



DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.7.14>

УДК: 520,16

СРАВНЕНИЕ АСТРОКЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ВОЗМОЖНЫХ МЕСТ РАЗМЕЩЕНИЯ ESMT В АГУЛЬСКОМ И КУЛИНСКОМ РАЙОНАХ ДАГЕСТАНА

**В.Б. Хайкин^{1,7}, А.Ю. Шиховцев³, Я.О. Водзяновский^{2,7}, И.В. Шалдырван¹,
М.Ю. Шиховцев^{3,8}, А.А. Леженин^{3,4}, В.С. Градов⁴, Г.А. Макоев^{1,7},
Павел. М. Землянуха⁵, Петр М. Землянуха⁵, А.В. Худченко^{2,6}**

**¹Специальная астрофизическая обсерватория РАН,
369167 Россия, Карачаево-Черкесская Республика, пос. Нижний Архыз**

**²Астрокосмический центр Физического Института им. П.Н. Лебедева РАН,
117997, Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32**

**³Институт солнечно-земной физики СО РАН,
664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а, а/я 291**

**⁴Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
630090, Россия, г. Новосибирск, проспект академика Лаврентьева, 6**

**⁵Институт Прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,
603950, Россия, г. Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46**

**⁶Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
125009, Россия, г. Москва, ул. Моховая, 11, корп. 7**

**⁷Институт астрономии РАН,
119017, Россия, г. Москва, ул. Пятницкая, 48**

**⁸Лимнологический институт СО РАН,
664033, Россия, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3, а/я 278**

Статья поступила в редакцию 12 октября 2025 г.

Аннотация. В последние годы в Российской Федерации ведется активный поиск и изучение астроклимата возможных мест размещения крупного миллиметрового/субмиллиметрового (ММ/субММ) телескопа, в том числе, в приложении к проекту Евразийских Субмиллиметровых Телескопов (ESMT).

С этой целью в 2021-2023 гг. были найдены подходящие места и организованы новые астропункты в северной Евразии: пик Хулугайша (Восточный Саян), г. Курапдаг в Агульском районе Дагестана и АПП Ташанта в межгорной котловине республики Алтай на границе с Монголией. В качестве опорной локации с целью сравнения астроклиматических характеристик используется астроплощадка Большого Телескопа Альт-Азимутального (БТА, г. Пастухова). Для новых астропунктов характерны достаточно низкие значения осажженного водяного пара и общей облачности. Данные метеорологических измерений свидетельствуют о высокой повторяемости слабых порывов приземного ветра в п. Ташанта и на пике Хулугайша, а также о регулярных порывах ветра выше 30 м/с в районе г. Курапдаг. В качестве альтернативы г. Курапдаг нами рассматривается г. Джуфудаг в Агульском районе и высокогорное плато Шунудаг в Кулинском районе Дагестана. В настоящей работе сравниваются астроклиматические условия на г. Джуфудаг и плато Шунудаг с г. Пастухова и другими астропунктами. Получены карты осажженного водяного пара, общей облачности и скорости порывов ветра на Северном Кавказе и его восточной части по данным реанализа Era-5. Для достижения большей детализации карт применена мезомасштабная модель WRF. Приводятся первые результаты измерений оптической толщи и осажженного водяного пара в районе расположения г. Джуфудаг и плато Шунудаг, полученные с помощью измерителя прозрачности атмосферы радиометрического ИПАР-2 в марте-апреле и июне 2025 г. Приведены первые результаты измерений метео параметров и углового размера атмосферных изображений на оптическом телескопе (*seeing*) в районе г. Джуфудаг с помощью УЗ метеостанции и оптического монитора Полярной звезды Поляр-2.

Ключевые слова: субмиллиметровый телескоп, астроклимат, осажженный водяной пар, оптическая толщина, общая облачность, ветровой режим, *seeing*, радиометрический метод, реанализ Era-5.

Финансирование: Разделы 1, 4, 5 настоящей работы выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-72-00041, разделы 2, 3.2, 3.4, 6.1-6.4 настоящей работы выполнены в рамках государственного задания САО РАН, утвержденного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, разделы 3.1 и 3.3. настоящей работы выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда № 24-72-10043, <https://rscf.ru/project/24-72-10043/>.

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

Введение

В последние годы в РФ ведется активный поиск и изучение возможных мест размещения крупного миллиметрового/субмиллиметрового (ММ/субММ) телескопа [1-7], в том числе, в рамках проекта Евразийских Субмиллиметровых Телескопов (ESMT) [5, 6]. В концепции проекта ESMT обоснована необходимость сооружения трех новых высокоэффективных мм/субмм радиотелескопов класса 15-21 м в Узбекистане на горе Акташтау (3282 м), выше плато Суффа (2400 м), в России (выше 3000 м над уровнем моря) и на Тибетском плато в КНР (выше 5000 м над уровнем моря). С этой целью в 2021-2022 гг. в РФ найдены возможные места и в 2023-2024 гг. в рамках проекта РФФ организованы новые астропункты в северо-восточной Евразии: на пике Хулугайша (Восточный Саян), г. Курапдаг в Агульском районе Дагестана, АПП Ташанта в межгорной (Чуйской) котловине республики Алтай на границе с Монголией, а также организован астропункт сравнения в месте расположения Большого Телескопа Альт-Азимутального (БТА). Ключевыми астроклиматическими показателями при выборе места размещения такого инструмента являются статистики оптической толщи (τ), осажденного водяного пара (PWV) и общей облачности (ТСС). Также важны статистики водозапаса облаков, осадков, скорости ветра, показатели атмосферной мелкомасштабной турбулентности и углового размера атмосферных изображений на оптическом телескопе (*seeing*).

Все три новых астропункта, выбранные по результатам детального изучения климата горных районов РФ и данным реанализа Era-5, в процессе измерений

показывают достаточно высокие астроклиматические характеристики, однако для г. Курапдаг оказалась характерна высокая повторяемость приземного ветра с порывами, достигающими 40-50 м/с. Высокие скорости приземного ветра и его порывов в значительной степени ограничивают возможности выбора астроплощадки для размещения будущего телескопа, а также изучения ее астроклимата. В качестве альтернативы г. Курапдаг нами рассматривается г. Джуфудаг, расположенная на границе Агульского района с Табасаранским, Хивским и Кайтагским районами в 30 км от г. Курапдаг и высокогорное плато Шунудаг в Кулинском районе Дагестана в 35 км от г. Курапдаг [9].

В настоящей работе рассматриваются астроклиматические условия на г. Джуфудаг (3015 м) в Агульском районе Дагестана и на высокогорном плато Шунудаг (2963 м) в Кулинском районе Дагестана. Проводится сравнение указанных мест между собой, а также с г. Курапдаг и районом расположения БТА (2070) на склоне г. Пастухова (2732 м) в КЧР, где холм “Семиродники” (2340 м) в работе [10] достаточно смело рассматривается как возможное место размещения ММ/субММ телескопа диаметром 15 м. В той же работе БТА предложено использовать в качестве симулятора субММ обсерватории.

Ранее в работе [1] 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. Результаты изучения оптической толщи атмосферы в обсерватории Пик Терскол с помощью реанализа Era-5 и модели MOLIERE на частотах 100 ГГц, 150 ГГц и 225 ГГц приведены в работе [11]. Различные методы измерения PWV сравниваются в работе [12]. Для достижения большей детализации пространственных распределений PWV и приземной скорости ветра в данной работе применена мезомасштабная модель WRF (Weather Research and Forecasting), использующая данные GFS (Global Forecast System) в качестве начальных и граничных условий [13]. В работе [14] дан обзор различных методов

и инструментов, используемых для измерения и оценки непрозрачности атмосферы, включая специальные радиометрические системы для измерения яркости неба. Обсуждается возможность оценки PWV на основе таких измерений с помощью искусственной нейронной сети.

Ниже приведены и анализируются карты PWV, TCC и скорости ветра в разные сезоны в местах сравнения по данным реанализа Era-5 и WRF, а также их медианные оценки на новых астропунктах и в местах расположения крупных ММ/субММ телескопов. По данным прогностических моделей атмосферы ICON (Integrated COSMO model), NEMSGLOBAL и атмосферного загрязнения SILAM (System for Integrated Modelling of Atmospheric Composition) построены гистограммы скорости порывов ветра, приведены прогнозы слоя облаков и осадков, даны оценки загрязнения и оптической плотности (прозрачности) атмосферы (ОПА) в местах сравнения. Приводятся первые результаты измерений оптической толщи и осажженного водяного пара в местах сравнения, уточняется методика и обсуждаются дальнейшие планы комплексного изучения астроклимата возможных мест размещения ESMT, включая измерение углового размера атмосферных изображений на оптическом телескопе (*seeing*).

1. Измерение оптической толщи атмосферы абсолютным радиометрическим методом

Радиометрические методы измерения оптической толщи τ и осажженного водяного пара PWV основаны на регистрации радиояркостной температуры атмосферы или ее разностей на различных зенитных углах в приближении плоскостой модели атмосферы. Для измерения оптической толщи атмосферы наиболее часто используется метод атмосферных разрезов [15], который не требует абсолютной калибровки, а измерения могут выполняться в относительных единицах. Абсолютный метод измерения τ используется реже, поскольку для него нужна точная температурная калибровка. Главными достоинствами абсолютного метода являются отсутствие необходимости сканирования атмосферы, получение

оптической толщи атмосферы в зените или на нужном угле и его устойчивость к метеоусловиям.

Наши измерения оптической толщи и PWV абсолютным методом показали, что, если температуры термостатирования радиометров во время полевых измерений и калибровки поддерживаются с высокой точностью, их калибровка сохраняется и можно обойтись только первичной (лабораторной) калибровкой радиометров без проведения вторичной калибровки радиометров в месте измерений. При этом как показано в работе [9] именно такой вариант калибровки радиометров предпочтителен, поскольку достичь необходимой точности вторичной калибровки в полевых условиях без применения жидкого азота не удастся.

В частности, измеряемая радиояркая температура атмосферы T_b может быть представлена в виде [9]:

$$T_b = \frac{1}{K}(V - V_0 - \Delta V) - 2,73e^{-\tau_\lambda}, \quad (1),$$

где K [В/К] – первичная (лабораторная) калибровка радиометра при заданной температуре термостата t_0 , V [В] – измеренное радиометром значение шума в зените, V_0 [В] – ожидаемое значение шума радиометра при чернотельной нагрузке, охлажденной до абсолютного нуля (получается продлением прямой первичной калибровки при азотной и комнатной температурах до 0), ΔV [В] – вклад, вызванный близким расположением зданий, сооружений и земли в процессе измерений T_b , которые могут попадать в боковые лепестки рупора. $\Delta V = V - V_{\min}$, $V_{\min}$ измеряется при удалении радиометра с рупором, направленным в зенит или под малым зенитным углом от зданий и сооружений, а также возвышением над землей настолько, чтобы дальнейшее удаление или возвышение не уменьшало $V_{\min}$. Последним членом в выражении (1) в первом приближении можно пренебречь, а учесть его вклад после того, как станут известными T_b и τ_λ . Заметим, что в случае высокой оптической толщи ослабленный поглощением атмосферы член, связанный с СМВ зануляется,

а при малой оптической толщине его нужно учитывать для достижения высокой точности измерений T_b .

Радиояркие температуры атмосферы в Кельвинах на интересующей нас волне λ в зените можно определить из уравнения переноса в приближении плоскостной модели атмосферы как:

$$T_{b\lambda} = [1 - e^{-\tau_\lambda}] T_{eff} + 2,73 e^{-\tau_\lambda}. \quad (2)$$

Откуда можно найти оптическую толщину атмосферы в зените и ее пропускание $e^{-\tau_\lambda}$:

$$\tau_\lambda = \ln \frac{\left(\frac{2,73}{T_{eff}} - 1 \right)}{\left(\frac{T_b}{T_{eff}} - 1 \right)}, \quad (3)$$

где 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 атмосферы высотным профилем плотности водяного пара, который можно получить из зондовых данных [16]:

$$T_{eff} = \frac{\int_0^H T(h) \rho(h) dh}{\int_0^H \rho(h) dh}, \quad (4)$$

где $T(h)$ – температурный профиль атмосферы [K], $\rho(h)$ – профиль плотности водяного пара атмосферы [г/м³].

С другой стороны, интегральную оптическую толщину τ_λ атмосферы можно определить как [17]:

$$\tau_\lambda = \alpha(\lambda) \cdot \exp\left(\frac{-h}{h_0}\right) + \beta(\lambda) \cdot W + \gamma(\lambda) \cdot Q, \quad (5)$$

$$\alpha(\lambda) = \frac{\tau_{O_2}(\lambda, h)}{\exp\left(\frac{-h}{h_0}\right)}, \quad \beta(\lambda) = \frac{\tau_{H_2O}(\lambda, h)}{\int_h^{h_0} \rho(h) dh}, \quad \gamma(\lambda) = \frac{\tau_Q(\lambda, h)}{\int_{h_1}^{h_2} M(h) dh}, \quad (6)$$

$$PWV = W = \int_0^\infty \rho(h) dh \quad (3), \quad Q = \int_{h_1}^{h_2} M(h) dh, \quad (7)$$

тогда для ясного неба:

$$\tau_\lambda = \alpha(\lambda) \cdot \exp\left(\frac{-h}{h_0}\right) + \beta(\lambda) \cdot W, \quad (8)$$

$$W = \frac{\tau_\lambda - \alpha(\lambda) \cdot \exp\left(\frac{-h}{h_0}\right)}{\beta(\lambda)}, \quad (9)$$

где τ_{H_2O} – оптическая толщина паров воды [Нп], τ_{O_2} – оптическая толщина кислорода [Нп], τ_Q – оптическая толщина жидкокапельной воды [Нп], h – высота над уровнем моря (км), h_0 – характеристическая высота кислорода = 5,3 (км), $h_2 - h_1 = L$ – толщина облака, PWV – количество осаждаемой воды (мм), $\rho(h)$ – высотный профиль влажности [г/м³], $M(h)$ – высотный профиль водности облака [кг/м³], Q – водозапас облаков [кг/м²]. Коэффициенты удельного поглощения в кислороде α [Неп], в парах воды β [Неп/мм] и в жидко-капельной воде γ [Неп × м²/кг] быстро растут с увеличением частоты, зависят от климатических условий и высоты места. Коэффициенты α , β и γ , связывающие оптическую толщину с PWV , вкладом кислорода и жидко-капельной воды можно рассчитать по моделям поглощения атмосферы с использованием высотных профилей метеорологических характеристик. Методика расчета заключается в интегрировании погонного поглощения в данном диапазоне волн по высотным профилям давления $P(h)$, температуры $T(h)$ и влажности $W(h)$.

Расчетные радиояркостные температуры ясной атмосферы T_b и τ_0 в зените приведены на рис. 1. В таблице 1 приведены коэффициенты α и β , полученные ранее по моделям MOLIERE и Liebe в работе [11], коэффициент γ , приведенный

в таблице 1 взят из работы [4]. Модель MOLIERE и ее модификации включают в себя модель переноса миллиметрового и субмиллиметрового излучения в условиях ясного неба, и она разработана под задачи измерений с применением различных приемных устройств [18].

Таблица 1. Усредненные значения коэффициентов α , β и γ на высоте 2000 м.

λ , мм	α , Неп		β , Неп/мм		γ , Неп м ² /кг
	Лето	Зима	Лето	Зима	
3	0,125	0,009	0,122	0,008	0,195
2	0,075	0,024	0,072	0,021	0,455

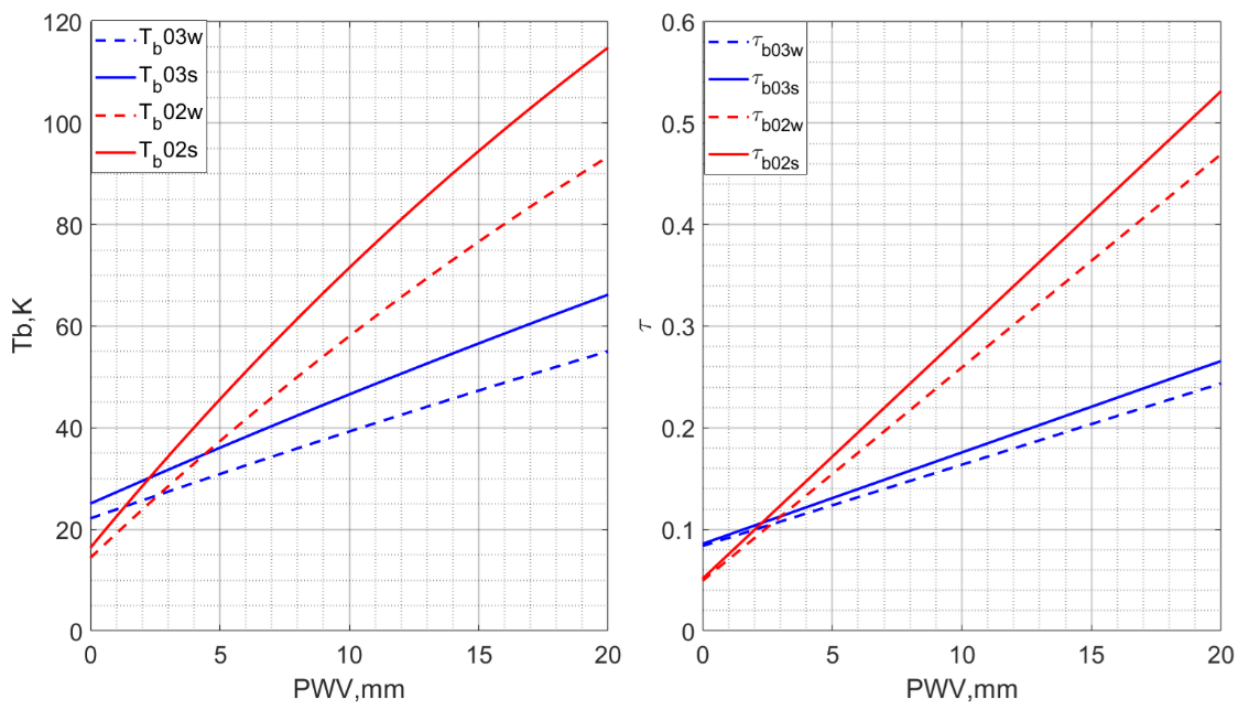


Рис. 1. T_b (слева) и τ [Неп] (справа) ясной атмосферы на высоте 2000 м $\lambda = 3$ мм и $\lambda = 2$ мм для зимы w (-20 °C) и лета s ($+20$ °C).

Обратим внимание на то, что, как видно из рис. 1, в случае ясной атмосферы при значениях $PWV = 2-3$ мм на высоте 2000 м (при значениях $PWV = 1-2$ мм на высоте 3000 м) наблюдается точка инверсии T_b , при облачной атмосфере инверсии не наблюдается. Поэтому месячная и годовая норма инверсий T_b может служить универсальной характеристикой качества астроклимата астропункта. Чем больше ясных дней и чем ниже PWV в месте расположения астропункта, тем выше вероятность повторяемости инверсий.

2. Места сравнения

В отличие от г. Курапдаг (рис. 2), входящей в состав Самурского хребта, простирающегося на 193 км с юго-запада на северо-восток и относящегося к системе Бокового хребта Большого Кавказа, г. Джуфудаг (рис. 3) входит в другой горный массив Малого Кавказа параллельный Самурскому хребту, а именно в хребет Джуфудаг (рис. 5), где нет столь мощной горно-долинной циркуляции ветра.



Рис. 2. Вершина г. Курапдаг (3721 м) в Агульском районе Дагестана.

Кроме того, г. Джуфудаг (3015 м) может быть защищена от ветров преимущественного юго-западного направления самим Самурским хребтом (максимальная высота 3837 м). В результате скорости порывов ветра на г. Джуфудаг очень редко превышают 25 м/с. Также, как будет показано ниже, г. Джуфудаг имеет хорошие показатели общей облачности, не хуже г. Курапдаг. Важным логистическим достоинством г. Джуфудаг является легкая доступность. Из ближайшего высокогорного с. Буршаг собственными силами жителей села по склону г. Джуфудаг проложена дорога длиной 8 км до высоты 2850 м (рис. 3-4), оставшаяся часть дороги длиной около 800 м также легко может быть проложена по склону горы.



Рис. 3. Гора Джуфудаг (3015 м) (слева),
вид на Самурский хребет с г. Джуфудаг (справа).



Рис. 4. Дорога на г. Джуфудаг из с. Буршаг.

Другим возможным кандидатом для места размещения ESMT является плато Шунудаг (рис. 6) является самым высокогорным плато Дагестана и РФ и самым крупным высокогорным плато Европы ($\sim 4.5 \times 2,5$ км). Склоны плато Шунудаг и г. Джуфудаг из-за умеренной сухости климата полностью лишены лесного покрова и на них произрастают в основном мелкоосоковые травы, однако достаточная близость лесных массивов Табасаранского района, расположенных на расстоянии 6-8 км от г. Джуфудаг (рис. 5) означает, что г. Джуфудаг находится недалеко от зоны повышенного влагосодержания на востоке. Согласно Розе ветров преимущественное направление ветра здесь западно-юго-западное (WSW) и влияние более влажных воздушных масс со стороны Табасаранского района, как и Каспия, минимально. Ближайшая к г. Джуфудаг граница леса проходит

на высоте 1800 м (рис. 5), что ниже обычной высоты, где растет в горах лес. Расстояние до крупных лесных массивов, расположенных на востоке от плато Шунудаг составляет более 20 км.

