНСС-станций и реанализа ERA-5, достигают 3,05 мм в среднем за год и 1,08 и 5,32 мм зимой и летом соответственно.

Также мы проанализировали изменения содержания PWV в месте расположения с. Хунзах, находящегося недалеко от плато Акаро (рис. 4). Среднегодовое значение PWV в с. Хунзах составляет 10,30 мм. Отклонения между медианами содержания осадочного водяного пара, определенными по данным ГНСС-станций и реанализа ERA-5, равны 1,17 мм в среднем за год и 1,17 и 3,58 мм зимой и летом соответственно.

Некоторые исследователи считают перспективным местом для установки миллиметрового телескопа п-ов Крым, в частности район полигона ННГУ «Карадаг» [31]. В целом Крым характеризуется низкой повторяемостью значений  $PWV < 3$  мм. Для сравнения содержания PWV по данным ГНСС-станции и реанализа ERA-5 мы выбрали в качестве опорной ст. SAIC, расположенную в п. Научный, в Крымской астрономической станции ГАИШ МГУ, которая, по нашим оценкам, может представлять астроклиматически благоприятный район Крыма (рис. 5).

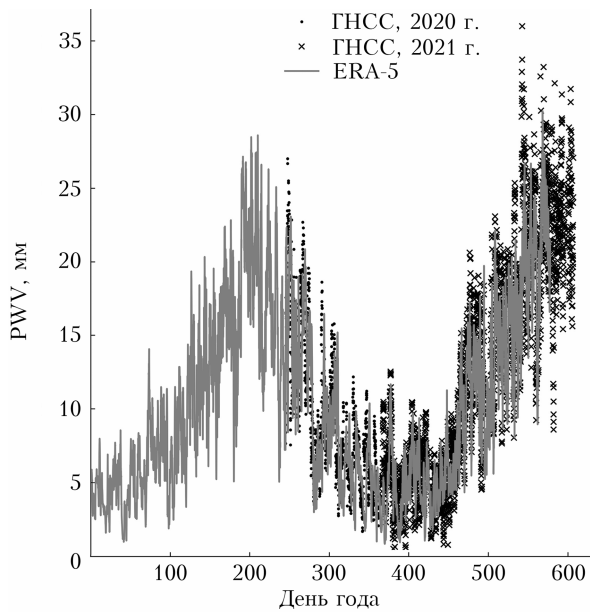


Рис. 4. Изменения содержания осажденного водяного пара в течение года по данным ERA-5 (с 1 января 2020 по 31 июля 2021 г.) и ГНСС (с 5 сентября 2020 г. по 31 августа 2021 г.) на ст. HUNZ

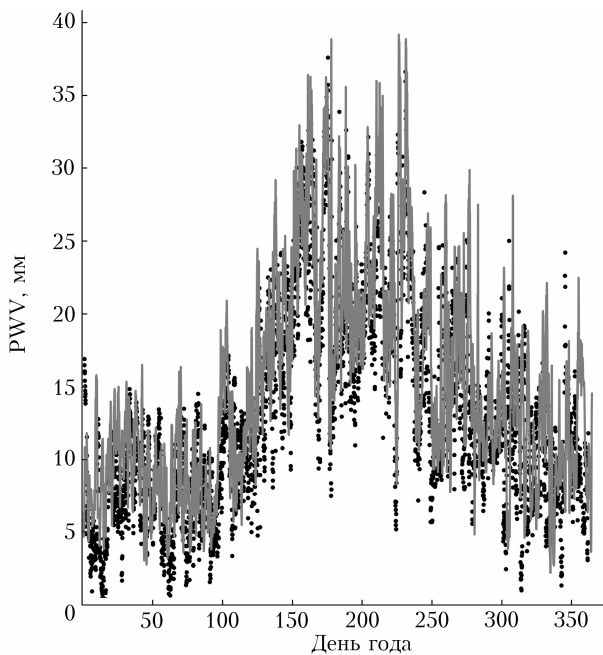


Рис. 5. То же, что и на рис. 1, для 2019 г. на ст. SAIC

Измерения показали, что среднее значение PWV составляет 15,0 мм, отклонения среднегодовых медианных значений не превышают 1,76 мм. Наибольшие отклонения по амплитуде соответствуют зиме (1,30 мм), наименьшие – лету (–2,39 мм). Отрицательные отклонения свидетельствуют о некотором завышении значений PWV в реанализе ERA-5 в сравнении с данными измерений ГНСС-станций.

