

МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ В КАВКАЗСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ ГАИШ МГУ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КАМПАНИИ 2007–2015 ГОДОВ

© 2016 г. В. Г. Корнилов, М. В. Корнилов, Н. И. Шатский, О. В. Возякова,
И. А. Горбунов, Б. С. Сафонов*, С. А. Потанин, Д. В. Черясов, В. А. Сеник

*Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова*

Поступила в редакцию 23.03.2016 г.

На основе измерений, выполненных в период с 2007 по 2015 г. на вершине горы Шатджатмаз рядом с 2.5-м телескопом Кавказской обсерватории ГАИШ МГУ, определены статистические характеристики основных метеопараметров: температуры окружающего воздуха, скорости приземного ветра и относительной влажности. Исследованы стабильность этих параметров в течение всего периода измерений и их изменение внутри годового цикла. Медианное значение температуры в ясные ночи составляет $+3.2^{\circ}\text{C}$, хотя отмечаются ночи с температурой ниже -15°C . Характерное значение приземного ветра составляет 3 м/с, вероятность ветра сильнее 10 м/с не превышает 2%. Потери наблюдательного времени из-за высокой влажности максимальны в летний период, но в целом по году невелики, меньше 10%. Оценено абсолютное содержание водяного пара в атмосфере, особенно важное при наблюдениях в ИК-диапазоне. Минимальное количество осаждаемой воды наблюдается в декабре–феврале, медианное значение по этим месяцам 5 мм. Дополнительно приводятся данные о скорости ветра на разных высотах над поверхностью (от 1 до 16 км), полученные нами при измерении оптической турбулентности. Приведены результаты и методика измерений годового количества ясного ночного астрономического времени, составляющего в среднем 1320 ч, т.е. 45% от возможного на широте обсерватории. Примерно 70% ясного времени приходится на период с середины сентября по середину марта. Максимум ясной погоды наблюдается в ноябре, когда доля ясной погоды доходит до 60% от возможного времени астрономической ночи.

Ключевые слова: астроклиматические исследования, метеоданные, количество ясной ночной погоды, PWV.

DOI: 10.7868/S0320010816090035

ВВЕДЕНИЕ

Всем известно, что при классических астрономических наблюдениях эффективность, в смысле предельных возможностей по блеску, зависит прежде всего от качества изображения (Боуэн, 1964; Щеглов, 1980). Однако и другие астроклиматические параметры играют не менее важную роль. Так, общий выход телескопа пропорционален количеству ясной ночной погоды, причем обычно не вся она может быть использована в случае сильного приземного ветра и/или высокой влажности окружающего воздуха.

При выборе места установки 2.5-м телескопа ГАИШ МГУ выявилось отсутствие современной астроклиматической информации, касающейся северокавказского региона, и собственно выбор был

сделан на основе разрозненных исследований 40–50-летней давности и других факторов. Полное и качественное изложение истории астроклиматических исследований Северного Кавказа и основных полученных за это время результатов приведено в статье (Панчук, Афанасьев, 2011). Интересные исторические факты на эту тему содержатся также в книге Д.Я. Мартынова (2012).

В этой связи в начале 2006 г. нами была поставлена задача многолетнего мониторинга атмосферной оптической турбулентности и других астроклиматических параметров на горе Шатджатмаз, выбранной для установки телескопа. Исследование астроклиматических характеристик на этой вершине, начатое в конце 2007 г. и продолжившееся до 2015 г., наряду со значением для астрономических наблюдений в Кавказской обсерватории ГАИШ МГУ, имеет и более общее значение для понимания

* Электронный адрес: safonov@sai.msu.ru

астроклиматической ситуации на Северном Кавказе.

Первые результаты наших исследований были представлены в работе (Корнилов и др., 2010), где, кроме данных об атмосферной оптической турбулентности, также приводятся основные метеорологические характеристики, измеренные на протяжении первых двух лет. Итоги всей кампании 2007–2013 гг. измерений оптической турбулентности подробно изложены в работе (Корнилов и др., 2014), а в настоящей статье мы представляем результаты измерений метеорологических параметров, в том числе и количества ясного ночного времени.

Вслед за кратким общим описанием места проведения кампании и хода измерений, в следующих разделах приводятся полученные нами метеорологические характеристики. Кроме обычных метеоданных, таких как температура, ветер, влажность, получены оценки количества осаждаемой воды и приведена информация о скорости высотного ветра, полученная нами из данных измерений оптической турбулентности. Затем даны описание методики и результаты определения количества ясного ночного времени по данным одноэлементного термопарного ИК-микроболометра.

Приведенные в статье результаты позволяют достаточно полно характеризовать метеорологические особенности Кавказской обсерватории (КГО ГАИШ) с целью эффективного планирования наблюдений на 2.5-м телескопе. Дальнейшее измерение астроклиматических характеристик параллельно с работой телескопа позволит оптимизировать использование наблюдательного времени.

ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ МЕСТА И АСТРОКЛИМАТИЧЕСКОЙ КАМПАНИИ

Территория Кавказской обсерватории расположена на горе Шатджатмаз рядом с ее вершиной (Малокарачаевский р-н КЧР России, 20 км к югу от Кисловодска, высота вершины 2127 м над уровнем моря). Гора относится к Скалистому хребту, идущему параллельно Главному Кавказскому хребту на удалении около 50 км. В западном направлении Скалистый хребет постепенно повышается к горе Бермамыт, а затем загибается на север, обеспечивая водораздел Северного Кавказа на восточную и западную часть.

Башня 2.5-м телескопа возведена в 40 м от крутого юго-восточного склона горы на высоте 2112 м над уровнем моря в точке с широтой $43^{\circ}44'10''$ N и долготой $42^{\circ}40'03''$ E. Телескопы меньшего размера будут установлены в четырех 5-м башнях вдоль хребта на северо-восток от главного инструмента. Еще дальше, на расстоянии около 400 м, в небольшой низине располагаются здания инфраструктуры

обсерватории. В 700 м на северо-запад находится Горная астрономическая (солнечная) станция ГАО РАН (ГАС ГАО). Южная часть горизонта свободна от каких-либо световых источников, однако с севера визуально наблюдается подсветка населенными пунктами региона Кавказских Минеральных Вод. В полукилометре на восток от обсерватории проходит дорога Кисловодск–Джилы-Су (северное Приэльбрусье). Сам Эльбрус находится на юго-юго-западе на удалении 47 км.

Специальная астрофизическая обсерватория РАН находится примерно в 100 км к западу от КГО на северных отрогах Главного Кавказского хребта ($+43^{\circ}38'49''$ N, $+41^{\circ}26'26''$ E), а Терскольская астрономическая обсерватория Института астрономии РАН расположена фактически на склоне Эльбруса ($+43^{\circ}16'29''$ N, $+42^{\circ}30'03''$ E). В отличие от КГО, обе обсерватории находятся рядом с более высокими вершинами.

Автоматический астроклиматический монитор АСМ¹ был установлен на вершине горы Шатджатмаз в 40 м к юго-западу от отметки центра башни 2.5-м телескопа летом 2007 г., а измерения были начаты осенью того же года. Оборудование монитора и алгоритм его работы описаны нами ранее в (Корнилов и др., 2010; Корнилов, 2011; Корнилов и др., 2012а), где основное внимание уделено измерениям атмосферной оптической турбулентности комбинированным прибором MASS/DIMM (многоапертурный датчик мерцаний и монитор дифференциальных дрожаний) (Корнилов и др., 2007).

Измерения основных метеорологических характеристик начались практически сразу же после установки вышки и оборудования монитора. В состав аппаратуры был включен минимальный набор датчиков для измерения метеопараметров для того, чтобы (1) иметь необходимую информацию для безопасного и эффективного проведения автоматических наблюдений и (2) накопить однородный ряд измерений основных метеопараметров для последующего анализа измерений оптической турбулентности (Корнилов и др., 2010).

Метеоданные практически непрерывно собирались с 3 октября 2007 г., а данные с датчика ясного неба (см. раздел “Статистика ясного ночного времени”) — с 24 ноября 2006 г. Что касается измерений оптической турбулентности, то они были выполнены в период с 15 ноября 2007 г. по 15 мая 2013 г., их общая продолжительность составила около 7000 ч. При этом мы не претендовали на полное соответствие получаемых результатов метеорологическим стандартам и использовали

¹ Аббревиатура АСМ заимствована у аналогичного комплекса ASM (Astronomical Site Monitor) Европейской южной обсерватории.

