DOI: https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.9.4

УДК: 521.98

СТАТИСТИКИ ОСАЖДЕННОГО ВОДЯНОГО ПАРА НА НОВЫХ АСТРОПУНКТАХ СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЕВРАЗИИ

В.Б. Хайкин [1,7], А.П. Миронов [2], А.Ю. Шиховцев [3], Г.А. Макоев [1,7], Я.О. Водзяновский [4,7], А.В. Худченко [4,5], Павел М. Землянуха [6], Е.А. Копылов[7]

[1] Специальная астрофизическая обсерватория РАН (САО РАН), пос. Нижний Архыз, Россия
[2] Государственный астрономический институт им.П.К. Штернберга МГУ (ГАИШ МГУ), Москва, Россия
[3] Институт солнечно-земной физики СО РАН (ИСЗФ), Иркутск, Россия
[4] Астрокосмический центр ФИАН (АКЦ ФИАН), Москва, Россия
[5] ИРЭ им.В.А.Котельникова РАН, Москва, Россия
[6] Институт прикладной физики РАН (ИПФ РАН), Нижний Новгород, Россия
[7] Институт астрономии РАН (ИНАСАН), Москва, Россия

Статья поступила в редакцию 23 мая 2025 г.

Аннотация. В работе с помощью ГНСС метода получены месячные статистики осажденного водяного пара на новых астропунктах северо-восточной Евразии: пике Хулугайша (Восточный Саян), г.Курапдаг в Агульском районе Дагестана и АПП Ташанта в межгорной котловине республики Алтай в сравнении с районом расположения БТА, КГО и обсерваторией Пик Терскол. Приводятся изменения часовых значений медианы осажденного водяного пара на пике Хулугайша, АПП Ташанта и в районе расположения БТА по данным реанализа *Era*-5 и влагосодержания в приземном слое по метеоданным 2023-2024 гг. Показано что новые астропункты северо-восточной Евразии имеют значительные преимущества по осажденному водяному и общей облачности в сравнении с лучшими из существующих. Начат набор статистики оптической толщи и осажденного водяного пара в районе расположения БТА и новых астропунктов

с помощью двухканального атмосферного радиометра ИПАР-2 на волне 3 мм и 2 мм.

Ключевые слова: субмиллиметровый телескоп, астроклимат, осажденный водяной пар, оптическая толща, радиометрический метод, ГНСС метод, реанализ Era-5.

Финансирование: Работа выполнена при поддержке гранта РНФ N23-72-00041.

Автор для переписки: Хайкин Владимир Борисович, vkhstu@mail.ru

Введение

В связи с высоким интересом к сооружению крупных одиночных субММ телескопов в Евразии актуальным является исследование астроклимата возможных площадок для их размещения [1, 2, 3] и развитие субТГц приемных технологий [4, 5]. Ряд новых мест рассматривается в качестве кандидатов для размещения инструментов Телескопа Горизонта Событий следующего поколения *ngEHT* [6]. В работе [7] приведены планы размещения и оснащения приемными инструментами 15 м субММ Телескопа (*XSMT*) с диапазоном 80-690 ГГц на сайте *XSMC* (4820 м) Цинхай-Тибетского (*Quinghai-Tibet*) плато. В работах [8, 9] приведены астроклиматические характеристики сайта *Lenghu* той же провинции *Quinghai-Tibet*, который рассматривается как перспективное место размещения 12 м оптического телескопа (*LOT*).

Ключевыми астроклиматическими условиями для размещения субММ телескопа являются низкие значения осажденного водяного пара (*PWV*), оптической толщи $\tau\lambda$ и общей облачности (*TCC*). В частности, преимущества потенциальных мест размещения Евразийских СубМиллиметровых Телескопов (*ESMT*) по *TCC* показаны в работе [2]. С целью изучения астроклимата возможных мест размещения *ESMT* организованы новые астропункты в Евразии: на пике Хулугайша (Восточный Саян), г.Курапдаг в Агульском районе Дагестана, АПП Ташанта в межгорной котловине республики Алтай а также астропункт сравнения в районе расположения Большого Телескопа Альт-

Азимутального (БТА). Для изучения статистик *PWV* возможных мест размещения *ESMT* в настоящей работе использованы данные Европейского центра среднесрочного прогноза погоды *ReAnalysis* (*ERA*-5, геодезических станций Глобальных Навигационных Спутниковых Систем (ГНСС) и метеостанций на новых астропунктах. Используемая нами методика получения значений *PWV* из данных реанализа *Era*-5 с учетом особенностей рельефа приведена в работе [10]. Низкие значения медианы *PWV* являются ключевым астроклиматическим условием для выбора места для расположения ММ/субММ телескопа, они определяют принципиальную возможность субММ наблюдений. В возможных местах размещения *ESMT* также важны статистики облачности, водозапаса облаков, осадков, скорости ветра, показатели турбулентности и атмосферное разрешение (*seeing*), под которым обычно понимают полуширину длинноэкспозиционного изображения точечного источника на крупном телескопе в условиях реальной атмосферы.

Ранее в работе [11] на 5 сайтах Северного Кавказа и Крыма выполнена валидация *PWV*, полученного по данным реанализа *ERA*-5, с помощью ГНСС метода. В работе [12] описаны методы и инструменты, используемые для измерения и оценки непрозрачности атмосферы, включая специальные радиометрические системы для измерения яркости неба. Обсуждается оценка осаждаемого водяного пара на основе таких измерений с помощью искусственной нейронной сети. В работе [13] выполнена валидация данных *ERA*-5, ГНСС метода и радиометра водяного пара (РВП) ИПА РАН с помощью данных радиозондирования. Результаты изучения оптической толщи в обсерватории Пик Терскол с помощью реанализа *ERA*-5 и модели *Molier* на частотах 100 ГГц, 150 ГГц и 225 ГГц приведены в работе [14]. В работе [10] показано что восточная часть Северного Кавказа имеет неоспоримые астроклиматические преимущества в сравнении с западной. В работе [2] приведены первые результаты изучения астроклимата г.Курапдаг в Агульском районе Дагестана. В работе [3] сообщается о первых результатах измерения оптической толщи атмосферы в восточной части Северного Кавказа

радиометрическим методом. В работе [15] сделаны статистические оценки содержания водяного пара и оптической толщи по данным реанализа *Era*-5 и радиозондирования применительно к миллиметроволновым радиотелескопам.

1. Статистические характеристики *PWV* на новых астропунктах Евразии, полученные ГНСС методом

С целью оценки осажденного водяного пара по данным ГНСС станций применялся стандартный подход, основанный на расчете задержки принимаемого сигнала с созвездия спутников. Обработка фазовых измерений задержки сигнала с двухчастотных ГНСС приемников [16] проводилась с помощью методик, реализованных в пакете программ *GAMIT*/*GLOBK* [17], в дальнейшем значения *PWV* корректировались с помощью модели, описанной в работе [18]. Применение ГНСС метода основано на линейной зависимости *PWV* от влажной составляющей задержки ГНСС сигнала *ZWD*:

$$PWV = \Pi \cdot ZWD, \tag{1}$$

где $ZWD = ZTD - ZHD$, ZTD – измеренной значение полной задержки, ZHD – гидростатическая задержка в зените (вычисляемая по метеопараметрам). Коэффициент пропорциональности Π определяется константами рефракции и средневзвешенной температурой атмосферного водяного пара T_m, при этом профиль температуры $T(z)$ интегрально “взвешивается” профилем парциального давления водяного пара $p_w(z)$.

В таблице 1 приведены координаты ГНСС станций, установленных на существующих и новых астропунктах северо-восточной Евразии. Статистики *PWV*, полученные ГНСС методом в 2022-2024 гг. приведены в таблицах 2-9. Новые астропункты расположены на Северном Кавказе (СК) и также, в Сибири, в Саянах и на Алтае. Для сибирских регионов характерен длинный зимний период с отрицательными температурами воздуха и низким влагосодержанием атмосферы, на СК отмечается более короткий зимний период с низким влагосодержанием. При этом циклоны и антициклоны вносят кратковременные изменения в климатические условия, но зимний сибирский антициклон обычно

носит устойчивый характер. В результате из таблиц видны низкие средние значения *PWV* на новых сибирских астропунктах в долгий зимний период (октябрь-апрель). На рис. 1 приводятся изменения часовых значений *PWV* на разных астропунктах в феврале-апреле 2024 г. На рис. 2 показано существенное уменьшение *PWV* на пике Хулугайша 20-21 мая 2024 г. с высотой. Обратим особое внимание что медиана *PWV* опускается на пике Хулугайша ниже 2 мм ночами в апреле – наиболее интересном месяце для *EHT*. Низкие значения *PWV* характерны для астропункта г. Курапдаг (3778 м) в Агульском районе Дагестана, однако по результатам проведенных экспедиций и метеоданным беспокойство вызывает ветровой режим на всем южном склоне Самурского хребта с регулярными сильными порывами ветра со скоростью более 30 м/с, что вызывало значительные технические трудности на этапе изучения астроклимата. Размещение субММ телескопа в таком месте требует, как минимум, применения радиопрозрачного укрытия (РПУ) что является непростой технической задачей с учетом размеров *ESMT* и интересующего диапазона длин волн. Поэтому в настоящее время ведется поиск альтернативного места в Агульском районе Дагестана за пределами Самурского хребта с более спокойным ветровым режимом [19]. При этом даже в случае возникновения необходимости применения РПУ для *ESMT* оно может быть существенно более бюджетным и эффективным.

