

УДК 523.31-852; 550.2

РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ АСТРОКЛИМАТА НА КРЫМСКОМ ПОЛУОСТРОВЕ В КОРОТКОВОЛНОВОЙ ЧАСТИ МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА ДЛИН ВОЛН

© 2018 М. И. Агафонов¹, Г. М. Бубнов^{2,3}, И. Т. Бубукин¹,
В. Ф. Вдовин^{2,3}, Р. В. Горбунов⁴, И. И. Зинченко^{1,2},
В. А. Лапченко⁴, В. И. Носов², А. Л. Панкратов^{1,2,3}, И. В. Ракуть^{1,3}

¹Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, 603950 Россия

²ФИЦ Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 603950 Россия

³Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева, Нижний Новгород, 603950 Россия

⁴Карадагская научная станция им. Т.И. Вяземского — природный заповедник РАН, Феодосия, 298188 Россия

Поступила в редакцию 27 декабря 2018 года; принята в печать 22 мая 2018 года

В работе представлены результаты исследований астроклимата на Крымском полуострове вблизи радиоастрономической станции ННГУ «Кара-Даг» (высота 105 м над уровнем моря). Измерения проводились в полуавтоматическом режиме каждые 2 минуты с 22 июля по 21 сентября 2017 г. Рассмотрены закономерности изменения параметров прозрачности атмосферы, построены статистические диаграммы. Получены статистические данные, характеризующие астроклимат. Их анализ позволяет прогнозировать возможность радиоастрономических наблюдений в окнах прозрачности миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов длин волн.

Ключевые слова: *атмосферные эффекты — измерительное оборудование: разное — методы: наблюдательные — методы: анализ данных*

1. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы возрос интерес к радиоастрономическим исследованиям в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн с поверхности Земли. На сегодняшний день в России практически нет инструментов для исследований на волнах 3 мм и короче. Кроме того, актуальной задачей является поиск мест для наземного плеча будущей РСДБ миссии «Миллиметрон» [1]. Главным претендентом на эту роль на территории бывшего СССР является радиотелескоп с 70-м основным рефлектором РТ-70 на плато Суффа с рабочим диапазоном частот 5–300 ГГц и диаграммой направленности до 3'' [2]. Однако срок ввода этого инструмента достаточно далек, а имеющиеся в России 22-м рефлектор РТ-22 КРАО и два 7.5-м зеркала МГТУ под Дмитровом имеют скромную эффективную поверхность на волне 3 мм и расположены на уровне моря в местах с сомнительным для диапазона волн короче 3 мм астроклиматом.

Астроклимат местности установки радиотелескопа является важной составляющей его эффективной работы. Главной проблемой указанных

диапазонов для целей радиоастрономии и телекоммуникаций является значительное поглощение излучения атмосферными газами [3], и в первую очередь, парами воды. Оно подвержено значительным сезонным и суточным вариациям, существенно зависит от климата местности и высоты над уровнем моря. Наиболее достоверное определение астроклимата осуществляется регулярными измерениями интегрального атмосферного ослабления в окнах прозрачности атмосферы. Определять эти параметры можно со спутников и с поверхности Земли, оба варианта имеют свои преимущества и недостатки. Поскольку основное содержание влаги в атмосфере приходится на приземный слой, то локальный климат территории является определяющим. В 1930-х гг. на территории СССР по результатам исследований поглощения атмосферы для создания южной обсерватории [4] была выбрана местность вблизи Старого Крыма, но постройке обсерватории помешала война. В 1966 г. в 13 км от Старого Крыма у подножия горы Балалы-Кая (Карадагский горный массив) В. С. Троицким была создана радиоастрономическая станция НИРФИ

(РАС «Кара-Даг»), где методом «искусственной Луны» проводились измерения лунной поверхности [5], а также спектров эталонных радиоисточников.