Мы также рассчитали линейные коэффициенты корреляции между изменениями содержания водя-

ного пара, оцененные по данным ГНСС-станций и реанализа ERA-5 (табл. 3). Значения содержания водяного пара изменяются с высокой степенью синхронности. Коэффициенты корреляции изменяются от 0,71 до 0,94. Стоит отметить, что наилучшая связь между изменениями содержания водяного пара, определенными по данным ГНСС-станций и реанализа ERA-5, наблюдается в регионах с наименьшим количеством общей облачности. Например, на ст. HUNZ значение линейного коэффициента корреляции Пирсона составляет 0,94.

Таблица 3

Линейные коэффициенты корреляции между изменениями содержания водяного пара, оцененные по данным ГНСС-станций и реанализа ERA-5

Станция	Коэффициент корреляции
HUNZ	0,94
KISL	0,91
SAIC	0,93
SEKC	0,88
TRSK	0,71

Оценки содержания осажденного водяного пара (см. табл. 2) свидетельствуют о неплохих астроклиматических показателях для наблюдений в миллиметровом/субмиллиметровом диапазонах в районе пика Терскол (включая площадку Гара-Баши на Эльбрусе). Как и ожидалось, вполне удовлетворительные характеристики демонстрирует урочище Шатджатмаз в Кисловодске (2095 м). Анализ данных ERA-5 указывает на высокую перспективность горы Хорай (3521 м), расположенной в Рутульском районе Дагестана рядом с высокогорным с. Цахур (2200 м), и горы Карах (2876 м) в соседнем Агульском районе рядом с высокогорным с. Рига (2100 м). В Рутульском районе Дагестана интерес также представляют склоны гор Каталнац (3780 м) рядом с высокогорным с. Аракуль (2100 м). В г. Шеки (Азербайджан) (700 м) отмечается высокое содержание PWV, хотя он и находится рядом с перспективным высокогорным районом Дагестана. В пос. Научный (Крым), расположенном в 25 км от Черного моря, значения содержания PWV достаточно высоки, однако они все-таки ниже, чем в г. Шеки, расположенном в < 100 км от Каспийского моря.

## Заключение

Выполнен статистический анализ и проведена верификация значений содержания осажденного водяного пара, полученных реанализом ERA-5 на выбранных станциях Северного Кавказа и Крыма. В качестве опорных были взяты данные измерений на существующих ГНСС-станциях. Получены следующие выводы.

1. Наибольшее PWV для всех представленных станций наблюдается в теплый период, наименьшие – в холодный. Средние значения PWV,

оцененные по данным реанализа, составляют 4,31 мм для пика Терскол, 8,28 мм для Кисловодска, 15,0 мм для пос. Научный, 15,20 мм для г. Шеки и 10,48 мм для с. Хунзах.

2. В среднем отклонения медианных значений содержания PWV, оцененных по данным измерений ГНСС-станций и реанализа ERA-5, не превышают нескольких миллиметров. Наибольшие отклонения по абсолютной величине наблюдаются для станций в г. Шеки и с. Хунзах. Однако относительные изменения содержания осажденного водяного пара между станциями невелики и составляют 16,7 и 14,7% для станций с максимальными (Шеки) и минимальными отклонениями (пик Терскол). Таким образом, реанализ оценивает содержание осажденного водяного пара с примерно одинаковой относительной погрешностью.