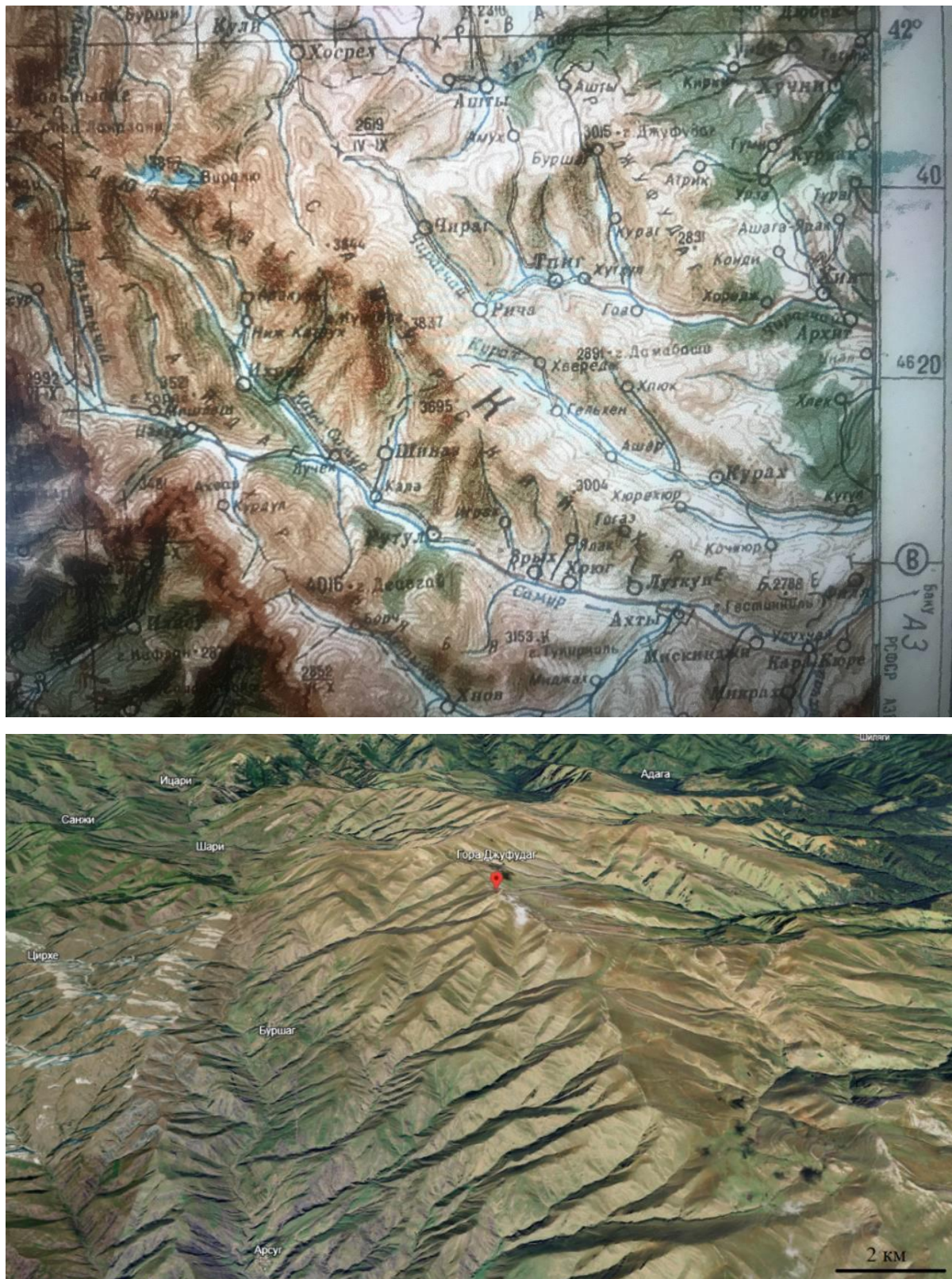


Рис. 5. Карта расположения Самурского хребта и хребта Джуфудаг (вверху) и рельеф г. Джуфудаг (внизу).



Рис. 6. Вид на высокогорное плато Шунудаг со склона г. Джуфудаг в Агульском районе Дагестана в марте 2025 г.



Рис. 7. Дорога в район плато Шунудаг из с. Цовкра-1.

Несмотря на то, что высота плато Шунудаг (2963 м) менее 3000 м, по ключевым астроклиматическим показателям оно может рассматриваться среди возможных мест размещения ESMT и других инструментов, в частности, компактных интерферометрических решеток ММ/субММ диапазона с базой до 4 км. Режим ветра плато Шунудаг более спокойный чем в районе г. Курапдаг. К плато Шунудаг проложена колхозная дорога из села Цовкра-1 длиной 10 км до высоты 2500 м (рис. 7), оставшейся части дороги до вершины плато Шунудаг длиной 4-5 км также может быть проложена, но в настоящий момент подъем на плато с конца дороги проходит по руслу реки с ледником и занимает не менее 1 часа. Логистическим достоинством плато Шунудаг является относительная близость к Махачкале (175 км), дорога на машине или маршрутке

из Махачкалы через с. Леваши до ближайших высокогорных сел занимает 3,5-4 часа. До ближайших сел к г. Джуфудаг дорога идет через Дербент и занимает около 5 часов (250 км). Между Махачкалой, Дербентом и ближайшими административными муниципальными центрами с. Хив и с. Тпиг регулярно ходят маршрутки.

3. Астроклиматические условия на Северном Кавказе

3.1 Осажденный водяной пар, скорость ветра и общая облачность в местах сравнения по данным реанализа Era-5

Для изучения статистик и пространственного распределения PWV, TCC и скорости ветра нами использованы данные Европейского центра среднесрочного прогноза погоды ECMWF ReAnalysis (Era-5). Era-5 – это глобальный набор данных реанализа, содержащий почасовые метеорологические данные с 1979 года по настоящее время с пространственным разрешением 31 км. Набор данных реанализа использует архивные спутниковые наблюдения и измерения метеостанций в сочетании с метеорологическими моделями для обеспечения глобально согласованного набора данных на разных уровнях атмосферы. При пространственном разрешении 31 км некоторые точки данных измерений и наблюдений находятся в одной ячейке сетки, в то время как большинство ячеек сетки не охвачены ни одной измерительной станцией. Для объединения наблюдений и создания глобального сеточного набора данных используется процесс ассимиляции данных.

Используемая нами методика уточнения значений PWV, полученным по данным реанализа Era-5, основана на учете особенностей рельефа, ее описание приведено в работе [11]. В частности, значения PWV уточнялись по формуле:

$$RWV = K_{ref} PWV_0 \exp\left(\frac{0.439\delta z}{1000}\right), \quad (10)$$

где PWV_0 – исходное значение содержания водяных паров в столбе атмосферы по данным реанализа Era-5, δz – относительная высота вершины горы

(относительно усредненной высоты ближайших узлов сетки реанализа Era-5 к вершине горы), K_{ref} – коэффициент пропорциональности, выбираемый на основе сравнения данных реанализа Era-5 с данными референсных измерений. Сравнение данных реанализа Era-5 с измерением значений PWV GNSS методом показало, что оптимальное значение $K_{ref} = 0,789$ для пика Терскол. Для нахождения K_{ref} можно также использовать данные ближайшей станции радиозондирования с учетом высоты данного места, т.е. интегрируя профиль влажности с учетом температуры, начиная с данной высоты.

На рис. 8 приведены усредненные карты PWV и TCC на Северном Кавказе зимой, полученные по данным реанализа Era-5. Пространственное распределение PWV уточнено с использованием формулы (10), с помощью которой корректируются значения осаждемого водяного пара для узлов сетки выше 1500 м. Как видно из рис. 8 справа плато Шунудаг и г. Джуфудог находятся в зоне низкой TCC в отличие от мест расположения БТА и Пика Терскол. При этом по данным визуальных наблюдений неба в с. Буршаг на склоне г. Джуфудог более 2/3 ночей оказались метеорологически ясными зимой и весной 2025 г.

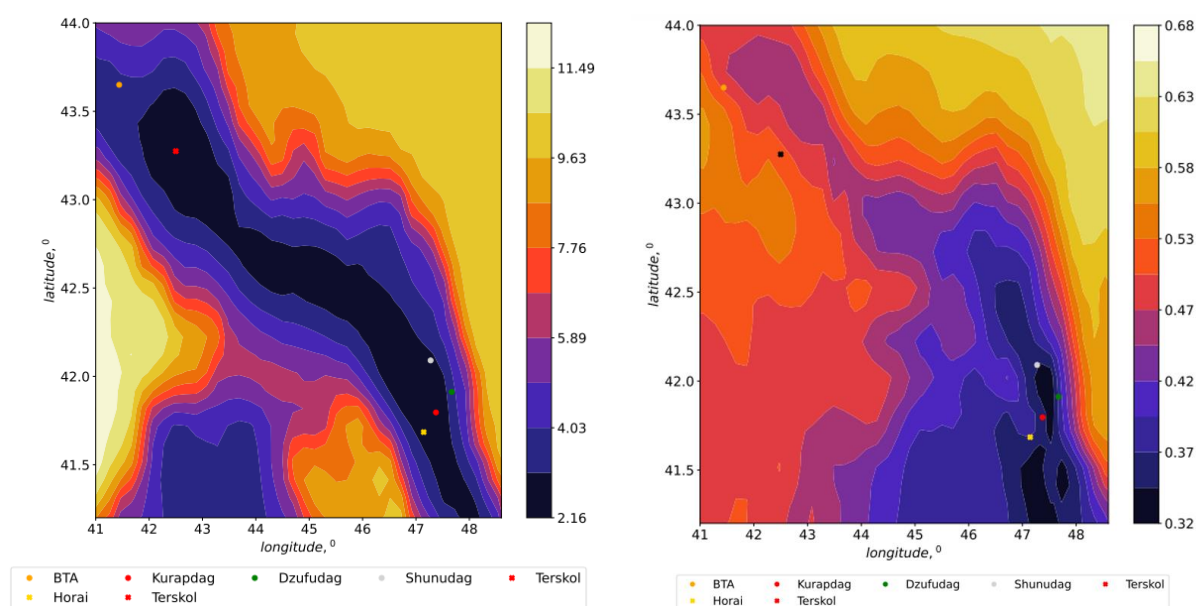


Рис. 8. Усредненная карта PWV (слева) [в мм] и TCC (справа) на Северном Кавказе зимой по данным реанализа Era-5.

Анализ рисунка 8 показывает, что плато Шунудаг находится на краю зоны с наименьшим PWV, а г. Джуфудаг – в нескольких километрах от нее, однако с учетом разрешения метода (25-30 км) граница зон может иметь некоторую погрешность, а уточнение границы зоны минимума PWV требует более высокого разрешения данных или, например, применения адаптированной к региону мезомасштабной модели WRF, что будет рассмотрено в секции 3.3.

Статистики PWV и TCC для интересующих нас мест и астропунктов, полученные по данным реанализа Era-5 с использованием формулы (10) в каждой измеренной точке, приведены в таблице 2.

Таблица 2. Медианные значения PWV и TCC в ночное время по данным Era-5 для рассмотренных мест, включая новые астропункты на г. Курапдаг (Дагестан), АПП Ташанта (Алтай) и пике Хулугайша (Саяны).

Астропункт	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
Майданак, Узбекистан	2650	3,4	8,7	0,54	0,13	2018 г., ночи
ALMA, Чили	5058	0,51	1,7	0,11	0,39	2018 г., ночи
Mauna Kea, Гавайи	4205	1,9	2,7	0,37	0,22	2018 г., ночи
Summit Camp, Гренландия	3216	0,8	2,2	0,92	0,67	2018 г., ночи
Scott Amudsen, SP	2835	0,23	0,95	0,34	0,54	2018 г. ночи
Акташтау, Узбекистан	3383	1,8	5,9	0,57	0,31	2018 г., ночи
Али-1, Тибет, КНР	5100	0,4	4,4	0,35	0,57	2018 г., ночи
Музтаг-Ата, Памир, КНР	4536	0,7	3,7	0,42	0,62	2018 г., ночи
Шорбулак, Памир, Таджикистан	4350	1,8	6,0	0,58	0,18	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
Аркасара, Архыз, РФ	2839	2,6	8,2	0,71	0,53	2018 г., ночи
Пик Терскол, Эльбрус, РФ	3100	1,8	5,8	0,69	0,54	2018 г., ночи
Гара-Баши, Эльбрус, РФ	3847	1,2	4,9	0,68	0,55	2018 г., ночи
Приют 11-ти, Эльбрус, РФ	4100	1,1	4,8	0,68	0,55	2018 г., ночи
Абишира-Ахуба, Архыз, РФ	3016	2,1	6,7	0,71	0,53	2018 г., ночи
г. Хорай, Дагестан, РФ	3521	1,4	6,6	0,45	0,34	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
г. Мус-Хая, Якутия, РФ	2959	0,6	9,8	0,71	0,92	2018 г., ночи
РАТАН-600, РФ	970	6,2	21,8	0,63	0,54	2018 г., ночи
БТА, РФ	2070	3,9	12,9	0,67	0,55	2018 г., ночи
Вершина горы Пастухова	2732	3,7	12,2	0,62	0,52	2018 г., ночи

Как видно из таблицы 2, ряд мест с неплохой медианой PWV (пик Терскол, Гара-Баши, Приют 11-ти в Приэльбрусье, хребет Абишира-Ахуба в Архызе, плато Шорбулак на Восточном Памире) сильно портит высокая ТСС особенно в наиболее продуктивный зимний период.

Важным условием возможности размещения ESMT в горной местности является спокойный ветровой режим, поскольку сильный ветер снижает время проведения наблюдений на открытом телескопе, повышает требования к прочности ферменного каркаса, к моменту приводов и актуаторов, заметно увеличивает стоимость инструмента. Уместно напомнить, что забрало башни БТА разрешено открывать при порывах ветра не превышающих 10 м/с в течение одного часа и его закрывают при первом порыве ветра 15 м/с, а парусность открытого телескопа диаметром 15 м будет существенно выше парусности БТА внутри башни с открытым забралом.

Применение радиопрозрачного укрытия (РПУ) для защиты ESMT от ветра технически возможно, но может снизить эффективность телескопа на 15-20 % в интересующем нас диапазоне волн. Применение РПУ может значительно упростить конструкцию ферменного каркаса и уменьшить нагрузочную способность подвижных элементов Опорно-Поворотного Устройства (ОПУ) и в целом может заметно снизить стоимость инструмента. При этом возможные потери эффективности 15-20 % можно компенсировать незначительным увеличением диаметра главного зеркала без увеличения его парусности и усложнения конструкции ферменного каркаса. В этом случае ветровых ограничений на работу телескопа не будет, требования к прочности телескопа переносятся на требования к прочности РПУ, однако это тоже требует немалых усилий в условиях необходимости достижения высокой радиопрозрачности РПУ в ММ/субММ диапазоне волн.

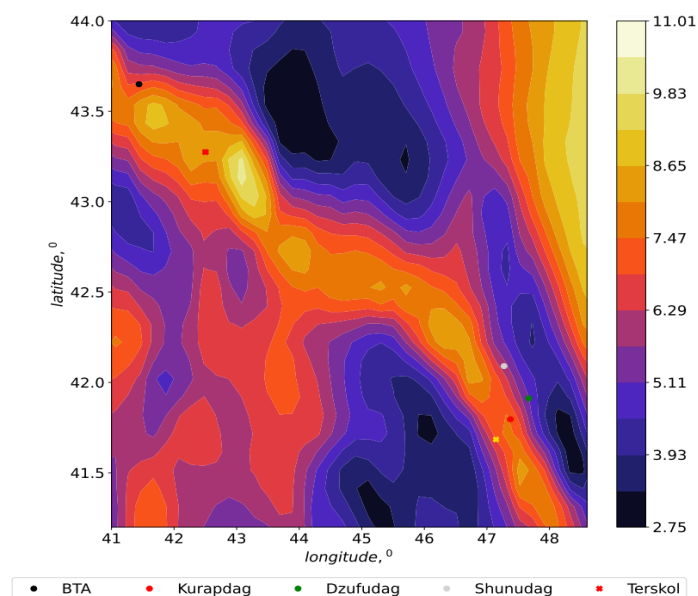


Рис. 9. Пространственное распределение медианы скорости порывов ветра (м/с) на Северном Кавказе в зимнее время по данным реанализа Era-5.

С использованием данных реанализа Era-5 получено усредненное пространственное распределение медианных значений скорости порывов ветра (рис. 9). Как следует из рис. 9 и будет показано ниже в разделе 3.3 целый ряд рассматриваемых в таблице 2 мест имеют сложный режим ветра с высокой повторяемостью порывов ветра до 40-50 м/сек и выше, не подходящий для размещения открытого телескопа диаметром 15 м и более. Среди них Гара-Баши, Приют 11-ти, пик Терскол, вершина и склоны горы Пастухова, г. Курапдаг.

3.2 Поле ветра по данным модели ICON

Хорошо известно, что скорость ветра определяется горизонтальным барическим градиентом (ГБГ) а также зависит от характеристик подстилающей поверхности. ГБГ – равнодействующая сил давления, действующих на единицу объема в горизонтальном направлении в отличие от вертикального барического градиента (ВБГ) – равнодействующей сил давления, действующих на единицу объема в вертикальном направлении. Рост скорости ветра с высотой вызван ВБГ и уменьшением силы трения воздуха с высотой. Установлено, что скорость ветра в нижнем слое атмосферы (до 8-10 км) над равниной растет с высотой по логарифмическому или степенному закону, но показатель степени не более 0,4-0,5 т.е. рост достаточно медленный [19]. Однако в горах добавляется

горно-долинная циркуляция ветра и быстрые струйные течения, что может в разы увеличивать силу ветра.

Если давление в горах на высоте 3 км ожидаемо падает примерно на 40 % в сравнении с уровнем моря, предсказать среднюю скорость ветра и максимальные кратковременные порывы ветра в горах достаточно сложно, поскольку кроме розы ветров, широты и долготы места, нужен учет рельефа и высотных профилей температуры и давления, а они могут существенно отличаться в горах от равнины, где обычно выполняется радиозондирование сетью аэрологических станций. В горах, как и на равнине, температура воздуха падает с высотой, поскольку нагретый землей воздух, становясь легче и начинает подниматься вверх. При подъеме он попадает в зоны с более низким атмосферным давлением, что приводит к его расширению. В процессе расширения совершается работа и затрачивается внутренняя энергия, что ведет к снижению его температуры за исключением области инверсионного слоя. Однако температурная инверсия в горной местности обычно отличается от равнинной, поскольку ее причиной нередко является ночное выхолаживание поверхности Земли и оседание на Землю теплых воздушных масс, а эти процессы в горах имеют свою специфику.

Для изучения ветрового режима и получения оценок статистик скорости порывов ветра на плато Шунудаг и г. Джуфудаг воспользуемся прогностической моделью погоды и климата ICON (Integrated COSMO model). ICON – гибкая, масштабируемая, высокопроизводительная среда моделирования для прогнозирования погоды, климата и окружающей среды, использующая спутниковые данные дистанционного зондирования земли (ДЗЗ), данные сети наземных метеорологических и аэрологических станций. Такие модели дают сглаженную картину ожидаемой скорости порывов ветра с максимальным разрешением 10-15 км, но имеют достаточно высокую корреляцию с локальными метеоданными. Это подтвердили астроклиматические экспедиции РАН в горный Дагестан в 2022-2025 гг. Кроме того, данные архивов сделанных ранее прогнозов ICON уточняются по мере появления фактических данных наземных

метеорологических и аэрологических сетей. Гистограммы скорости порывов ветра в ноябре (2020-2024 гг.) на плато Шунудаг, г. Джуфудаг и местах сравнения построенные по данным ICON приведены на рис. 10. Месяцы апрель и ноябрь выбраны как наиболее ветреные месяцы на хребте Джуфудаг согласно климатическим справочникам. Способ аппроксимации построенных гистограмм скорости порывов ветра будет подробно описан в пункте 6.4.

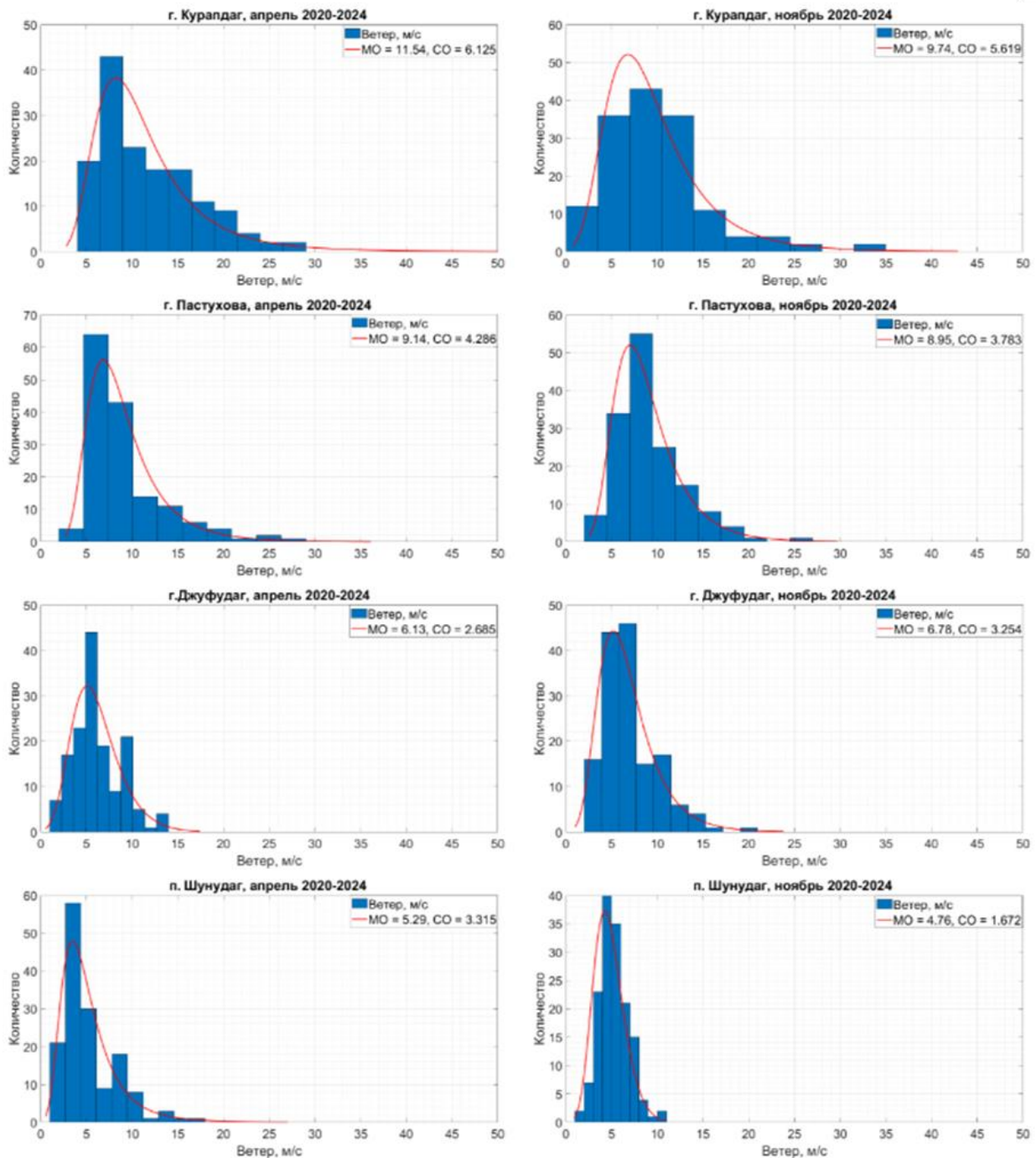


Рис. 10. Гистограммы скорости максимальных порывов ветра на плато Шунудаг, г. Джуфудаг, г. Курапдаг и г. Пастухова в апреле и ноябре (2020-2024 гг.) по данным модели ICON.