Карадагский горный массив [6] расположен на морском побережье и имеет специфический профиль с изменением высот и полузамкнутыми областями между горными хребтами, расположенными вдоль побережья в несколько рядов. Эта конфигурация создаёт разнообразие климатических условий. РАС «Кара-Даг» находится у границы заповедника и защищен от моря с востока двумя грядами гор. Сочетание особенностей атмосферной циркуляции Кара-Дага обуславливает значительные величины солнечной радиации при сравнительно малой облачности. На Кара-Даге преобладают ветры северных румбов, несущие сухой воздух со степного Крыма. В течение года их повторяемость превышает 60% [6]. Постоянно проявляются горно-долинные ветры (скорость 1–7 м с⁻¹), которые дуют ночью с гор к побережью, а днем в обратном направлении. Повторяемость ветров северных румбов возрастает ночью и уменьшается днем. Это является важным для задачи радиоастрономических наблюдений, т.к. в основном измерения проводятся ночью. Считается, что самым сухим местом в горном Крыму является вдающийся в море мыс Меганом, где на пути воздушных масс оказывается горная гряда. Максимальное количество осадков в горном Крыму формируется за счёт западных переносов и поэтому Юго-Восточный Крым оказывается в циркуляционной тени. С этим связано выделение в ландшафтном районировании западного (влажного) и восточного (сухого) южного побережья. Несмотря на то, что в среднем за год на Кара-Даге бывает около 100 дней с осадками, заповедник является одним из самых засушливых районов горного Крыма (среднегодовое количество осадков на Кара-Даге в 1.6 раза меньше, чем в Ялте, и в 1.3 раза меньше, чем в Феодосии). Это даёт основание ожидать и низкое влагосодержание в интегральном столбе и низкое поглощение волн короче 3 мм. Исследования, проведенные в Крымской астрофизической обсерватории Курбасовой Г. С. и Вольвачем А. Е. [7], показали, что «Выделяется участок с аномально высокой инсоляцией. Это, прежде всего, пункт Кара-Даг и его окружение». Таким образом, Кара-Даг является ещё и самым солнечным и малооблачным местом в Крыму.

Для приёма излучения атмосферы в линии поглощения водяного пара 5–8 мкм [8] и определения влажности верхней и средней тропосферы на спутнике MODIS [9] используются каналы 7.475–7.175 мкм и 6.895–6.535 мкм (с пространственным разрешением 1000 м), а приземная влажность восстанавливается при помощи мо-

дели экстраполяции. Кроме того, разрешающая способность открытых усреднённых спутниковых данных [10] составляет 1 географический градус. При этом РАС «Кара-Даг» попадает в квадрат усреднения, где только 4% приходится на поверхность суши, и указанные факторы могут завышать соответствующие ему спутниковые значения интегральной влажности [10], что и наблюдается по нашим данным. Таким образом, измерение поглощения атмосферы с поверхности Земли специальными устройствами в частотном диапазоне предполагаемых радиоастрономических наблюдений (для нашего случая волн длиной 3 мм и короче) остается актуальным.

Исследование астроклимата в месте расположения Международной радиоастрономической обсерватории (МРАО) «Суффа» (Узбекистан) осуществляется с 2013 г. по настоящее время в окнах прозрачности атмосферы 2 и 3 мм с помощью приёмного комплекса МИАП-2 [11, 12]. Результаты представлены в статье [13]. Однако требование существенной доработки поверхности антенны РТ-70, его расположение на высокогорье и за границей России делают необходимым рассмотрение и других возможных мест расположения радиотелескопа для решения предполагаемых задач. Поэтому астроклимат исследовался в различных точках России: гора Мус-Хая (высота 1950 м) в Якутии [14, 15], САО РАН на Северном Кавказе (высота 2000 м) [15] и обсерватория «Бадары» (813 м над уровнем моря) западнее Байкала [16].