3. Реанализ ERA-5 с высотной привязкой можно эффективно использовать как в комбинации с ГНСС-методом, так и самостоятельно. Он дает более сглаженную картину изменений содержания осажденного водяного пара в сравнении с ГНСС-методом. Однако коэффициент корреляции обоих методов высокий. Например, на ст. HUNZ значение линейного коэффициента корреляции Пирсона составляет 0,94.

4. Как и ожидалось, наименьшие значения PWV в столбе атмосферы из рассмотренных нами пунктов по результатам анализа данных ГНСС-станции и реанализа ERA-5 соответствуют пику Терскол (обсерватория «Пик Терскол»), преимущества которого среди российских горных площадок ранее отмечены в [32]. Анализ влагосодержания атмосферы показал, что на Северном Кавказе отмечаются и другие пункты, перспективные для миллиметровых/субмиллиметровых наблюдений, например Гара-Баши. Согласно данным реанализа ERA-5 с. Хунзах имеет весьма скромные показатели влагосодержания и облачности для горного Дагестана, соизмеримые с районом расположения БТА. Наиболее перспективными для задач миллиметровой/субмиллиметровой астрономии и поиска мест размещения российского инструмента на Северном Кавказе являются, по данным реанализа ERA-5, два района горного Дагестана – Рутульский и Агульский, в частности, легко доступные из ближайших высокогорных сел горы Хорай (3521 м) и Каталнац (2876 м) в Рутульском районе и гора Карах с окрестностями в соседнем Агульском районе Дагестана.

Авторы выражают искреннюю благодарность генеральному директору Сорокину Сергею Дмитриевичу и сотрудникам НПК «Индустриальные геодезические системы» за предоставленные ГНСС-данные сети базовых станций компании.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, а также в рамках Междисциплинарной научно-образовательной школы «Фундаментальные и прикладные исследования космоса» МГУ им. М.В. Ломоносова (А.П. Миронов).

1. *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, Proc. All-Rus. Conf., 21–25 September, 2020, Nizhny Arkhyz, Russia. P. 378–383. DOI: 10.26119/978-5-6045062-0-2\_2020\_378.
2. *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-Rus. Microwave Conf. (RMC), Moscow, Russia, 2020. P. 47–51. DOI: 10.1109/RMC50626.2020.9312233.
3. *Duan R., Khaikin V., Lebedev M., Shmagin V., Yakopov G., Vdovin V., Bubnov G., Zhang X., Niu C., Li D., Zinchenko I.* Toward Eurasian SubMillimeter Telescopes: The concept of multicolor SubTHz MKID-array demo camera MUSICAM and its instrumental testing // 7th All-Rus. Microwave Conf. (RMC), Moscow, Russia, 2020. P. 41–46. DOI: 10.1109/RMC50626.2020.9312270.
4. *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.
5. *Bubnov G., Vdovin V., Khaikin V., Tremblin P., Baron G.* Analysis of variations in factors of specific absorption of sub-terahertz waves in the Earth's atmosphere // 7th All-Rus. Microwave Conf. (RMC), Moscow, Russia, 2020. P. 229–232. DOI: 10.1109/RMC50626.2020.9312314.
6. *Maud L.T., Tilanus R.P.J., van Kempen T.A., Hogerheijde M.R., Schmalzl M., Yoon I., Contreras Y., Toribio M.C., Asaki Y., Dent W.R.F., Fomalont E., Matsushita S.* Phase correction for ALMA. Investigating water vapour radiometer scaling: The long-baseline science verification data case study // Astron. Astrophys. 2017. V. 605. P. A121. DOI: 10.1051/0004-6361/201731197.
7. *Лукин В.П., Коняев П.А., Борзилов А.Г., Соин Е.Л.* Адаптивная система стабилизации и формирования изображения для крупноапертурного солнечного телескопа // Оптика атмосф. и океана. 2021. Т. 34, № 3. С. 207–217.
8. *Ботыгина Н.Н., Колобов Д.Ю., Ковадло П.Г., Лукин В.П., Чуπραков С.А., Шиховцев А.Ю.* Двухзеркальная адаптивная система коррекции атмосферных помех Большого солнечного вакуумного телескопа // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 7. С. 563–569; *Botygina N.N., Kolobov D.Yu., Kovadlo P.G., Lukin V.P., Chuprakov S.A., Shikhovtsev A.Yu.* Two-mirror adaptive system for correction of atmospheric disturbances of the large solar vacuum telescope // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 6. P. 709–717.
9. *Botygina N.N., Emaleev O.N., Konyayev P.A., Kopylov E.A., Lukin V.P.* Development of elements for an adaptive optics system for solar telescope // J. Appl. Remote Sens. 2018. V. 12, N 4. P. 042403. DOI: 10.1117/1.JRS.12.042403.
10. *Xiong Z., Zhang B., Sang J., Sun X., Wei X.* Fusing precipitable water vapor data in China at different time-scales using an artificial neural network // Remote Sens. 2021. V. 13. P. 1720. DOI: 10.3390/rs13091720.
11. *He Q., Shen Z., Wan M., Li L.* Precipitable water vapor converted from GNSS-ZTD and ERA5 datasets for the monitoring of tropical cyclones // IEEE Access.