Как видно из рис. 10 даже в наиболее ветреные месяцы для данного района математическое ожидание скорости порывов ветра (МО) и стандартное отклонение (СО) кривой аппроксимирующей гистограммы существенно более низкие на плато Шунудаг и г. Джуфудаг в сравнении с г. Курапдаг и г. Пастухова. В целом режим ветра на плато Шунудаг в течение года можно считать умеренно спокойным, поскольку прогнозы порывов ветра со скоростью более 30 м/с на плато Шунудаг, согласно данным модели ICON, случаются, а на г. Джуфудаг спокойным, что также следует из рис. 9.

3.3 Осажденный водяной пар и приземная скорость ветра по данным мезомасштабной метеорологической модели WRF

С целью получения мезомасштабных метеорологических полей с высоким пространственным и временным разрешением в пределах Восточной части Дагестана мы использовали негидростатическую мезомасштабную модель WRF. Для адаптации модели WRF (Weather Research and Forecasting) был выбран регион (38,25 с.ш. – 45,75 с.ш., 44,00 в.д. – 51,50 в.д.) со сложным пересеченным рельефом с центром над горой Джуфудаг. В качестве исходных данных для инициализации модели WRF и обеспечения начальных и граничных условий, использовались данные GFS (Global Forecasting System). Временной период моделирования мезомасштабных полей атмосферы охватывал даты проведения экспедиции: с 1 по 8 апреля 2022 г. В этот период проводились натурные измерения атмосферных характеристик сотрудниками РАН на г. Курапдаг, во время которых наблюдались высокие скорости порывов приземного ветра (выше 35 м/с).

Куб данных, получаемый из модели WRF, охватывает тропосферу и нижние слои стратосферы. Вертикальное разрешение – более 50 высотных уровней. Выходные данные моделирования доступны каждые 20 минут. Расчеты выполнены в пределах трех доменов. Горизонтальное разрешение в пределах внутреннего домена – 1 км, что в спектральном представлении соответствует пику микрометеорологического максимума [13, 20]. Параметризации физических

процессов модели WRF, задействованные при расчетах метеорологических полей, включали в себя: Thompson (mp_physics = 8), Grell 3D (G3) (cu_physics = 5), RRTMG(ra_lw_physics = 4, ra_sw_physics=4), Mellor-Yamada Nakanishi and Niino Level 2.5 MYNN2 (bl_pbl_physics = 5), Revised MM5 (sf_sfclay_physics = 1), Noah-MP (sf_surface_physics = 4). Все выбранные параметризации применяются для запуска модели WRF во всех доменах. Эта комбинация схем параметризации валидирована с учетом данных радиозондирования в Республике Дагестан и рекомендуется нами к использованию для средних широт.

Ниже приводятся восстановленные пространственные распределения осажденного водяного пара вокруг горы Джуфудаг. Рисунок 11 показывает усредненное пространственное распределение осажденного водяного пара, проинтегрированного по всему атмосферному столбу, во внешнем домене (с горизонтальным разрешением 8 км) и внутреннем домене (с горизонтальным разрешением 1 км), соответственно. На рис. 11 отмечен ряд астроплощадок, интересных с точки зрения изучения астроклиматических и астропогодных условий. Астроплощадка Большого Телескопа Альт-Азимутального находится за пределами исследуемого района: расширение площади исследуемого района ведет к росту необходимых вычислительных мощностей суперкомпьютерного кластера. Также для рассматриваемого периода приведено и пространственное распределение приземной скорости ветра (рис. 11, нижняя панель).

Анализ рис. 11 показывает, что осажденный водяной пар распределен в пространстве неравномерно. Отличающиеся характеристики атмосфера имеет для астроплощадок в районе гор Курапдаг, Джуфудаг и плато Шунудаг. При этом в терминах осажденного водяного пара минимум соответствует району горы Курапдаг; здесь же отмечаются сильные приземные ветра. К северу и северо-востоку по мере уменьшения средней скорости приземного потока воздуха и средних расчетных порывов ветра наблюдается некоторое увеличение средних значений осажденного водяного пара.

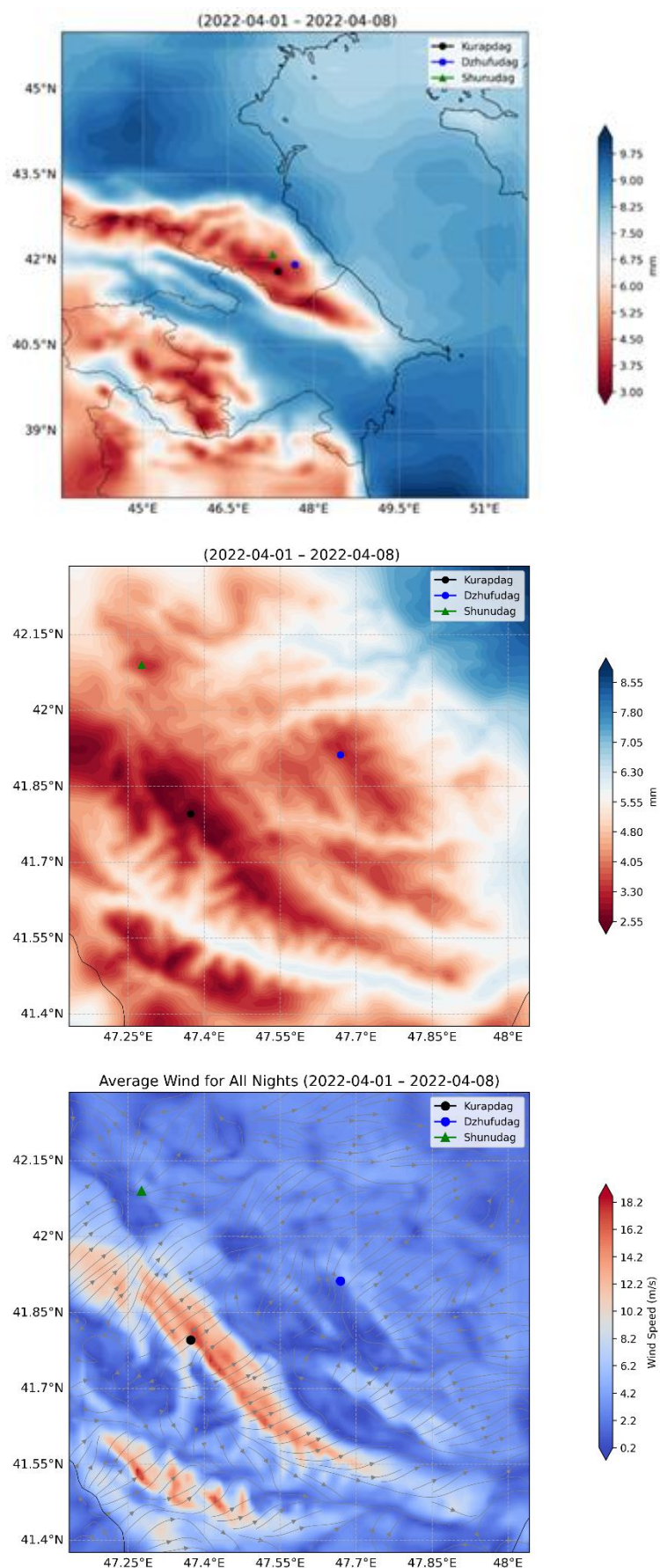


Рис. 11. Распределения PWV (верхняя и средняя панель) и приземного ветра (нижняя панель), полученные с помощью мезомасштабной WRF модели для периода экспедиции РАН в район горы Курапдаг в апреле 2022 г.

3.4 Характеристики прозрачности и загрязнения атмосферы по данным прогностической атмосферной модели SILAM

Основными параметрами, характеризующими состояние прозрачности и общего замутнения атмосферы являются коэффициент прозрачности (P_2) и оптическая плотность атмосферы (ОПА). ОПА и P_2 связаны между собой соотношением:

$$ОПА = -\ln P_2 = -0,5 \ln(S_{p,30}/S_0), \quad (11)$$

где $S_{p,30}$ – величина измеренного потока прямой солнечной радиации в кВт/м², приведенная к среднему расстоянию от Земли до Солнца и оптической массе атмосферы $m = 2$ (т. е. к высоте Солнца 30 °); S_0 – величина потока радиации на верхней границе атмосферы. Указанные показатели не только позволяют количественно оценить прозрачность атмосферы, но и дают возможность косвенно судить об аэрозольном ослаблении в атмосфере, поскольку ОПА представляет собой оптическую плотность атмосферы для прямой солнечной радиации в актинометрическом диапазоне длин волн $\Delta\lambda = 0,3\text{-}4$ мкм, где ее вариации определяются преимущественно изменениями аэрозольной составляющей, загрязнения и влагосодержания атмосферы. С другой стороны, оценка аэрозольной составляющей атмосферы, ее загрязнения наряду с влагосодержанием позволяет сделать вывод об ОПА и получить ее оценки сверху. В таблице 3 приведены P_2 и ОПА по данным актинометрической станции Шатджатмаз в 2012-2021 гг.

Таблица 3. Среднегодовые значения ОПА и P_2 на г. Шатджатмаз по данным актинометрической станции на г. Шатджатмаз.

Годы	P_2	ОПА
2012	0,837	0,178
2013	0,854	0,16
2014	0,838	0,177
2015	0,845	0,169
2017	0,838	0,177
2018	0,835	0,181
2020	0,824	0,194
2021	0,845	0,181

По данным [21] г. Шаджатмаз имеет наименьшее ОПА в РФ из всех мест многолетних непрерывных измерений актинометрической сети Росгидромета (169 пунктов) и ОПА составляла $0,194 \pm 0,033$ в 2020 г., $0,168 \pm 0,025$ в 2021 г. Однако по данным актинометрической станции на г. Шатджатмаз ситуация с ОПА в последние годы стала ухудшаться, что может быть связано с хозяйственным освоением Малокарачаевского района КЧР. Поскольку единственная актинометрическая станция в Дагестане находится в достаточно крупном городе Махачкала сравним загрязнение атмосферы на г. Джуфудаг и плато Шунудаг с помощью модельных оценок.

По данным Системы комплексного моделирования состава атмосферы (SILAM) плато Шунудаг и г. Джуфудаг в Дагестане имеет низкий показатель загрязнения атмосферы в сравнении с лучшими курортами Дагестана и РФ (таблица 4). Поскольку влагосодержание атмосферы наших мест сравнения существенно ниже, чем на г. Шатджатмаз (таблица 3) ожидаемая ОПА на плато Шунудаг и г. Джуфудаг должна быть не выше 20 %, что является высоким показателем для горной местности и достаточным для размещения оптического телескопа.

Таблица 4. Диапазон изменений показателя загрязнения атмосферы [$\text{мкг}/\text{м}^3$] в 2024 г. (0-20 – хороший, 21-35 – удовлетворительный, >35 – нездоровый).

Месяц	Детский курорт Евпатория, Крым	Курорт Кисловодск Ставропольский край	гора Шатджатмаз КЧР	Курорт Дербент, Дагестан	Курорт Избербаш Дагестан	гора Джуфудаг	Плато Шунудаг
4	2-36	4-16	0-13	2-31	1-31	1-12	1-10
8	4-20	4-13	2-13	2-20	1-18	1-12	1-12
10	4-16	2-12	0-6	2-20	2-33	1-17	0-6
12	4-20	2-17	0-7	2-68	2-71	1-16	1-11

Метеорологическая дальность видимости (МДВ) – наибольшее расстояние, на котором в дневное время виден далекий темный объект размером не менее 15', проектирующийся на фон неба у горизонта. МДВ – один из показателей прозрачности атмосферы, она зависит от содержания в воздухе капель воды, кристаллов льда и других примесей, малых газовых составляющих атмосферы (CO_2 и др.). МДВ определяется визуально по заранее выбранным объектам наблюдений. По данным метеорологической станции Росгидромета на горе Шатджатмаз среднемесячные значения МДВ не превышают 35 км, а в лучшие дни МДВ может достигать 75 км. По нашим наблюдениям с г. Джуфудаг в безоблачную погоду всегда видна г. Базардюзи (4466 м), расстояние прямой видимости до которой составляет 80 км.

4. Двухканальный атмосферный радиометр ИПАР-2А

Измеритель пропускания атмосферы радиометрический двухканальный ИПАР-2 был разработан для измерений T_b , τ и PWV абсолютным методом [8, 9]. На рис. 12 приведены внешний вид прототипа ИПАР-2 и измеренные Y -методом шумовые температуры радиометров 3 мм и 2 мм диапазонов. Калибровка ИПАР-2 выполняется перед и после цикла полевых измерений в лабораторных условиях АКЦ ФИАН. Ее применимость в горных условиях при значительных перепадах окружающих температур обеспечивается с помощью высокоточного конвекционного термостата ИПАР-2, работающего при той же температуре, при которой выполнялась лабораторная калибровка компактного корпуса прототипа ИПАР-2 из пенопласта в режиме ПИД регулирования не хуже $\pm 0,1$ °C. Система сбора данных (ССД) с карт-ридером и плата управления термостатом ИПАР-2 расположены в отдельных блоках, запуск ССД, визуализация данных и контроль записи данных радиометров ИПАР-2 выполняется с помощью ноутбука по собственной сети WI-FI. На рис. 13 приведен пример первичной (лабораторной) калибровки радиометров ИПАР-2 с тремя радиометрическими модулями.

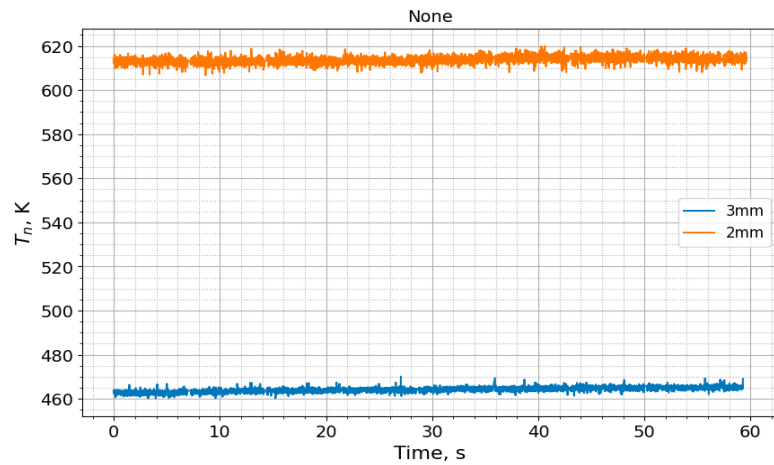


Рис. 12. Внешний вид прототипа ИПАР-2 (слева), измеренные шумовые температуры радиометров ИПАР-2 3 мм и 2 мм диапазонов (справа).

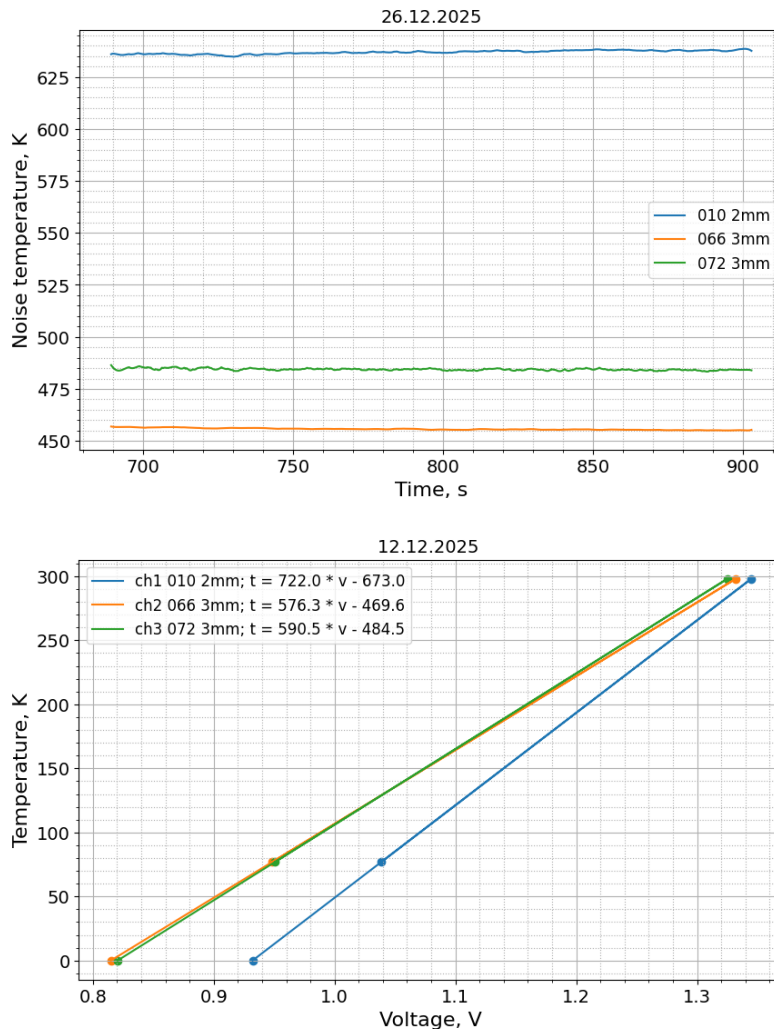


Рис. 13. Пример измерения шумовых температур ИПАР-2 с двумя радиометрами на волну 3 мм и одним радиометром на волну 2 мм (вверху), пример первичной (лабораторной) калибровки радиометров ИПАР-2 с помощью внешней охлаждаемой чернотельной нагрузки при температуре термостатирования радиометров $t_0 = 30^\circ\text{C}$ (внизу). Шумовая температура чернотельной нагрузки при физической температуре 0 K ожидаемая.

С целью набора статистики τ и радиометрического PWV в местах сравнения и других новых астропунктах подготовлена автоматизированная версия ИПАР-2А с возможностью проведения непрерывных удаленных измерений. Кроме двух радиометров на волну 3 мм и 2 мм, входящих в состав прибора, ИПАР-2А включает ИК камеру с короткофокусным объективом, чопперное колесо (ЧК) с чернотельными нагрузками и приводом, источник бесперебойного питания (ИБП) 5 В и 12 В, ССД с карт-ридером, плату управления высокоточным термостатом (рис. 14). Визуализация и контроль записи данных радиометров ИПАР-2А, контроль температуры термостата и управление ИПАР-2А выполняется удаленно по сети Ethernet 10 МВ или WI-FI с помощью одноплатного компьютера Orange Pi.

Роль ЧК в ИПАР-2А сводится к измерению долговременной стабильности КУ радиометров, пределов ошибки измерений в полевых условиях, а также оценки необходимости выполнения новой первичной калибровки ИПАР-2А. ИК тепловизионная камера Melexis (32x24 пикселя) имеет поле зрения 55° , шумовую эквивалентную разность температур (NETD) $0,1 \text{ K/Гц}^{1/2} \text{ RMS}$, частоту кадров 0,25-32 к/с. Она позволит автоматически определять облачность, дымку, оценивать качество ясного неба, а также контролировать ИК температуру чернотельной нагрузки.

Для ИПАР-2А разработан теплоизозащитный корпус из акриловых панелей толщиной 5 мм и радиопрозрачная крышка (РПК). Измеренные прямые потери в РПК, изготовленной из воздушного термопластика на 3D-принтере, составили не более 0,14/0,24 дБ на частоте 100/150 ГГц. С целью повышения тепловой развязки термостимулируемого объема с окружающей средой в условиях резких перепадов температур в горах и значительных ветровых воздействий разработан, напечатан из полиэфирного термопластика (ПЭТ) на 3D-принтере и установлен в воздухозаборном канале ИПАР-2А воздушный барьерный фильтр лабиринтного типа с гироидной структурой. Достигнута ср. кв. точность поддержания заданной температуры воздуха внутри теплозащитного корпуса, а также на поверхности корпусов самих радиометров с эффективным

теплоотводом составляет $0,02\text{ }^{\circ}\text{C}$ (рис. 15), максимальная разность температур корпусов радиометров Δ , достигаемая в условиях термодинамического равновесия внутри конвекционного объема не превышает $0,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ с $\text{СКО}(\Delta) = 0,025\text{ }^{\circ}\text{C}$.

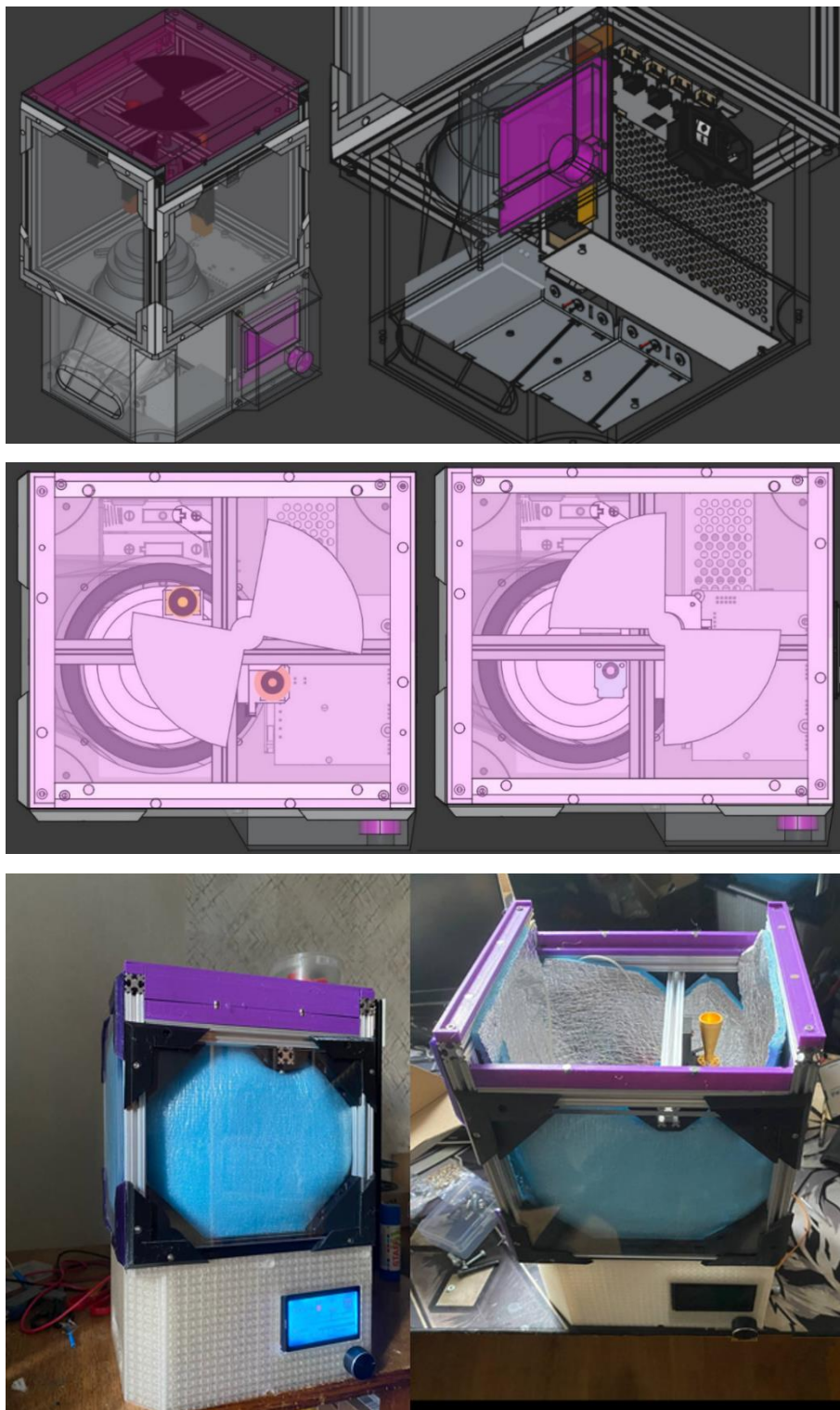


Рис. 14. 3D модель ИПАР-2А (вверху), вид сверху (середина) и опытный образец в процессе наладки (внизу).

