

УДК 535.243+551.593

Исследование оптических параметров атмосферы по многолетним фотометрическим наблюдениям Солнца в Крыму

Э.И. Терез^{1,3}, Г.А. Терез², А.В. Козак^{2,3}, С.В. Кузьмин³, С.О. Долгий³

¹ НИИ “Крымская астрофизическая обсерватория”, 98409, Украина, АР Крым, Научный *terez@crimea.edu*

² Таврический национальный университет им. В.И. Вернадского, 95007, Украина, АР Крым, Симферополь, пр. Вернадского, 4

³ Научно-исследовательский экологический центр, 95007, Украина, АР Крым, Симферополь, пр. Вернадского, 2

Поступила в редакцию 29 ноября 2011 г.

Аннотация. Описана конструкция автоматического солнечного фотометра СФ-1, предназначенного для определения оптических параметров атмосферы в области 372–1005 нм при круглогодичных наблюдениях (мониторинге), а также усовершенствованная методика автоматической обработки данных. Приведены результаты наблюдений в Крыму (в Симферополе на фотометре СФ-1 с 2001 г. и на Карадаге на стандартном солнечном фотометре М-83 с 1972 г.). На основании анализа данных наблюдений показаны внутригодовые и межгодовые временные зависимости аэрозольных оптических толщин и параметров Ангстрема для атмосферы Симферополя и Карадага. Существенным результатом является обнаружение значительного уменьшения оптической толщины аэрозоля (т. е. увеличение прозрачности атмосферы Крыма) начиная с 1993 г., что может быть объяснено резким уменьшением антропогенной нагрузки на атмосферу вследствие остановки основных промышленных объектов.

INVESTIGATION OF ATMOSPHERIC OPTICAL PARAMETERS ACCORDING TO MULTY-YEAR PHOTOMETRIC SOLAR OBSERVATIONS IN THE CRIMEA, *by E.I. Terez, G.A. Terez, A.V. Kozak, S.V. Kuzmin, S.O. Dolgiy.* An automatic solar photometer CF-1 developed for determining atmospheric optical parameters in the region of 372–1005 nm during all year round observations (monitoring) along with improved technique of automatic data processing is described. Observational results in the Crimea (in Simferopol with the photometer CF-1 since 2001 and in Karadag with the standard solar photometer M-83 since 1972) are presented. On the basis of the observational data analysis, annual and interannual temporal dependences of aerosol optical thicknesses and Angstrom parameters for Simferopol and Karadag atmospheres are shown. A significant result is the detection of noticeable decrease of aerosol optical thickness (i.e. increase of atmospheric transparency in the Crimea) beginning from 1993 which can be explained by a rapid decrease of anthropogenic loading on atmosphere due to stoppage of the main industrial objects.

Ключевые слова: солнечный автоматический фотометр, методика обработки, оптические параметры атмосферы Крыма

1 Введение

Исследование параметров атмосферы является важнейшей задачей как с научной, так и с экологической точек зрения. Актуальность решения этой задачи обуславливается ростом уровня промышленной загрязненности атмосферы, а также необходимостью уточнения количества парниковых газов и общего радиационного баланса земной поверхности. В конечном счете, это позволит уточнить существующие климатические модели и динамику изменения глобального климата Земли.

При определении оптических параметров атмосферы в дневное время наиболее широко используются методы солнечной фотометрии. В принципе они разделяются на разные проблемы: актинометрические измерения, когда измеряется интегральный поток от Солнца на поверхности Земли в широкой области спектра (0.3–4 мк). Подобные исследования проводятся уже сто лет (Аббот и др., 1908–1932; Охврил и др., 2009). Эти исследования показали сложный временной характер изменения атмосферной прозрачности. Для уточнения количественного вклада отдельных составляющих в ослабление солнечного потока необходимо изучить причины и характер изменения различных компонент. Это, прежде всего, влияние аэрозольного рассеяния и поглощения солнечного излучения, а также поглощение в молекулярных полосах водяного пара и углекислого газа. Ибо именно эти компоненты непосредственно связаны с антропогенным влиянием и возможным изменением климата.