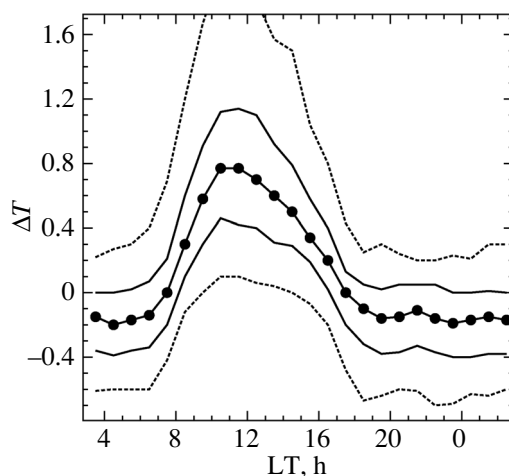


Рис. 1. Медианная разность температур датчиков АСМ и Vaisala в течение суток (●) в зимний период. Тонкие сплошные и штриховые линии показывают 25%, 75% и 5%, 95% квантили. По горизонтальной оси отложено местное время LT .

не стандартное метеорологическое оборудование, а простейший метео-контроллер, разработанный для работы с широкодоступными интегральными датчиками температуры TMP36 (Analog device) и влажности HIH-4000 (Honeywell). Для измерения скорости ветра применялся чашечный анемометр производства Davis Instruments (модель 7911), также подключенный к метео-контроллеру.

Метеодатчики были закреплены на высоте около 5 м на мачте, установленной на крыше вагона, стоящем на расстоянии 10 м от вышки АСМ к северо-западу. В этой конфигурации аппаратура проработала до октября 2015 г., когда ураганный ветер с порывами более 30 м/с снес мачту с крыши вагона. В декабре 2015 г. мы восстановили нашу систему, разместив датчики температуры и влажности под настилом вышки АСМ.

ТЕМПЕРАТУРА ВОЗДУХА

Датчик температуры был смонтирован в стандартном метеорологическом кожухе для минимизации эффекта нагрева Солнцем и защиты от осадков. Эпизодическое сравнение его показаний с данными метеостанции Росгидромета не обнаружило расхождения больше 2°C . После начала работы штатной метеостанции 2.5-м телескопа Vaisala MAWS301, установленной между башней и АСМ, появилась возможность более тщательной взаимной калибровки. Для этой процедуры мы использовали измерения в пробный период в июле–августе 2014 г. и в период с января по октябрь 2015 г. (~350 тыс. минутных точек). Совместные данные хорошо покрывают весь температурный диапазон от -15° до $+25^{\circ}\text{C}$, так что результаты сравнения применимы ко всем накопленным за 9 лет данным.

По всему калибровочному набору данных медианное значение разности показаний датчика АСМ и датчика Vaisala всего -0.05° , хотя межквартильный разброс этой разности достигает 0.7° . Сравнение температур для дневного и ночного времени отдельно показывает значительно большее различие, причина которого объясняется внутрисуточными вариациями $T_{\text{АСМ}} - T_{\text{Vaisala}}$, их поведение для зимнего периода представлено на рис. 1. Величина этих вариаций зависит от времени года: зимой она 0.9° , летом 1.1° . Летом подъем кривой начинается на 2 ч раньше, чем зимой, что подтверждает предположение о недостаточной защите датчика температуры АСМ от солнечного нагрева и тепловых потоков от близко расположенной (всего в 2 м ниже) металлической крыши вагона.

Представленные далее результаты приведены в систему датчика метеостанции Vaisala, сезонные и месячные значения, относящиеся к ночному периоду, скорректированы на величину $+0.3^{\circ}$. Кривые внутрисуточных изменений исправлены по медианной зависимости, подобной кривой на рис. 1, для зимнего и летнего периодов отдельно.

Для анализа долгосрочных изменений весь период с октября 2007 г. по октябрь 2015 г. был разделен на восемь годовых сезонов по границе 12^{h} по местному времени (LT) 1 октября. Далее вычислялись квартили распределений и два маргинальных квантиля 5% и 95% для оценки экстремальных ситуаций, результаты приведены далее в табл. 2. Для годового сезона маргинальные квантили означают, что в течение 18 дней в году может быть холоднее 5% (или теплее 95%) квантиля. Годовая медианная температура достаточно стабильна, отличаясь от общей медианы (см. табл. 1) не более, чем на $\pm 1.1^{\circ}$. Также стабильна “теплая” часть распределений, соответствующая периоду с

Таблица 1. Квантили распределения температуры воздуха для всех данных, ночи и ясной ночи, °C

Сезон	5%	25%	50%	75%	95%
Суточная температура	−9.63	−1.70	4.23	9.84	15.33
Ночная температура	−10.10	−2.23	3.60	8.80	13.47
В ясную ночную погоду	−11.24	−2.35	3.15	8.37	14.08

Таблица 2. Квантили распределений температуры воздуха в ясную ночную погоду по восьми годовым сезонам, °C

Сезон	5%	25%	50%	75%	95%
2007/08	−12.55	−6.30	0.65	7.15	13.15
2008/09	−10.73	−2.55	2.25	6.85	11.78
2009/10	−7.15	−0.42	5.85	11.00	15.84
2010/11	−5.58	2.27	6.65	8.75	14.39
2011/12	−13.95	−5.55	−0.35	8.09	13.35
2012/13	−10.16	−0.34	4.52	8.14	11.75
2013/14	−7.75	−1.68	2.85	6.35	14.58
2014/15	−7.15	−1.32	3.13	9.05	15.45

апреля по октябрь. Отрицательные температуры отличаются большей вариативностью с размахом достигающим $\sim 6^\circ$.

В табл. 1 также приведены общие статистические характеристики температуры воздуха в ночное и в ясное ночное время. Здесь и далее под ночными данными понимаются измерения в моменты ± 3 ч от местной полуночи. Выборка ночного ясного времени производилась для навигационной ночи по данным датчика ясного неба, описанного далее в соответствующем разделе.

Для ясного ночного времени в табл. 2 представлена информация по отдельным сезонам. Вариации квантилей от сезона к сезону гораздо существеннее чем для суточных данных. Даже медианные значения меняются на $\pm 3.5^\circ$. Здесь можно выделить аномально холодный сезон 2011/12 и аномально теплый 2010/11. Такие ситуации, в основном, определяются избытком (дефицитом) зимней ясной погоды, о чем свидетельствуют значения 5% квантиля.

Большой интерес представляет поведение температуры внутри года. Эволюция медианных значений и других квантилей по месяцам показана на рис. 2. Естественно, ночная температура лежит систематически ниже среднесуточной на $\approx 0.5^\circ$ в

осенне-зимний период и на $\approx 1.0^\circ$ летом. Для температуры в ясные ночи характерно другое поведение, эта кривая лежит несколько выше зависимости ночной температуры. На первый взгляд этот факт противоречит данным табл. 1, где для ясной ночной погоды все значения, кроме 95% точки, ниже значений ночной температуры. Однако это типичный эффект выборки, отражающий неравномерность распределения ясной погоды внутри года. Большая часть ясной погоды приходится на октябрь–декабрь (см. раздел “Статистика ясного ночного времени”) — заметно более холодный период, чем в среднем.

Поведение температуры воздуха внутри суток исследовалось так: вычислялась медиана в суточной выборке с 9 ч до 9 ч следующих суток, и анализировалась ее разность с текущими температурами. Полученные данные (рис. 3) приведены к показаниям датчика Vaisala. Видно, что нагрев воздуха активно начинается после рассвета и продолжается до полудня. Затем процесс нагрева приостанавливается, и температура начинает падать, сначала достаточно быстро, а после захода Солнца со скоростью порядка $0.1^\circ/\text{ч}$.

Медианный размах между температурой в полдень и во вторую половину ночи достигает 2.5° . Поскольку распределения разностей практически симметричны (на это показывают квартили распределения), приведенные кривые отражают наиболее вероятную ситуацию. Естественно, эффект больше летом и достигает 2.6° в июле–сентябре, зимой, в наиболее холодные январь–март, составляет только 1.9° . Более существенным является суточное интегральное воздействие нагрева окружающего воздуха (аналог полной добавочной энергии): $25.5^\circ \times \text{ч}$ и $13.5^\circ \times \text{ч}$ для лета и зимы соответственно. Приведенные величины прямо пропорциональны затратам тепла на поддержание стабильной подкупольной температуры 2.5-м телескопа.