В 2017 г. исследования астроклимата продолжились на территории Крымского полуострова на радиоастрономической станции «Кара-Даг». Несмотря на небольшую высоту над уровнем моря (105 м — основная площадка, и 140 м — верхняя площадка), на станции проведено множество научных работ с измерением радиоизлучения космических тел с поверхности Земли [5] на длинах волн вплоть до 8 мм. В связи с вышеперечисленным было высказано предположение, что РАС «Кара-Даг» может также послужить для наблюдения космоса и его объектов и в коротковолновом диапазоне миллиметрового спектра. Для проверки такой возможности и проводились измерения астроклимата на РАС «Кара-Даг». Для сравнения с ними также осуществлялись аналогичные, но кратковременные измерения и в других точках Крымского полуострова: на площадке РТ-22 КраО, около посёлка Голубой залив и на плато Ай-Петри.

2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА МИАП-2

Измерительный комплекс МИАП-2 представляет собой радиометрическую систему в общем

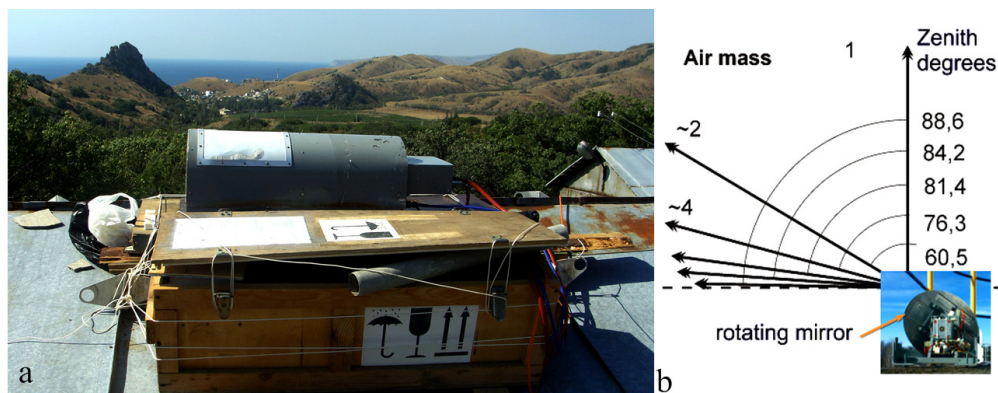


Рис. 1. Фото комплекса в точке измерений на территории РАС «Кара-Даг» (а) и схема сканирования диаграммами направленности радиометров по углу места в цикле измерения излучения атмосферы (b).

корпусе, включающую два радиометра с рабочими диапазонами 84–99 и 132–148 ГГц с рупорно-линзовыми антеннами, имеющими диаграммы направленности $2^{\circ}5$, опорно-поворотное устройство и систему управления, сбора и обработки данных на базе компьютера и модуля USB-4716 фирмы Advantech. Комплекс позволяет определять оптическую толщину атмосферы в окнах прозрачности вблизи 2 и 3 мм при помощи метода «атмосферных разрезов». Структура и принцип действия комплекса МИАП-2 подробно описаны в работах [11, 12].

Для определения полного вертикального поглощения в атмосфере комплекс МИАП-2 (рис. 1а) устанавливался на крышу аппаратного домика РАС «Кара-Даг» на высоту 6 метров от поверхности земли, что соответствовало 105 м от уровня моря. В автоматическом режиме осуществлялось циклическое сканирование в секторе углов места от 0° до $88^{\circ}6$ относительно направления в зенит в вертикальной плоскости, проходящей через узкую область над открытой кромкой горизонта моря. При этом в секторе сканирования диаграмм направленности антенн радиометров отсутствовали какие-либо объекты (не считая облаков). На каждом угле места осуществлялась остановка поворота антенн на равные интервалы времени (4 с) для накопления информации о яркостной температуре атмосферы на пяти углах места: $60^{\circ}5$, $76^{\circ}3$, $81^{\circ}4$, $84^{\circ}2$ и $88^{\circ}6$ (рис. 1b). Собираемая информация через аналого-цифровое устройство записывалась в память компьютера и далее обрабатывалась по методу «двух углов» [17] путем сравнения сигналов в двух из выбранных направлений с некоторой опорной областью с температурой T_0 , наиболее близкой к температуре приземного слоя атмосферы. За такую область принималось значение яркостной температуры излучения атмосферы на угле места $88^{\circ}6$.