В последние четыре десятилетия в ряде регионов Земли (США, Западная Европа, СССР) были начаты работы по созданию региональных сетей атмосферных станций, призванных осуществлять исследования ее параметров по солнечным фотометрическим наблюдениям в разных участках спектра видимой и ближней ИК областей. Были разработаны несколько оригинальных конструкций солнечных фотометров. Это, прежде всего, широко используемые на 46 атмосферных станциях бывшего СССР фотометры М-83 (Гущин, 1988), фотометры типа SP-4 (Кабанов и др., 1993), японские фотометры MS-115, швейцарские PFR и др.

Однако научное значение исследований оптических параметров атмосферы неизмеримо возрастает, если эти измерения проводить на однотипных автоматических солнечных фотометрах, используя при этом унифицированную методику обработки данных наблюдений. Это позволит создать мировую сеть атмосферных станций (мировой мониторинг), что, естественно, станет существенным этапом в уточнении прогнозирования изменений глобального климата Земли. Разработка такого автоматического солнечного фотометра проводилась в разных научных организациях в конце 90-х годов. В итоге приоритетное направление получила идея американского геофизика Холбена и др. (1998), которые предложили создать единую мировую систему атмосферных исследований AERONET (Aerosol Robotic Network) на базе конструкции спектральных радиометров Sun Photometer, разработанных французской фирмой CIMEL Electronique. Координирующим центром мирового мониторинга атмосферных исследований стал космический центр им. Годдарда (NASA/Goddard Space Flight Center).

В разработке оптимальной конструкции автоматического солнечного фотометра приняла участие и Украина (Таврический национальный университет совместно с Научно-исследовательским экологическим центром). Испытательные наблюдения на опытном экземпляре солнечного фотометра СФ-1 начались уже в 1996 г. (Козак и др., 1997).

2 Солнечный фотометр СФ-1

2.1 Функциональная схема

Солнечный фотометр СФ-1 разрабатывался в 1993–1996 гг., совершенно независимо от разработки французских фотометров фирмы CIMEL Electronique. Поэтому совпадение функциональной схемы и ряда узлов этих фотометров объясняются просто рациональным проектированием с учетом современных требований к автоматическим солнечным фотометрам. Особое внимание при разработке фотометра было обращено на повышение точности определения оптической толщины атмосферы (ОТА). Дело в том, что на заседании рабочей группы ВМО (1993) в Силвен Спрингс (США) было

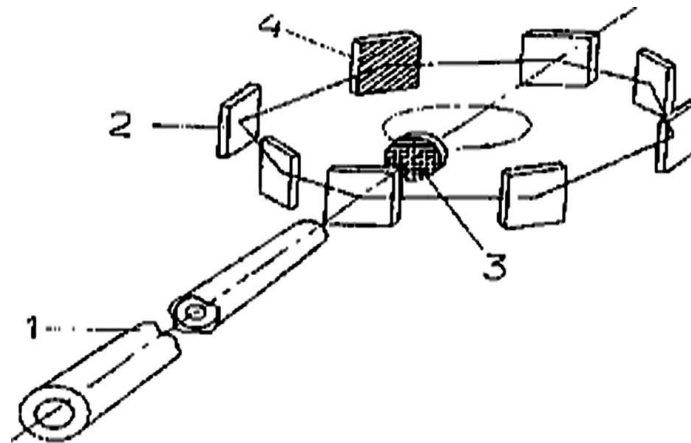


Рис. 1. Оптическая схема солнечного фотометра СФ-1. 1 – коллиматор, 2 – интерференционный светофильтр, 3 – фотодиод, 4 – непрозрачная пластина со светодионом, помещенным на обратной стороне пластины

заявлено о том, что данные измерений оптической толщины атмосферы, полученные разными фотометрами региональных сетей, представляются ненадежными. Принципиальной проблемой остается стабильность калибровки фотометрической аппаратуры. Поэтому при разработке нового универсального автоматического фотометра, предназначенного для сети мирового мониторинга, должны быть решены две основные проблемы: 1) контроль стабильности инструментальных характеристик фотометра, 2) анализ существующих методик обработки результатов наблюдений с целью минимизации погрешностей и автоматизации всех процессов обработки наблюдательных результатов.