ВЛАЖНОСТЬ

В датчик относительной влажности (RH в %) АСМ из-за неудачной конструкции его корпуса во время продолжительных осадков часто попадала вода, и он начинал показывать сильно заниженную влажность. Как результат, исходные данные содержат примерно 20% неадекватных показаний кусками характерной продолжительности в час-два. Чтобы такие ошибки не влияли на результаты статистического анализа, мы провели тщательную верификацию данных путем сравнения с любезно предоставленными нам данными метеостанции Кисловодской высокогорной научной станции Института физики атмосферы им. Обухова (КВНС ИФА) за 2007–2013 гг. (шесть измерений в час, а

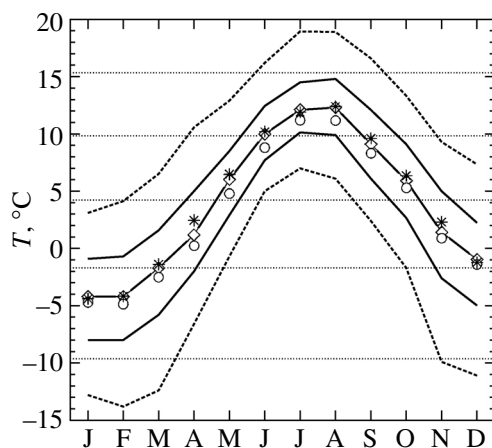


Рис. 2. Поведение медианных температур воздуха в течение года для полного набора данных ($\diamond$), для температуры ночью ($\circ$) и для случая ясного ночного неба ($*$). Тонкие сплошные и штриховые линии показывают 25%, 75% и 5%, 95% квантили для полного набора соответственно. Квантили для двух других выборок примерно совпадают с ними и не показаны. Горизонтальные пунктирные линии обозначают квантили для всех данных.

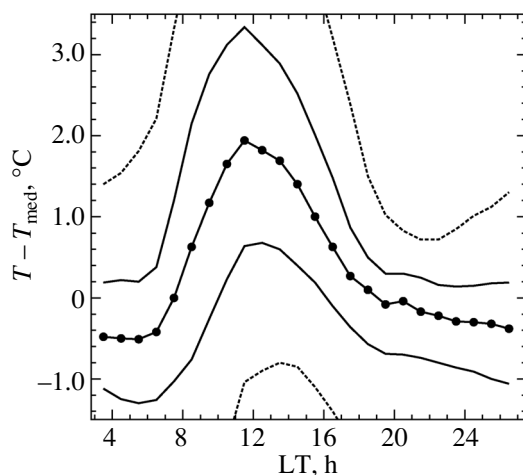


Рис. 3. Медианная разность текущей температуры и суточной медианы в течение суток как функция местного времени LT в часах. Тонкие сплошные и штриховые линии показывают 25%, 75% и 5%, 95% квантили соответственно.

начиная с 2012 г. — ежеминутные данные) и с измерениями метеостанции Росгидромета “Шатджатмаз” за 2012–2014 гг. (интервал данных 3 ч), свободно доступными через сайт <http://rp5.ru>. Обе метеостанции расположены ближе чем в 1000 м от АСМ при перепаде по высоте менее 40 м.

Сравнение наших измерений с этими данными показывает в общем хорошее согласие при систематических различиях менее 5%. Измерения АСМ, вылетающие за пределы эмпирической огибающей в виде $\pm 3 RH^{1/4}$ от средней зависимости, были заменены привлеченными данными с учетом систематического 1.5% смещения, так как простое исключение вылетающих точек приводит к недооценке высокой влажности. Итоговый контроль осуществлялся по кумулятивным распределениям,

построенным для пересекающихся по времени измерений. Различия распределений по оси RH не превышают $\pm 3\%$. Итоговый объем данных АСМ составляет $\approx 50\,000$ ч, покрывающих период с октября 2007 г. по конец апреля 2014 г. с одним двухмесячным перерывом для замены сгоревшего датчика в 2013 г.

Медианы годовых сезонов (определенных так же как и при анализе температуры) меняются незначительно, в пределах 72–82%. В сезон 2013/14 попадает только зимний период, что приводит к заниженному значению характерной влажности. Если этот сезон исключить из рассмотрения, то характерные точки статистики RH таковы: медиана 77%, первый и третий квартили —

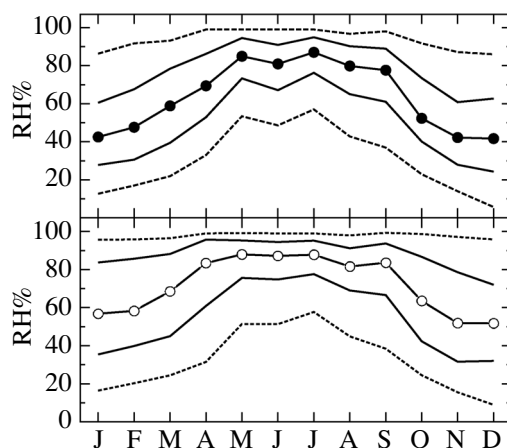


Рис. 4. Поведение квантилей распределений относительной влажности RH по месяцам внутри года. Вверху: для ясной погоды, медианы обозначены знаком $\bullet$. Внизу: для всех данных, медианы показаны символом $\circ$. Сплошные тонкие линии показывают 25% и 75% квантили, штриховые — 5% и 95% квантили.

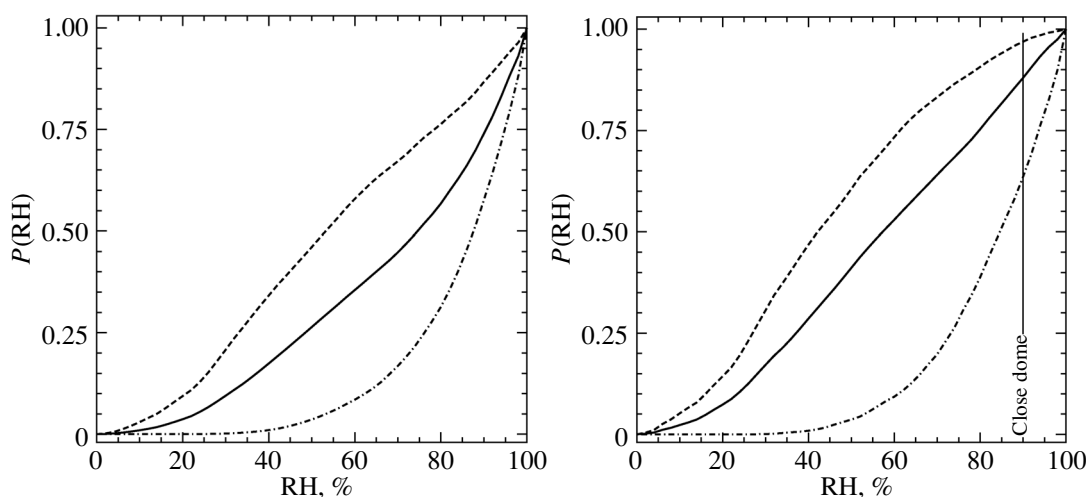


Рис. 5. Кумулятивные распределения относительной влажности RH для круглосуточных данных (слева) и для ясного ночного неба (справа). Сплошная линия для всего года, штриховая для ноября–января, штрихпунктирная для периода май–июль.

51% и 91%. Для ясной ночной погоды квантили равны 40, 60 и 81% соответственно.

Как и температура, влажность показывает четкую годовую переменность, представление о которой дает рис. 4. Месячное медианное значение RH для всех данных (внизу) позволяет разделить годовой цикл на условно сухой период ($RH \sim 60\%$) — с октября по март, и влажный — с апреля по сентябрь ($RH \sim 80\%$). Квантиль 95% соответствует $RH = 99\%$. Внутригодовые изменения для ясной ночной погоды показывают, что во “влажный” период характерная величина RH остается $\sim 80\%$, в то время как во время “сухого” периода уменьшается до 40–50%. При этом и 75% квантиль также показывает, что становится суше на $\sim 20\%$. Самые

сухие месяцы — это ноябрь, декабрь и январь, а самые влажные — май, июнь и июль.