Таблица 1. ГНСС станции.

	Код	Долгота, °в.д	Широта, °с.ш.	Высота, м	Описание
1	KRDG	47.3832565	41.7910201	3547.964	ИНАСАН, АП г. Курапдаг, Дагестан
1	TRSK	42.5004671	43.2749828	3121.885	ГАИШ, обсерватория Пик Терскол
2	KBAL	42.6684192	43.7367194	2123.988	КГО ГАИШ
3	KISL	42.6629375	43.7416736	2095.331	КГО ГАИШ
4	BTAA	41.4454944	43.6459647	2101.587	БТА САО РАН
5	ZECK	41.5650723	43.7883948	1166.303	РАО Зеленчуксая ИПА РАН
6	HLGS	100.9974116	51.7426877	2766.232	ИНАСАН АП Хулугайша, Саяны
7	X901	89.1918833	49.7180681	2069.296	ИНАСАН АП Ташанта, Алтай

Таблица 2. Астропункт на г. Курапдаг в Дагестане (KRDG). Из-за технических сложностей в 2023 г ГНСС оборудование на астропункте работало только 26 суток с 10 июля по 4 августа. Представлены минимальные, максимальные значения *PWV* и среднее, медиана, СКО, (кумулятивная) невязка определения *PWV* для всего месячного интервала (A), в ночное (N, 00:00-05:00) и дневное (D, 13:00-19:00) время.

T	MIN	MAX	СРЕДНЕЕ, мм			МЕДИАНА, мм			СКО, мм			δPWV, мм		
	мм	мм	A	N	D	A	N	D	A	N	D	A	N	D
7	0.0	14.0	5.1	5.0	5.4	4.9	4.0	5.2	3.4	4.0	3.1	1.3	1.5	1.2
8	2.8	13.5	7.4	7.7	7.2	7.1	8.7	6.9	2.5	2.6	2.3	2.1	2.1	1.9

Таблица 3. Обсерватория пик Терскол, ГАИШ МГУ (TRSK).

T	MIN	MAX	СРЕДНЕЕ, мм			МЕДИАНА, мм			СКО, мм			δPWV, мм		
	мм	мм	A	N	D	A	N	D	A	N	D	A	N	D
3	0.0	10.1	3.1	3.1	3.2	3.1	2.9	3.2	1.9	1.9	1.9	1.0	1.1	1.0
4	0.0	12.4	4.3	4.1	4.6	4.0	3.8	4.4	2.5	2.5	2.5	0.9	1.0	0.9
5	0.0	16.9	6.0	5.6	6.5	5.8	5.5	6.4	2.6	2.6	2.5	1.0	1.1	0.9
6	0.0	16.7	8.0	7.5	8.7	7.9	7.6	8.6	2.9	2.8	2.7	1.2	1.3	1.2
7	0.3	19.3	8.7	7.9	9.9	8.6	7.5	10.1	3.2	3.3	2.7	1.3	1.4	1.2
8	0.0	20.7	9.3	8.4	10.6	9.5	8.5	10.9	3.7	3.7	3.3	1.4	1.5	1.3
9	0.1	16.7	6.7	6.2	7.6	6.6	6.0	7.5	3.0	3.1	2.8	1.3	1.4	1.3
10	0.0	14.0	5.2	5.1	5.6	5.2	5.0	5.5	2.4	2.5	2.4	1.0	1.1	1.0
11	0.0	10.4	3.5	3.5	3.5	3.2	3.1	3.4	2.1	2.2	2.1	1.1	1.2	1.1
12	0.0	12.5	3.2	3.3	3.2	2.8	2.9	2.8	2.1	2.1	2.1	1.0	1.0	1.0

Таблица 4. Кавказская горная обсерватория ГАИШ МГУ (KBAL).

T	MIN	MAX	СРЕДНЕЕ, мм			МЕДИАНА, мм			СКО, мм			δPWV, мм		
	мм	мм	A	N	D	A	N	D	A	N	D	A	N	D
1	0.1	9.2	3.2	3.1	3.3	2.8	2.9	2.9	2.0	1.9	2.1	1.1	1.2	1.1
2	0.0	10.6	4.4	4.5	4.5	4.4	4.4	4.6	2.2	2.2	2.3	1.1	1.4	0.9
3	0.0	9.4	4.3	4.0	4.7	4.2	3.7	4.6	2.1	2.3	1.9	1.2	1.6	1.1
4	1.4	16.1	8.3	7.5	9.6	8.1	7.6	9.4	2.9	2.4	2.9	1.2	1.4	1.2
5	2.6	21.4	8.7	7.9	9.5	8.5	7.7	9.1	2.8	2.7	2.7	1.1	1.0	1.0
6	11.8	19.7	15.4	15.1	16.6	15.7	15.6	16.7	2.1	2.7	1.1	1.2	1.3	1.4
7	3.5	24.4	12.9	11.5	14.9	12.4	10.1	14.3	4.4	4.5	3.8	1.4	1.4	1.4
8	3.3	29.2	14.2	12.7	15.8	13.5	12.5	15.3	4.3	3.9	4.4	1.0	1.1	1.0
9	0.1	21.9	10.3	9.7	11.4	10.3	9.5	11.2	4.1	4.0	4.4	1.1	1.0	1.1
10	0.1	15.6	6.9	6.7	7.1	7.0	7.2	7.3	3.9	3.8	4.2	0.9	1.0	0.9
11	0.0	13.5	4.5	4.1	4.9	4.3	3.6	4.9	3.2	3.0	3.4	0.8	0.9	0.9
12	0.0	9.9	5.0	5.2	4.8	5.2	5.4	5.1	2.1	2.0	2.3	0.7	0.8	0.6

Таблица 5. ГАИШ МГУ (KISL).

T	MIN	MAX	СРЕДНЕЕ, мм			МЕДИАНА, мм			СКО, мм			δPWV, мм		
	мм	мм	A	N	D	A	N	D	A	N	D	A	N	D
1	0.0	13.5	4.7	4.8	4.7	4.6	4.7	4.7	2.2	2.2	2.2	0.9	1.0	0.9
2	0.0	17.9	5.2	5.1	5.3	5.1	5.1	5.3	2.5	2.5	2.5	1.1	1.2	1.1
3	0.0	14.2	5.7	5.5	6.0	5.6	5.3	6.0	2.6	2.6	2.6	1.2	1.3	1.2
4	0.1	16.8	7.7	7.1	8.5	7.5	6.9	8.3	2.9	2.8	2.9	1.1	1.2	1.1
5	0.2	23.7	11.4	10.6	12.5	11.3	10.4	12.4	3.3	3.3	3.2	1.1	1.2	1.1
6	4.2	25.7	15.0	14.0	16.5	15.0	14.2	16.4	3.7	3.5	3.4	1.4	1.5	1.4
7	4.0	31.4	15.9	14.8	17.6	15.9	14.6	17.8	4.2	4.1	3.8	1.2	1.3	1.1
8	2.6	27.9	15.3	14.2	17.0	15.4	14.3	17.7	4.7	4.4	4.6	1.1	1.2	0.9
9	1.7	24.8	11.8	11.1	12.9	11.6	10.8	12.9	3.8	3.9	3.6	1.4	1.5	1.3
10	0.2	21.5	9.3	9.0	9.8	9.2	8.9	9.7	3.4	3.3	3.4	1.2	1.3	1.2
11	0.1	16.3	6.3	6.3	6.4	6.1	6.0	6.2	2.7	2.7	2.7	1.1	1.1	1.1
12	0.0	14.5	5.6	5.7	5.5	5.4	5.6	5.4	2.5	2.5	2.5	1.1	1.3	1.1

Таблица 6. Росреестр, САО РАН (ВТАА).