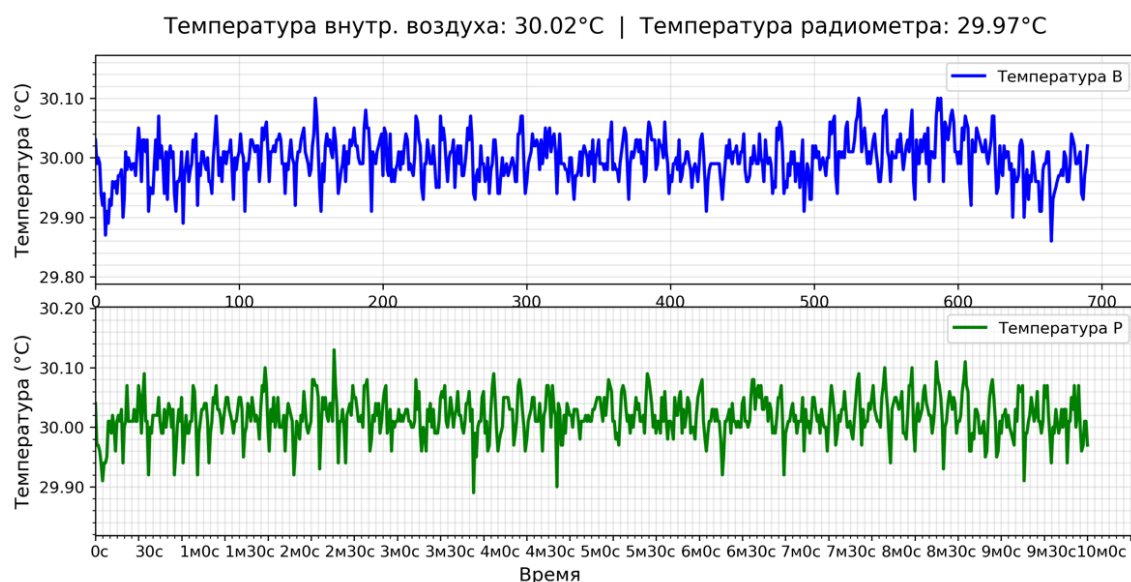


Рис. 15. Результат изменения температуры воздуха внутри теплоизолированного объема ИПАР-2А(вверху) и на корпусе одного из радиометров (внизу), СКО = 0,03 °C для обеих измеренных температур.

Температура термостатирования радиометров задается с пульта прибора или удаленно и обычно составляет от 25 °C до 35 °C. При тех же температурах выполняется лабораторная калибровка прибора. Корпус ИПАР-2А является герметичным в отношении влаги, внешний воздух, поступающий внутрь прибора, проходит влагозащитный фильтр. Время полной готовности прибора к радиометрическим измерениям после включения питания составляет не более 1 часа, вес прибора готового к транспортировке составляет не более 3 кг.

Радиометрические измерения атмосферы с помощью ИПАР-2А планируется начать на одном из астропунктов в марте 2026 г.

5. Результаты первых радиометрических измерений в местах сравнения

Ниже приводятся результаты очередных измерений оптической толщи и PWV с помощью ИПАР-2 на астропункте сравнения в районе расположения БТА в марте и июне 2025 г и первых радиометрических измерений на г. Джумфудаг и плато Шунудаг в марте-апреле и в июне 2025 г в сравнении с данными радиозондирования. С этой целью высотные профили водяного пара и температуры, полученные на ближайших аэрологических станциях (Таблица 5), интегрируются с высоты места радиометрических измерений.

Таблица 5. Расстояние до ближайших аэрологических станций.

Астропункт	Аэрологическая станция	Расстояние до астропункта, км	Регион расположения аэрологической станции
БТА	МРВ	150	Ставропольский край, РФ Краснодарский край, РФ
	Туапсе	200	
Джуфудаг	Махачкала	120	РД, РФ Азербайджан
	Маштага	250	
Шунудаг	Махачкала	115	РД, РФ

На рис. 16 показан процесс измерений оптической толщи и радиометрического PWV из окна башни БТА с помощью прототипа двухканального атмосферного радиометра ИПАР-2. Измеренные радиояркостные температуры атмосферы T_b , оптической толщи τ и PWV в районе БТА 14-17 марта 2025 г на волне 3 мм и 2 мм, а также результаты расчета PWV на высоте БТА по данным ближайших аэрологических станций (Минеральные воды – МРВ и Туапсе) приведены на рис. 17, сопутствующие метеоусловия приведены на рис. 18. Результаты аналогичных радиометрических измерений в июне 2025 г приведены на рис. 19. Достаточно низкие значения PWV, опускающиеся до 4-5 мм соответствуют сухой, ясной или малооблачной погоде, установившейся в районе расположения БТА в указанные периоды. Однако в конце периода измерений в марте 2025 г наблюдался приход циклона с приносом влажных масс и усилением ветра до скорости выше 30 м/с (рис. 18).



Рис. 16. Процесс измерений оптической толщи τ и PWV с помощью двухканального атмосферного радиометра ИПАР-2 из окна башни БТА 20.12.2024 г.

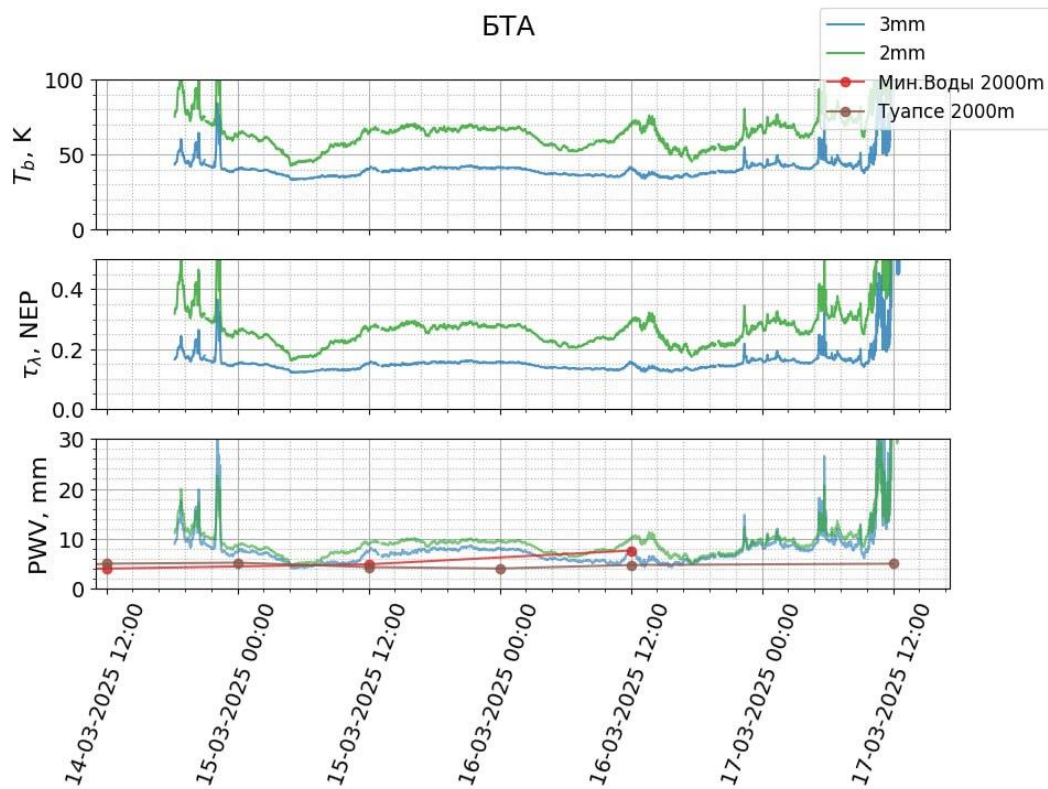


Рис. 17. Результат измерений T_b , τ и PWV в зените из окна башни БТА 14-17.03.2025 г.

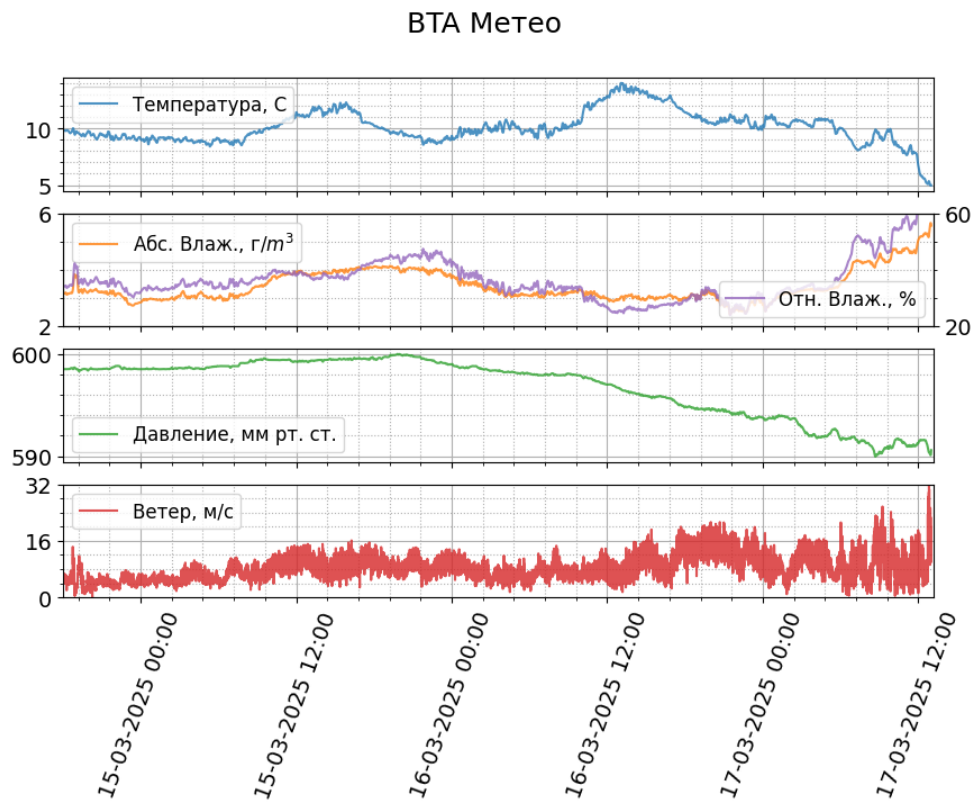


Рис. 18. Метеопараметры в районе расположения БТА в период радиометрических измерений 14-17.03.2025 г.

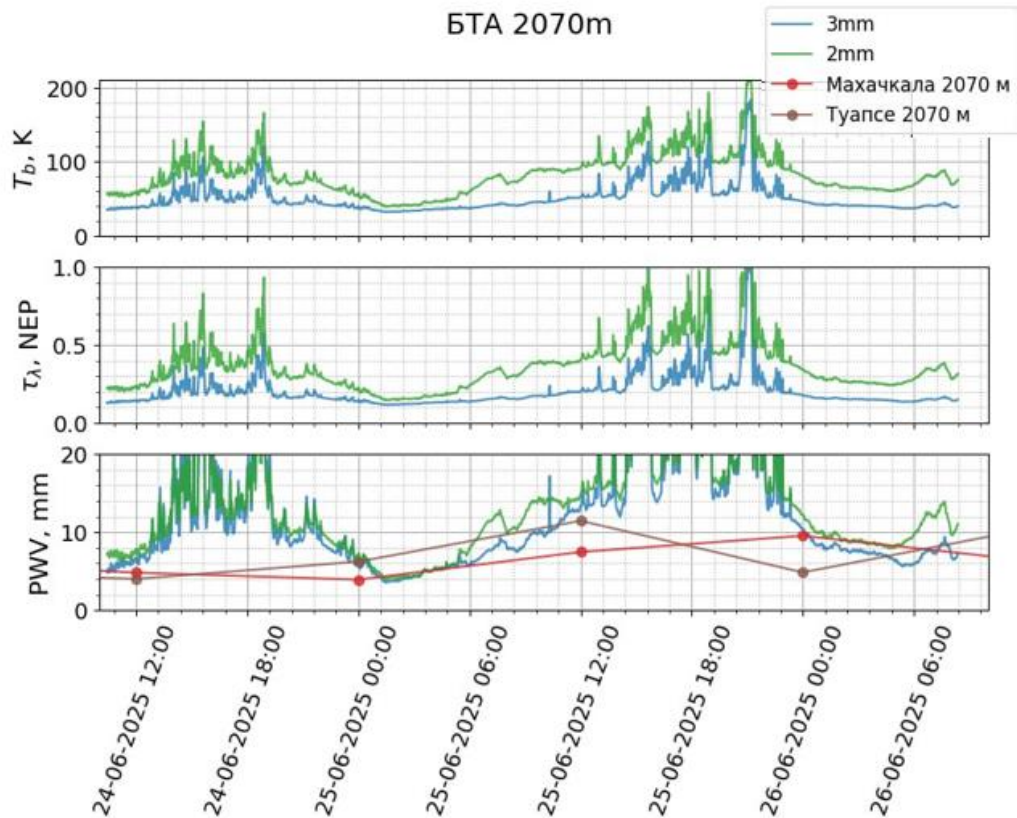


Рис. 19. Результат измерений T_b , τ и PWV, приведенных к зениту из окна башни БТА 24-26.06.2025 г.

На рис. 20 приведен $PWV_{ПВ}$, полученный по приземным метеопараметрам для экспоненциального закона падения удельного влагосодержания с высотой в районе расположения БТА и по зондовым данным на высоте БТА в 2025 г. На рис. 20 также приведен график скорости ветра в 2025 г по данным метеостанции одного из малых телескопов, расположенного рядом с БТА. На приведенном графике нет порывов ветра более 30 м/с, хотя по данным метеостанции БТА они случаются нередко (см. рис. 30), что указывает на то, что малый телескоп мог находиться в ветровой тени БТА по преимущественно юго-западному направлению ветра.

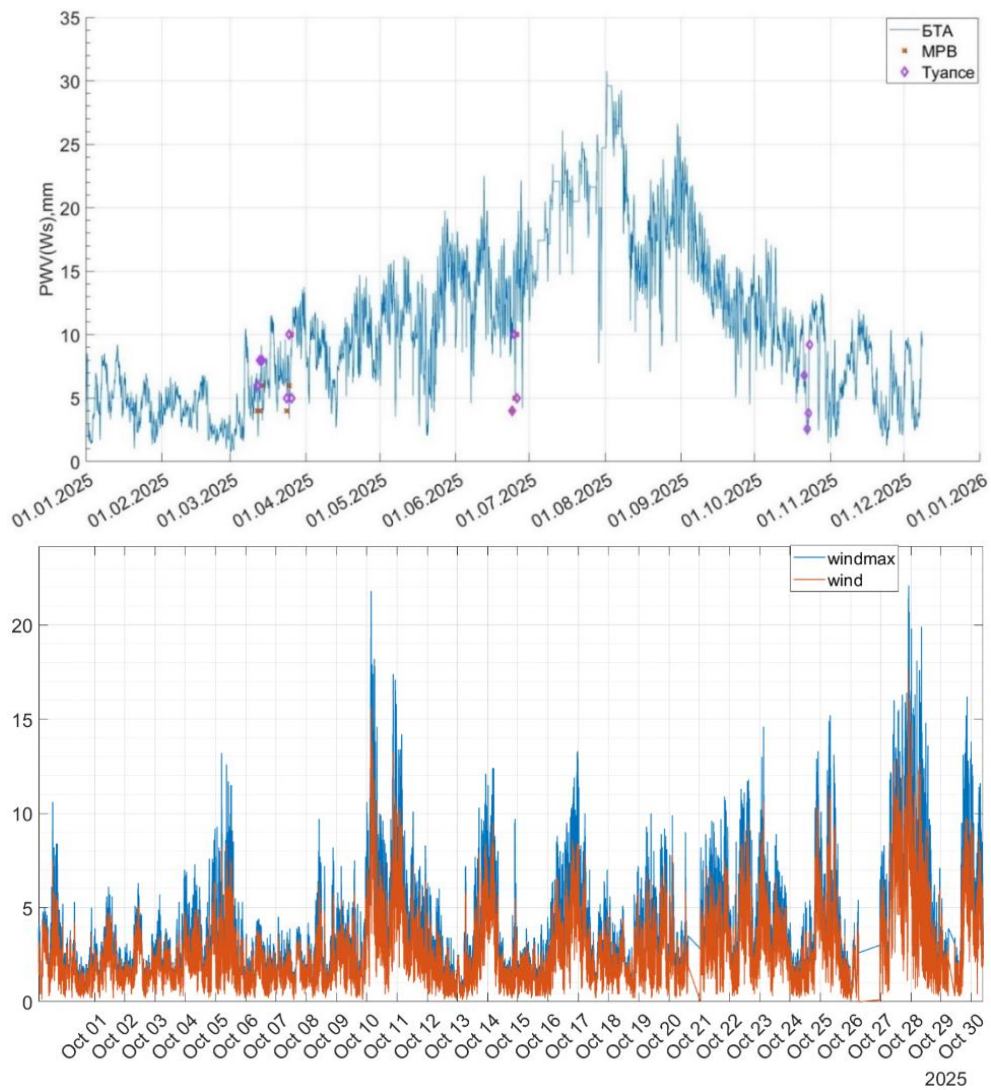


Рис. 20. $PWV_{ПВ}$, полученный по приземным метеопараметрам в районе расположения БТА и зондовым данным на высоте БТА в 2025 г. (вверху), ветер по данным метеостанции одного из малых телескопов, расположенного рядом с БТА (внизу).

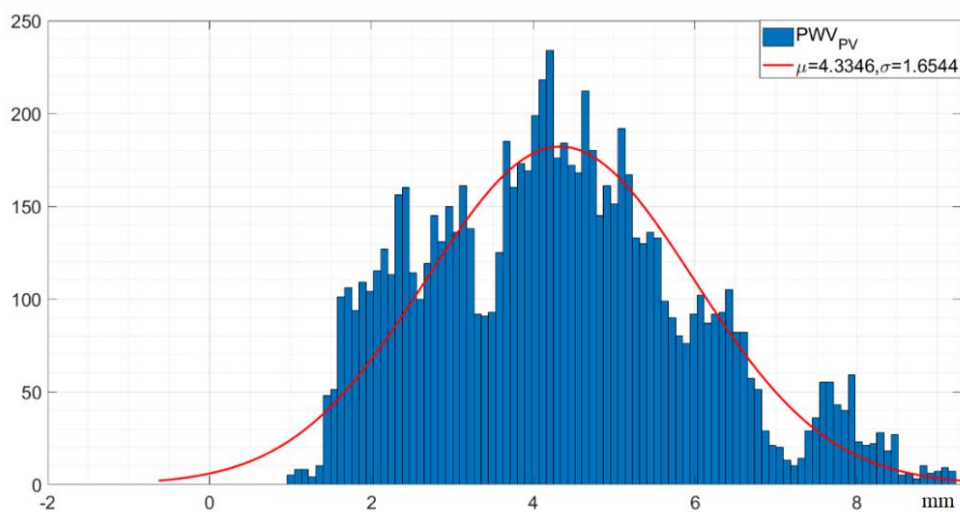


Рис. 21. Гистограмма значений $PWV_{ПВ}$ в районе расположения БТА в зимний период 2025 г.

На рис. 21 приведена гистограмма значений $PWV_{ПВ}$ для зимнего периода 2025 г и результат ее аппроксимации нормальным распределением. Результаты выполненных нами радиометрических измерений на астропункте сравнения БТА в 2024-2025 гг. находятся в хорошем соответствии с данными, приведенными на рис. 20-21.

Отметим, что в периоды ясной и сухой погоды значения PWV в районе расположения БТА достигают меньших значений, чем ожидалось, облачность соответствует ожидаемой, а максимальные скорости порывов ветра существенно выше ранее ожидаемых и хорошо соответствуют новым данным, полученным по реанализу Era-5 (рис. 9).



Рис. 22. Процесс измерений интегрального влагосодержания на г. Джуфудаг (вверху) на высоте 2850 м и на плато Шунудаг (внизу) на высоте 2800 м в конце марта – начале апреля 2025 г.