Для этих периодов кумулятивные распределения RH выглядят совершенно по-разному. И это понятно, так как они зафиксированы в точке 100%, и изменение медианы неизбежно приводит к существенному изменению формы. Распределения для разных периодов показаны на рис. 5: слева для суточных данных, справа для ясного ночного неба. Обращает на себя внимание большая разница между кривыми для “сухого” и “влажного” периодов. Годовое распределение ближе к первой кривой, что очевидно, так как вклад ночей ноября–января в ясную погоду доминирующий. В этот период вероятность влажности выше 90% невелика, не превышает 5%. Напротив, в мае–июле веро-

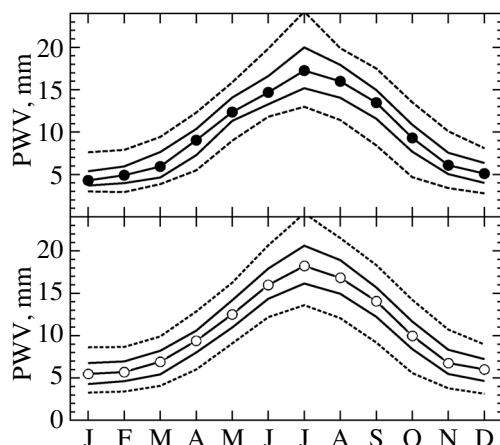


Рис. 6. Поведение квантилей распределений осажденной воды PWV по месяцам внутри года. Вверху: для ясной погоды, медианы обозначены знаком $\bullet$. Внизу: для всех данных, медианы показаны символом $\circ$. Сплошные тонкие линии показывают 25% и 75% квантили, штриховые — 5% и 95% квантили.

ятность предельно высокой влажности составляет $\approx 35\%$.

Используя данные по относительной влажности и температуре, мы вычислили абсолютную влажность, чтобы на ее основе прогнозировать количество осажденной воды PWV аналогично тому, как это делалось Отаролой и др. (2010). Абсолютная влажность D_w [г/м³] вычисляется по стандартным формулам (например 1.4–29 в инструкции Всемирной Метеорологической Организации, 2008):

$$D_w = \frac{216.7}{T + 273.15} P_w, \quad (1)$$

где P_w — парциальное давление водяного пара в гПа, T — температура воздуха в °C. Величина P_w находится через парциальное давление насыщенного водяного пара при данной температуре и относительной влажности:

$$P_w = 6.136 \exp \left(\frac{17.62 T}{243.12 + T} \right) \times \frac{RH}{100}. \quad (2)$$

Фактор 6.136 есть стандартный коэффициент 6.112, скорректированный за среднее атмосферное давление на вершине 790 гПа.

Возякова (2012) аналогично вычисляла абсолютную влажность для сравнения с величинами PWV , полученными из задержек GPS сигналов. Используя обобщенный МНК и данные из этой работы, мы переопределили регрессию как $PWV = 2.1 + 1.79 D_w$. С помощью этого соотношения по вычисленной абсолютной влажности были получены минутные оценки PWV для всего периода измерений.

Чтобы окончательно убедиться в адекватности полученных значений, мы выбрали период 2007–2009 г., где имеются полученные по задержке GPS

сигналов величины PWV (примерно 8500 точек), и сравнили их с нашими данными. Наклон линейной регрессии $PWV_{ASM} = 0.178 + 0.95 PWV_{GPS}$ практически единичный, среднее квадратичное поперечное рассеяние точек составляет 1.9 мм, а в наиболее интересной области малых значений ($PWV < 10$ мм) рассеяние еще меньше: 1.1 мм, и вполне объясняется точностью данных.

Результаты этой верификации позволяют нам использовать вычисленные оценки для статистического анализа количества водяного пара над горой Шатджатмаз. Сезонные вариации годовых медиан (см. табл. 3) несколько больше, чем для относительной влажности, но заключены в пределах 6.7–9.0 мм при медиане для всего периода измерений 7.6 мм. Сезон 2013/14 в расчет не брался, так как его величины занижены из-за отсутствия данных в период апреля–сентября 2014 г.

Таблица 3. Квантили распределения количества осажденной воды PWV в мм по семи годовым сезонам для ясного ночного неба

Сезон	5%	25%	50%	75%	95%
2007/08	3.5	4.6	6.7	11.2	18.0
2008/09	2.8	5.2	7.2	11.6	16.7
2009/10	3.7	6.4	9.0	14.1	19.5
2010/11	4.1	5.7	8.4	12.2	18.0
2011/12	3.2	4.4	6.4	12.5	18.4
2012/13	3.9	5.5	7.7	12.1	16.0
2013/14	2.9	4.0	5.3	7.3	10.1
2007/13	3.4	5.2	7.6	12.3	18.0

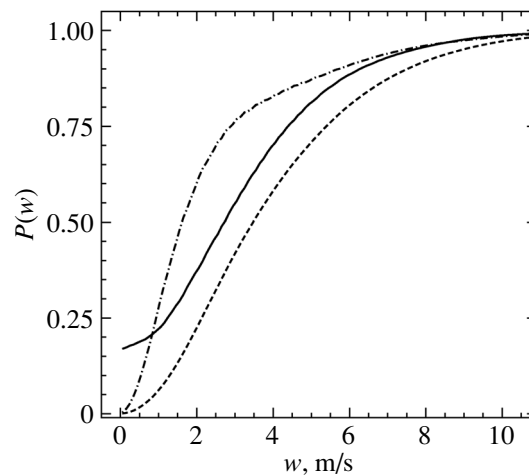


Рис. 7. Кумулятивные распределения скорости ветра w по одновременным измерениям с анемометром АСМ (сплошная) и метеостанции Vaisala (штриховая) и корректирующая функция (штрихпунктирная кривая).

Поведение PWV внутри года представлено на рис. 6 для круглосуточных данных и для ясной ночной погоды. Внутригодовые вариации имеют ярко выраженный характер, количество воды для ясной погоды в январе (годовой минимум) и в июле (годовой максимум) меняется в 3.2 раза. В отличие от кривой для относительной влажности, летний максимум имеет резкую форму. Межквартильный размах составляет примерно $\pm 15\%$ от медианного значения, что позволяет уверенно использовать эти результаты для прогнозирования количества осаждаемой воды.

ПРИЗЕМНЫЙ ВЕТЕР

Существенным недостатком чашечного анемометра является наличие мертвой зоны в его сигнале (частота вращения крыльчатки) при малых скоростях ветра. К этому в зимние периоды добавляется эффект обмерзания: иней блокирует вращение даже при заметном ветре. Эти инструментальные эффекты привели к тому, что почти 20% данных датчика ветра АСМ тождественно нулевым, и кумулятивная функция распределения скоростей ветра w начинается не с нулевого уровня (см. рис. 7).

Понятно, что оба варианта использования такой функции, вычисть подложку или оставить как есть, приводят к смещенным значениям квантилей. Поэтому так же, как и для температурного датчика, мы провели калибровку, используя данные метеостанции Vaisala как опорные. Так как мертвая зона вносит неоднозначность и поэтому не позволяет привести поточечную коррекцию, мы выбрали путь коррекции кумулятивных распределений.

Корректирующая функция определялась из кумулятивных распределений $P_{ASM}(w)$ и $P_{Vaisala}(w)$,

построенных по совпадающим по времени измерениям. Эти распределения изображены на рис. 7, где штрихпунктирной линией представлена сама корректирующая функция, равная отношению $P_{Vaisala}(w)/P_{ASM}(w)$. Вид функции свидетельствует о явном влиянии мертвой зоны на величины квантилей распределения в диапазоне до 2.5 м/с. Однако несмотря на то, что при увеличении w корректирующая функция стремится к единице, коррекция все равно сильно отражается на значении верхних квантилей из-за уменьшения наклона кумулятивных распределений.

На рис. 8 показаны исправленные таким образом кумулятивные распределения, построенные по всем измерениям с АСМ анемометром (3.9 млн. минутных измерений) для ночного и дневного периода (± 3 ч от полудня) и по измерениям в ясное ночное время. Ночные кривые практически совпадают, что говорит об отсутствии корреляции между ветром и ночной ясной погодой. Дневная кривая выделяется в сторону больших скоростей ветра. Численные значения квантилей приведены в табл. 4. Таблица показывает, что наша первоначальная оценка скоростей ветра (Корнилов и др., 2010) по данным первых двух лет измерений без учета мертвой зоны анемометра оказалась заниженной на 0.7 м/с для ночного и на 1.0 м/с для дневного времени.