T	MIN	MAX	СРЕДНЕЕ, мм			МЕДИАНА, мм			СКО, мм			δPWV, мм		
	мм	мм	A	N	D	A	N	D	A	N	D	A	N	D
1	0.0	9.0	3.3	3.3	3.4	3.1	3.1	3.1	2.1	2.0	2.1	0.9	1.0	0.9
2	0.0	10.2	4.6	4.7	4.6	4.4	4.4	4.6	2.3	2.2	2.4	0.7	0.8	0.7
3	0.0	10.6	4.5	4.0	5.0	4.4	3.8	4.8	2.2	2.3	2.2	0.7	0.8	0.7
4	2.2	19.8	8.4	7.4	9.6	7.9	6.9	9.0	3.7	3.2	3.9	1.0	1.0	1.0
5	1.5	17.2	9.0	8.1	10.1	9.0	8.1	10.2	3.0	3.2	2.8	0.8	0.9	0.8
6	2.5	19.3	13.1	12.0	14.7	13.6	13.3	15.0	3.1	3.6	2.5	1.6	1.7	1.6
7	0.7	22.4	13.1	11.2	15.5	12.9	10.4	15.5	4.4	4.6	3.5	1.4	1.5	1.6
8	4.6	26.3	14.7	12.4	17.5	14.4	11.9	17.3	4.7	4.2	4.0	1.2	1.3	1.3
9	0.5	22.4	11.0	9.8	12.4	10.8	9.7	12.3	4.3	4.0	4.3	1.2	1.2	1.2
10	0.1	16.4	7.1	7.0	7.4	7.1	7.3	7.2	4.0	3.7	4.3	1.0	1.1	1.0
11	0.0	13.3	4.8	4.6	5.1	4.7	4.0	5.3	3.3	3.2	3.4	1.0	1.1	1.0
12	0.0	11.1	4.8	4.9	4.8	4.8	4.9	4.6	2.5	2.5	2.4	0.8	1.0	0.7

Таблица 7. РАО Зеленчукская (ZECK).

T	MIN	MAX	СРЕДНЕЕ, мм			МЕДИАНА, мм			СКО, мм			δPWV, мм		
	мм	мм	A	N	D	A	N	D	A	N	D	A	N	D
1	0.0	16.4	5.3	5.3	5.3	5.1	5.0	5.1	2.7	2.7	2.7	0.9	1.0	0.8
2	0.0	19.4	5.9	5.8	6.0	5.8	5.7	5.8	2.9	2.9	3.0	1.0	1.2	0.9
3	0.0	17.5	7.1	6.9	7.4	7.1	6.9	7.5	3.2	3.2	3.1	0.9	1.0	0.8
4	0.0	27.7	9.9	9.4	10.7	9.8	9.2	10.7	3.8	3.6	3.8	1.0	1.1	0.9
5	0.4	30.2	15.2	14.3	16.6	15.0	14.1	16.3	4.3	4.0	4.2	1.1	1.2	1.0
6	4.8	36.6	20.5	19.1	22.6	20.5	19.2	22.7	4.8	4.5	4.5	1.1	1.2	1.0
7	0.7	39.1	22.8	21.5	25.1	22.7	21.2	25.2	5.4	5.1	5.0	1.2	1.4	1.2
8	5.8	40.6	22.6	21.3	24.9	22.9	21.4	25.3	5.8	5.4	5.7	1.2	1.4	1.2
9	2.0	35.9	17.2	16.5	18.7	16.9	16.0	18.7	5.0	4.9	4.9	1.1	1.3	1.0
10	0.2	30.1	12.2	12.0	12.8	12.0	11.8	12.7	4.4	4.4	4.5	1.0	1.1	0.9
11	0.0	20.2	7.7	7.7	7.9	7.3	7.3	7.5	3.5	3.5	3.5	1.1	1.2	1.0
12	0.0	21.1	6.4	6.4	6.4	6.2	6.3	6.2	3.1	3.1	3.0	1.0	1.1	0.9

Таблица 8. Месячные статистики PWV, вычисленные по ГНСС измерениям на пункте Хулугайша (HLGS) за период времени с 16 ноября 2023 по 24 июня 2024. Измерения в ноябре 2023 (11 месяц) и апреле 2024 (4 месяц) являются неполными. В декабре, январе измерения не проводились. Представлены минимальные, максимальные значения *PWV* и среднее, медиана, СКО, (кумулятивная) невязка определения *PWV* для всего месячного интервала (A), в ночное (N, 00:00-05:00) и дневное (D, 13:00-19:00) время.

T	MIN	MAX	СРЕДНЕЕ, мм			МЕДИАНА, мм			СКО, мм			δPWV, мм		
	мм	мм	A	N	D	A	N	D	A	N	D	A	N	D
1	0.1	7.0	2.6	2.4	2.7	2.1	1.8	2.3	1.8	1.8	1.8	1.0	1.1	0.9
2	0.0	6.0	2.8	2.8	2.8	2.8	2.7	2.8	1.4	1.4	1.4	0.8	0.7	0.8
3	0.0	6.1	2.5	2.6	2.6	2.6	2.7	2.7	1.3	1.3	1.3	0.8	0.8	0.8
4	0.0	6.9	2.4	2.2	2.7	1.9	1.9	2.4	1.9	1.9	2.1	1.8	1.2	1.3
5	0.0	15.1	7.4	7.2	8.0	7.1	7.0	7.6	3.1	3.5	2.7	1.3	1.1	1.4
6	2.3	18.0	8.9	8.2	9.6	9.1	8.7	10.0	3.1	3.1	3.0	3.3	3.4	3.4

Таблица 9. Месячные статистики *PWV*, вычисленные по ГНСС измерениям на пункте Ташанта (X901) за период времени с 9 мая 2023 по 29 июня 2024. Представлены минимальные, максимальные значения *PWV* и среднее, медиана, СКО, (кумулятивная) невязка определения *PWV* для всего месячного интервала (A), в ночное (N, 00:00-05:00) и дневное (D, 13:00-19:00) время.

T	MIN	MAX	СРЕДНЕЕ, мм			МЕДИАНА, мм			СКО, мм			δPWV, мм		
	мм	мм	A	N	D	A	N	D	A	N	D	A	N	D
10	0.1	13.4	6.3	6.0	6.4	6.3	6.1	6.3	2.7	2.7	2.7	0.9	0.8	0.9
11	0.1	10.7	5.4	5.2	5.6	5.6	5.3	5.7	2.3	2.3	2.3	0.8	0.8	0.8
12	0.0	9.6	3.8	4.0	3.8	4.0	4.3	4.0	2.2	2.2	2.3	0.8	0.7	0.8
1	0.0	7.5	3.3	3.2	3.4	3.2	3.0	3.3	1.6	1.5	1.6	0.8	0.8	0.8
2	0.0	6.8	2.9	2.9	2.8	3.1	3.0	3.1	1.5	1.4	1.6	0.8	0.8	0.8
3	0.1	8.8	3.8	3.6	3.7	3.7	3.6	3.8	1.8	1.5	1.8	0.9	0.8	0.9
4	0.0	12.6	5.9	5.9	5.9	6.1	5.9	6.0	2.5	2.4	2.6	0.9	0.8	0.8
5	2.3	19.6	9.3	9.1	9.5	9.1	9.0	9.2	3.3	2.9	3.6	1.1	1.1	1.0
6	3.6	25.9	12.2	12.8	11.8	11.6	12.3	11.3	4.3	4.6	4.1	1.2	1.1	1.2
7	5.5	26.1	13.5	13.8	13.6	13.3	13.5	13.1	3.1	3.4	2.8	1.1	1.2	1.1
8	4.9	21.3	13.5	13.7	13.3	13.5	13.8	13.3	3.3	3.2	3.7	1.2	1.3	1.1

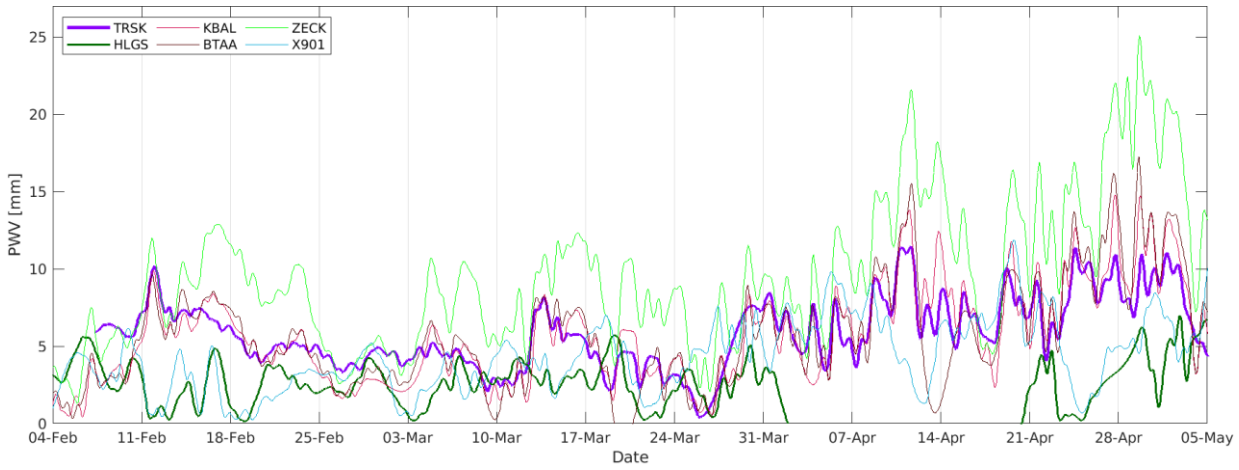

Рис. 1. Изменение часовых значений *PWV* на разных астропунктах, полученные ГНСС методом в феврале-апреле 2024 г.