2020. V. 8. P. 87275–87290. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2991094.
12. *Jiao D., Xu N., Yang F., Xu K.* Evaluation of spatial-temporal variation performance of ERA5 precipitation data in China // *Sci. Rep.* 2021. V. 11. P. 17956. DOI: 10.1038/s41598-021-97432-y.
  13. *Zhang Y., Cai C., Chen B., Dai W.* Consistency evaluation of precipitable water vapor derived from ERA5, ERA-Interim, GNSS, and radiosondes over China // *Radio Sci.* 2019. V. 54. P. 561–571. DOI: 10.1029/2018rs006789.
  14. *Bevis M., Businger S., Herring T.A., Rocken C., Anthes R.A., Ware R.H.* GPS Meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97, N D14. P. 787–801.
  15. *Антонович К.М.* Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. Часть 1. М.: Картоцентр, 2005. 334 с.
  16. *Антонович К.М.* Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. Часть 3. М.: Картоцентр, 2006. 360 с.
  17. URL: [http://geoweb.mit.edu/gg/docs/Intro\\_GG.pdf](http://geoweb.mit.edu/gg/docs/Intro_GG.pdf) (дата обращения: 10.10.2021).
  18. *Комплекс оборудования* для хранения и обработки астрономических данных ГАИШ МГУ. [Электронный ресурс] URL: <https://istina.msu.ru/equipment/card/9351754> (дата обращения: 18.10.2021).
  19. *Boehm J., Werl B., Schuh H.* Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111, N B2. P. B02406. DOI: 10.1029/2005JB003629.
  20. *Wang Z., Sun M., Yao X., Zhang L., Zhang H.* Spatiotemporal variations of water vapor content and its relationship with meteorological elements in the third pole // *Water.* 2021. V. 13, N 13. P. 1856. DOI: 10.3390/w13131856.
  21. *Ayantobo O.O., Wei J., Kang B., Li T., Wang G.* Spatial and temporal characteristics of atmospheric water vapour content and its relationship with precipitation conversion in China during 1980–2016 // *Int. J. Climatol.* 2021. V. 41, N 3. P. 1747–1766. DOI: 10.1002/joc.6928.
  22. *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. 105307. DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.105307.
  23. *Bordi I., Fraedrich K., Sutera A., Zhu X.* Ground-based GPS measurements: time behavior from half-hour to years // *Theor. Appl. Climatol.* 2014. V. 115. P. 615–625. DOI: 10.1007/s00704-013-0923-z.
  24. *Lees E., Bousquet O., Roy D., Bellevue J.L.D.* Analysis of diurnal to seasonal variability of integrated water vapour in the South Indian Ocean basin using ground-based GNSS and fifth-generation ECMWF reanalysis (ERA5) data // *Quant. J. Roy. Meteorol. Soc.* 2021. V. 147, N 734. P. 229–248. DOI: 10.1002/qj.3915.
  25. *Yao Y., Shan L., Zhao Q.* Establishing a method of short-term rainfall forecasting based on GNSS-derived PWV and its application // *Sci. Rep.* 2017. V. 7, N 1. P. 12465. DOI: 10.1038/s41598-017-12593-z.