Для оценки ветрового воздействия на телескоп и его купол, важной как с точки зрения эффективности наблюдений, так и с точки зрения безопасности, мы рассмотрели ситуации сильного ветра. Вероятность штормовых ветров (средний ветер больше 15 м/с) составляет всего 0.3% (1 день в году). Однако кратковременная (средняя за 2 с) скорость ветра (ветер в порывах) может достигать гораздо больших значений. На рис. 8 показана функция

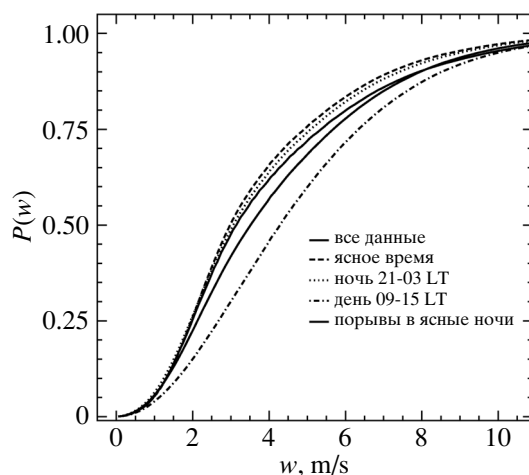


Рис. 8. Скорректированные кумулятивные распределения скорости ветра для различных подвыборок.

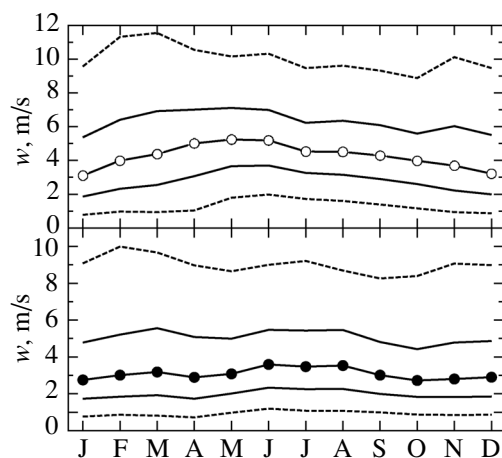


Рис. 9. Медианная скорость ветра и квантили его распределения по месяцам года для ночного (внизу) и дневного (вверху) времени. Медианы обозначены символами ● и ○.

распределения кратковременной скорости ветра в ясную ночь, а ее квантили приведены в табл. 4. Если для усредненного за минуту ветра вероятность превысить 10 м/с составляет 2.8%, то для порывов она увеличивается до 4.5%.

Изменение характеристик скорости ветра внутри года показано на рис. 9. Ночной ветер не обнаруживает значимых систематических изменений и держится на среднем уровне около 3 м/с, лишь в июне—августе медианная скорость возрастает до ≈ 3.5 м/с. Дневной ветер в течение года меняется гораздо сильнее: в декабре—январе наблюдается минимум на уровне ≈ 3.1 м/с, затем ветер усиливается, достигая в апреле—июне максимума в ≈ 5.1 м/с, и с июля начинает монотонно спадать.

В принципе, квантили месячных распределений ведут себя похожим образом, однако 95% квантиль показывает, что в феврале—марте на фоне обычной стабильной ситуации увеличивается вероятность сильных ветров.

Статистика направления ветра подтверждает нашу первую оценку ветровой ситуации (Корнилов и др., 2010). Действительно, характер дневного и ночного ветра сильно различается, что и не удивительно в горных условиях. Роза ветров для дневного, ночного и периода ясного ночного неба показана на рис. 10. Обращает на себя внимание, что из северо-восточного квадранта ночью ветер никогда не дует. Это благоприятное обстоятельство позволяет считать наши метеоданные неискаженными

Таблица 4. Квантили распределения скорости ветра днем, ночью и в ясную ночь в м/с

Сезон	5%	25%	50%	75%	95%	99%
Суточные данные	0.94	2.12	3.52	5.68	9.49	12.76
Дневное время	1.12	2.68	4.29	6.34	10.00	13.42
Ночное время	0.89	1.94	3.06	5.09	9.01	12.10
Ясная ночь	0.98	1.96	2.98	4.92	8.77	11.89
Порывы в ясную ночь	0.97	1.99	3.14	5.36	9.78	13.71

влиянием башни 2.5-м телескопа, расположенной как раз на северо-востоке от метеостанции и астроклиматического монитора.

ВЫСОТНЫЙ ВЕТЕР

Скорость ветра на разных высотах над поверхностью определяет временные характеристики оптической турбулентности в атмосфере. Возможности многих астрономических методов явно или неявно связаны с тем, как быстро меняется картина фазовых и амплитудных возмущений принимаемой световой волны. Это не обязательно современные методы высокого углового разрешения. Как пример, можно привести высокоточную фотометрию, где величина шума мерцаний зависит от скорости ветра в стратосфере (Корнилов, 2011). Информация о высотном ветре может быть получена многими способами. Астрономическая общественность обычно использует либо данные наблюдений с инструментом SCIDAR (Авила и др., 2006; Гарсия-Лоренцо и др., 2009), либо данные NCEP/NCAR (Калнэй и др., 1996).

Здесь представлены результаты определений скорости ветра в атмосфере на высотах от 1 км

до 16 км, выполненные по измерениям оптической турбулентности прибором MASS. Восстановление скорости ветра возможно разными методами, но далее приводятся только результаты метода “V” (Корнилов, 2012с). Хотя сравнение с данными NCEP/NCAR для высот 10 и 16 км показывает заметное расхождение, оно для настоящего анализа не критично. Скорее всего, проблема расхождения связана с тем, что вертикальное разрешение метода плохо определено, и максимум скорости ветра в тропопаузе просто заглаживается. Тем не менее, изучение вариаций наблюдающихся скоростей во времени может помочь идентифицировать основные процессы, происходящие в атмосфере.

Измерения, пригодные для извлечения скорости ветра, были начаты только 30 апреля 2009 г. после модификации управляющей программы инструмента MASS. Восстановление скорости выполнялось на нестандартной для профилей оптической турбулентности высотной сетке: 1, 2.5, 4, 6.5, 10 и 16 км над вершиной. В результате получено $\approx 290\,000$ минутных профилей. Минутные профили содержат большой шум восстановления, приводящий к спорадическим выбросам на порядок величины, что физически необъяснимо. Однако уже 10-мин медианные значения свободны от таких артефактов, и их поведение внутри ночи достаточно гладкое.

Общеизвестно, что существуют значимые сезонные изменения скорости высотного ветра, связанные с перестройкой глобальной циркуляции воздушных масс в течение года. Такие изменения явно видны на кривых, приведенных на рис. 11. Показана эволюция медиан выборочных месячных распределений скорости ветра для шести высот, соответствующих узлам высотной сетки. Для ясности мы не стали приводить квантили распределений, их принципиальное поведение повторяет поведение медиан.

Напомним, что эти кривые характеризуют ясное ночное время, поэтому их можно сравнивать с поведением приземного ветра на рис. 9 внизу. Так же как и в случае приземного ветра, скорости ветра на высотах 1 и 2.5 км не сильно меняются

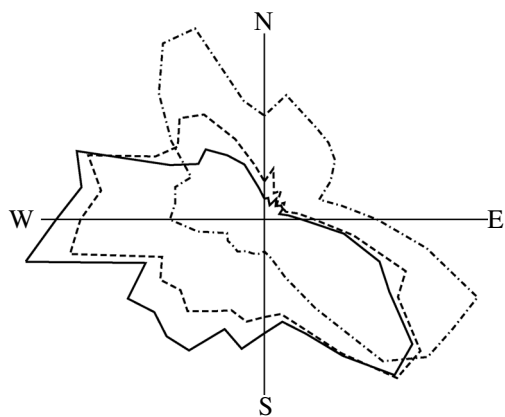


Рис. 10. Частотное распределение направления ветра в три периода: дневной обозначен штрихпунктирной линией, ночной — штриховой, и при ясном ночном небе — сплошной линией.

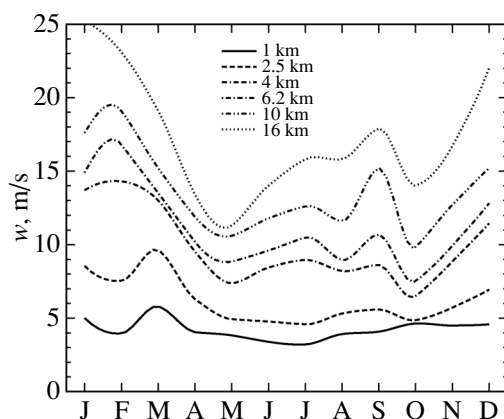


Рис. 11. Медианная скорость высотного ветра на разных высотах по данным измерений оптической турбулентности с прибором MASS.