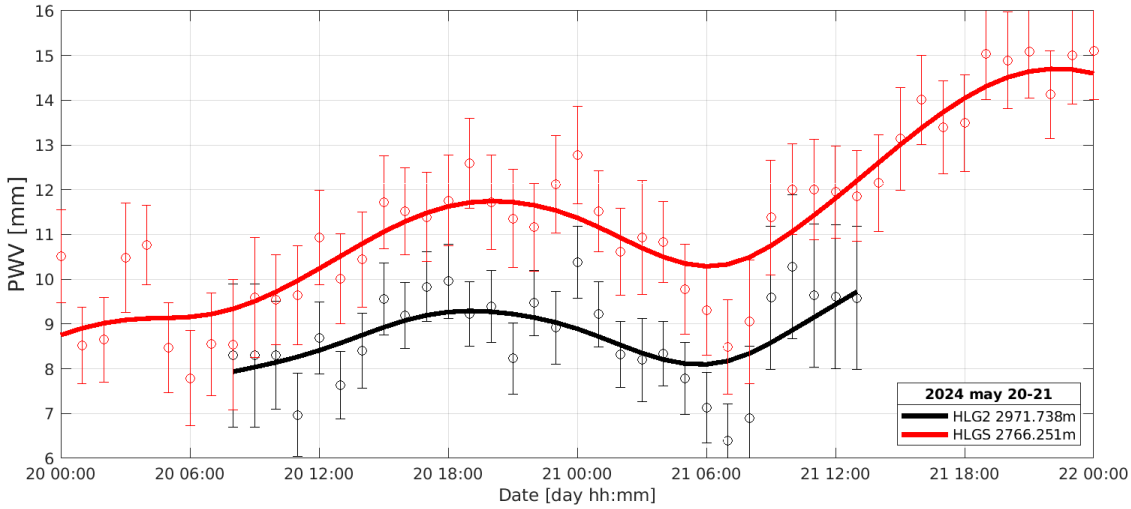

Рис. 2. Измерение часовых значений *PWV* двумя ГНСС станциями на пике Хулугайша 20-21 мая 2024 г.

2. Изменения часовых значений *PWV* на новых астропунктах по данным *Era*-5 и приземной влажности

Оптическая толща кислорода экспоненциально зависит от высоты, что отражает экспоненциальное распределение кислорода по высоте, указанная зависимость достаточно устойчива от температуры и определяется в основном давлением, однозначно связанным с высотой. Профиль влагосодержания атмосферы обычно более сложный, зависит от температурной инверсии и циклонов, однако в случае отсутствия температурных аномалий и внешних притоков влаги удельное влагосодержание атмосферы также экспоненциально падает с высотой. Поэтому в работе [20] предлагается оценивать интегральное влагосодержание атмосферы с помощью удельного влагосодержания приземного слоя по метеоданным с учетом экспоненциального зависимости распределения водяного пара по высоте. Это позволяет оценивать *W* как в текущий момент, так и в прошлом только по метеопараметрам и сравнивать ее с полученной *W* радиометрическим методом. При всех достоинствах такого простого метода нужно понимать его ограничения, связанные с возможным нарушением экспоненциальной зависимости в разное время суток, в различных климатических условиях и в разные сезоны что требует специального изучения.

Устойчивая экспоненциальная зависимость влагосодержания с высотой может оказаться полезным дополнением к другим методам оценки W по крайней мере в условиях антициклона. При наличии экспоненциальной зависимости удельное влагосодержание атмосферы описывается формулой:

$$W(h) = W_s e^{\frac{-h}{H_0}}, \quad (2)$$

где $W(h)$ – удельное влагосодержание на высоте h [мм/км], W_s – удельное влагосодержание в приземном слое [мм/км], H_0 – эффективная высота [км]. Интегрируя (2) по высоте получим интегральное влагосодержание атмосферы W или $PWV_{пв}$:

$$W = W_s H_0. \quad (3)$$

Для нахождения W_s удобно использовать формулу [21]:

$$W_s = 2.16 \frac{fE^s}{t + 273}, \quad (4)$$

где f [%] – относительная влажность воздуха, t – температура воздуха [ºС], E^s [мб] = 1.333 E^s [мм рт. ст.] – давление насыщенных паров воды при данной температуре. E^s [мм рт. ст.] можно найти из уравнения Антуана:

$$\log_{10} E^s = A - \frac{B}{t + C}, \quad (5)$$

где A, B, C – экспериментальные справочные параметры для паров воды: A = 8.07131, B = 1730.63, C = 233.426.

При наличии единого постоянного экспоненциального распределения удельного влагосодержания с высотой H_0 должна быть постоянной и составлять ~ 2 км, что требует проверки. Проверка заключается в построении зависимостей W_s от W для данного места в разное время года и в разное время суток. Разброс точек на графиках полученных зависимостей определяет отклонение от экспоненциальной зависимости удельного влагосодержания от высоты.

Наряду с локальными измерениями PWV ГНСС методом для независимой оценки сезонных изменений PWV мы использовали данные реанализа *Era*-5 и ранее предложенный и апробированный метод коррекции значений PWV, учитывающий рельеф местности [10]. На рис. 3 приведены изменения часовых

значений осажденного водяного пара в районе пика Хулугайша (высоты 2766 и 3000 м соответственно), полученные по данным *Era*-5 с июня 2023 г по июль 2024 г и более подробно мае 2024 г. приведены на рис. 4. Отдельно на рис. 5 и в таблице 10 показан период с 00 ч по 06 ч местного времени с 16 по 22 мая 2024 г. Анализ таблицы 10 показывает, что учет перепада высот дает большое различие между медианами *PWV*, в частности, разница между медианами *PWV* для ССО – пик Хулугайша (3000 м) за период с 11 по 22 мая достигала 2.3 мм.

Как видно из рис. 4-5 в мае 2024 г наблюдалась высокая переменность *W* в широком диапазоне значений. В этот период содержание водяного пара в атмосфере определялось выраженным низкочастотным атмосферным процессом, связанным с адвекцией воздушных масс с повышенным содержанием водяного пара. Указанная климатическая специфика характерна для теплых месяцев в районе пика Хулугайша с мая по сентябрь, когда астроклиматические условия для наблюдений в ММ/субММ диапазонах заметно ухудшаются.