Солнечный фотометр СФ-1 представляет собой двухканальный прибор. Один канал – измерительный и является собственно фотометром. Второй канал используется для наведения прибора на Солнце и гидирования. Оптическая схема измерительного канала фотометра СФ-1 приведена на рис. 1.

При проведении фотометрических измерений оптических параметров атмосферы очень важным является вопрос выбора участков спектра (“спектральных точек”), в которых фотометр регистрирует излучение Солнца. С точки зрения оптимизации наблюдений количество спектральных точек должно быть минимальным, но достаточным, чтобы можно было с необходимой точностью провести интерполяцию между ними. С другой стороны, чтобы минимизировать влияние эффекта Форбса при измерении интенсивности прямой солнечной радиации, необходимо проводить наблюдения в узких участках спектра. Для выделения спектральных участков в оптической схеме прибора СФ-1 используются интерференционные светофильтры.

Прозрачность земной атмосферы максимальна в видимой и ближней ИК-области, но быстро уменьшается в синей и УФ-области (практически до нуля при $\lambda = 300$ нм). Кроме того, кривая прорезана теллурическими полосами поглощения, интенсивность которых резко возрастает в области $\lambda > 1100$ нм, что делает практически невозможным наземные измерения в далекой ИК-области спектра. Проанализировав возможные варианты, было решено выбрать 7 участков спектра. Шесть участков спектра расположены вне полос поглощения в земной атмосфере ($\lambda_{\max} = 372$ нм, 405 нм, 453 нм, 556 нм, 748 нм и 1005 нм), а один – в центральной области полосы поглощения ρ водяного пара ($\lambda_{\max} = 940$ нм). Полуширина всех используемых интерференционных светофильтров $\Delta\lambda$ равна 10–12 нм.

В качестве приемника света используется фотодиод ФДУК-1 (область чувствительности 330–1160 нм), специально изготовленный во ВНИИ ОФИ с пониженной чувствительностью в красной

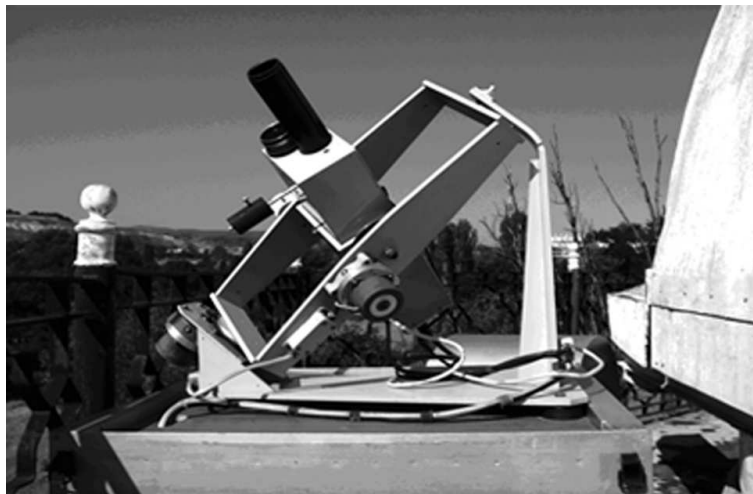


Рис. 2. Внешний вид наружного блока солнечного фотометра СФ-1

части спектра для уменьшения влияния рассеянного света. Набор светофильтров смонтирован на турели, которая при вращении последовательно устанавливает в световой пучок требуемый интерференционный светофильтр. Одно из окон турели закрыто непрозрачной пластиной. На обратной стороне этой пластинки установлен калиброванный светодиод с целью проверки стабильности чувствительности фотометра. Светодиод зажигается только на 7 сек., т. е. в тот интервал времени, когда он находится напротив регистрирующего фотодиода. Причем зажигание светодиода происходит не при каждом обороте турели, а через раз. Это позволяет через оборот турели (когда пластина 4 перекрывает солнечный пучок) контролировать темновой ток фотодиода. Фотометр имеет безлинзовый входной коллиматор, позволяющий получить поле зрения прибора в виде трапеции с полушириной $\approx 2^\circ$ (на уровне половинной чувствительности) и с плоской вершиной, равной $\approx 1^\circ$.