в течение года, но в их поведении имеется характерная деталь, отмеченная нами ранее (Корнилов и др., 2014): значимое увеличение скорости в марте. В более высоких слоях эта деталь сливается с зимним максимумом в феврале. Самый верхний 16 км слой имеет максимум в январе.

В период с мая по октябрь ветер выше 4 км минимален, причем на общем фоне виден локальный минимум в октябре, по-видимому, обусловленный стабильным осенним антициклоном. Летний минимум скорости ветра в верхней атмосфере приводит к тому, что шум мерцаний для обсерватории максимален в период с мая по август, хотя в основном мерцания на больших телескопах обуславливаются движением турбулентности на еще больших высотах: 20–25 км (Корнилов и др., 2012b).

СТАТИСТИКА НОЧНОГО ЯСНОГО ВРЕМЕНИ

Количество ясного ночного неба — величина, плохо определенная из-за отсутствия общепринятой стандартной методики. В практике для ее оценки используются совершенно различные методы. Предварительный выбор места на основе метеоданных дополняется анализом информации с метеоспутников (см., например, Эразмус, Саразен, 2002; Кавацани и др., 2011). В случае работающих обсерваторий используются журналы наблюдений (Панчук, Афанасьев, 2011; Тапия, 2003). Для оперативной оценки состояния неба применяются визуальные и ИК ПЗС-камеры с большим полем зрения (см. Санчес и др., 2007; Асейтуно и др., 2011) или одноэлементные болометры (Клэй и др., 1998; Марчант и др., 2008).

При автономных автоматических наблюдениях текущая информация о состоянии облачности на небе требуется, в первую очередь, для обеспечения безопасных для аппаратуры условий работы.

Наиболее простым и удобным является одноэлементный термопарный ИК-микроболометр (бесконтактный термометр), измеряющий поток радиации от неба, как правило, в диапазоне 8–14 мкм. В поле зрения такого одноэлементного датчика попадает лишь малая часть неба, и это приводит к некоторой неопределенности, но в большинстве случаев мониторинг околоразенитной области достаточен.

Выходной сигнал с такого датчика отражает радиационный баланс между поверхностью земли и атмосферой, и в случае ясного неба чувствительный элемент датчика излучает больше, чем поглощает. Общепринято, хотя совсем и не обязательно, пересчитывать сигнал в яркостную температуру излучения T_{sky} , которая в случае ясного неба существенно ниже, чем окружающая температура T_{amb} . Следует иметь в виду, что температура самого сенсора T_{sen} может отличаться от окружающей температуры, если он подогревается для того, чтобы избежать конденсации на нем водяного пара. Тогда вывод об отсутствии облаков делается по значению $\Delta T = T_{\text{sky}} - T_{\text{amb}} + T_{\text{sen}}$.

Для обеспечения наблюдений оптической турбулентности нами использовался датчик Boltwood clouds sensor², установленный в 2006 г. на близ расположенной ГАС ГАО в рамках проекта МАСТЕР (Липунов и др., 2010). В поле зрения датчика попадает примерно 15% площади неба около зенита. Накопленные к 2010 г. данные были использованы для первой объективной оценки количества ясного ночного неба (Корнилов и др., 2010) на вершине горы Шатджатмаз.

В настоящем разделе мы приводим результаты анализа гораздо большего массива данных с 24 ноября 2006 г. по 3 октября 2015 г. общей

² <http://www.cyanogen.com/fix.php>

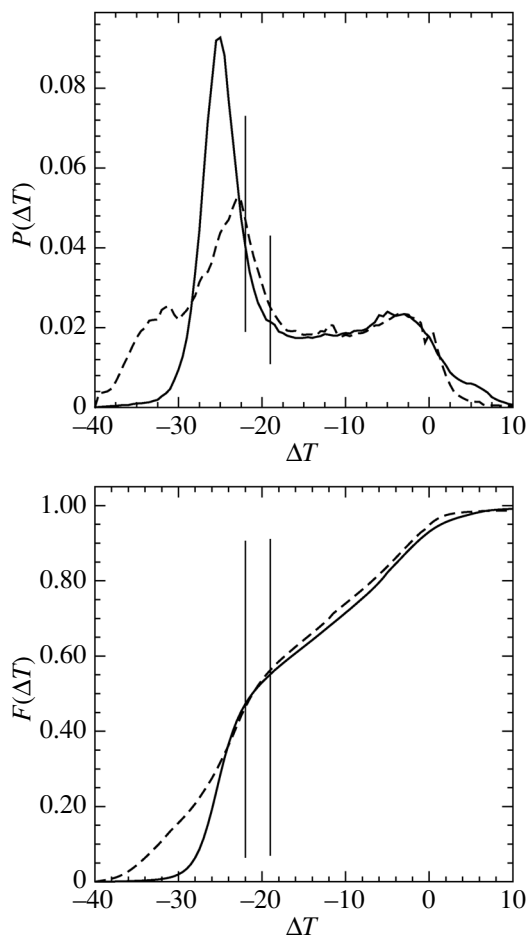


Рис. 12. Дифференциальные (вверху) и кумулятивные (внизу) распределения величины ΔT в навигационную ночь, используемые при определении ясного неба. Тонкие вертикальные линии — пороги -22 и -19°C . Сплошными линиями обозначены распределения после учета долговременных трендов датчика, штриховыми — без коррекции.

продолжительностью 3234 календарных дня. По техническим причинам отсутствуют данные для 237 дней, что составляет порядка 7% от полного объема измерений. Поскольку существуют астрономические задачи, не критичные к уровню фона неба, анализ выполнялся и для астрономической ($h_\odot < -18^\circ$), и для навигационной ($h_\odot < -12^\circ$) ночей. Массив данных измерений температуры неба в навигационную ночь содержит ≈ 1.7 млн. минутных точек.

Показанное на рис. 12 распределение ΔT является типичным для более-менее продолжительного периода. Аналогичная картина наблюдается и для “сырого” сигнала датчика, пропорционального энергетическому потоку в случае $T_{\text{sen}} \approx T_{\text{amb}}$. Левый пик соответствует ясному небу. Однако изучение распределений ΔT в разные сезоны показало, что на годовых временных масштабах характеристики этого датчика заметно изменяются. Поэтому для наблюдений критерий ясного неба, первоначально установленный как $\Delta T < -22^\circ\text{C}$,

приходилось несколько раз уточнять опытным путем по потокам от звезд, измеряемым MASS.

Дрейф датчика определялся по положению максимумов (мод) распределений ΔT , построенных по трехмесячному периоду. Естественно, предполагается, что оптические свойства чистой атмосферы сами по себе не меняются. Контролем служила температура правого среза распределения (плотная низкая облачность), соответствующая ситуации нулевого потока излучения. Полный размах кривой дрейфа за 8 лет составил почти 15°C с максимальной скоростью изменения $\sim 5^\circ\text{C}$ в год. Также на кривой дрейфа наблюдается годовая волна незначимой амплитуды, либо по причине неполной компенсации температуры детектора, либо из-за большей непрозрачности атмосферы летом.

Далее мы аддитивно скорректировали величину ΔT так, чтобы положение максимума пика ясного неба соответствовало $\Delta T = -25^\circ\text{C}$. Такая коррекция делает пик ясного неба более определенным

Таблица 5. Количество ясного ночного навигационного NCS и астрономического ACS времени в часах для разных сезонов

Сезон	ACS	NCS	Сезон	ACS	NCS
2006/07	1328	1543	2011/12	1323	1528
2007/08	1458	1671	2012/13	1203	1413
2008/09	1331	1552	2013/14	1429	1641
2009/10	1342	1566	2014/15	1302	1502
2010/11	1162	1347	2006/15	1320	1529

(см. рис. 12 сверху, сплошные кривые) по сравнению с распределением некорректированных значений (штриховая кривая), но не меняет результат принципиально. Максимум пика, после коррекции дрейфа датчика, естественно приходится на 25.0°C при ширине пика 5°C в смысле FWHM. Кумулятивное распределение на рис. 12 (внизу) можно сразу использовать для определения средней доли ясного неба при выбранном пороге. При пороге -22°C доля ясного неба составляет 47%, а при -19°C — 55%, т.е. неопределенность порога в 1°C приводит к неопределенности результата порядка 3%.

Установить однозначную связь между температурой ΔT и полным отсутствием облачности не удастся, так как высокие полупрозрачные облака практически не меняют радиационный баланс. По измерениям в канале MASS мы отобрали периоды, отличающиеся стабильностью измеряемого светового потока на временах десятки минут. Распределения величин ΔT для таких условий фотометриче-

ского качества и для остальных периодов наблюдений, когда фиксировались вызванные высокими облаками изменения потока, хотя и имеют систематическое различие порядка 1.5°C , но сильно перекрываются, так как их ширины порядка 5°C .