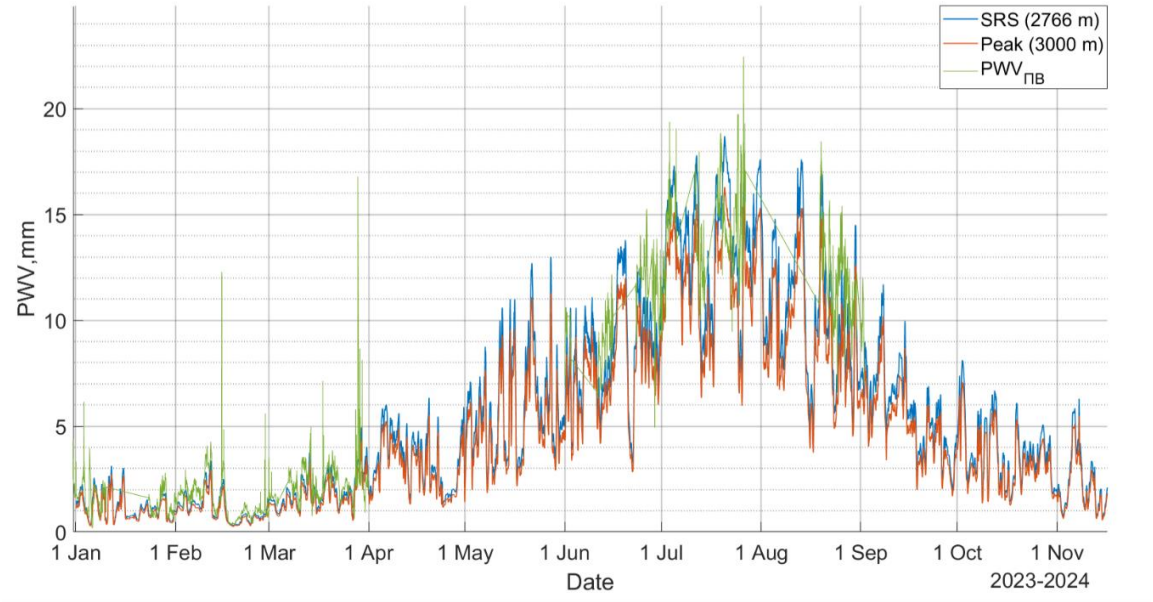

Рис. 3. Изменения часовых значений осажденного водяного пара на пике Хулугайша и СКЛ по данным реанализа *Era*-5 в 2023-2024 гг. и $PWV_{пв}$ по приземной влажности, резкие скачки $PWV_{пв}$ вызваны сбоями в работе температурного блока УЗ метеостанции.

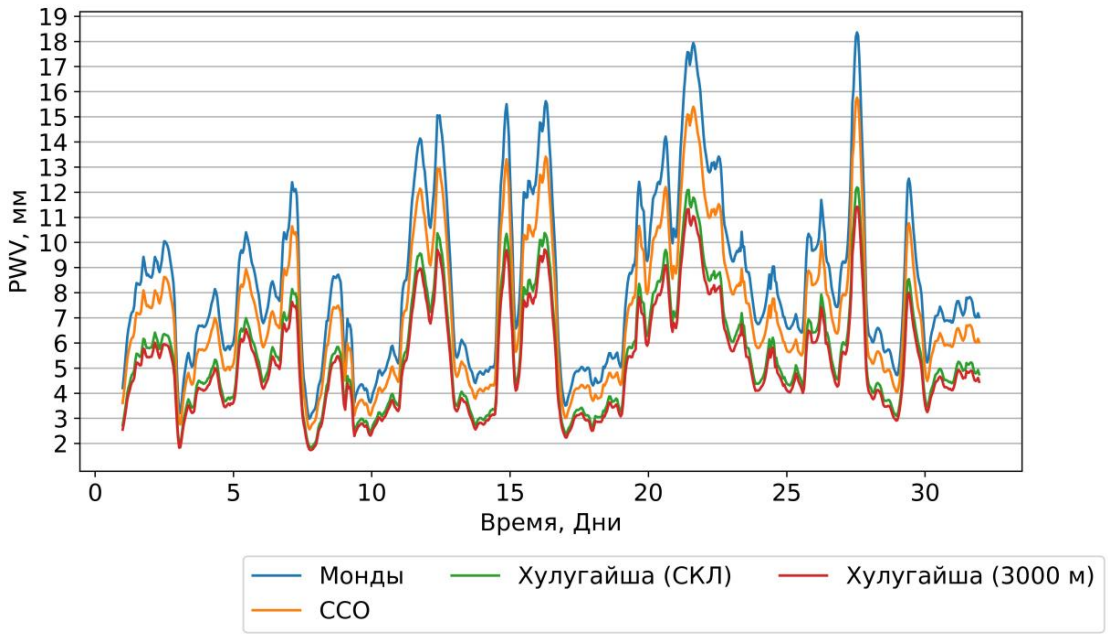

Рис. 4. Изменения часовых значений осажденного водяного пара для разных астропунктов в мае 2024 г., рассчитанных по данным реанализа *Era*-5. Выбранный временной период соответствует от 00 UTC 1 мая 2024 г. до 23 UTC 31 мая 2024 г.

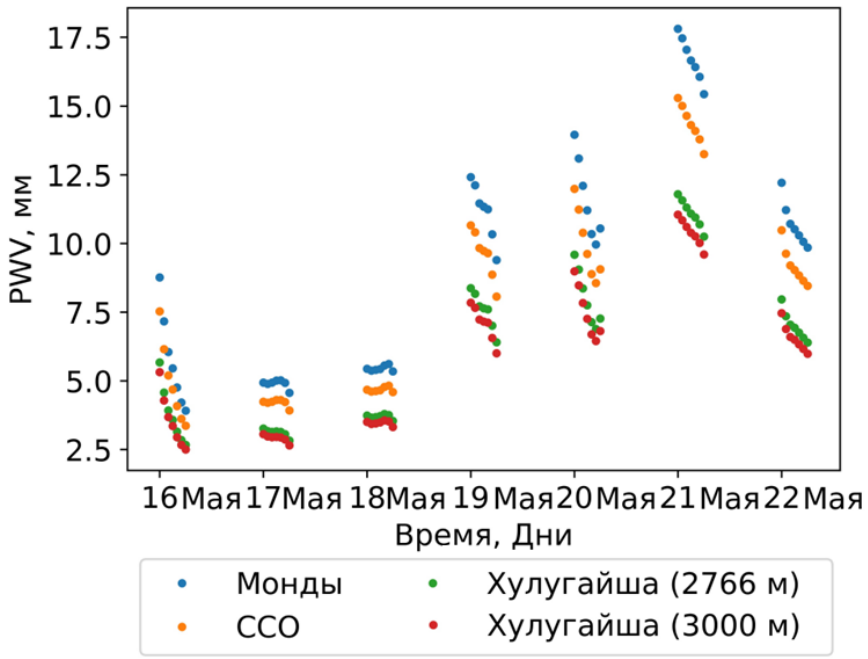

Рис. 5. Изменения часовых значений осажденного водяного пара для разных пунктов с 00 ч по 06 ч местного времени с 16 по 22 мая 2024 г., рассчитанных по данным реанализа *Era*-5.

Таблица 10. Медианные значения *PWV* для разных ночей в мае 2024 г. Рядом с названием пункта в скобках указана высота над уровнем моря.

Дата	16.05	17.05	18.05	19.05	20.05	21.05	22.05	16-22.05
п.Монды (1300 м)								
Медиана PWV, мм	5.7	4.9	5.4	11.4	11.7	16.9	10.6	10.1
ССО Монды (2000 м)								
Медиана PWV, мм	4.9	4.2	4.7	9.8	10.0	14.5	9.1	8.6
Хулугайша (СКЛ, 2766 м)								
Медиана PWV, мм	3.8	3.1	3.7	7.7	8.1	11.2	7.0	6.8
пик Хулугайша (3000 м)								
Медиана PWV, мм	3.5	3.0	3.5	7.2	7.5	10.5	6.5	6.3

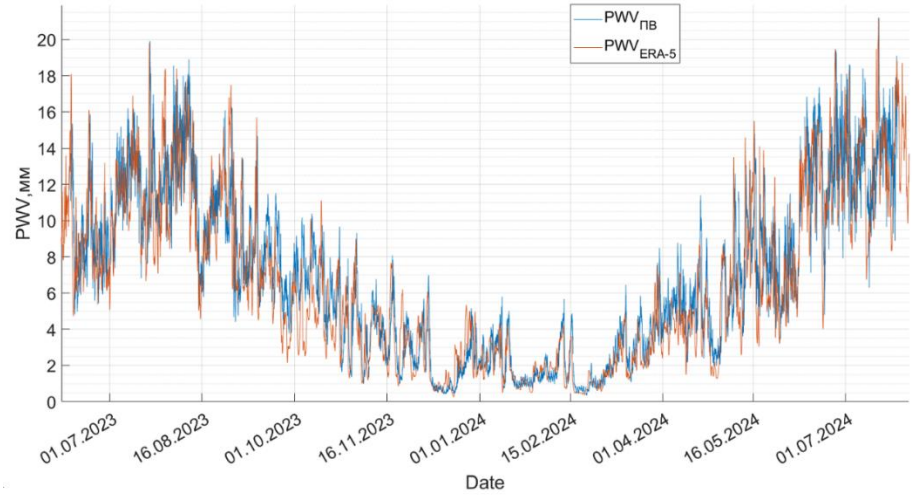

Рис. 6. Изменения часовых значений *W* по данным *Era*-5 и $PWV_{пв}$ по приземной влажности на АПП Ташанта в 2023-2024 гг.