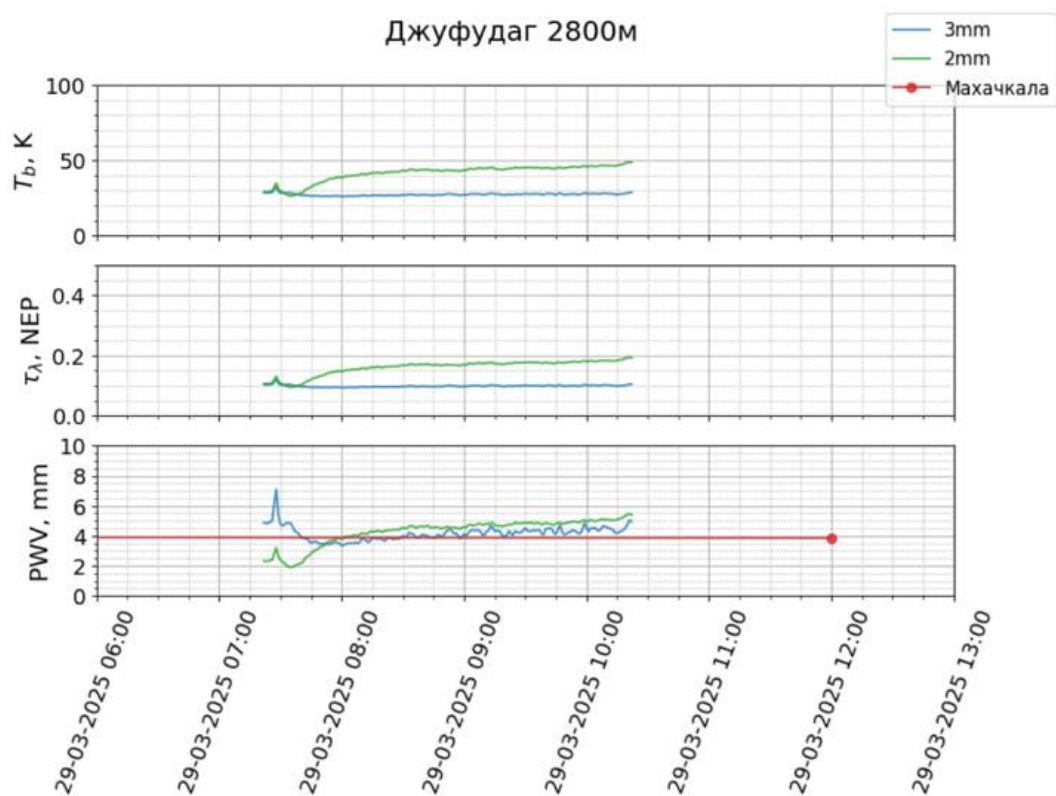


Рис. 23. Результат радиометрических измерений на г. Джуфудаг 29.03.2025 г.

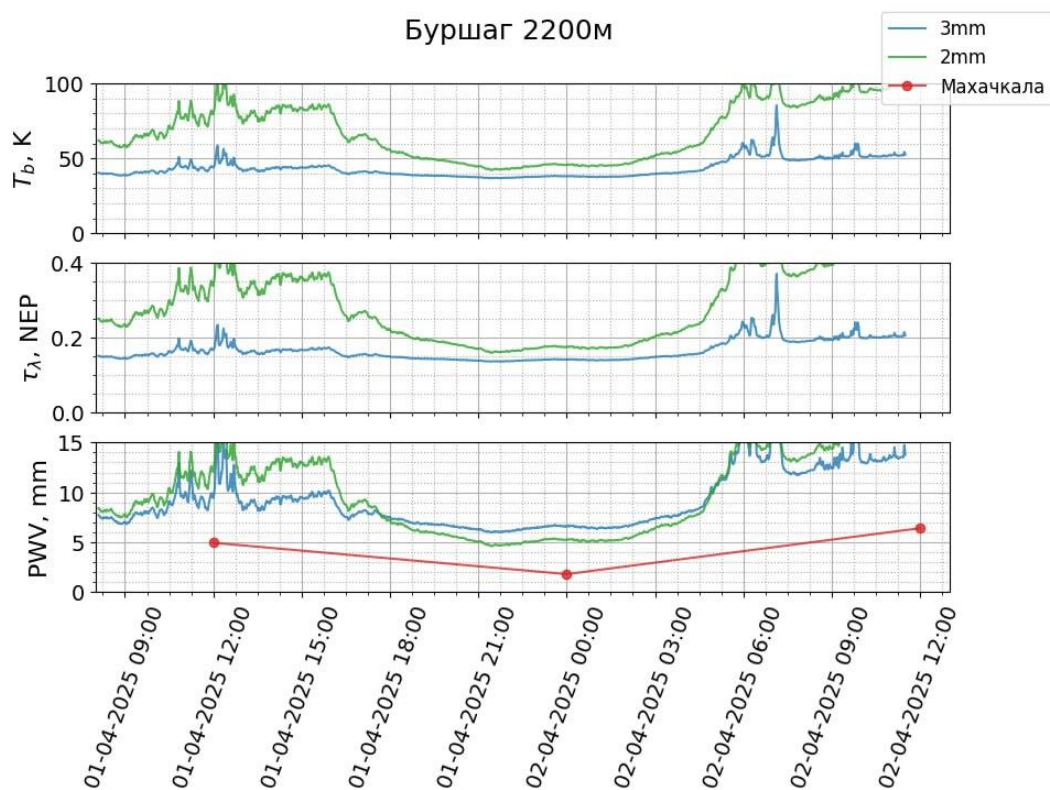


Рис. 24. Результат радиометрических измерений атмосферы в с. Буршаг 1-2.04.2025 г.

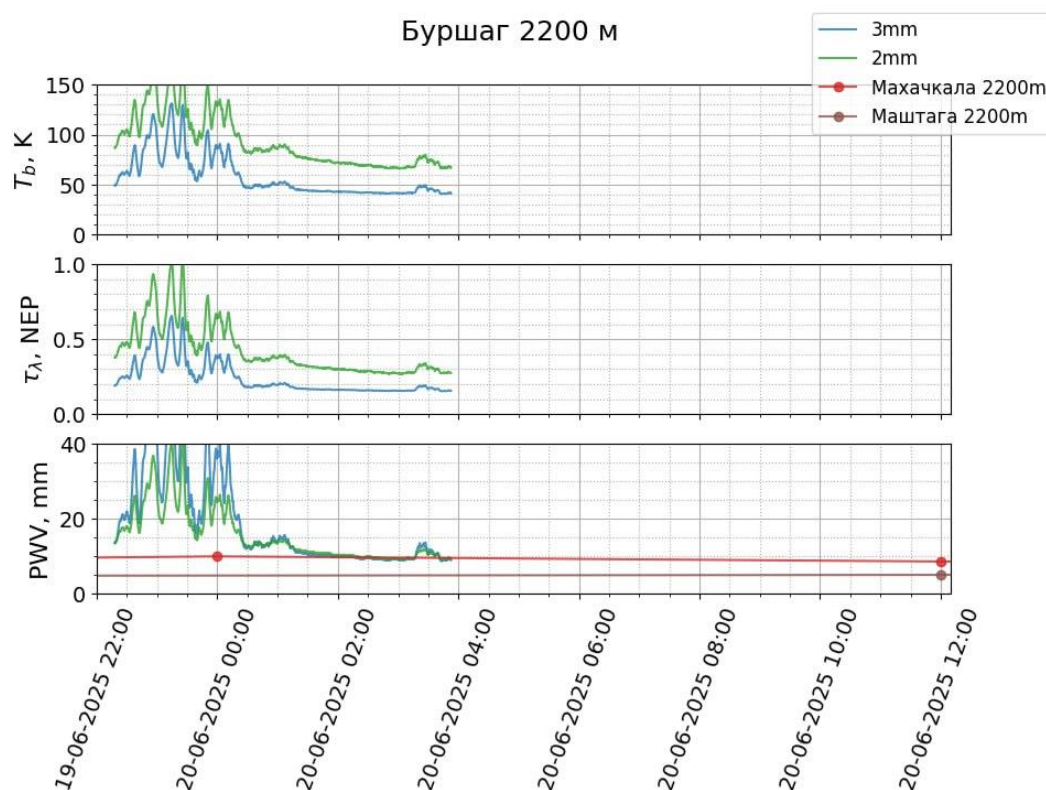


Рис. 25. Результат радиометрических измерений в с. Буршаг 19-20.06.2025 г.

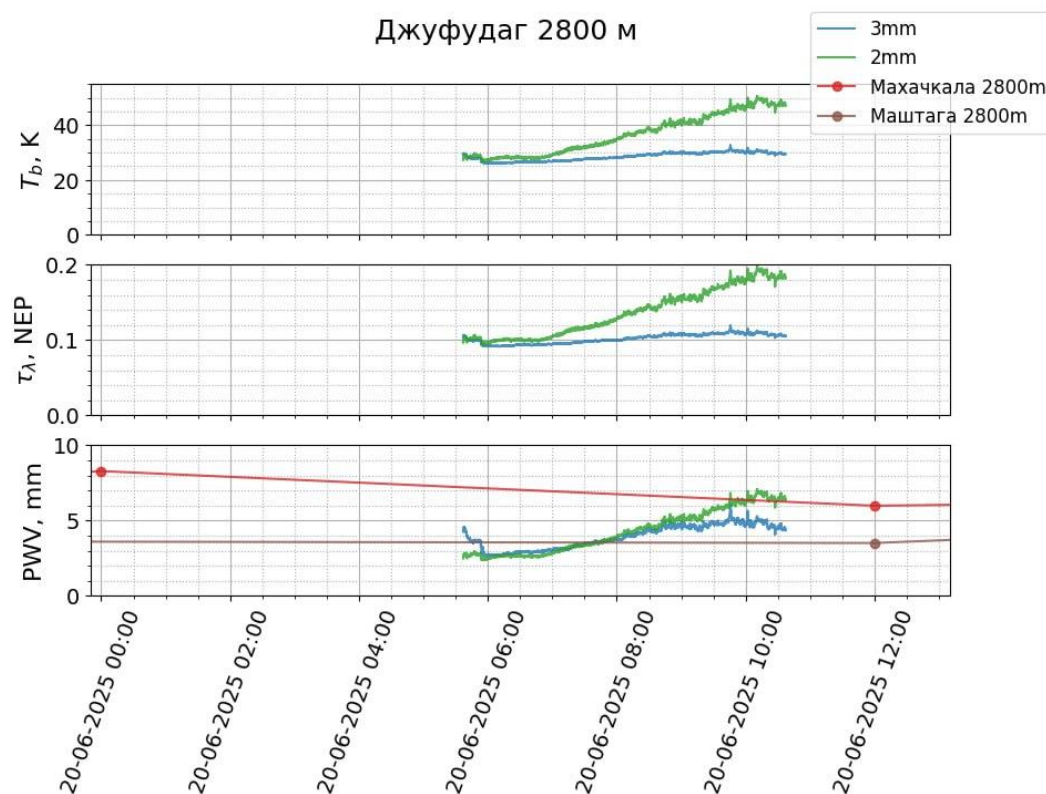


Рис. 26. Результат радиометрических измерений атмосферы на г. Джуфудаг 20.06.2025 г.

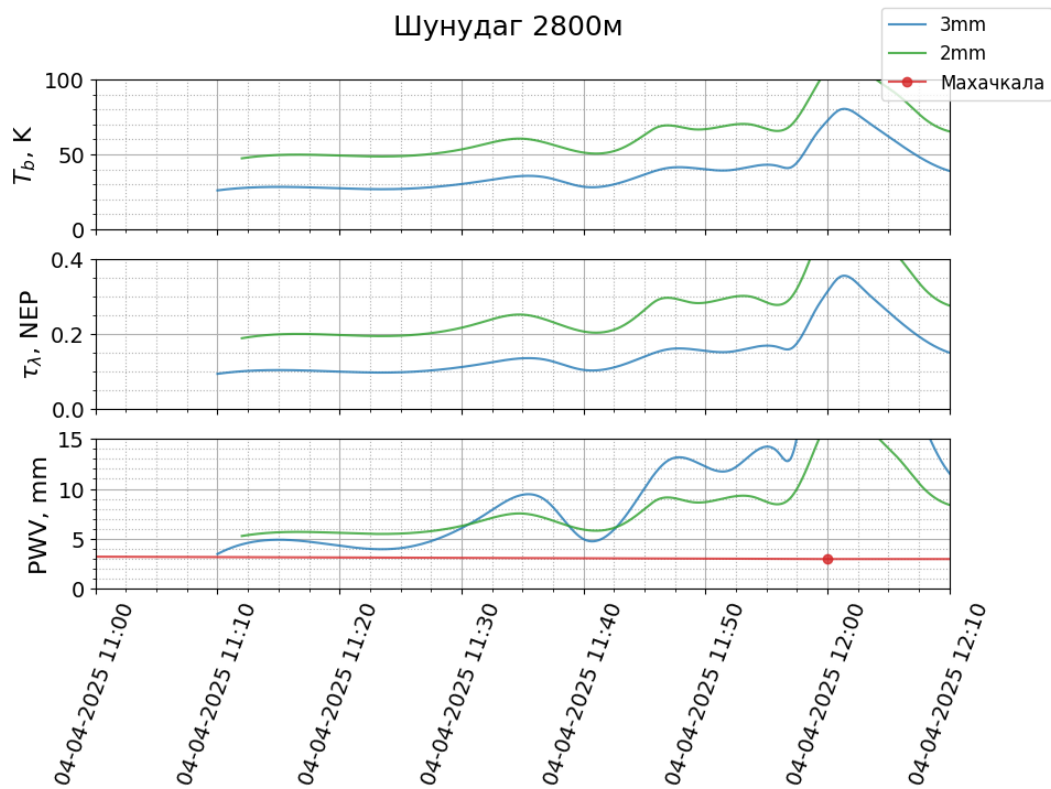


Рис. 27. Результат радиометрических измерений атмосферы на плато Шунудаг (2800 м) 04.06.2025 г. во время прохождения гряды облаков.

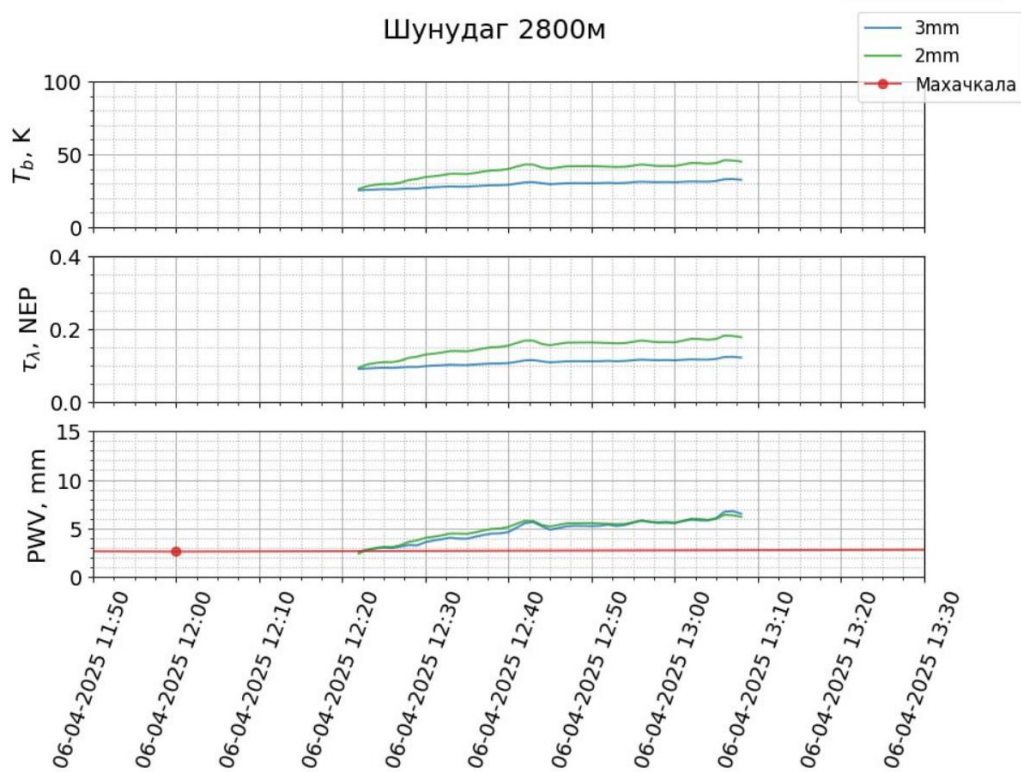


Рис. 28. Результат радиометрических измерений на плато Шунудаг (2800 м) 06.04.2025 г. в условиях ясной атмосферы.

На рис. 22. показан процесс радиометрических измерений на плато Шунудаг и г. Джуфудаг в конце марта-начале апреле 2025 г. На рис. 23-28. приведены результаты радиометрических измерений в конце марта-начале апреля и в июне 2025 г.

Результаты радиометрических измерений на г. Джуфудаг и плато Шунудаг на волне 3 мм/2 мм показали ожидаемо низкий уровень яркостных температур ≤ 30 K/50 K, оптической толщи $\leq 0,1$ Нп/0,2 Нп и $PWV \leq 3-4$ мм в конце марта – начале апреля и в июне 2025 г. Для дальнейшего исследования астроклимата мест сравнения необходим набор статистик метеорологических параметров, оптической толщи и PWV . С этой целью принято решение установить автоматическую УЗ метеостанцию и начать регулярные радиометрические измерения оптической толщи и PWV в с. Буршаг (2225 м) на склоне г. Джуфудаг (3015 м) как месте с ожидаемо более спокойным ветровым режимом.

6. Развитие методов комплексного изучения астроклимата и дальнейшие планы

6.1. Измерение водозапаса облаков Q и ВТЗ

Нами пока были рассмотрены в основном измерения влагосодержания атмосферы W , которое можно было получить в условиях ясного неба или переменной облачности. Если коэффициенты α , β для получения W можно рассчитать по атмосферной модели Liebe, Moliere и др., которые используют квантово-механическую теорию поглощения в кислороде и водяном паре, удельный коэффициент поглощения в капельной воде γ требует иного подхода с использованием дипольной теории Дебая. Этот коэффициент проще измерить радиометрическим методом в месте проведения измерений оптической толщи.

В случае наличия облачности задача нахождения W и Q решается на двух частотах с помощью системы из двух линейных уравнений типа (5) с двумя неизвестными W и Q . Точность ее решения зависит точности измерения T_b на двух длинах волн и точности вычисления удельных коэффициентов

поглощения. Удельные коэффициенты поглощения можно также получить радиометрически измеряя τ на двух волнах и получая W и Q от другого прибора, например РВП ИПА РАН [22]. Измерив α , β в условиях ясного неба можно найти (измерить) коэффициент γ в условиях облачности. В результате последовательно можно измерить все удельные коэффициенты поглощения. В наших ближайших планах – совместная работа ИПАР-2А с РВП ИПА РАН и переход к измерению W и Q , что даст возможность эффективно работать в условиях как ясного, так и облачного неба. Определенный интерес представляет увеличение числа каналов ИПАР-2А до 3-х (ИПАР-3А) с помощью второго радиометра 3 мм диапазона. В этом случае по расхождению показаний 2-х 3 мм каналов можно будет оценивать относительную точность (повторяемость) радиометрических измерений разными радиометрами на одной волне. Относительную точность (сходимость) радиометрических измерений на двух разных волнах характеризует получаемая ими разница в PWV .

Знание W и Q также позволяет найти влажную тропосферную задержку (ВТЗ) радиосигнала, имеющую размерность длины ΔL_{ϕ} [см] – важную величину для РСДБ наблюдений. Диапазон значений ΔL_{ϕ} составляет от нескольких метров летом в обсерватории “Зеленчукская” до нескольких сантиметров зимой в обсерватории “Бадары” [23].

6.2. Вторичная калибровка ИПАР-2А по данным РВП ИПА РАН

Повторные лабораторные (первичные) калибровки ИПАР-2 показали их достаточно высокую временную стабильность, но повторяемость их выполнения требует дальнейшего совершенствования. Точность нахождения удельных коэффициентов поглощения, а также их соответствие данному региону можно повысить, измеряя их радиометрически, как описано в пункте 6.1. В наших ближайших планах – валидация ИПАР-2А с помощью РВП ИПА РАН как эталонного прибора и фактически вторичная калибровка ИПАР-2А по данным РВП ИПА РАН. Ранее в работе [12] было показана высокая корреляция

значений W , полученных с помощью РВП ИПА РАН в Менделеево с данными радиозондирования.

Сравнение W и Q на двух приборах может выявить смещение ΔW и ΔQ . Лабораторная калибровки ИПАР-2А выполняется с помощью чернотельной нагрузки при двух температурах (комнатной и жидкого азота). Шумовая температура чернотельной нагрузки не должна зависеть от частоты измерений и полученные калибровочные коэффициенты не должны зависеть от АЧХ радиометров. В реальных радиометрических измерениях T_b может зависеть от АЧХ радиометров, поскольку от нее будет зависеть относительный вклад кислорода в T_b и он будет тем больше чем меньше W . Поэтому полезно изучить зависимости $\Delta W(W)$ и $\Delta Q(Q)$ в достаточно широком диапазоне $W = 1-20$ мм и $Q = 0-0,5$ кг/м², а также их временную стабильность найденных смещений $\Delta W(t)$, $\Delta Q(t)$, используя РВП ИПА РАН. Также целесообразно получить $\Delta W(W)$ и $\Delta Q(Q)$ в широком диапазоне изменения давления ΔP , что позволит их применять на разных высотах расположения прибора.

Следующим шагом может стать вторичная калибровка ИПАР-2А с помощью РВП ИПА РАН. Зная W по данным РВП ИПА РАН в условиях ясного неба найдем:

$$\tau_1 = \alpha_1 \cdot \exp\left(\frac{-h}{h_0}\right) + \beta_1 \cdot W, \quad (11)$$

$$\tau_2 = \alpha_2 \cdot \exp\left(\frac{-h}{h_0}\right) + \beta_2 \cdot W. \quad (12)$$

Сравним их с значениями оптической толщи, полученными с помощью ИПАР-2А в тех же условиях:

$$\tau_{01} = \ln \frac{\left(\frac{2.73}{T_{eff}} - 1\right)}{\left(\frac{T_{b01}}{T_{eff}} - 1\right)}, \quad (13)$$

$$\tau_{02} = \ln \frac{\left(\frac{2.73}{T_{eff}} - 1 \right)}{\left(\frac{T_{b02}}{T_{eff}} - 1 \right)}. \quad (14)$$

Откуда получим:

$$W_0 = \frac{\tau_\lambda - \alpha(\lambda) \cdot \exp\left(\frac{-h}{h_0}\right)}{\beta(\lambda)}. \quad (15)$$

Тогда $\Delta W = W - W_0$ – смещение W_0 и далее подбором найдем T_{b1} и T_{b1} , при котором $\Delta W = 0$ на каждой частоте. Полученное таким образом ΔT_b – это смещение T_b в условиях ясного неба.