Полученная выше общая доля ясного времени в 47% является формальной оценкой, практический смысл имеет ситуация, когда ясное небо детектируется как минимум в течение 20 мин непрерывно. Такой сегмент реально можно использовать для наблюдений, и к тому же это означает, что область ясного неба достаточно большая. Именно так подсчитывалась продолжительность ясной погоды в работе (Корнилов др., 2010). Данные о количестве навигационной и астрономической ясной погоды по сезонам приведены в табл. 5. Причину аномального значения в сезон 2010/11 установить трудно. Вероятнее всего, это артефакт датчика, недаром кривая дрейфа в этот сезон резко меняет поведение.

По нашим данным годовое количество ясного астрономического ночного времени на горе Шатт-жатмаз, даже если включить в подсчет аномальный сезон 2010/11, составляет 1320 ч, т.е. 45% от теоретически возможных на этой широте 2950 ч. Эта величина незначительно меньше нашей предыдущей, полученной по первым двум годам, оценки 1343 ч, приведенной в (Корнилов и др., 2010). Для навигационной ночи годовое количество ясного времени равно 1529 ч при расчетном максимуме 3451 ч (45%).

Распределение месячной продолжительности ясных астрономических и навигационных ночей по месяцам года представлено на рис. 13 (шкала слева). Из графика ясно видно, что основное наблюдательное время реализуется в период с середины сентября по середину марта, где содержится $\approx 70\%$ всего ясного времени. Максимум приходится на ноябрь месяц, а минимум на июнь. Различие в количестве ясного времени достигает четырех раз, но главной причиной этого является различие в продолжительности ночи. Об этом свидетельствует показанная на рис. 13 справа доля ясного времени. Ее минимальная величина приходится на апрель (меньше 30%). На летний период (с мая по август) приходится 40% ясного времени, в октябре, и особенно ноябре, достигается максимальная доля в 60%. Доли ясного времени для навигационных и астрономических ночей совпадают.

Важным и интересным является вопрос, как ясная погода ведет себя на временах сравнимых с длительностью ночи. Наличие и отсутствие ясного неба можно представить в виде случайного процесса с двумя состояниями типа телеграфной волны. Длительности непрерывных кусков (сегментов) ясной погоды τ определялись из массива данных измерений ΔT в течение периодов навигационной

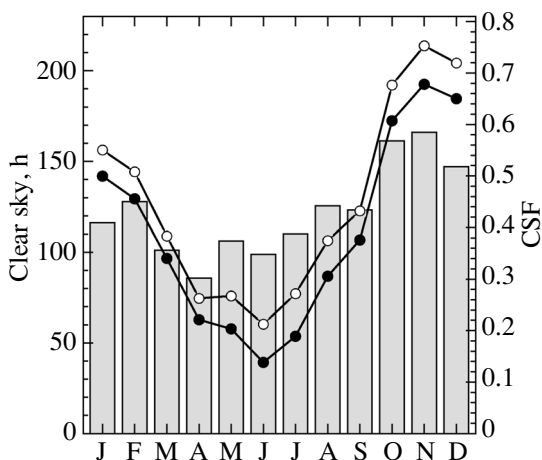


Рис. 13. Среднемесячное количество ясного астрономического (●) и навигационного (○) неба, шкала слева. Серой гистограммой показана среднемесячная доля ясного ночного неба CSF, шкала справа.

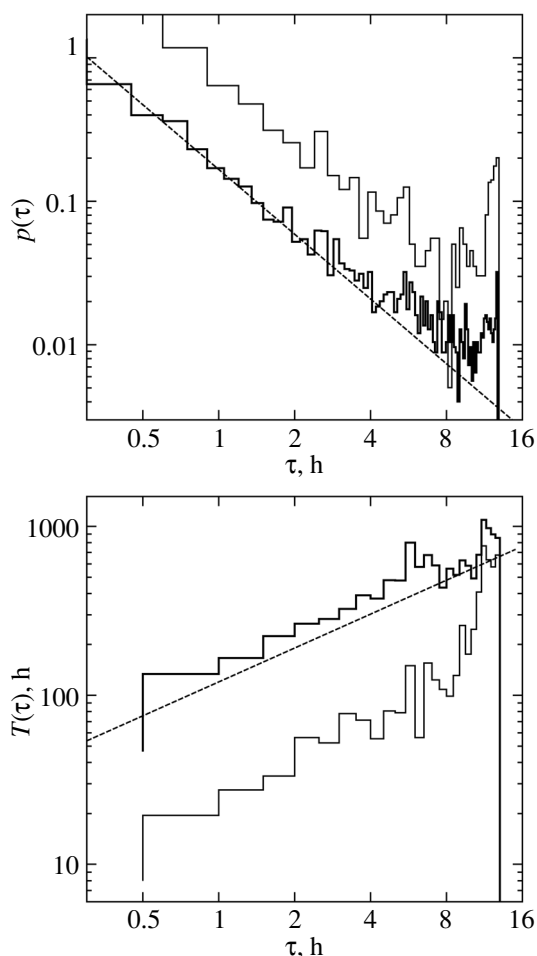


Рис. 14. Вверху: плотность вероятности реализации сегмента ясной погоды длительностью τ в логарифмическом масштабе (толстая линия). Тонкая штриховая линия — закон $\tau^{-3/2}$ для сравнения. Тонкая — плотность вероятности в октябре—декабре, смещенная вверх для наглядности. Внизу: суммарное ясное время от продолжительности ясной погоды внутри ночи. Толстая линия обозначает зависимость для всех данных, тонкая для октября—декабря, штриховая показывает закон $\tau^{2/3}$.

ночи по условию $\Delta T < -22^\circ\text{C}$. Их частотное распределение показано на рис. 14 вверху.

В целом распределения $P(\tau)$ имеют степенной характер, для сравнения нанесена линия $P(\tau) \propto \tau^{-3/2}$. Однако наше эмпирическое распределение есть результат перекрытия по времени сегмента ясного неба с навигационной ночью. Очевидное следствие — полное отсутствие сегментов с длительностью больше 12.5 ч длительности декабрьских ночей. При этом в диапазоне от 5 ч (самые короткие ночи) до 12.5 ч наблюдается избыточная вероятность. Тонкой линией показана плотность вероятности, построенная по данным октября—

декабря. Здесь наличие пика, обусловленного модуляцией ночным временем, очевидно.

В нашей ситуации примерно равной вероятности ясной и облачной погоды, аналогичное распределение для облачной погоды практически совпадает с рассмотренным. Степенной закон означает, что вероятность коротких сегментов высока, однако это не означает, что в них сосредоточена вся ясная погода. Прежде всего потому, что вероятность попасть в случайный момент времени в сегмент длины τ пропорциональна его длине, что делает общее поведение этой вероятности практически плоским со значимым пиком на длине ночи.

Более того, в ситуациях неустановившейся погоды (короткие сегменты) и сегменты облачности короткие, поэтому, если рассматривать вероятность $P'(\tau)$ суммарного времени ясного неба τ в отдельной ночи, мы будем иметь другой характер зависимости. Объединив отдельные сегменты внутри ночи, мы получили, что среднее число сегментов 3.3, хотя наиболее вероятное значение все же 1. На рис. 14 внизу показана гистограмма суммарного ясного времени от общей продолжительности ясной погоды внутри ночи. На кривой для полных данных также видна деталь из-за модуляции продолжительностями ночей, она же на кривой для лучшего наблюдательного периода в октябре—декабре проявляется как выделяющийся пик от 10 до 12.5 ч.

Имея неискаженную ночной выборкой вероятность $P(\tau)$, можно рассчитывать вероятности разных практических ситуаций, относящихся к наблюдательному процессу. Подробный анализ этого подхода выходит за рамки настоящей работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Уже упоминалось, что метеорологические измерения планировались для обеспечения автоматической работы монитора оптической турбулентности АСМ и для последующей интерпретации результатов измерений оптической турбулентности. Однако впоследствии оказалось, что эти данные еще более необходимы для эффективной эксплуатации 2.5-м телескопа, для долгосрочного и краткосрочного планирования и выполнения астрономических наблюдений в обсерватории.