3. СТАТИСТИКА НАБЛЮДЕНИЙ

Радиометрический комплекс был запрограммирован на измерение атмосферной оптической толщины каждые 2 минуты. Таким образом, он записывал динамику во времени атмосферного поглощения в неперах в двух окнах прозрачности атмосферы. В качестве примера на рис. 2 представлена запись измерений атмосферного поглощения прибором МИАП-2 в радиометрических каналах 2 и 3 мм с 19 по 22 июля 2017 г. последовательно во времени: 1 — на вышке возле телескопа РТ-22 в посёлке Качивели (координаты — $44^{\circ}23'51''71N$, $33^{\circ}58'46''26E$, высота над уровнем моря — 30 м, азимут плоскости сканирования ϕ_{scan} — примерно 115°), 2 — на повороте дороги в посёлок Голубой залив ($44^{\circ}24'59''98N$, $33^{\circ}59'18''62E$, 367 м над ур. м., $\phi_{scan} \approx 190^{\circ}$), 3 — на плато Ай-Петри возле верхней станции канатной дороги ($44^{\circ}27'11''78N$, $34^{\circ}03'35''23E$, 1147 м над ур. м., $\phi_{scan} \approx 85^{\circ}$), а с 22 июля по 21 сентября 2017 г. на крыше лабораторного домика РАС «Кара-Даг» ($44^{\circ}55'37''07N$, $35^{\circ}11'31''20E$, 105 м над ур. м., $\phi_{scan} \approx 189^{\circ}$) — участок 4. Пропуски в данных вызваны как сменой точек наблюдения, так и отключением электричества при рутинных измерениях на РАС «Кара-Даг» и отсутствием квалифицированного персонала для оперативного перезапуска прибора. Прослеживаются суточные вариации атмосферного поглощения. Ясное (без видимых облачных образований) время характеризуется малым разбросом точек величиной до 0.1 неп. С появлением облачности нарушаются условия применимости плоскостной модели атмосферы, принятой в методе «разрезов», в результате чего появляется заметный разброс точек. При выпадении осадков (дождя) прибор продолжает работать, но изменение определяемых величин носит непредсказуемый характер. Возможно, наличие этих данных при наборе статистики и дополнительная методика их обработки позволят