К тем же значениям T_{b1} , T_{b1} , τ_1 , τ_2 можно прийти, найдя новые калибровочные коэффициенты. Запишем уравнение (2) в виде:

$$V_1 / K_1 = [1 - e^{-\tau_1}] T_{eff} + 2.73e^{-\tau_1}, \quad (16)$$

$$V_2 / K_2 = [1 - e^{-\tau_2}] T_{eff} + 2.73e^{-\tau_2}, \quad (17)$$

тогда получим:

$$K_1 = \frac{V_1}{[1 - e^{-\tau_1}] T_{eff} + 2.73e^{-\tau_1}}, \quad (18)$$

$$K_2 = \frac{V_2}{[1 - e^{-\tau_2}] T_{eff} + 2.73e^{-\tau_2}}, \quad (19)$$

где K_1 и K_2 – новые (вторичные) калибровочные коэффициенты, которые можно использовать для получения более точных значений T_{b1} , T_{b1} , τ_1 , τ_2 и $W_1 = W_2$.

Сравнивая Q_0 , полученное с помощью ИПАР-2А и Q , полученное с помощью РВП ИПА РАН получим смещение $\Delta Q = Q - Q_0$,

Предложенная методика вторичной калибровки ИПАР-2 с помощью РВП ИПА РАН как эталонного прибора позволит повысить точность измерений W и Q

с помощью ИПАР-2 до $\Delta W \pm 1$ мм и $\Delta Q \pm 0,05$ кг/м². Это потребует достаточно длительных (не менее месяца зимой и месяца летом) первых совместных измерений ИПАР-2А и РВП ИПА РАН [22]. В дальнейшем короткую вторичную калибровку (в течение 1-2 малооблачных дней) можно будет выполнять не чаще одного раза в год. В случае получения высокой временной стабильности найденных смещений ΔW , ΔQ и ΔT_b , их можно будет использовать для коррекции данных ИПАР-2А без проведения новых вторичных калибровок.

6.3. Измерение углового размера атмосферных изображений

Угловой размер атмосферных изображений на оптическом телескопе (*seeing*) FWHM можно определить как $\text{FWHM(рад)} = 0,98 \times \lambda/R_0$, где R_0 – радиус Фрида. Радиус Фрида определяется набором неоднородностей показателя преломления воздуха от земной поверхности до верхней границы турбулентной атмосферы. Радиус Фрида зависит от длины волны регистрируемого излучения как $R_0 \sim \lambda^{6/5}$, по физическому смыслу он эквивалентен диаметру телескопа, имеющего дифракционный предел полуширины изображения λ/R_0 , которое соответствует изображению, создаваемому атмосферой при наблюдении точечного источника идеальным телескопом с бесконечным размером зеркала. Для субмм телескопа наибольший интерес представляет радио *seeing* но он должен быть связан с “сухим” оптическим “*seeing*” по приведенной выше зависимости от длины волны и также учитывать неоднородности влажной компоненты атмосферы (водяной пара и капельной воды) [6, 20]. Оптический *seeing* также может учитывать влажную компоненту если диапазон измерений *seeing* расширить до начала ближнего ИК диапазона, где существуют линии поглощения паров воды. Для измерения *seeing* и контроля за состоянием облачности в районе г. Джуфудаг будут использованы оптические мониторы Полярной звезды (ПЗ) Поляр-2 и Поляр-3, разработанные в САО РАН [24, 25]. Облака верхнего яруса (цирусы), при которых обычно видна ПЗ, могут повышать *seeing*, что требует одновременного мониторинга облачности, а это недостижимо с помощью одного

прибора Поляр-2 из-за недостаточно широкого поля зрения и установки на нем оптимального коэффициента усиления для наблюдений ПЗ.

Polar-2 имеет следующие характеристики:

- длиннофокусный объектив малых размеров с $F/D = 12,7$, что обеспечивает высокую точность измерения дисперсии положения центра изображения;
- достаточно широкое поле зрения $FOV = 4,23^\circ \times 3,18^\circ$;
- максимальное разрешение изображения 2592×1944 пикселей, пиксель $2 \text{ мкм} \times 2 \text{ мкм}$;
- высокий динамический диапазон HDR и высокая чувствительность (1042 mV с сигналом насыщения 914 mV , что позволяет видеть объекты с астрономической освещенностью в $1,34 \times 10^{-9}$ люкс, или до 8 звездной величины);
- высокое быстродействие (60 кадров в секунду);
- возможность наведения на полярную звезду на любой широте измерений;
- достаточно высокая квантовая эффективность (QE) CMOS камеры вплоть до начала ближнего ИК диапазона.

Поляр-2 позволяет непрерывно наблюдать ПЗ (видимая звездная величина 1,97) при фиксированном положении прибора на любой широте в ночное и сумеречное время и вычислять *seeing* звезды с помощью статистической обработки разброса координат центров ее изображений. Оптический монитор Поляр-2 и УЗ метеостанции в процессе испытаний в высокогорном селе Буршаг (2225 м) Агульского района Дагестана на склоне г. Джуфудаг показаны на рис. 29.



Рис. 29. Оптический монитор Поляр-2 и УЗ метеостанция во время испытаний в высокогорном селе Буршаг (2225 м) Агульского района Дагестана.

В процессе испытаний прибора Поляр-2 в период с 1 октября по 1 декабря 2025 г., минимальный размер атмосферных изображений (минимальный *seeing*) с интервалом измерений 3 минуты опускался ниже 0,2", медианный *seeing*, приведенный к зениту составил 0,49". Разница в показаниях двух приборов Поляр-2 одновременно на одной площадке измеряющих *seeing* с временным интервалом 3 минуты составляет 0,025" (СКО). Медианный *seeing* за тот же период, измеренный аналогичным прибором в районе расположения БТА составил 1,05", что 1,5 раза ниже годовых медианных значений *seeing*, полученных по данным многолетних наблюдений [26], а также значений *seeing*, полученных по данным наблюдений звезд на БТА и Цейсс-100 с длительными экспозициями в данный период. Поэтому был сделан вывод о систематическом занижении измеряемых значений *seeing* прибором Поляр-2.

Измерения *seeing* на самом телескопе включают вклад турбулентности атмосферы внутри башни и в самой оптической системе телескопа. Обычно *seeing* в свободной атмосфере, ниже медианных значений *seeing*, измеряемых крупным телескопом. Кроме того, существует зависимость измеряемых значений *seeing* от времени экспозиции. В частности, многофункциональные оптические

приборы с быстродействующими CMOS камерами, работающие на телескопах Цейсс-1000 и БТА (MMPP и Scorpio-2) с короткими экспозициями (≤ 100 с) дают медианный *seeing* близкий к Полярю. Однако *seeing*, полученный по результатам наблюдений звезд на Цейсс-1000 и БТА с CCD камерами с длинными экспозициями (5-6 мин) получается выше, но именно он традиционно считается более правильным.

Попытка увеличить время экспозиции оптических приборов с CMOS камерами на Цейсс-1000 и Поляр-2 до 5-6 мин привела к увеличению медианного *seeing* в 1,5-2 раза в зависимости от величины *seeing*, что обеспечило высокую сходимость результатов измерений *seeing* на разных инструментах и говорит о наличии ранее неучтенных масштабов турбулентности, которые стали проявляться и вносить свой вклад. С учетом оптимизации времени измерений *seeing* уточненный медианный *seeing*, приведенный к зениту в с. Буршаг в октябре-декабре 2025 можно оценить на уровне 0,75".

Стоит также упомянуть еще одну из возможных причин систематического занижения *seeing* – малый размера апертуры в приборе Поляр-2, поскольку малая апертура ($D \ll R_0$) может обладать определенной пространственной фильтрацией к линейным размерам атмосферных турбулентных флуктуаций. В частности, с уменьшением R_0 и ростом *seeing* систематическая ошибка измерений *seeing* (смещение вниз) с помощью Поляр-2 может по этой причине возрасти. Однако, высокое отношение С/Ш и применяемый способ обработки смещений центров изображений ПЗ [24] может позволить вытаскивать и частично подавленные малые масштабы турбулентности (высокий *seeing*). С другой стороны, при больших R_0 и малом *seeing* систематическая ошибка измерений (смещение вниз) может возрасти из-за эффекта сглаживания, поскольку данные измерений *seeing* показывают, что большая изменчивость R_0 наблюдается при больших значениях R_0 , в то время как низкие значения R_0 с меньшей вероятностью будут существенно изменяться [27]. Поэтому для измерений низких значений *seeing* нужна оптическая камера с достаточно высоким быстродействием, а для насыщения роста *seeing* на CMOS камерах

нужно оптимально выбирать время экспозиции (не менее 300 с). Все эти аспекты будут уточнены в дальнейшем по мере накопления статистики *seeing*.

Следует отметить очень высокое качество изображений ПЗ в с. Буршаг с коротким временем экспозиции (1 с), на которых диск Эйри окружен двумя дифракционными кольцами (узор Эйри), что независимо от результатов измерений медианы *seeing* говорит об очень спокойной атмосфере.

Заметим, что в Поляр-2 уверенно получаются только секундные временные изображения ПЗ, субсекундные изображения ПЗ позволит получать Поляр-3. Поляр-3 имеет CMOS камеру с повышенным быстродействием, чувствительностью и высоким порогом насыщения. Расширенное поле зрения $15^\circ \times 20^\circ$ и разрешение изображения 8 МР позволит одновременно с измерением *seeing* регистрировать состояние облачности вокруг нее и отмечать периоды повышения *seeing* из-за влияния облачности верхнего яруса.

Локальная величина турбулентных флуктуаций индекса преломления в воздухе описывается *структурным коэффициентом показателя преломления* C_n^2 . Зависимость $C_n^2(h)$ называется оптическим профилем турбулентности (ОПТ). Качество изображения и *seeing* зависят от суммарного влияния всех слоев атмосферы и $\frac{1}{R_0^{5/3}}$ прямо пропорционален $\int_0^{H_{\max}} C_n^2(h) dh$, где $H_{\max}$ – максимальная высота турбулентности (20 км). Поэтому, зная R_0 можно найти интеграл от ОПТ, а знание $C_n^2(0)$, профилей температуры и влажности атмосферы, которые можно получить по данным радиозондирования ближайшей аэрологической станции или данным реанализа Ecm-5 позволяет восстановить ОПТ.

Для измерения приземной температуры, давления, влажности порывов и пульсаций ветра, нахождения $C_n^2(0)$, оценки вклада турбулентности приземного слоя атмосферы в *seeing*, ПСС и оптической прозрачности атмосферы (ОПА) нами будет использована автоматическая метеостанция с УЗ анемометром и солнечным фотометром.

6.4. Измерение облачности, ПСС, скорости и направления ветра

В период испытаний оптического монитора Поляр-2 в октябре-ноябре 2025 г. более 75 % ночей в месте его расположения в с. Буршаг оказались ясными и рабочими для измерений *seeing* по ПЗ, что говорит о низкой бальности облачности или тонком слое облаков ночью. Это соответствует и визуальным наблюдениям ночного неба в с. Буршаг в 2025 г. Ожидаемое нами количество ясных ночей на г. Джуфудаг (3015 м) в течение 2025 г составляет 75-80 %, что на уровне лучших обсерваторий мира – Мауна Кеа (4200 м), Серо Паранал (2640 м), La Palma (2396 м). Для сравнения число полностью ясных рабочих ночей для прибора Поляр-2 в октябре-ноябре 2025 г. в районе БТА не превышает 25 %, а в течение всего 2025 г. – не превышает 20 %. Продолжительность солнечного сияния (ПСС) по данным солнечного фотометра достигала 220 часов в месяц, что говорит о достаточно низкой бальности облаков днем, но замечена и тенденция прояснения неба в ночные часы. С учетом сезонного фактора и горного рельефа, снижающего ПСС, ожидаемая ПСС в с. Буршаг (2225 м) не ниже 2580 ч/год, что может стать одним из трех наиболее высоких измеренных значений ПСС в РФ. Для сравнения ПСС в районе расположения БТА не превышает 2140 ч в год. В настоящее время по данным актинометрических станций РФ наибольшую ПСС в РФ имеет г. Борзя (687 м) (Забайкальский край) 2869 ч в год, на втором месте находится г. Улан-Удэ (500 м) 2797 ч в год, на третье место с ПСС 2553 ч в год может претендовать с. Ахты (1100 м) в Дагестане, которое расположено в 50 км по прямой видимости от с. Буршаг. На Крымском полуострове наибольшую ПСС регистрируют в г. Судак и на мысе Меганом (2450-2500 ч). Достаточно высокие значения ПСС получают в г. Хабаровск (2450 ч) и г. Чита (2420 ч).

В дальнейшем контроль облачности в с. Буршаг и на г. Джуфудаг будет выполняться автоматически широкоугольными видеокамерами дневного и ночного видения. Поскольку в данный момент в нашем распоряжении нет средств объективного контроля облачности на г. Джуфудаг воспользуемся, как и в разделе 3.2. для ветра, прогнозными моделями облачности и осадков, чтобы

сравнить по этим показателям сразу ряд астропунктов. Наилучшие возможности прогнозирования облачности и осадков предлагает модель NEMSGLOBAL. Глобальные модели погоды NEMSGLOBAL и ERA5 – единственные модели, доступные с интервалом в один час на протяжении более 30 лет. Большинство наборов данных моделирования погоды в них автоматически обновляются ежедневно, что обеспечивает согласованность между прогнозом погоды и его историей. Такие модели широко используются в профессиональных метеосервисах Windy, Windfinder, Meteoblue, World-Weather, Meteoexplorer и др.

На рис. 30-31 приведены ожидаемый слой облаков и количество осадков 6 мест сравнения по данным NEMSGLOBAL в период испытаний наших приборов в октябре-ноябре 2025 г. Из рис. 30-31 видно, что с. Буршаг имеет наименьший слой облаков и количество осадков в октябре-ноябре 2025 г. среди приведенных мест сравнения, расположенных на близкой высоте, а г. Джуфудаг существенно превосходит по слою облаков и осадкам все места сравнения, включая г. Эльбрус (5642 м). Фактически данный модельный прогноз ожидаемого слоя облаков и количества осадков является прогнозом возможного времени работы ESMT в указанный период в каждом из мест сравнения. На рис. 32 приводятся в те же месяцы слой облаков и количество осадков на г. Джуфудаг и плато Шунудаг, где также наименьшая облачность видна на г. Джуфудаг. Корреляция приведенного модельного прогноза слоя облаков и количества осадков с результатами наших собственных наблюдений и метеоданными в с. Буршаг достаточно высокая (выше 70 %) и фактическая бальность облаков в с. Буршаг обычно ниже прогноза.

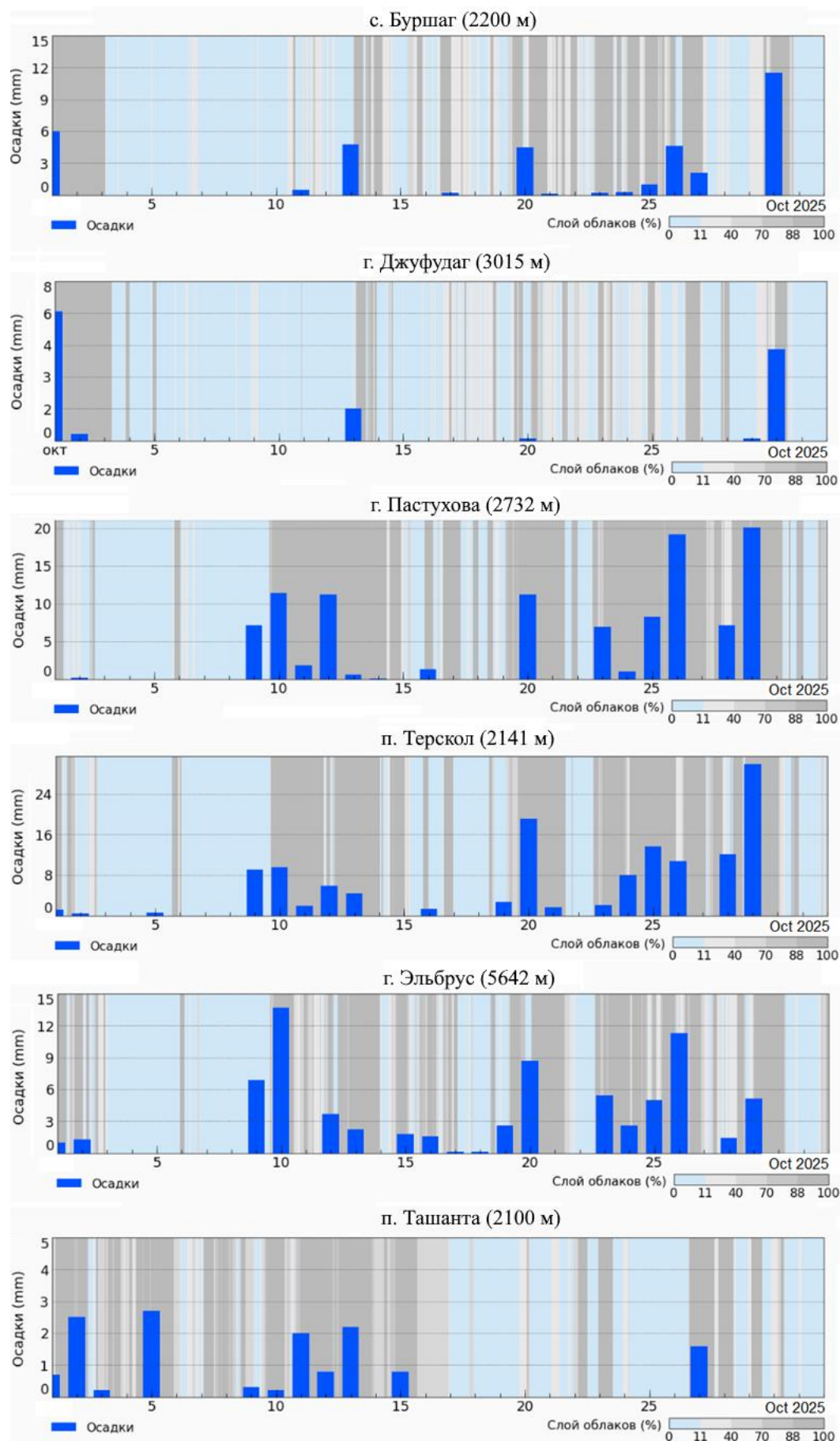


Рис. 30. Прогноз слоя облаков и количества осадков в 6 местах сравнения в октябре 2025 г. по NEMSGLOBAL.

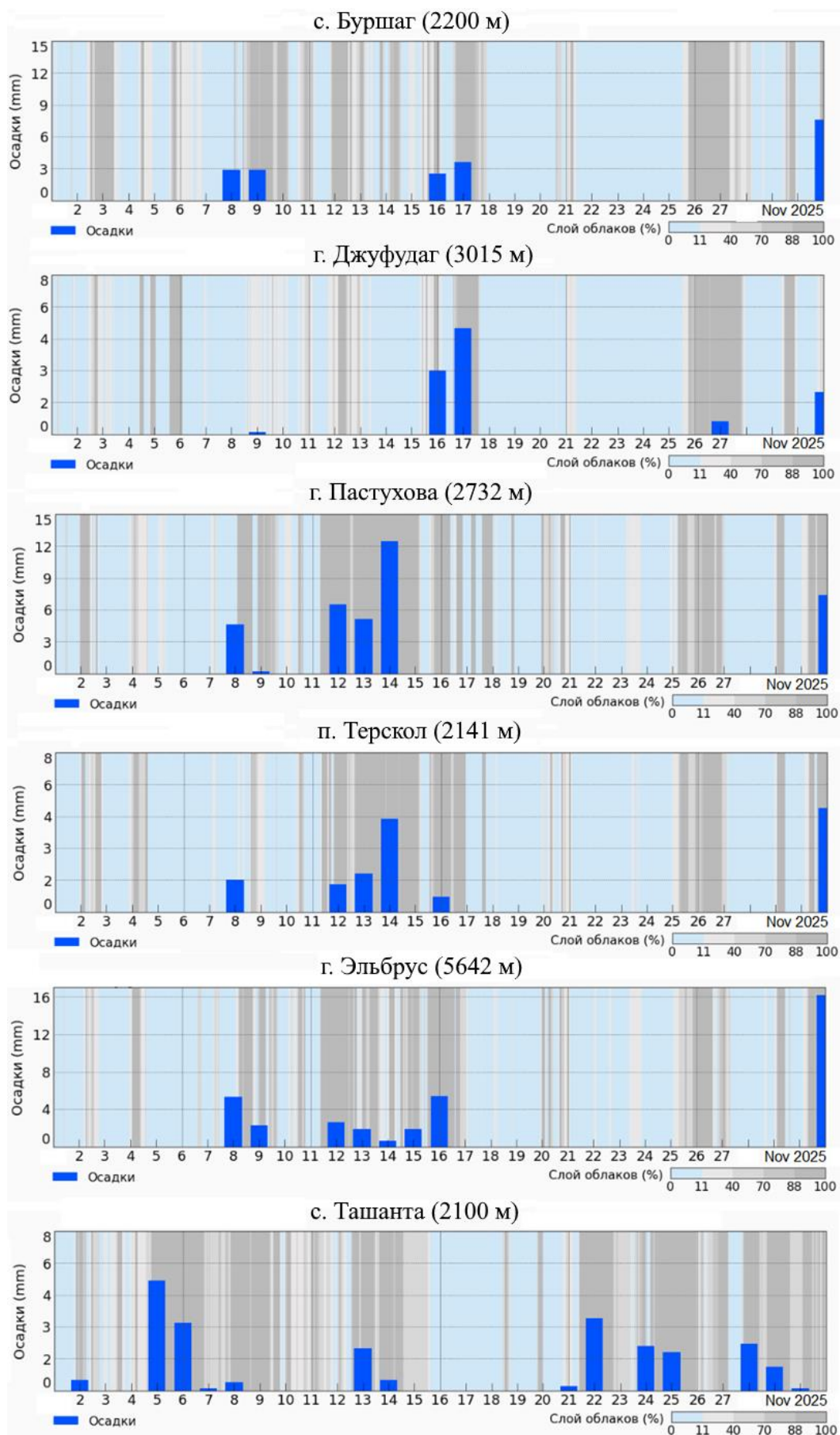


Рис. 31. Ожидаемый слой облаков и количество осадков в 6 местах сравнения в ноябре 2025 г. по NEMSGLOBAL.