Электрическая система фотометра обеспечивает преобразование аналоговых сигналов, снимаемых с фотоприемника ФДУК-1, в цифровой код с последующей записью на магнитном носителе компьютера типа IBM PC AT. Все процессы регистрации сигналов и управления фотометром автоматизированы и находятся под управлением компьютера.

Фотометр СФ-1 имеет отдельный канал часового ведения и слежения за Солнцем. Модуль управления системой слежения позволяет производить наведение на Солнце с помощью ручного пульта. Затем включается система гидирования, которая по сигналам двух пар фотодатчиков с помощью реверсивного двигателя корректирует по двум координатам правильность наведения фотометра на Солнце с точностью не хуже одной угловой минуты.

Питается прибор от сети переменного тока 220 В, 50 Гц. Электрическая мощность, потребляемая фотометром (вместе с компьютером), не превышает 50 Вт.

Фотометр установлен на экваториальном штативе английского типа с жестким креплением полярной оси под углом 45° . Угол поворота фотометра по высоте 0° – 90° . Поворот оси штатива по азимуту ограничен в точке запада концевым выключателем. Штатив снабжен шаговыми реверсивными электродвигателями для автоматического гидирования по двум координатам, что дает возможность, в принципе, вести наблюдения на любой географической широте. Вес фотометра 4,5 кг (вместе с монтажкой – 11,7 кг).

Внешний вид наружного блока солнечного фотометра представлен на рис. 2.

2.2 Исследование оптических характеристик солнечного фотометра СФ-1

При выполнении фотоэлектрических наблюдений все измерения проводятся относительным методом, т. е. исходными данными для последующей обработки являются не абсолютные величины

отсчетов во всех спектральных участках, а их отношение к сигналу эталонного светодиода. Таким образом, не имеет значения абсолютная калибровка измерительной аппаратуры. Основные требования в этом случае – это линейность регистрирующей системы фотометра, стабильность излучения контрольного светового эталона (светодиода), стабильность фотометрической системы (т. е. характеристик светофильтров) и отсутствие посторонней засветки.

В принципе, использование в регистрирующем тракте фотометра светодиода гарантирует линейность световой характеристики прибора в очень широком диапазоне освещенностей. Но тем не менее, линейность фотометра СФ-1 в период его эксплуатации периодически контролируется с помощью контрольного нейтрального светофильтра, имеющего коэффициент пропускания порядка 0.3. Проверка линейности обычно проводится в видимой области спектра (4-й канал фотометра с длиной волны в максимуме пропускания, равной $\lambda = 556$ нм). В качестве источников излучения используются стабилизированные лампы накаливания. Методика проверки линейности заключается в измерении коэффициентов пропускания контрольного нейтрального светофильтра при разных уровнях световых потоков. Критерием линейности регистрирующего канала фотометра является совпадение коэффициентов пропускания контрольного светофильтра (с погрешностью регистрации электронного тракта, т. е. порядка ± 0.1 %) в достаточно широком интервале световых потоков.

Контроль параметров всех светофильтров проводился ежегодно в оптической лаборатории. В первые годы наблюдений (до 2000 г.) наблюдалось некоторое смещение λ_{\max} ультрафиолетовых светофильтров (1-й и 2-й каналы) в более длинноволновую область, пока не установились окончательные значения $\lambda_{\max} = 372$ нм и 405 нм соответственно. Наблюдалось также небольшое уширение полосы пропускания ультрафиолетовых светофильтров, что, впрочем, несущественно для данной работы. Для подавления рассеянного света при записи сигналов в участках спектра 453 нм и 556 нм вместе с интерференционными светофильтрами установлены стеклянные светофильтры СЗС-21; для участка с $\lambda = 405$ нм светофильтр СС-15, а для участка с $\lambda = 372$ нм светофильтр УФС-2.