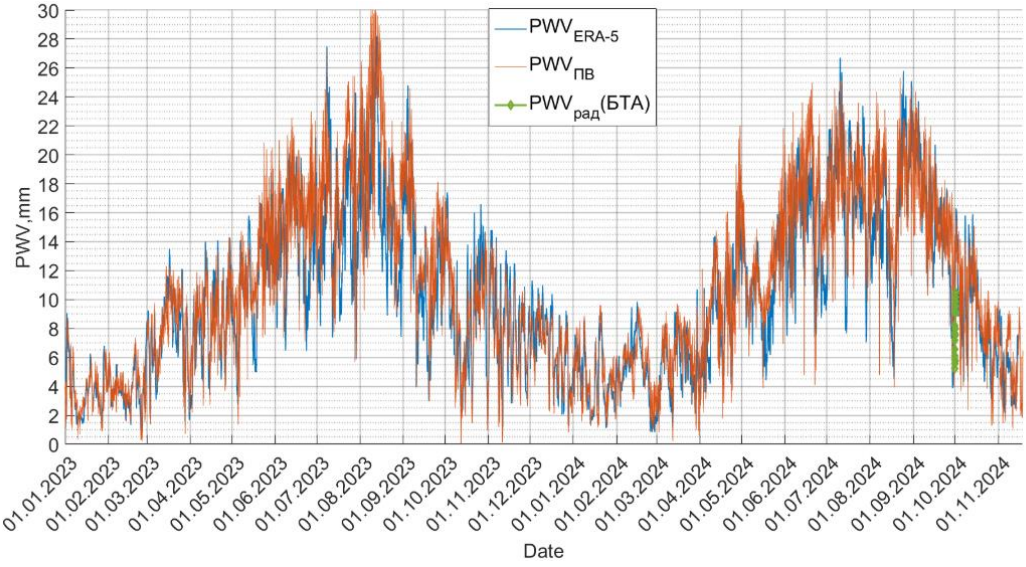

Рис. 7. Изменения часовых значений *W* по данным *Era*-5 и $PWV_{пв}$ по приземной влажности в районе расположения БТА в 2023-2024 гг и по данным пробных радиометрических измерений *PWV* ($PWV_{рад}$) двухканальным атмосферным радиометром ИПАР-2 в период 30.09.-1.10.2024 г.

На рис. 6 приведены изменения часовых значений W по *Era*-5 и $PWV_{пв}$ по приземной влажности на АПП Ташанта, которые также характеризуют высокое интегральное и удельное влагосодержание с мая по октябрь и низкое с ноября по апрель. Для сравнения на рис. 7 приведены изменения часовых значений W по данным *Era*-5 и $PWV_{пв}$ по приземной влажности для района расположения БТА. Из рис. 7 видно, что диапазон изменений часовых значений *PWV* в районе расположения БТА а несколько раз шире в сравнении с пиком Хулугайша и АПП Ташанта. Сравнение значений *PWV*, полученных по данным *Era*-5 и ГНСС методом показывает смещение *PWV* по ГНСС данным на 1-1.5 мм вверх что видно из выше приведенных таблиц и графиков и что также следует из работы [13].

Для новых и существующих астропунктов с помощью реанализа *Era*-5 были получены статистики *PWV* и *TCC* за 2018 г (ночи) (таблица 11), которые также показывают существенное преимущество новых астропунктов в сравнении с существующими по *PWV* и *TCC*.

Таблица 11. Медианные значения *PWV* и *TCC* в ночное время для новых и существующих астропунктов наблюдений по данным *Era*-5.

Сайт	Высота, м	PWV (ночи), мм		TCC (ночи)		Примечание
		Зима	Лето	Зима	Лето	
Суффа, Узбекистан	2400	2.7	8.7	0.6	0.32	2018 г., ночи
Акташтау, Узбекистан	3383	1.8	5.9	0.57	0.31	2018 г., ночи
ССО Монды, Саяны, РФ	2006	0.9	10.0	0.45	0.61	2018 г., ночи
Пик Хулугайша, Саяны, РФ	3015	0.6	6.8	0.44	0.6	2018 г., ночи
АПП Ташанта, Алтай, РФ	2200	1.2	11.9	0.37	0.51	2018 г., ночи
Пик Терскол, Эльбрус, РФ	3150	1.8	5.8	0.69	0.54	2018 г., ночи
г.Курапдаг, Дагестан, РФ	3724	1.4	6.5	0.44	0.35	2018 г., ночи
г.Шатджатмаз, Кисловодск, РФ	2096	3.6	9.0	0.59	0.56	2018 г., ночи
РАТАН-600, РФ	970	6.2	21.8	0.63	0.54	2018г., ночи
БТА, РФ Вершина горы Пастухова	2070 2732	3.9 3.7	12.9 12.2	0.67 0.62	0.55 0.52	2018 г., ночи 2018 г., ночи

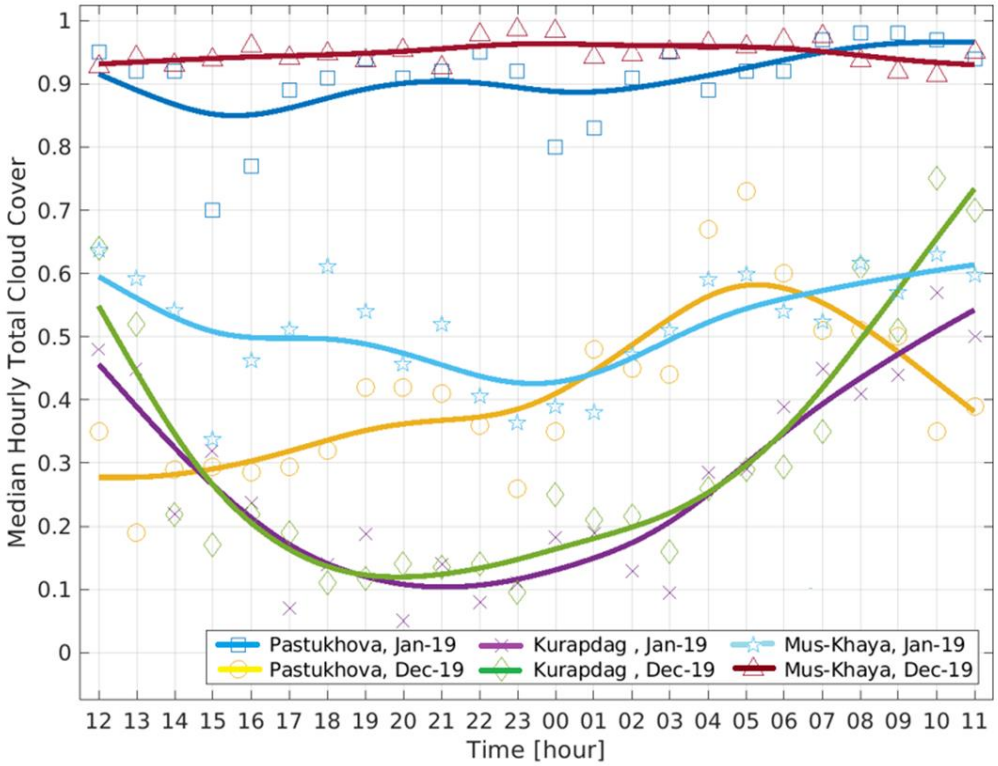

Рис. 8. Изменение почасовой медианы *TCC* на г. Пастухова, г. Курапдаг и г. Мус-Хая в течение суток в январе и декабре 2019.

Хороший астроклимат характеризуется не только низкой медианой *PWV* и *TCC*, но и их снижением в ночные часы, когда достигается наилучшее качество субММ изображений. Уменьшение *PWV* ночью обычно происходит из-за снижения температуры воздуха и такой суточный цикл характерен для большинства рассмотренных горных мест, включая астропункт сравнения БТА. Ночное снижение облачности нередко имеет место в горах, но также нередко встречается и повышенная ночная орографическая активность. На рис. 8 приведено изменение почасовой медианы *TCC* на г. Пастухова, г. Курапдаг и г. Мус-Хая в течение суток в январе и декабре 2019 г по данным *Era*-5. Из рис. 8 наряду с очень низкой медианой *TCC* на г. Курапдаг наблюдается значительное снижение *TCC* в ночные часы в январе и декабре 2019 г. Полученную нами статистику *TCC* для г. Пастухова подтверждает статистика наблюдений на БТА: в январе и декабре 2019 г наблюдения на БТА проводились, согласно отчету директора САО ОАН, в течение 110 и 210 часов соответственно что составило 26 % и 49 % возможного фактического времени наблюдений.