  26. *Wang J., Dai A., Mears C.* Global water vapor trend from 1988 to 2011 and its diurnal asymmetry based on GPS, radiosonde, and microwave satellite measurements // *J. Clim.* 2016. V. 29, N 14. P. 5205–5222. DOI: 10.1175/JCLI-D-15-0485.1.
  27. *Ssenyunzi R.C., Oruru B., D'ujanga F.M., Realini E., Barindelli S., Tagliaferro G., von Engeln A., vad de Giesen N.* Performance of ERA5 data in retrieving precipitable water vapour over East African tropical region // *Adv. Space Res.* 2020. V. 65. P. 1877–1893. DOI: 10.1016/j.asr.2020.02.003.
  28. *Milyukov V., Kopaev A., Zharov V., Mironov A., Myasnikov A., Kaufman M., Duev D.* Monitoring crustal deformations in the Northern Caucasus using a high precision long base laser strainmeter and the GPS // *J. Geodyn.* 2010. V. 49, N 3–4. P. 216–223. DOI: 10.1016/j.jog.2009.10.003.
  29. *Милюков В.К., Миронов А.П., Рогожин Е.А., Стеблов Г.М.* Оценки скоростей современных движений Северного Кавказа по GPS наблюдениям // *Геотектоника.* 2015. Т. 3. С. 56–65.
  30. *Милюков В.К., Миронов А.П., Овсяченко А.Н., Рогожин Е.А., Горбатов А.В., Дробышев В.Н., Хубаев Х.М., Николаев А.В.* Скорости современных горизонтальных движений в центральном секторе Большого Кавказа по данным GPS-наблюдений и их связь с тектоникой и глубинным строением земной коры // *Докл. Академии наук.* 2018. Т. 481, № 3. С. 288–292.
  31. *Агафонов М.И., Бубнов Г.М., Бубукин И.Т., Вдовин В.Ф., Горбунов Р.В., Зинченко И.И., Лапченко В.А., Носов В.И., Панкратов А.Л., Ракуть И.В.* Результаты наблюдений астроклимата на Крымском полуострове в коротковолновой части миллиметрового диапазона длин волн // *Астрофиз. Бюлл.* 2018. Т. 73, № 3. С. 412–417.
  32. *Lapinov A.V., Lapinova S.A., Petrov L.Yu.* On the benefits of the Eastern Pamirs for sub-mm astronomy // *Proc. SPIE.* 2020. P. 11453. DOI: 10.1117/12.2560250.

*A.Yu. Shikhovtsev, V.B. Khaikin, A.P. Mironov, P.G. Kovadlo. Statistical analysis of precipitable water vapor in the North Caucasus and Crimea.*

The results of studies of the precipitable water vapor (PWV) at Terskol, Kislovodsk, Nauchny, Sheki, and Hunzakh sites are presented. The comparative analysis of changes in GNSS-derived PWV and PWV estimated from the ERA-5 reanalysis database has been performed. The ERA-5 data make it possible to reveal new sites suitable for millimeter/submillimeter telescopes. In view of the comparatively low total cloud cover, Rutulsky and Agulsky regions are the most promising for building millimeter/submillimeter telescopes in the North Caucasus (Dagestan, mt. Horai (3521 m), Katalnats (3780 m), mt. Karah (2876 m), and mt. Sindaky (2849 m)).