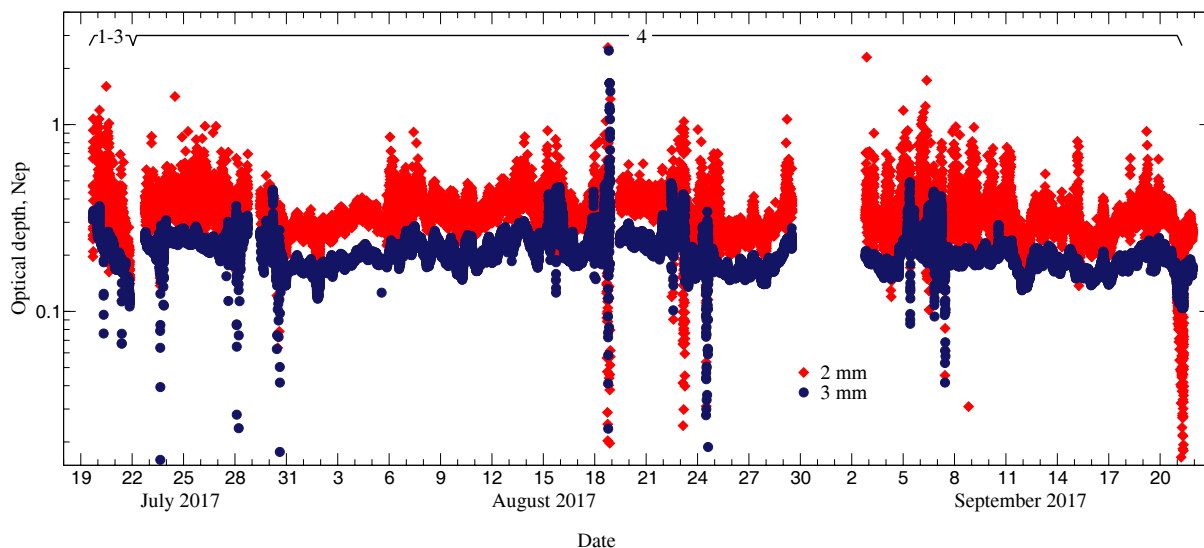


Рис. 2. Графики измерений прибором МИАП-2 атмосферного поглощения в неперах в каналах 2 и 3 мм с 19 по 22 июля: 1 — на площадке РТ-22 КраО, 2 — около посёлка Голубой залив, 3 — на плато Ай-Петри и 4 — с 22 июля по 21 сентября 2017 г. на РАС «Кара-Даг».

будущем понять механизмы влияния облачности и дождя на измерение прибором излучения атмосферы и получать влажностные характеристики над этими образованиями в любых погодных условиях.

Из-за небольшой продолжительности дождливых периодов, несмотря на нетипично влажный сезон лета 2017 г. в Крыму, вклад облачности и осадков в статистической оценке атмосферного поглощения был несущественным. Поскольку измерения на площадке РТ-22 КраО, около посёлка Голубой залив и на плато Ай-Петри проводились всего трое суток, в общую статистику по Крыму они не вошли. Однако следует отметить, что уровень поглощения на площадке РТ-22 КраО, измеренный в ясную погоду, примерно соответствует уровню измерений на РАС «Кара-Даг» при наличии облачности, а низкое поглощение на плато Ай-Петри 0.1–0.15 неп регистрировалось в некоторые дни измерений на РАС «Кара-Даг». Проведенные 3 августа на верхней площадке РАС «Кара-Даг» ($44^{\circ}55'46''1N$, $35^{\circ}11'34''4E$, 140 м над ур. м., $\phi_{scan} \approx 187^{\circ}$) измерения не выявили существенных отличий с нижней площадкой, а уровень поглощения на канале 3 мм при этом составил 0.14–0.16 неп.

Мы сопоставили данные о поглощении атмосферы и о погодных условиях, регистрация которых осуществлялась в автоматическом режиме на Карадагской станции фоновое экологического мониторинга с использованием метеостанции Тропосфера-Н, расположенной на восточном склоне г. Святая. На рис. 3 для примера представлены графики изменения атмосферного поглощения и направления ветра в районе расположе-

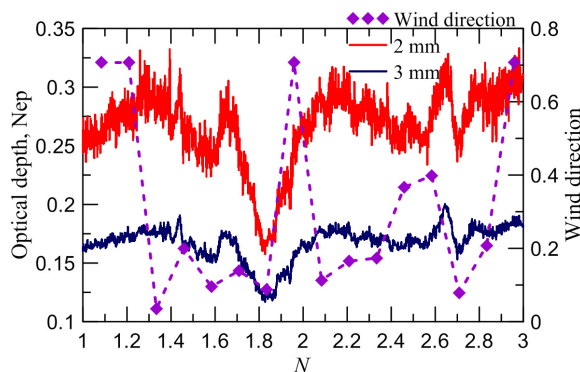


Рис. 3. Изменения атмосферного поглощения в радиометрических каналах 3 и 2 мм и направления ветра в районе расположения прибора МИАП-2 с 1 по 3 августа 2017 г. При смене направления ветра на северный с некоторой задержкой по времени падает поглощение.