Далее под минимальным и максимальным значением некоторой величины будем понимать значения маргинальных квантилей 5% и 95% ее распределения. Эти квантили для выборок ясной ночной погоды соответствуют в нашем случае ~ 60 ч или 6–10 ясным ночам, если речь идет о сезонных величинах, и только 1–2 ночам, если рассматриваются месячные значения. В этих терминах многие полученные вероятностные оценки становятся нагляднее. Кратко подытожим основные результаты

измерений метеопараметров для наблюдательного времени:

- Медианная температура по всем сезонам составляет $+3.2^{\circ}\text{C}$, минимальная температура наблюдается в феврале -13.9°C , максимальная — в июле $+17.8^{\circ}\text{C}$. Температурный перепад между днем и ночью составляет летом 2.6°C , а зимой 1.9°C .
- Минимальная относительная влажность наблюдается в ноябре—феврале, ее типичное значение 42–45%. С мая по август влажность превышает $\sim 80\%$. При безопасном пороге влажности в 90% в летние месяцы может быть потеряно $\sim 30\%$ ясного времени, в зимний период — только 5%.
- Медианное количество осаждаемой воды в период с октября по март около 5 мм. В 5% зимнего периода количество осаждаемой воды может быть меньше 3 мм. Летний период с этой точки зрения бесперспективен.
- Медианная скорость ветра равна 3.0 м/с. Значимой внутригодовой зависимости медианной скорости не имеется. Ветер сильнее 10 м/с наблюдается только в 2% случаев. Вероятность порывов более 10 м/с оценивается в $\approx 4.5\%$.
- Доминирующее направление ветра с запада или с юго-востока примерно с равной вероятностью. Ветер с северо-востока ночью не дует.
- Медианная скорость ветра на высотах больше 4 км максимальна в зимний период (примерно 20 м/с на высоте 10 км в феврале) и минимальна летом (около 12 м/с). На высоте 1 км над поверхностью ветер в течение года меняется незначительно, и его скорость примерно 4 м/с.

Полученная нами годовая продолжительность ясной ночной погоды включает в себя некоторую неоднозначность из-за различия подходов к ее определению. К сожалению, за многие десятилетия астроклиматических исследований астрономическая общественность так и не приняла единого метода измерений этого важнейшего параметра. Тем не менее:

- Среднее годовое количество ясного астрономического ночного времени составляет 1320 ч (45% от возможного для данной широты). Для навигационной ночи эта величина равна 1529 ч при расчетном максимуме 3451 ч.

- Основная часть ясного ночного времени ($\approx 70\%$) приходится на период с середины сентября по середину марта. Максимум приходится на ноябрь месяц, когда доля ясной погоды достигает 60%.

В рамках этой статьи мы намеренно не углублялись в сравнение полученных результатов с результатами подобных исследований в других обсерваториях, хотя, конечно, использовали доступную информацию при верификации наших данных. Несомненно, сбор метеоданных, измерение атмосферной оптической турбулентности и мониторинг фотометрических свойств атмосферы будут продолжены. Однако фокус этих измерений будет перенесен с накопления данных и их статистического анализа на использование этих результатов в реальном времени при астрономических наблюдениях.

Исследования астроклиматических параметров и особенностей их поведения над вершиной горы Шатджатмаз, изложенные в данной работе, были поддержаны научной общественностью ГАИШ. Большую помощь при работе на месте оказали сотрудники ГАС ГАО РАН и сотрудники ГАИШ МГУ П.В. Картунов, А.А. Белинский, а в последние два года и другие сотрудники обсерватории. Особенную благодарность мы выражаем И.А. Сеню за предоставленные метеоданные Кисловодской высокогорной научной станции ИФА им. Обухова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авила и др. (R. Avila, E. Carrasco, F. Ibañez, J. Vernin, J.-L. Prieur, and D.X. Cruz), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **118**, 503 (2006).
2. Асейтуно и др. (J. Aceituno, S.F. Sánchez, F.J. Aceituno, D. Galadí-Enríquez, J.J. Negro, R.C. Soriguer, and G. Sanchez Gomez), *Publ. Astron. Soc. Pacific* **123**, 1076 (2011).
3. Боуэн (I. S. Bowen), *Astron. J.* **69**, 816 (1964).
4. Возякова О.В., *Письма в Астрон. журн.* **38**, 307 (2012) [O.V. Voziakova, *Astron. Lett.* **38**, 271 (2012)].
5. Всемирная Метеорологическая Организация (World Meteorological Organization). *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. т. 8. (2008).
6. Гарсия-Лоренцо и др. (B. García-Lorenzo, A. Eff-Darwich, J. J. Fuensalida, and J. Castro-Almazán), *MNRAS* **397**, 1633 (2009).
7. Кавацани и др. (S. Cavazzani, S. Ortolani, V. Zitelli, and Y. Maruccia), *MNRAS* **411**, 1271 (2011).
8. Калнэй и др. (E. Kalnay, M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, et al.), *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **77**, 437 (1996).

9. Клэй и др (R.W. Clay, N.R. Wild, D.J. Bird, B.R. Dawson, M. Johnston, R. Patrick, and A. Sewell), Publ. Astron. Soc. Australia **15**, 332 (1998).
10. Корнилов (V. Kornilov), *Comprehensive characterization of astronomical sites* (ArXiv:1101.2347, Кисловодск, 2011).
11. Корнилов В.Г., Письма в Астрон. журн. **37**, 44 (2011) [V. G. Kornilov, Astron. Lett. **37**, 40 (2011)].
12. Корнилов В.Г. и др. (V. Kornilov, A. Tokovinin, N. Shatsky, O. Voziakova, S. Potanin, and B. Safonov), MNRAS **382**, 1268 (2007).
13. Корнилов В.Г. и др. (V. Kornilov, N. Shatsky, O. Voziakova, B. Safonov, S. Potanin, and M. Kornilov), MNRAS **408**, 1233 (2010).
14. Корнилов В.Г. и др. (V. Kornilov, O. Voziakova, M. Kornilov, et al.), *Second Workshop on Robotic Autonomous Observatories* (Astron. Soc. India Conf. Ser., Малага, 261, 2012a).
15. Корнилов В.Г. и др. (V. Kornilov, M. Sarazin, A. Tokovinin, T. Travouillon, and O. Voziakova), Astron. Astrophys. **546**, 13 (2012b).
16. Корнилов В.Г. и др. (V. Kornilov, B. Safonov, M. Kornilov, N. Shatsky, O. Voziakova, S. Potanin, I. Gorbunov, V. Senik, and D. Cheryasov), Publ. Astron. Soc. Pacific **126**, 482 (2014).
17. Корнилов М.В. (M.V. Kornilov), SPIE Astron. Telesc. Instrument. 2012 **8447**, 84471B (Ed. B.L. Ellerbroek, E. Marchetti, J.-P. Véran, Амстердам, 2012c).
18. Липунов и др. (V. Lipunov, V. Kornilov, E. Gorbovskoy, and V. Yurkov), Adv. Astron. 349171 (2010).
19. Мартынов Д.Я., *Полвека у телескопа. Казанский период (1922-1954)* (М.: Изд-во Московского университета, 2012).
20. Марчант и др. (J. Marchant, R.J. Smith, and I.A. Steele), SPIE Astron. Telesc. Instrument. 2008 **7012**, 70123U (Ed. L. Stepp, R. Gilmozzi, Марсель, 2008).
21. Отарола и др. (A. Otárola, T. Travouillon, M. Schöck, R. Riddle, W. Skidmore, R. Dahl, D. Naylor, and R. Queral), Publ. Astron. Soc. Pacific **122**, 470 (2010).
22. Панчук В.Е., Афанасьев В.Л., Астрофиз. бюллетень **66**, 233 (2011).
23. Санчез и др. (S.F. Sánchez, J. Aceituno, U. Thiele, D. Pérez-Ramírez, and J. Alves), Publ. Astron. Soc. Pacific **119**, 1186 (2007).
24. Тапия (M. Tapia), *San Pedro Mártir: Astronomical Site Evaluation* (Ed. I. Cruz-Gonzalez, R. Avila, M. Tapia, Rev. Mexicana Astron. Astrofísica, 75, 2003).
25. Щеглов П.В., *Проблемы оптической астрономии* (М.: Наука, 1980).
26. Эразмус, Саразен (D. Erasmus and M. Sarazin), *Astronomical Site Evaluation in the Visible and Radio Range* (Ed. J. Vernin, Z. Benkhaldoun, C. Muñoz-Tuñón, San Francisco, Astron. Soc. Pacific, 310, 2002).