3. Первые результаты радиометрических измерений *PWV*

Комплексное исследование астроклиматических условий также предполагает измерение оптической тощи τ_λ в ММ диапазоне волн и радиометрического *PWV***.**

Радиометрический *PWV* в условиях ясного неба может быть получен по формуле:

$$W = \frac{\tau_\lambda - \alpha(\lambda)\cdot exp\left(\frac{-h}{h_0}\right)}{\beta(\lambda)}\tau_\lambda, \tag{6}$$

$$\tau_\lambda = ln\frac{\left(\frac{2.73}{T_{eff}} - 1\right)}{\left(\frac{T_b}{T_{eff}} - 1\right)}, \tag{7}$$

где τ_λ – интегральная оптическая толща атмосферы в зените [Нп] $\tau_\lambda = \tau_{\lambda z}\sin(90\text{-}z)$, z-зенитный угол. T_b – радиояркостная температура атмосферы, измеряемая радиометром под зенитным углом z, h – высота над уровнем моря (км), h_0 – характеристическая высота кислорода = 5.3 (км), α и β – коэффициенты удельного поглощения в кислороде и парах воды, T_{eff} – усредненная эффективная термодинамическая температура, температура равномерно нагретой атмосферы, дающей такое же Планковское излучение, что и атмосфера с реальным распределением температуры по высоте, T_{eff} может быть найдена взвешиванием высотного профиля температуры высотным профилем плотности водяного пара, которые можно получить из зондовых данных [22]:

$$T_{eff} = \frac{\int_0^H T(h)\rho(h)dh}{\int_0^H \rho(h)}, \tag{8}$$

где $T(h)$ – температурный профиль атмосферы [К], $\rho(h)$ – профиль плотности водяного пара атмосферы [г/м^3].

Рис. 9. Процесс измерений *PWV* с помощью двухканального атмосферного радиометра ИПАР-2 из окна башни БТА 20.12.2024.

С августа 2024 г начат набор статистик радиояркостной температуры T_b, оптической толщи и радиометрического *PWV* в районе расположения ВТА и на новых астропунктах северо-восточной Евразии с помощью двухканального атмосферного радиометра ИПАР-2 с калибровкой термостатируемого прибора на чернотельной нагрузке при комнатной температуре и температуре жидкого азота перед циклом измерений в АКЦ ФИАН. На рис. 9 показан процесс измерений оптической толщи и радиометрического *PWV* из окна башни БТА с помощью ИПАР-2. В настоящее время завершается разработка новой автоматизированной версии ИПАР-2А, которая ускорит процесс набора статистики результатов радиометрических измерений [19].

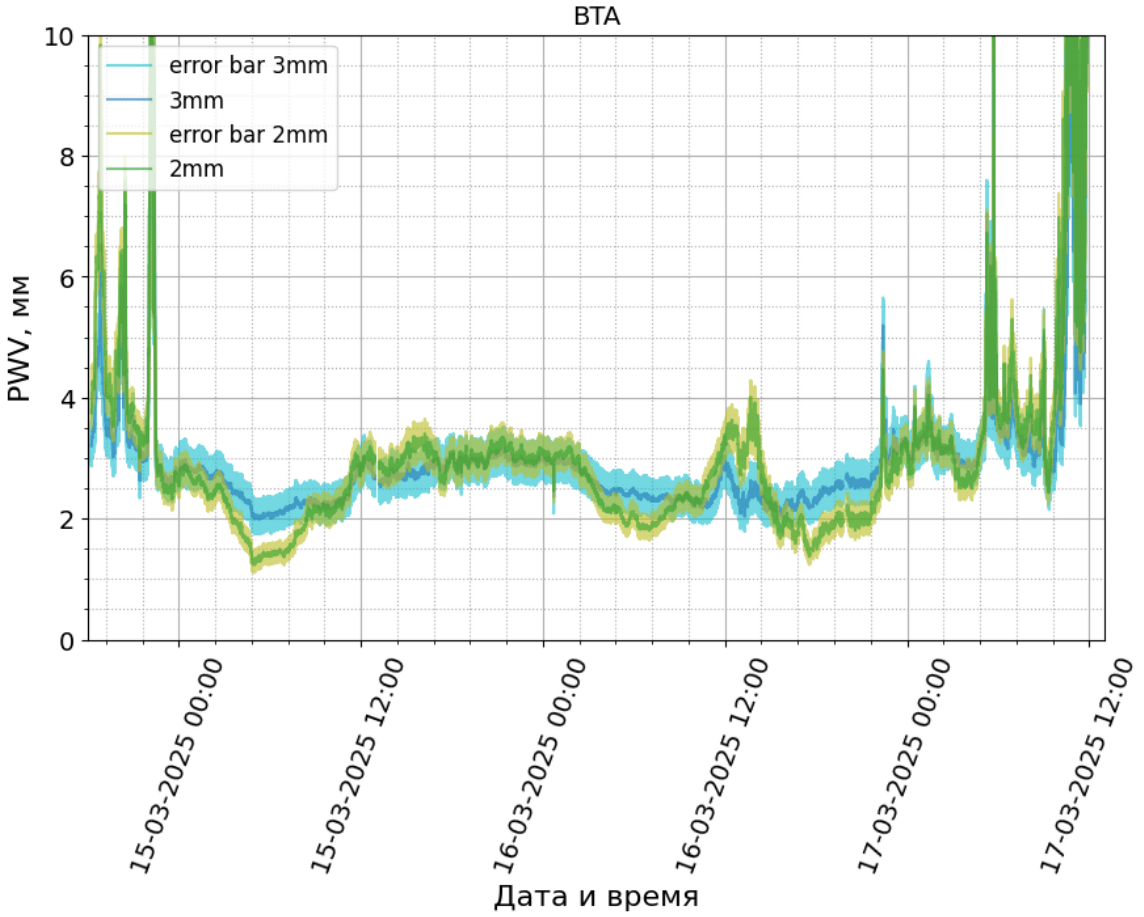

Рис. 10. *PWV* в зените, полученный из окна башни БТА 14-17.03.2025.

На рис. 10 приведен *PWV* в зените, полученный из окна башни БТА 14-17.03.2025. Высотные профили температуры и влажности $T(h)$ и $\rho(h)$ для нахождения T_{eff} определялись нами по радиозондовым данным ближайшей аэрологической станции Минеральные воды. Коэффициенты удельного поглощения в кислороде α и парах воды β для расчета W на высоте БТА получены нами ранее в работе [14] с помощью модели поглощения *MOLIERE* с базой данных *JPL*. Модель *MOLIERE* включает в себя модель переноса миллиметрового и субмиллиметрового излучения в условиях ясного неба и разработана под задачи измерений с применением различных приемных устройств. Достаточно низкие значения $PWV = 2\text{-}3 \pm 1$ мм для середины марта, приведенные на рис. 10, соответствуют сухой и ясной погоде установившейся в районе расположения БТА в данный период.