ния прибора МИАП-2 с 1 по 3 августа 2017 г. Для удобства сравнения, от направления ветра, записанного в углах от 0° до 360° (где 0° и 360° соответствуют северному ветру, а 180° — южному), взят синус половинного угла, так, чтобы северному ветру соответствовал 0, а южному — 1, при этом отсутствие ветра (штиль, когда влага приходит с моря) задаётся как 90° (что соответствует восточному ветру, который также гонит влагу с моря), чтобы не путать с северным ветром. Наблюдения показывают, что при штиле, или же ветре с моря (юга), происходит повышение влажности. При северном ветре (со стороны степного Крыма), возникает понижение влажности. Для ветров восточного и западного направлений всё сложнее, но сила их

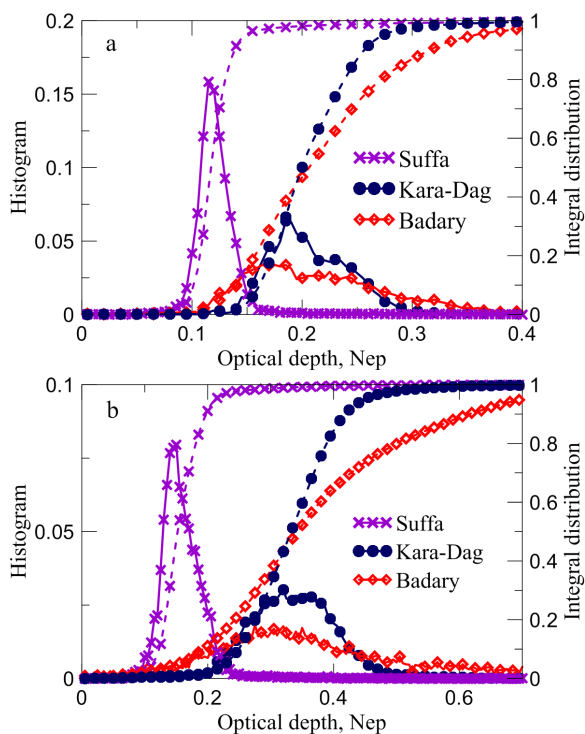


Рис. 4. Гистограммы измерений (сплошные кривые) и интегральные распределения (штриховые линии) оптического поглощения атмосферы летом/осенью в диапазоне 3 мм (а) и 2 мм (б) на РАС «Кара-Даг», РАО «Бадары» и МРАО «Суффа».

меньше, чем у северного. Таким образом, преобладание на Кара-Даге северного ветра вообще и в ночное время в частности [6, 7], создаёт на территории РАС «Кара-Даг» благоприятные условия для ночных астрономических наблюдений.

На рис. 4 в виде гистограмм и интегральных функций распределений приведены статистические характеристики измерений оптического поглощения атмосферы в диапазоне 2 и 3 мм в трёх радиоастрономических пунктах: РАС «Кара-Даг» (высота 105 м над ур. м., наблюдения с 22 июля по 21 сентября 2017 г.), РАС «Бадары» западнее Байкала (813 м над ур. м., аналогичные измерения тем же прибором МИАП-2 с 1 июля по 29 сентября 2016 г.) и МРАО «Суффа» (2400 м над ур. м., измерения с 3 июля по 30 сентября 2017 г. аналогичным прибором МИАП-2).