Величина рассеянного света при проведении опытных наблюдений была экспериментально измерена и не превышала 0.5 %, кроме самых коротковолновых участков ($\lambda = 372$ нм и $\lambda = 405$ нм), где она составила 3 %. Поэтому при обработке результатов наблюдений для этих спектральных участков все сигналы соответственно уменьшались на 3 %. Для того, чтобы регистрируемые фотодиодом сигналы от Солнца были одинакового порядка, на $\lambda = 556$ нм, 750 нм и 940 нм были установлены дополнительно нейтральные светофильтры.

Стабильность фотоэлектрической системы регистрации фотометра контролируется с помощью светового сигнала от эталонного светодиода в течение всего периода наблюдений. Этот период может быть ограничен одним наблюдательным днем. Но лучший вариант, если светодиод дает стабильный световой поток в течение длительного времени. В этом случае можно сравнивать наблюдения, сделанные в разные сезоны, и даже в разные годы. Эталонный светодиод был поставлен Всесоюзным институтом оптико-физических измерений (ВНИИ ОФИ), где он прошел полную программу испытаний. Температурная нестабильность его 0.01 % на градус. В условиях наблюдений в Крыму (Симферополь и Карадаг) максимальный интервал температур при проведении наблюдений от -10 °С до $+35$ °С. Значит, максимальное изменение светового потока светодиода при экстремальных условиях может составлять до 0.45 %. Учитывая, что допустимая погрешность измерений ОТА 1 %, было решено не делать специального термостата для эталонного светодиода. Временная стабильность эталонного светодиода гарантируется на уровне не хуже ± 0.2 % за десять лет. Этот параметр контролируется в процессе самих фотометрических наблюдений. Дело в том, что по результатам обработки наблюдений, сделанных в течение каждого дня, определяется, как отмечено выше, не прямой отсчет от Солнца, а относительная величина отсчета, измеренного от Солнца, к сигналу от эталонного светодиода, т. е. $\ln(I_0/I_{\text{эталон}})$. (Ниже эту величину мы будем просто обозначать как $\ln I_0$.) Сам по себе внеатмосферный поток от Солнца I_0 постоянен с точностью ± 0.1 % (Фрелих, 2004). Однако его величины $\ln I_0^1$, измеренные фотометром СФ-1, вследствие погрешностей измерений и возможной нестабильности инструментальной системы могут несколько различаться в разные дни наблюдений. Когда проводятся систематические наблюдения, то за достаточно длительный промежуток времени (год и более) легко проконтролировать, как изменяется параметр $\ln I_0^1$ от времени. В табл. 1 приведены экспериментально измеренные величины $\ln I_0^1$ в

разных участках спектра за десять лет непрерывных наблюдений. Максимальный разброс усредненных среднегодовых значений $\ln I_0^1$ в видимой области ($\lambda = 556$ нм) составляет всего ± 2.5 %. При этом не прослеживается никакого временного тренда. Это свидетельствует о том, что возможная нестабильность светодиода на данном отрезке времени просто не обнаружима.

При измерении ОТА на показания солнечного фотометра влияет рассеянное (однократно и многократно) излучение околосолнечного ореола, попадающее из предельного угла прибора. Следует отметить, что критерий применимости закона Бугера к данным наблюдений в атмосфере по фотометрическому прибору, направленному на Солнце, в случае возможного влияния на его показания рассеянного излучения, поступающего в прибор из его предельного угла, был выведен теоретически Гуциным и Виноградовой (1983). При этом был рассчитан вклад в ореол однократно и двукратно рассеянного излучения. Из рассмотрения экспериментальных и теоретических данных, приведенных в этой работе, следует, что доля рассеянного излучения атмосферы, поступающего в прибор одновременно с прямым солнечным излучением, зависит от воздушной массы атмосферы в наклонном направлении и от предельного угла прибора. В работе (Гуцин, Виноградова, 1983) показано, что для фотометров с углом зрения, не превышающим 3° , для области длин волн более 357 нм закон Бугера выполняется для зенитных углов Солнца менее 82° .