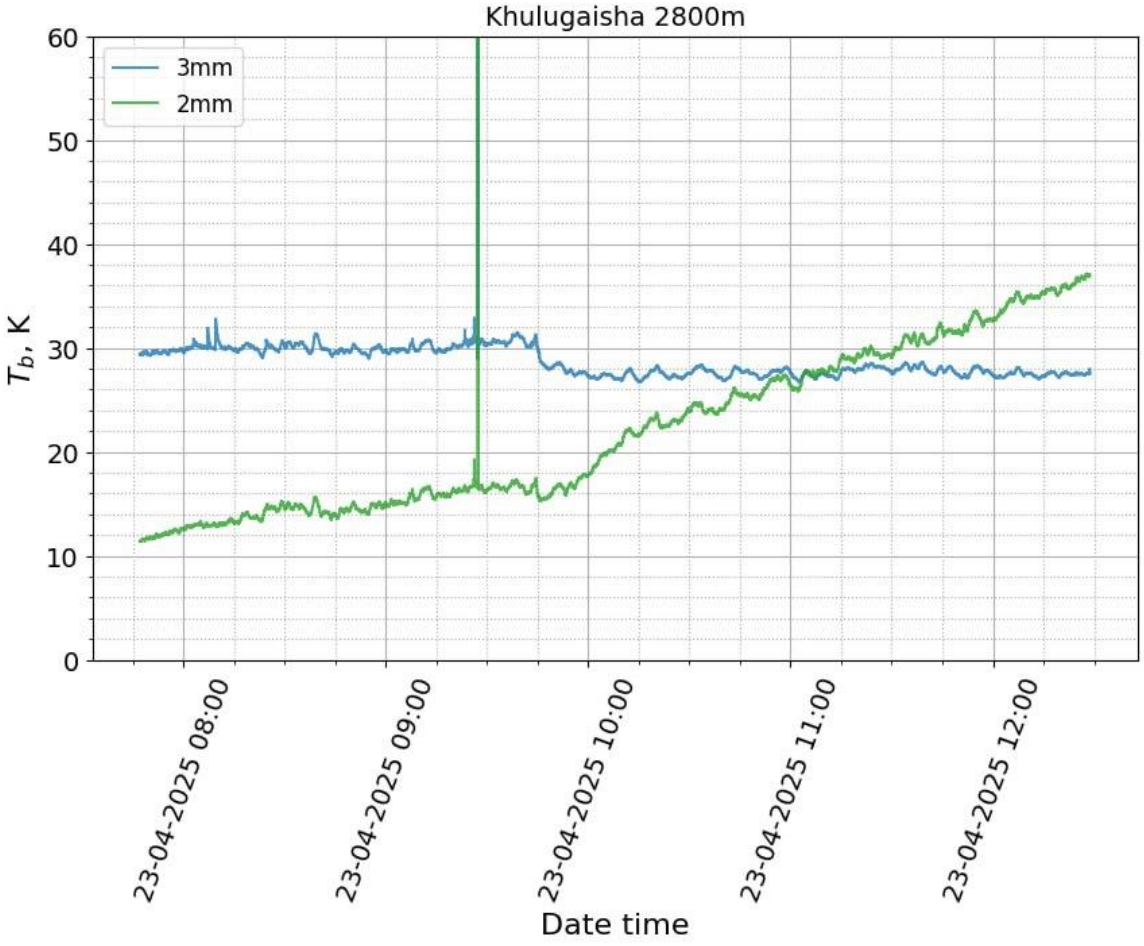

Рис. 11. Инверсия T_b на пике Хулугайша 23 апреля 2025 г. Резкий скачок T_b вызван накрытием рупоров ИПАР-2 абсорбером.

На рис. 11 приведен случай значительной инверсии T_b на волне 3 мм и 2 мм в течение 3 часов в первый день радиометрических измерений с помощью ИПАР-2 на пике Хулугайша 23 апреля 2025 г. Подобная инверсия радиояркостных температур атмосферы возможна лишь при $PWV \sim 1$ мм. Приведенный случай сразу демонстрирует астроклиматическую перспективность данного сайта – ни одного случая инверсии T_b в районе расположения БТА пока зарегистрировать не удалось ни в октябре, ни в декабре ни в марте, но такие случае оказались нередкими на пике Хулугайша и они также были замечены в процессе первых радиометрических измерений в горном Дагестане в начале апреля 2025.

Заключение

Изучение статистик осажденного водяного пара на новых астропунктах Евразии пик Хулугайша, г. Курапдаг и АПП Ташанта с помощью ГНСС метода, по данным реанализа *Era*-5, по приземной влажности и первым радиометрическим измерениям показывает существенное астроклиматическое преимущество новых астропунктов в сравнении с существующими при том что общая облачность в них по данным *Era*-5 также существенно ниже.

Финансирование: Работа выполнена при поддержке гранта РНФ N23-72-00041.

Благодарности: Авторы выражают благодарность руководителю НПК Индустриальные геодезические системы (https://hive.geosystems.aero/) С.Д. Сорокину за активную помощь в установке ГНСС станций в сложных горных условиях, директору Ташантинской основной общеобразовательной школы Е.Б. Едильбаеву за помощь в организации астропункта в с. Ташанта.

Литература

1. Bubnov G.M. et al. Searching for new sites for THz observations in Eurasia // IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology. – 2015. – Т. 5. – №. 1. – С. 64–72.
2. Khaikin V. B. et al. A study of the astroclimate in the Dagestan mountains Agul region and at the Ali Observatory in Tibet as possible locations for the Eurasian SubMM Telescopes (ESMT) // Proc. Sci. – 2022. – Т. 425. – С. 72.
3. Балега Ю.Ю и др. Прямые измерения атмосферного поглощения излучения субтерагерцового диапазона волн на Северном Кавказе // Доклады Российской академии наук. 2022. Т. 502, № 1. С. 5–9. https://doi.org/10.31857/S2686740022010023
4. Rudakov K.I. et al. Low-noise sis receivers for new radio-astronomy projects // Radiophysics and Quantum Electronics. – 2019. – Т. 62. – С. 547-555.

5. Балега Ю.Ю и др. Сверхпроводниковые приемники для космических, аэростатных и наземных субтерагерцовых радиотелескопов // Известия вузов. Радиофизика. – 2020. – Т. 63. – №. 7. – С. 533–566.
6. Raymond A.W. et al. Evaluation of new submillimeter VLBI sites for the Event Horizon Telescope // The Astrophysical Journal Supplement Series. – 2021. – Т. 253. – №. 1. – С. 5.
7. Li J. et al. A 15-m Submillimeter-Wave Telescope (XSMT) and Its Development // 33rd IEEE International Symposium on Space THz Technology (ISSTT 2024), April 7-11, 2024.
8. Deng L. et al. Lenghu on the Tibetan Plateau as an astronomical observing site // Nature. – 2021. – Т. 596. – №. 7872. – С. 353–356.
9. Bi C. et al. Astroclimatic parameters characterization at Lenghu site with ERA5 products // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2024. – Т. 527. – №. 3. – С. 4616-4631.
10. Shikhovtsev A.Y. et al. Precipitable water vapor and fractional clear sky statistics within the Big Telescope Alt-Azimuthal region // Remote Sensing. – 2022. – Т. 14. – №. 24. – С. 6221.
11. Шиховцев А.Ю. и др. Статистический анализ содержания водяного пара на Северном Кавказе и в Крыму // Оптика атмосферы и океана. – 2022a. – Т. 35. – №. 1. – С. 67–73.
12. Zinchenko I.I. et al. Measurements and Evaluations of the Atmospheric Transparency at Short Millimeter Wavelengths at Candidate Sites for Millimeter- and Sub-Millimeter-Wave Telescopes // Applied Sciences. – 2023. – Т. 13. – №. 21. – С. 11706.
13. Хайкин В.Б. и др. Статистические характеристики осажденного водяного пара, оптической толщи и облачности в Северной части Евразии // Астрономический журнал, 2024a, том 101, № 2, с. 195–206.
14. Шиховцев А.Ю. и др. Оптическая толща атмосферы для пика Терскол по данным реанализа Era-5. // Оптика атмосферы и океана, N11, 2022b.

15. Shikhovtsev A.Y., Kovadlo P.G. Statistical estimations of the vapor content and optical thickness of the atmosphere using reanalysis and radiosonding data as applied to millimeter telescopes // Optika Atmosfery i Okeana. – 2024. – Т. 37. – №. 2. – С. 169-175.
16. Bevis M. et al. GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 1992. – Т. 97. – №. D14. – С. 15787-15801.
17. 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 // Journal of geophysical research: solid earth. – 2006. – Т. 111. – №. B2.
18. Herring T.A. et al. Introduction to GAMIT/GLOBK // Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts. – 2010. – Т. 400. – С. 401.
19. Хайкин В.Б., Домбек Е.М., Шиховцев А.Ю, Землянуха Павел М., Землянуха Петр М., Макоев Г.А., Назаров Г.П., Водзяновский Я.О., Худченко А.В. Первые результаты измерений пропускания атмосферы в местах расположения РАТАН-600, БТА и ЗТШ с помощью двухканального радиометра ИПАР-2 // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 5. https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.5.14
20. Clark T.A., Irwin G. Atmospheric Water Vapour at Mt. Kobau and Calgary and its Relevance to Infrared Astronomical Measurements // The Journal of the Royal Astr. Soc. of Canada. 67, N3 (522), 1973, p.142.
21. Бертенова О.Д. и др. О спектральной прозрачности и содержании пара над Памиром // Труды ГГО N237, 1979.
22. Fogarty W. Total atmospheric absorption at 22.2 GHz // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1975. – Т. 23. – №. 3. – С. 441-444.

Для цитирования:

Хайкин В.Б., Миронов А.П., Шиховцев А.Ю., Макоев Г.А., Водзяновский Я.О., Худченко А.В., Землянуха Павел М., Копылов Е.А. Статистики осажденного водяного пара на новых астропунктах северо-восточной Евразии // Журнал радиоэлектроники. – 2025. – №. 9. https://doi.org/10.30898/1684-1719.2025.9.4