Согласно статистике наблюдений (рис. 4) у МРАО «Суффа» явное преимущество в сравнении с двумя другими площадками. Однако в РАС «Кара-Даг» показатели атмосферного поглощения лучше, чем в РАО «Бадары», несмотря на её более низкое по высоте расположение над уровнем моря и погодные аномалии лета 2017 г. на европейской части РФ вообще и в Крыму в частности, по сравнению с 2016 г. Скорее всего, это непосредственно

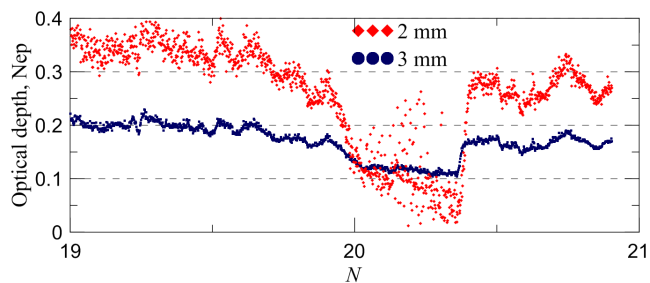


Рис. 5. Атмосферное поглощение по измерениям прибора МИАП-2 в каналах 2 и 3 мм с 19 по 21 сентября 2017 г. на РАС «Кара-Даг». Резкое понижение поглощения продолжительностью около 8 часов достигает меньшего значения на канале 2 мм.

связано со специфическим расположением радиоастрономической станции в горном массиве Кара-Даг и розой ветров на Крымском полуострове.

Обратим внимание на интересную особенность, наблюдавшуюся в конце периода измерений с 19 по 21 сентября в виде резкого понижения поглощения на протяжении длительного временного интервала около 8 часов (см. рис. 2 и 5). При этом на канале 2 мм величина поглощения становится ниже, чем на 3 мм. Такое обычно бывает при очень низкой влажности, когда атмосферное поглощение определяется, в основном, молекулярным кислородом, и на длине волны 3 мм оно в 2 раза больше, чем на волне 2 мм. Несмотря на большие шумы в 2-мм канале, поведение кривых является достаточно плавным и не похоже на аппаратную ошибку измерений. Это является стимулом к продолжению наблюдений астроклимата на РАС «Кара-Даг» в последующие сезоны, когда погодные условия будут более типичными для данных мест.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Несмотря на нетипичные для Юго-Восточного Крыма летние погодные условия (сильные ливни, вызвавшие сход селя в районе г. Судак), в июле–сентябре 2017 г. получены достаточно стабильные значения атмосферного поглощения. По измерениям на радиоастрономической станции ННГУ «Кара-Даг» атмосферное поглощение в зените на длине волны 3 мм иногда в течение нескольких суток находилось в интервале 0.14–0.2 неп, а для длины волны 2 мм в интервале 0.2–0.3. На более коротких интервалах времени, в течение нескольких часов, поглощение в зените на длине волны 3 мм иногда падало до 0.1–0.12 неп, а на длине волны 2 мм — до 0.05–0.18 неп. Таким образом, даже в летнее время уровень поглощения на РАС «Кара-Даг» позволяет проводить результативные радиоастрономические измерения на длине волны 3 мм и меньше.

По данным радиометра МИАП-2, в месте расположения РАС ННГУ «Кара-Даг» астроклиматические условия лучше, чем на площадке ИПА РАН РАО «Бадары», расположенной на высоте 813 м над уровнем моря. С другой стороны, РАС «Кара-Даг» существенно проигрывает по параметрам астроклимата высокогорным площадкам, таким как САО РАН и МРАО «Суффа», но выигрывает по доступности.

Наблюдается корреляция интегрального влагосодержания в атмосфере с показаниями абсолютной приземной влажности по метеостанции Карадагского заповедника. По результатам сравнения данных спутника MODIS и показаний радиометра МИАП-2 можно сделать вывод, что локальные особенности местности горного массива Кара-Даг дают некоторый выигрыш по интегральной влажности по сравнению с территорией Крыма в целом.