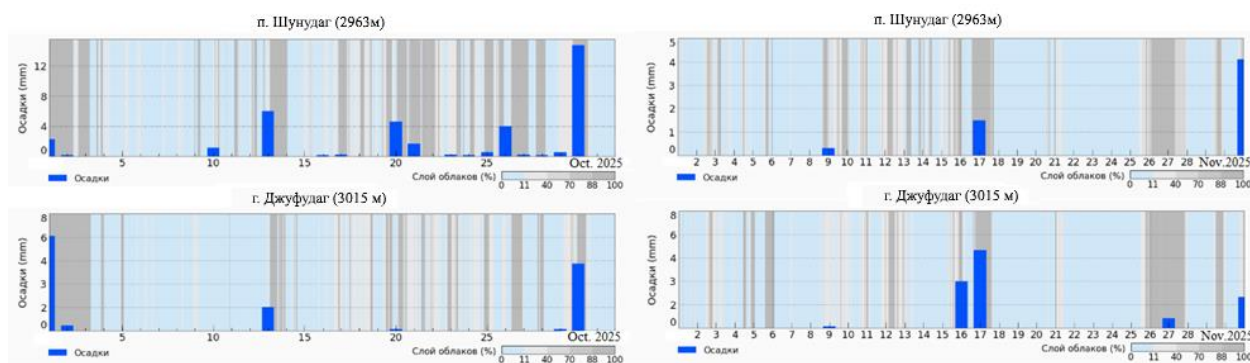


Рис. 32. Прогноз слоя облаков и количества осадков на г. Джуфудаг и плато Шунудаг в октябре и ноябре 2025 г. по NEMSGLOBAL.

Как и ожидалось УЗ метеостанция показывает спокойный ветровой режим в с. Буршаг на склоне г. Джуфудаг не только в сравнении с г. Курапдаг, но и в сравнении с местом расположения БТА на склоне г. Пастухова (рис. 33-34). Для местного режима ветра характерен суточный цикл с увеличением скорости максимальных порывов ветра до 10-12 м/с в утренние часы перед или сразу после восхода Солнца. Регулярные умеренные приземные ветры могут быть даже полезны: они способствуют рассеиванию тепловых слоев вблизи поверхности, уменьшая турбулентность, создаваемую нагревом земли, тем самым улучшая стабильность приземной атмосферы и *seeing* [28].

Как видно из рис. 33-34 скорости порывов ветра в районе БТА заметно превышают максимальные скорости порывов ветра в с. Буршаг на склоне г. Джуфудаг. При этом повторяемость скорости ветра в обоих случаях имеет характерное для ветра двухпараметрическое (β) распределение (рис. 34) (Вейбулла и др.), а его аппроксимация обобщенным распределением экстремальных значений (GEV) дает в 2-3 раза меньшие МО и СО в с. Буршаг в сравнении с районом расположения БТА.

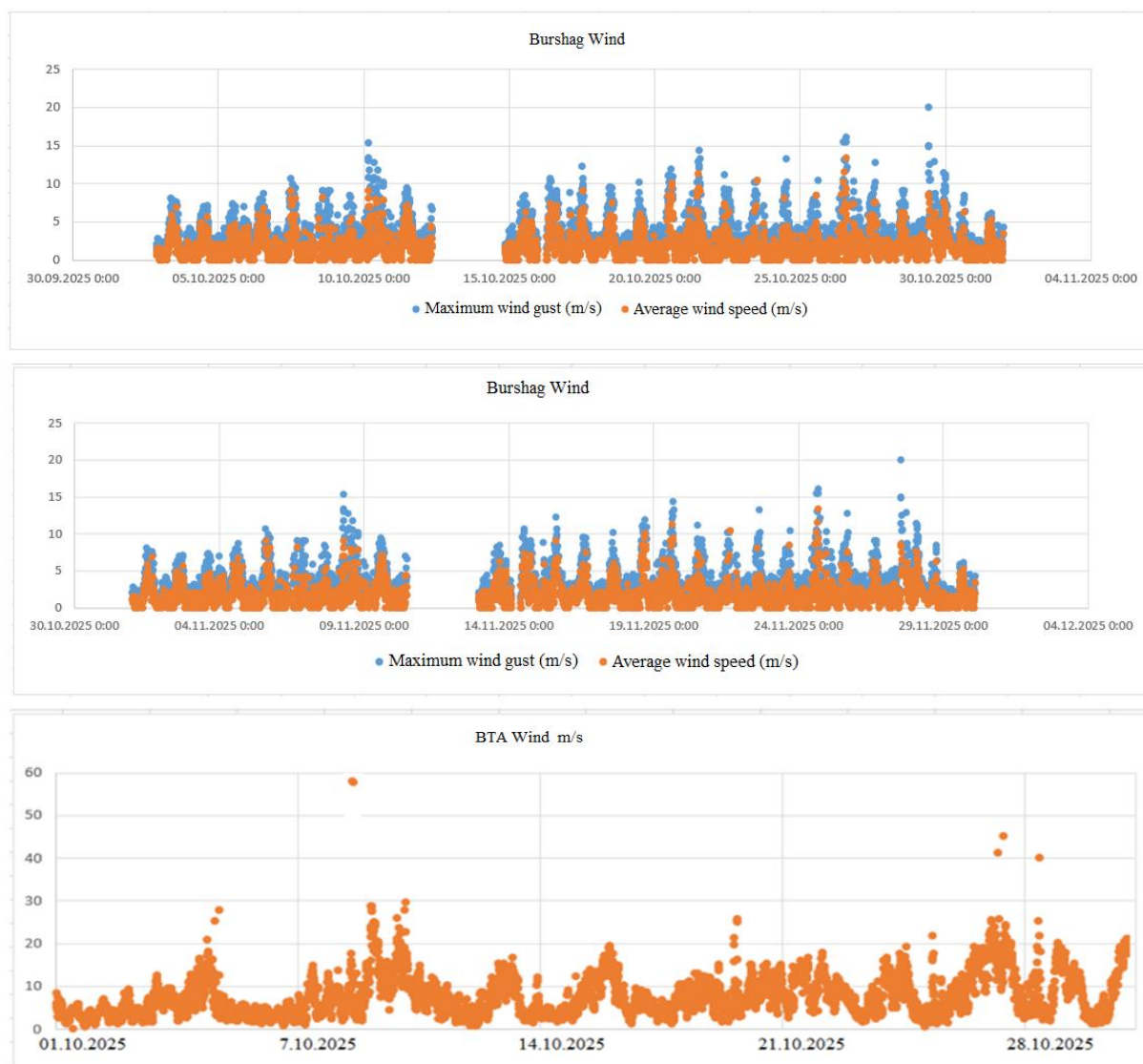


Рис. 33. Скорость ветра по данным УЗ метеостанции в с. Буршаг в октябре и ноябре 2025 г. (вверху), скорость ветра в районе расположения БТА по данным УЗ метеостанции БТА в октябре 2025 г. (внизу).

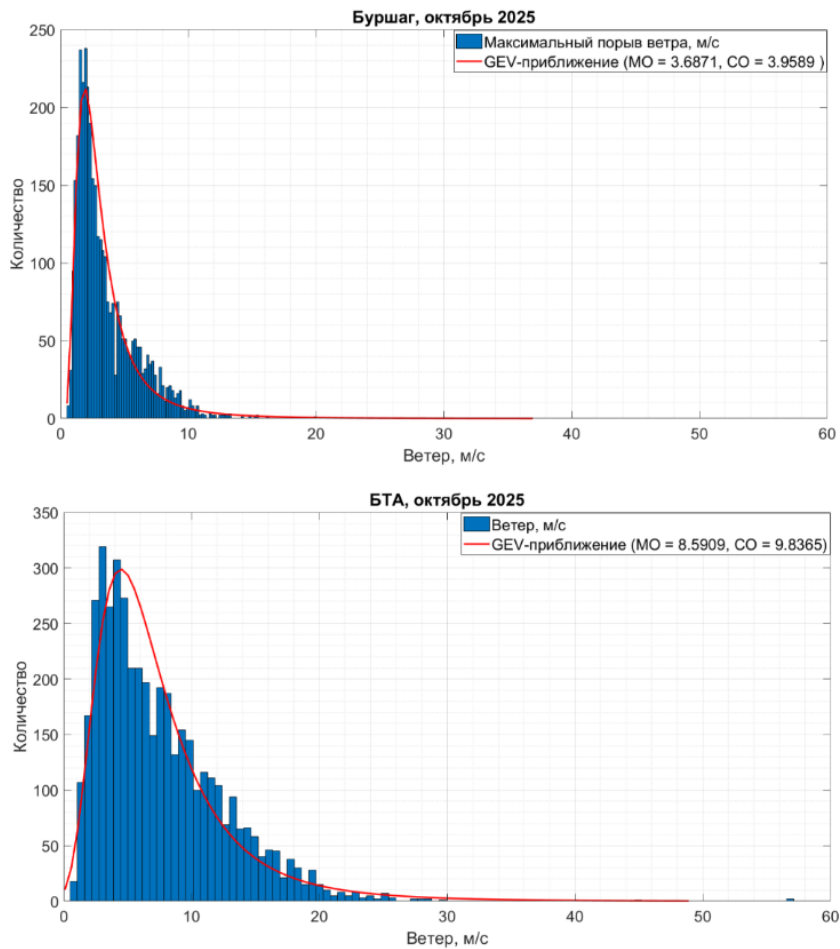


Рис. 34. Гистограммы скорости ветра по данным метеостанций с. Буршаг (2225 м) (вверху) и БТА (2070 м) (внизу) в октябре 2025 г. с GEV аппроксимацией плотности распределения.

Функция плотности распределения вероятности (PDF) обобщенного распределения экстремальных значений (GEV) имеет вид:

$$f(x, \xi) = \begin{cases} e^{-\frac{(x-\mu)}{\sigma}} \exp\left\{-e^{-\frac{(x-\mu)}{\sigma}}\right\}, & x \in [-\infty; \infty), \xi = 0 \\ \left(1 + \xi \frac{(x-\mu)}{\sigma}\right)^{-(1+1/\xi)} \exp\left\{-\left[1 + \xi \frac{(x-\mu)}{\sigma}\right]^{-1/\xi}\right\}, & x \in \left[\mu - \frac{\sigma}{\xi}; \infty\right), \xi > 0, \\ 0, & x \in \left[-\infty; \mu - \frac{\sigma}{\xi}\right], \xi > 0, \end{cases}$$

где μ – параметр положения (location), $\sigma > 0$ – параметр масштаба (scale), ξ – параметр формы (shape).

$g_k = \Gamma(1 - k\xi)$, $k \in \{1, 2\}$, где Γ – Гамма-функция ($\Gamma(z) = \int_0^\infty t^{z-1} e^{-t} dt$, $z > 0$).

Для $\xi < 1, \xi \neq 0$:

$E(X) = \mu + (g_1 - 1) \frac{\sigma}{\xi}$ – Математическое ожидание (МО) массива данных X

$\text{Var}(X) = (g_2 - g_1^2) \frac{\sigma^2}{\xi^2}$ – Дисперсия, $SD = \sqrt{\text{Var}(X)}$ – Стандартное отклонение (СО).

Параметры GEV приближения, полученные для гистограмм рис. 34, приведены в таблице 6.

Таблица 6. Параметры GEV приближения.

Параметры	Буршаг, октябрь 2025 г.	БТА, октябрь 2025 г.
ξ – формы	0,3616	0,2034
σ – масштаба	1,2673	3,1489
μ – положения	2,2596	5,0439

Сделаем попытку объяснить причины спокойного ветрового режима в с. Буршаг в сравнении с районом г. Курапдаг. Для этого напомним, что *преимущественное направление ветра* (ПНВ) – направление, с которого ветер дует преимущественно над конкретной точкой земной поверхности. *Ветровая тень* – область слабых ветров в ПНВ за подветренной стороной горы или горного хребта. *Глубина зоны ветровой тени* l зависит не только от высоты H и длины горного хребта L но и характера самого ветра. Согласно [29] l можно найти по формуле $l \approx 10H/Fr$, где Fr – число Фруда, которое зависит от L , N (частота Брюнста – Вейселя $\sim 0,01 \text{ с}^{-1}$), скорости ветра U . Если $U = 30 \text{ м/с}$, то для Самурского хребта получим $Fr \approx 0,1$ и $l \sim 200 \text{ км}$, но на практике из-за турбулентности, неоднородного рельефа и «перетекания» потока реальная ветровая тень обычно сокращается в 3-5 раз, тогда получим $l \sim 50 \text{ км}$ в долине.

Грубую оценку l можно сделать и по формуле $l \leq (8 \times H \times L)^{1/2}$, известной из аэродинамики, но она применима при $L/H \leq 24$. Если взять только северо-западную часть Самурского хребта длиной $\sim 90 \text{ км}$, удовлетворяющей данному соотношению, получим $l \leq 52 \text{ км}$ – длину *ветровой тени* в долине.

Если бы ветер двигался по прямой от вершины хребта высотой H до вершины горы высотой H_2 , расположенной в *зоне ветровой тени*, из простой геометрии следует, что длина *ветровой тени* для горы высотой H_2 существенно уменьшится до $l' = l \times (1 - H_2/H)$. Но *ветровой поток* движется по более сложной криволинейной траектории и уменьшение *глубины зоны ветровой тени* может быть не столь значительным. Кроме того, *встречные градиенты давления* в интересующем нас районе могут расширять *ветровую тень*. Хорошим примером большой *глубины зоны ветровой тени* является Хустская котловина шириной 24 км и длиной 42 км, полностью находящаяся по ширине в *ветровой тени* Карпатских гор относительно континентальных ветров при перепаде высот между ними не более 900 м.

Согласно полученной нами Розе ветров (РВ) ПНВ в с. Буршаг в октябре 2025 г. юго-восточное, по данным модели ERA-5, среднегодовое ПНВ в с. Буршаг и на г. Джуфудаг юго-западное (рис. 35). Такое же ПНВ имеют г. Курапдаг (3724 м) и ближайшее к ней высокогорное с. Чираг (2200 м), где нами ранее наблюдалась высокая повторяемость сильных порывов ветра.

Burshag 1 октября 2025 г. 0:00 - 31 октября 2025 г. 23:59

Средняя скорость ветра

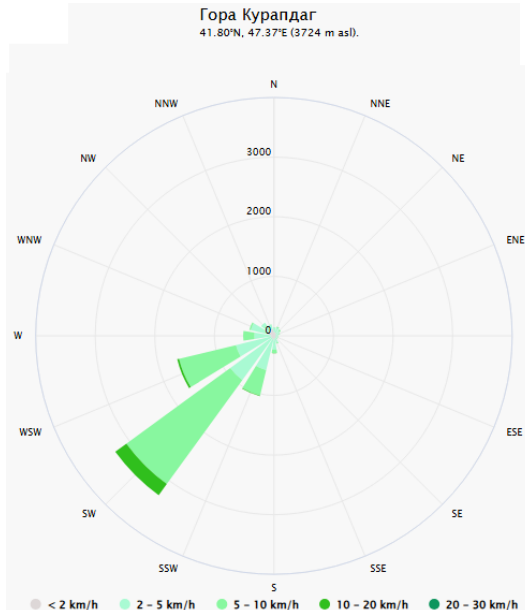
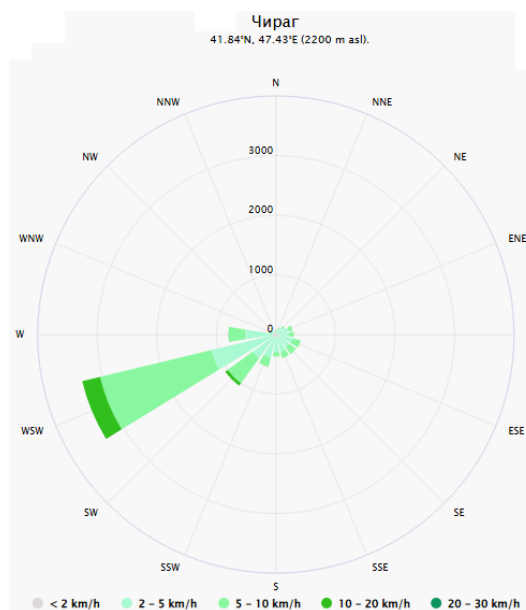
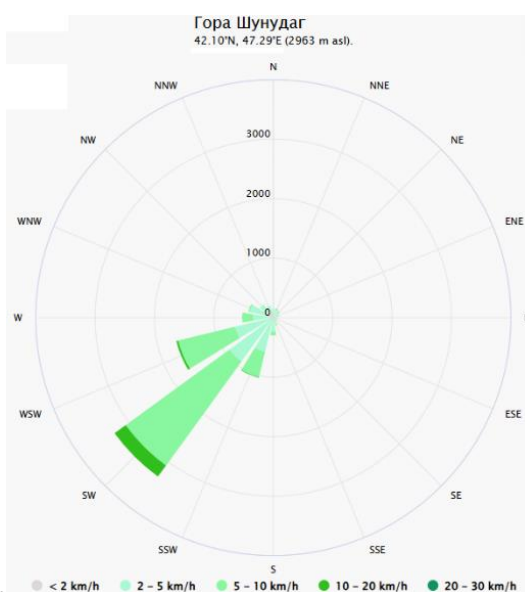
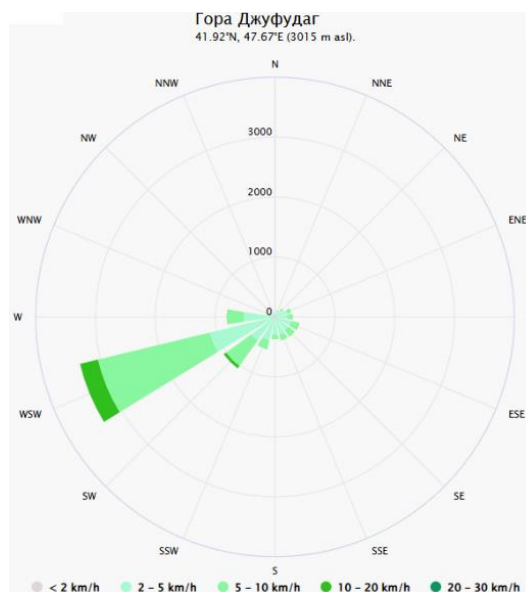
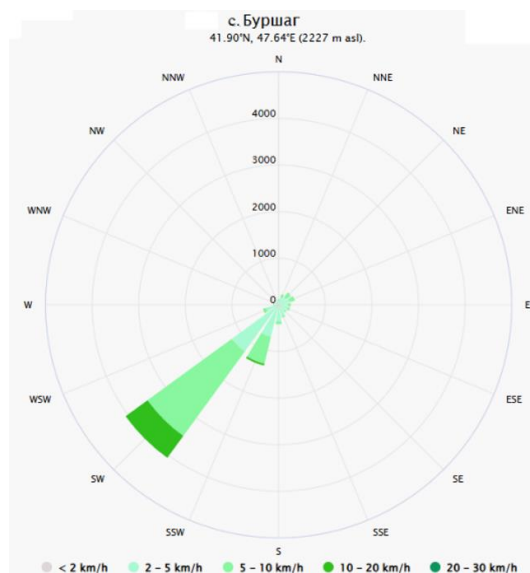
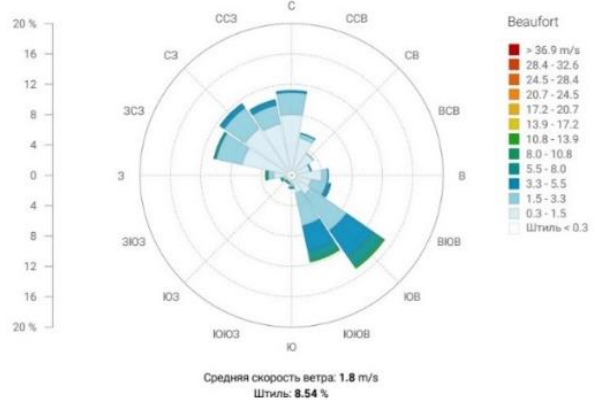


Рис. 35. РВ с. Буршаг октябрь 2025 г., годовая РВ по данным ERA-5 в с. Буршаг, на г. Джуфудаг, на г. Шунудаг, на г. Курапдаг и в с. Чираг.

Согласно карте, приведенной на рис. 36 на юго-западе для с. Буршаг и г. Джуфудаг расположен Самурский хребет (рис. 3, рис. 5), который может являться естественной преградой для ветров юго-западного направления, создавая своим горным массивом *ветровую тень* долине и существенно более низким горам, достаточно близко к нему расположенным на северо-востоке. Обычно из-за *ветровой тени* подветренная сторона хребта и ее склоны значительно суше *наветренной* и потому они часто не имеют лесного покрова, что характерно для Самурского хребта. Как видно из рис.35-36 ПНВ для г. Джуфудаг проходит через Самурский хребет южнее г. Курапдаг. Такое же юго-западное ПНВ по данным модели ERA-5 имеет плато Шунудаг (рис. 35), но самый протяженный и высокий в Дагестане Самурский хребет расположен на юго-востоке от плато Шунудаг (рис. 36) и не может защитить плато в ПНВ.

Наличие *ветровой тени* лишь одна из возможных причин значительного ослабления ветра в направлении г. Джуфудаг. *Ветровая тень*, например, не объясняет высокую повторяемость сильных ветров в с. Чираг, но они могут быть вызваны мощной горно-долинной циркуляцией ветра в этом районе как следствием ПНВ. Нельзя объяснить спокойный ветровой режим на г. Джуфудаг ее удалением на 30 км от Самурского хребта, поскольку с расстоянием скорость ветра может как затухать, так и усиливаться в зависимости от *знака градиента давления*.