В дальнейшем планируется продолжение длительных исследований астроклимата на Кара-Даге, в том числе и в зимнее время.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства Образования и Науки РФ (проекты 16.2562.2017/ПЧ, 3.8070.2017/БЧ), РФФИ (грант 16-32-00387 мол_а), а также в рамках госзадания ИПФ РАН (проект 0035-2014-0021 и 0035-2014-0206).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. V. Smirnov, A. M. Baryshev, P. de Bernardis, et al., *Radiophysics and Quantum Electronics*, **54**, 557 (2011).
2. Ю. Н. Артеменко, А. Е. Городецкий, В. В. Дубаренко и др., в *Труды Всерос. радиоастроном. конф.* (Пушино, 2014), т. 1, с. 58.

3. В. Е. Зуев, Ю. С. Макушкин, Ю. Н. Пономарев, *Современные проблемы атмосферной оптики. Т. 3. Спектроскопия атмосферы* (Гидрометеиздат, Ленинград, 1987).
4. V. E. Panchuk and V. L. Afanas'ev, *Astrophysical Bulletin* **66**, 233 (2011).
5. *Первый в стране Радиофизический институт (от создания до наших дней)*, под ред. С. Д. Снегирева, В. М. Фридмана, О. А. Шейнер (ФГБНУ НИРФИ, Нижний Новгород, 2016), с. 300.
6. *Природа Карадага*, под ред. А. Л. Морозовой, А. А. Вронского (Наукова думка. Киев, 1989) с. 286. <http://karadag.com.ru/complex/climate>
7. Г. С. Курбасова, А. Е. Вольвач, *Наука вчера, сегодня, завтра* **4** (26), 79 (2016).
8. А. Х. Перри, Дж. М. Уокер, *Система океан-атмосфера* (Гидрометеиздат, Ленинград, 1979).
9. <http://test.oceanographers.ru/?p=1482>
10. <http://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>
11. V. I. Nosov, O. S. Bolshakov, G. M. Bubnov, et al., *Instruments and Experimental Techniques* **59**, 374 (2016).
12. Ю. Н. Артеменко, Г. М. Бубнов, О. С. Большаков и др., *Узбекский физ. журнал* **16**(6), 421 (2014).
13. Г. М. Бубнов, Ю. Н. Артеменко, В. Ф. Вдовин и др., *Изв. ВУЗов. Радиофизика* **59**, 852 (2016).
14. G. M. Bubnov, V. F. Vdovin, I. I. Zinchenko, et al., *25th Intern. Symp. Space Terahertz Technology* (Moscow, 2014), p. 76.
15. G. M. Bubnov, E. B. Abashin, Yu. Yu. Balega, et al., *IEEE Trans. Terahertz Science and Technology* **5**(1), 64 (2015).
16. G. M. Bubnov, V. F. Vdovin, V. Yu. Bukov, et al., *32nd URSI GASS* (Montreal, 2017), Paper_F6-1(2225).
17. А. Г. Кисляков, К. С. Станкевич, *Изв. ВУЗов. Радиофизика* **10**, 1213 (1967).

The Results of Observation of the Astroclimate on the Crimean Peninsula in the Shortwave Part of the Millimeter Wavelength Range

M. I. Agafonov, G. M. Bubnov, I. T. Bubukin, V. F. Vdovin, R. V. Gorbunov, I. I. Zinchenko, V. A. Lapchenko, V. I. Nosov, A. L. Pankratov, and I. V. Rakut

We present the results of a study of the astroclimate on the Crimean Peninsula in the vicinity of the UNN Kara-Dag radioastronomical station (located at a height of 105 m above sea level). The measurements were taken in semi-automatic mode every 2 minutes from July 22 to September 21, 2017. We consider the variation trends of the atmospheric transparency parameters and plot statistical charts. We obtained statistical data characterizing the astroclimate. Their analysis allows us to forecast the possibility of radioastronomical observations in the millimeter and submillimeter wavelength range transparency windows.

Keywords: atmospheric effects — instrumentation: miscellaneous — methods: observational — methods: data analysis