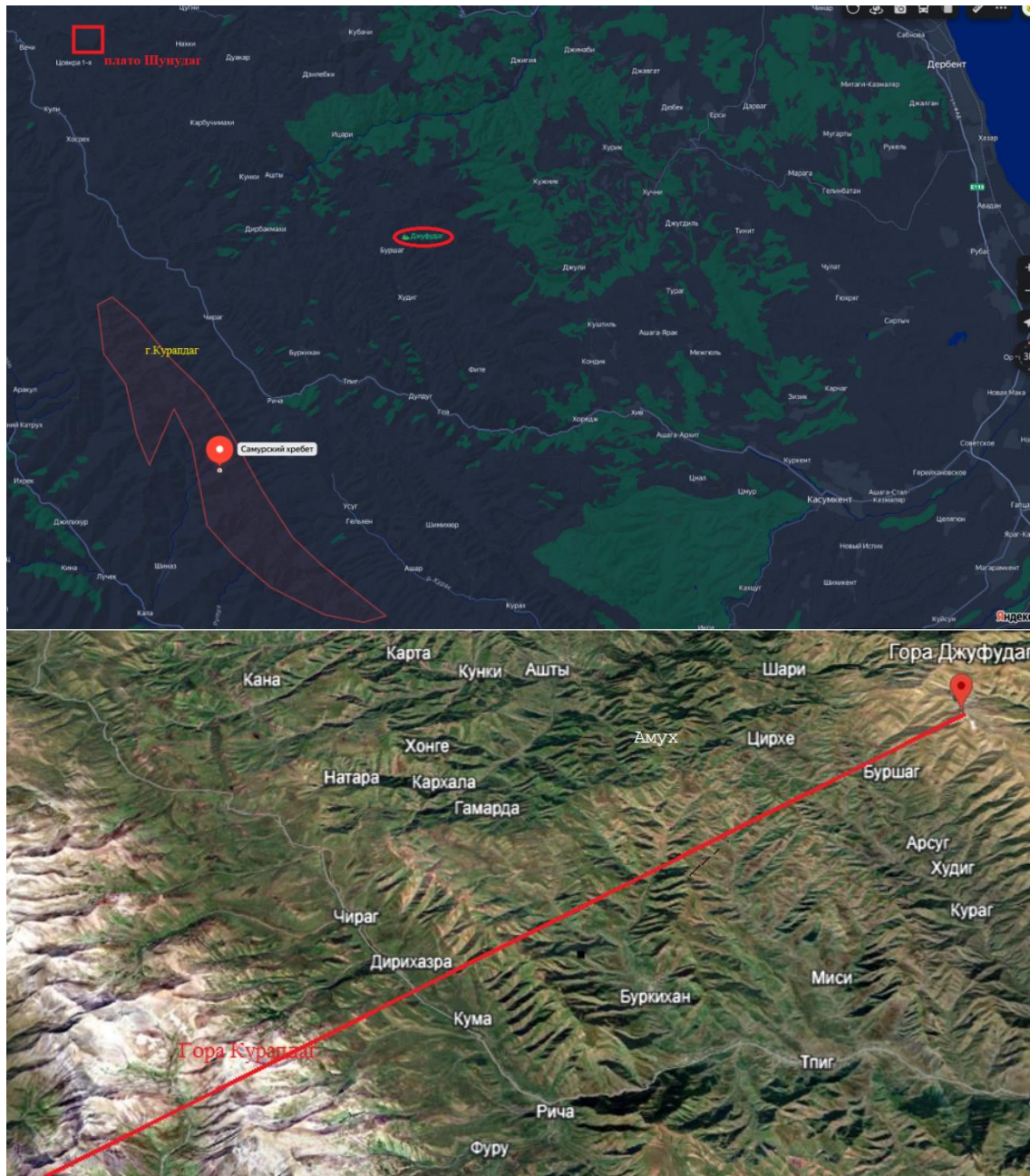


Рис. 36. Взаимное расположение г. Курапдаг, г. Джуфудаг, плато Шунудаг и Самурского хребта на Яндекс карте Дагестана (вверху) и на 3D Google map (внизу).

Другая возможная причина ослабления ветра в направлении г. Джуфудаг – интенсивное *трение приземного слоя воздуха* о земную поверхность. Кроме него существует *внутреннее трение* – трение внутри самого движущегося воздушного потока, которое уменьшается с высотой, что ведет к усилению ветра. В первом случае важную роль играет подстилающая поверхность и рельеф местности. Воздушный поток при обтекании горных препятствий деформируется, степень

и характер деформации зависит от характера набегающего потока – его скорости, направления и температуры, формы и размеров горного препятствия.

Как видно из рис. 5 направление Чираг-Буршаг-Джуфудаг отличается протяженным высотным рельефом (до 2700 м), а перепад высот между ним и г. Джуфудаг обычно не превышает 500 м за исключением прилегающих к горам долин. Скорость воздушного потока из-за интенсивного трения должна постепенно снижаться, кинетическая энергия потока может переходить в кинетическую энергию турбулентности и тепло, а также в потенциальную энергию воздушного потока. Но из-за уменьшения скорости воздушного потока уменьшается и динамическое трение, пропорционально или квадратично зависящее от его скорости, что ведет к снижению динамической турбулентности, переходу турбулентного (непрямолинейного, разнонаправленного, хаотичного) потока в квазиламинарный с малым количеством порывов. Так может работать в данном процессе отрицательная обратная связь, которая в конечном счете приводит к затуханию как порывов ветра, так и динамической турбулентности воздушного потока. Тем более зона интенсивного трения о рельеф заканчивается и поток переходит в долину, а потом поднимается вверх на гору постепенно набирая скорость, переходя в менее плотные слои атмосферы, что еще больше снижает его турбулентность.

Из рис. 5 следует, что северное направление от Самурского хребта, где расположено плато Шунудаг, лишено такого протяженного высотного рельефа. Наконец, спокойный режим ветра в с. Буршаг и на г. Джуфудаг может быть следствием комбинации целого ряда причин, включая вышеупомянутые. Этот вопрос требует дальнейшего изучения с использованием ветровых моделей и данных нашей метеостанции в с. Буршаг. Как видно из рис. 36 (внизу) с. Буршаг расположено на *наветренном* склоне г. Джуфудаг для ветров юго-западного направления и потому оно в значительной степени отражает картину ветра и на г. Джуфудаг с поправкой на высоту.

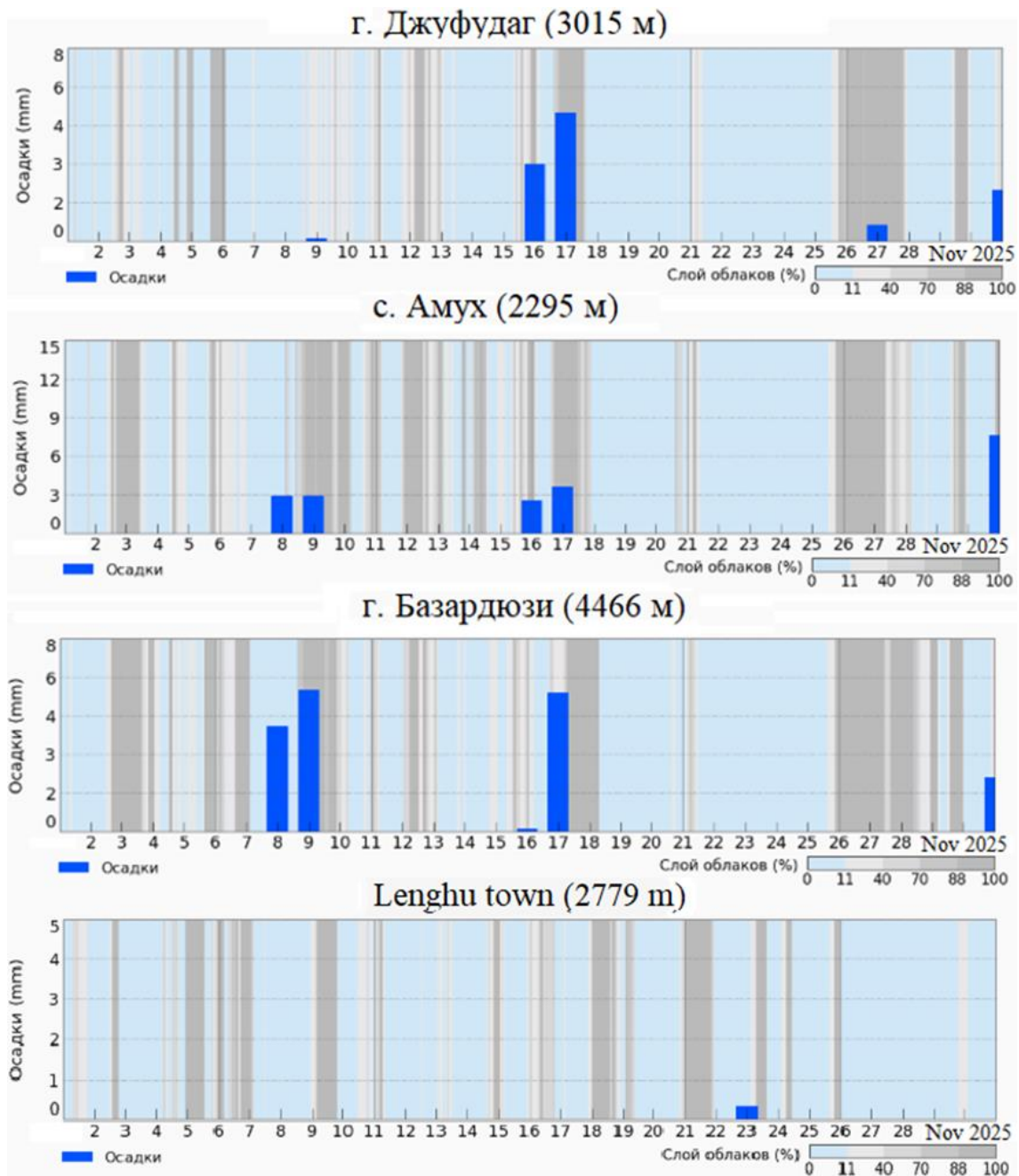


Рис. 37. Прогноз слоя облаков и количества осадков в с. Амух, на г. Джуфудаг, г. Базардюзі, в Lenghu town в ноябре 2025 г. по NEMSGLOBAL.

Не стоит также забывать об орографической активности, нередко встречающейся в горах, в частности об *орографическом эффекте ветра* – локальном усилении ветра на горных вершинах и склонах в процессе обтекания гор воздушными массами. Когда приземный атмосферный поток встречает на своем пути препятствие, он вынужден подниматься вверх, где температура ниже, при этом водяной пар конденсируется, образуя туман и облака, что может приводить к увеличению как облачности, так и количества осадков. Кроме того,

при обтекании горных препятствий структура воздушного потока резко изменяется, что может вызывать *горные волны* как следствие волновой деформации воздушного потока и *орографическую турбулентность*, возникающую при потере устойчивости *горных волн* [29].

По мнению работников сельского хозяйства с. Амух и опытных чабанов с. Буршаг, пасущих стада овец на склонах г. Джуфудаг и соседних гор, индивидуальные облака обычно образуются южнее вдоль хребта Джуфудаг, на севере которого расположена г. Джуфудаг (рис. 5), но слабая орографическая активность в районе г. Джуфудаг требует объективного подтверждения.

Орографическую облачную активность и появление индивидуальных облаков над горой можно изучать из горного села, из которого открывается вид на вершину горы. Село Буршаг находится на склоне г. Джуфудаг, закрывающим вид на вершину горы. Из 7 ближних сел Агульского района вид на вершину г. Джуфудаг и сразу на весь хребет Джуфудаг открывается только из с. Амух, расположенного северо-западнее с. Буршаг в 11 км по прямой видимости от вершины г. Джуфудаг. Установка высокочувствительной широкоформатной видео камеры высокого разрешения дневного и ночного видения в верхней части с. Амух (2295 м) позволит изучить статистику появления индивидуальных облаков над г. Джуфудаг и хребтом Джуфудаг. Однако важно понимать, как часто будет открываться вид на г. Джуфудаг из с. Амух с учетом возможности появления в нем низкой облачности или тумана. Это также можно оценить по данным прогностической модели (рис. 37). Как видно из рис. 37 такая возможность могла открываться в ноябре 2025 г. не менее 70 % ясного времени на г. Джуфудаг, что вполне достаточно для получения надежной статистики.

На рис. 37 для сравнения также представлен прогноз слоя облаков и количества осадков для г. Базардюзю (Базардюзю) (4466 м) – самой высокой горы Дагестана, где замечена достаточно высокая орографическая активность в виде облаков и тумана. Как видно из рис. 37 слой облаков и количество осадков на г. Базардюзю в ноябре 2025 г заметно больше чем на г. Джуфудаг, которая на 1451 м ниже. Похожая тенденция сохраняется и в другие месяцы года.

Кроме того, в отличие от г. Джуфудаг г. Базардюзю находится в системе ГКХ и на ней, как и в районе Самурского хребта замечена высокая повторяемость значительных скоростей ветра.



Рис. 38. Вид на г. Джуфудаг из верхней части с. Амух (2295 м) в феврале 2026 г.

На рис. 37 также представлен прогноз слоя облаков и количества осадков для города Ленху (Lenghu town), расположенного в провинции Цинхай на северной окраине Тибетского плато. Астрономический наблюдательный пункт Ленху (4200 м) был признан отличным местом для оптико-инфракрасных наблюдений и размещения крупного телескопа [30]. В частности, речь идет об оптическом телескопе диаметром 6,5 м и др. мега-проектах. Собранные на данный момент данные показывают, что медианный *seeing* на площадке Ленху составляет 0,75 " и 70 % ночей там ясные с хорошими фотометрическими условиями. Указанная площадка расположена на вершине горы Сайшитэн в 50 км от г. Ленху (2779 м),

метеоданные которого обычно приводятся вместе с данными сайта Ленху для долгосрочной астроклиматической характеристики данного района. Как видно из рис. 37. прогноз по количеству осадков в ноябре 2025 г. лучше для г. Ленху, а прогноз по слою облаков лучше для г. Джуфудаг. В том же районе на высоте 4820 м находится XSMC сайт, который изучается как возможная площадка для 15 m субмм телескопа (XSMT) [30].

Таким образом, уже полученные статистики ветра, облачности, ПСС и количества осадков в с. Буршаг, расположенном на *наветренном* склоне г. Джуфудаг в 4 км от вершины горы по прямой соответствуют самым оптимистичным ожиданиям и модельным прогнозам. Это наряду с предельно низким *seeing* и достаточно низкими значениями оптической толщи и осажденного водяного пара, полученными во время первых радиометрических измерений весной и летом 2025 г., а также легкая доступность вершины горы и ее близость к инфраструктуре высокогорных сел позволяет рассматривать г. Джуфудаг в качестве одного из наиболее перспективных астропунктов среди возможных мест размещения ESMT в РФ. Вид на г. Джуфудаг из верхней части с. Амух показан на рис. 38.

Заключение

В настоящей работе проведено сравнение астроклиматических условий на г. Джуфудаг и плато Шунудаг с другими астропунктами. Получены карты осажденного водяного пара, общей облачности и скорости порывов ветра на Северном Кавказе и в местах сравнения по данным реанализа Era-5. Для достижения большей детализации карт применена мезомасштабная модель WRF. По результатам выполненного исследования астроклиматические условия на г. Джуфудаг и плато Шунудаг сравнимы с г. Курапдаг, но плато Шунудаг имеет более спокойный, а г. Джуфудаг существенно более спокойный ветровой режим. Первые результаты радиометрических измерений подтверждают ожидаемо низкий уровень оптической толщи и PWV в местах сравнения в конце марта-начале апреля 2025 г. и на г. Джуфудаг в середине июня 2025 г. По нашим

оценкам г. Джуфудаг и плато Шунудаг могут рассматриваться в качестве возможных мест размещения ESMT, но по такому важному параметру как максимальная скорость порывов ветра г. Джуфудаг имеет существенное преимущество перед плато Шунудаг. Для повышения точности измерений оптической толщи и осажденного водяного пара может потребоваться вторичная калибровка прибора ИПАР-2А с помощью РВП ИПА РАН. Для дальнейшего комплексного исследования астроклимата необходим набор статистик метеорологических параметров, радиометрических и оптических измерений. С этой целью принято решение установить автоматическую УЗ метеостанцию и начать регулярные радиометрические измерения оптической толщи и PWV в с. Буршаг (2225 м) на склоне г. Джуфудаг (3015 м). В процессе испытаний оптического монитора Поляр-2 в октябре-ноябре 2025 г. получены первые очень оптимистические результаты измерений метеопараметров (ветер, облачность, осадки, ПСС) и углового размера атмосферных изображений на оптическом телескопе (*seeing*) в с. Буршаг на *наветренном* склоне, что с учетом высокого количества ясных ночей позволяет рассматривать г. Джуфудаг в качестве одного из наиболее перспективных астропунктов среди возможных мест размещения ESMT в РФ.

Благодарности

Авторы выражают искреннюю благодарность директору Буршагской СОШ, Алавдину А. Рамазанову, преподавателю физкультуры и труда Буршагской СОШ С.Б. Каидову, преподавателю младших классов Буршагской СОШ А.Б. Рамазановой, уроженцу с. Чираг Агульского района РД Гасану Гусейнову, и главе с. Цовкра-1 М.А. Ильдарову за большую помощь в проведении астроклиматических измерений на г. Джуфудаг и плато Шунудаг. Авторы особо признательны заслуженному работнику сельского хозяйства р. Дагестан Абдулмалику Рамазанову и агроному с. Амух Джамалутдину Рамазанову за полезные советы и рекомендации по изучению г. Джуфудаг. Большую помощь в обеспечении надежной связи и Интернета в удаленных

горных селах Агульского района авторам оказали специалисты компании Ellco (АО “Электросвязь”) Каиб и Шамиль Шабановы. Авторы также признательны главе Агульского района З.Г. Каидову и главе Кулинского района Ш.Р. Рамазанову за содействие в организации астроклиматических экспедиций РАН в районы г. Джуфудаг и плато Шунудаг.

Финансирование: Разделы 1, 4, 5 настоящей работы выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда № 23-72-00041, разделы 2, 3.2, 3.4, 6.1-6.4 настоящей работы выполнены в рамках государственного задания САО РАН, утвержденного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации, разделы 3.1 и 3.3. настоящей работы выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда № 24-72-10043, <https://rscf.ru/project/24-72-10043/>.

Литература

1. 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.
2. V.B. Khaikin, A.Yu. Shikhovtsev, A.P. Mironov and Xuan Qian; POS, 072, 8 (2022).
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. 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.
5. Khaikin V. et al. On the Eurasian submillimeter telescopes project (ESMT) //2020 7th All-Russian Microwave Conference (RMC). – IEEE, 2020. – С. 47-51.

6. Хайкин В.Б., Шиховцев А.Ю., Шмагин В.Е., Лебедев М.К., Копылов Е.А., Лукин В.П., Ковадло П.Г. О проекте евразийских субмиллиметровых телескопов (ESMT) и возможности применения адаптивной оптики для улучшения качества субмм изображений. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2022. №7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2022.7.9>
7. Shikhovtsev A.Y., Kovadlo P.G., Baron P. Candidate Sites for Millimeter and Submillimeter Ground-Based Telescopes: Atmospheric Rating for the Eurasian Submillimeter Telescopes Project // *Sensors*. – 2025. – Т. 25. – №. 7. – С. 2144.
8. Khaikin V. et al. A review of astroclimate conditions at possible locations for the Eurasian Submillimeter Telescopes (ESMT) // *Modern Astronomy: From the Early Universe to Exoplanets and Black Holes (VAK2024)*. – 2024. – С. 1067-1072.
9. 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>
10. Столяров В.А. и др. Перспективы развития миллиметровой астрономии в САО РАН // *Астрофизический бюллетень*. – 2024. – Т. 79. – №. 2. – С. 331-349.
11. Shikhovtsev A.Y. et al. Optical thickness of the atmosphere above the Terskol Peak // *Atmospheric and Oceanic Optics*. – 2023. – Т. 36. – №. 1. – С. 78–85.
12. В.Б. Хайкин. А.Ю. Шиховцев, А.П. Миронов. Статистические характеристики осажденного водяного пара, оптической толщи и облачности в Северной части Евразии. *Астрономический журнал*, 2024, том 101, № 2, с. 195–206.
13. Шиховцев А.Ю., Ковадло П.Г., Леженин А.А., Градов В.С. Методы диагностики атмосферы с высоким пространственным разрешением // В книге: Материалы 22-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, 2024. С. 291.

14. 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.
15. Кисляков А.Г. // Радиотехника и электроника. 1968 Т. 13, № 7 С. 1–161.
16. Fogarty W. Total atmospheric absorption at 22.2 GHz //IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1975. – Т. 23. – №. 3. – С. 441–444.
17. Bubnov G. et al. Analysis of variations in factors of specific absorption of sub-terahertz waves in the Earth's atmosphere //2020 7th All-Russian Microwave Conference (RMC). – IEEE, 2020. – С. 229-232.
18. Baron P. et al. 7-4 AMATERASU: model for atmospheric terahertz radiation analysis and simulation //Journal of the National Institute of Information and Communications Technology Vol. – 2008. – Т. 55. – №. 1.
19. Заварина М.В. Расчетные скорости ветра на высотах нижнего слоя атмосферы //Л.: Гидрометеиздат. – 1971. – Т. 161.
20. Kovadlo P.G., Shikhovtsev A.Y. Energy structure of the optical atmospheric turbulence for various parameters of the mean flow //Izv. Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Series «Earth Sciences. – 2014. – Т. 8. – С. 42-55.
21. ОБЗОР ФОНОВОГО СОСТОЯНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ НА ТЕРРИТОРИИ СТРАН СНГ ЗА 2021 г. Института Глобального климата и экологии (ИГКЭ) им. академика Ю.А. Израэля.
22. Ильин Г.Н. и др. Высокостабильный двухканальный радиометр водяного пара для измерений тропосферной задержки в реальном времени //Труды Института прикладной астрономии РАН. – 2013. – №. 27. – С. 210-215.
23. Ильин Г.Н., Троицкий А.В. Определение тропосферной задержки радиосигнала радиометрическим методом //Изв. вузов. Радиофизика. – 2017. – Т. 60. – №. 4. – С. 326.

24. Шалдырван И.В., Комаров В.В., Комарова В. Н., Фокин М. Ю. Внедрение в САО РАН системы мониторинга Полярной звезды. Всероссийской Астрономической конференции «Современная астрономия: от ранней Вселенной до экзопланет и черных дыр» пос. Нижний Архыз, 2024г.
25. И.В. Шалдырван, А.Ю. Шиховцев, В.Б. Хайкин. О возможности удаленного измерения астрономической видимости на г. Джуфудаг в Агульском районе Дагестана с помощью оптического монитора Polar-2. Всероссийская радиоастрономическая конференция (ВРК – 2025), Иркутск, август 2025.
26. В.Е. Панчук, В.Л. Афанасьев. «Астроклимат северного Кавказа – мифы и реальность». Астрофизический бюллетень, 2011, том 66, № 2, с. 253–274.
27. Bradford L.W., Roberts Jr L.C. Some measurements of the short term variability of r_0 //2007 AMOS Conference Proceedings (Advanced Maui Optical and Optical and Space Surveillance Technologies Conference). – 2007.
28. Bradley E.S., Roberts L.C., Bradford L.W., Skinner M.A., Nahrstedt D.A., Waterson M.F., Kuhn J.R. Characterization of Meteorological and Seeing Conditions at Haleakala. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 118, 172, 2006.
29. Smith, R.B. (1979) The Influence of Mountains on the Atmosphere. Advances in Geophysics, 21, 87-230,
30. Deng, L., Yang, F., Chen, X. et al. Lenghu on the Tibetan Plateau as an astronomical observing site. Nature 596, 353–356 (2021).

Для цитирования:

Хайкин В.Б. и др. Сравнение астроклиматических условий возможных мест размещения ESMT в Агульском и Кулинском районах Дагестана. // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – №. 7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.7.14>