3 Определение оптической толщины атмосферы методом спектральной экстинкции

Как было отмечено выше, второй принципиальной проблемой создания системы мирового мониторинга является создание стандартной методики обработки результатов наблюдений, обеспечивающей минимизацию погрешностей, и обязательное условие – автоматическая обработка результатов наблюдений, исключаяющая “человеческий фактор”.

Основной параметр, характеризующий оптические свойства атмосферы – это оптическая толщина атмосферы (ОТА), равная отрицательной величине натурального логарифма коэффициента атмосферной прозрачности в данной длине волны, т. е. $\tau = -\ln p$. Следует отметить, что в астрономических работах чаще используется для характеристики атмосферы термин атмосферная экстинкция – звездная величина коэффициента атмосферной прозрачности ($\alpha = -2.5 \lg p$).

Метод определения атмосферной экстинкции впервые был разработан группой американских ученых под руководством Аббота и др. (1908–1932) в Смитсоновской астрофизической обсерватории для определения величины солнечной постоянной в начале прошлого века. Этот метод основан на законе поглощения света Бугера и в литературе обычно называется методом Бугера (в западной литературе методом Бугера-Лэнгли).

Суть метода заключается в том, что согласно закону Бугера интенсивность монохроматического потока лучистой энергии, прошедшего сквозь атмосферу от астрономического источника, находящегося на зенитном расстоянии θ , равна

$$I = I_0 \cdot e^{-\tau X(\theta)}, \quad (1)$$

где I_0 – внеатмосферная интенсивность потока лучистой энергии, τ – оптическая толщина атмосферы ($\tau = -\ln p$), X – величина, называемая воздушной массой. Эта величина определяется оптической толщиной атмосферы, проходимой солнечными лучами при зенитном расстоянии Солнца θ , по отношению к оптической толщине, проходимой при положении Солнца в зените ($\theta = 0$). Для зенита принимается $X(\theta) = 1$.

Формулу (1) можно представить в логарифмическом виде:

$$\ln I = \ln I_0 - \tau X(\theta). \quad (2)$$

Из выражения (2) следует, что зависимость $\ln I$ от воздушной массы X представляет прямую линию. Очевидно, что экстраполяция ее до нулевой воздушной массы дает величину $\ln I_0$, а угол наклона к оси абсцисс позволит определить оптическую толщину атмосферы τ .

Метод Бугера стал широко использоваться во второй половине XX века в астрономии для создания больших фотометрических каталогов звезд, а также в геофизике для работ по определению оптической толщины аэрозолей с помощью наземных солнечных фотометров. Однако, по мере накопления опыта фотометрических измерений, наблюдателями было замечено, что метод Бугера дает точные результаты только в том случае, если оптические параметры атмосферы остаются стабильными в течение всего времени наблюдений. А это в условиях среднего астроклимата выполняется достаточно редко. Поэтому и астрономы, и геофизики постоянно пытались разработать новые методы, с помощью которых можно бы было исключить систематические погрешности при определении ОТА.

Подробно эта проблема проанализирована Никоновым (1976). Показано, что в настоящее время существует целый ряд методов, позволяющих исключить систематические погрешности при использовании метода Бугера-Лэнгли при наблюдениях в ночное время, когда можно воспользоваться комбинацией наблюдений восходящих и заходящих звезд. При проведении дневных наблюдений проблема определения ОТА гораздо сложнее. Здесь есть единственный источник света – Солнце. В последние десятилетия XX века был разработан ряд методов, позволяющих определить ОТА с помощью косвенных методов (метод индикатрис, метод, основанный на использовании эмпирических формул, метод трендов и т. д.) (Атрощенко и др., 1992). Все эти методы не лишены недостатков. Главный из которых – достаточно большие погрешности в определении ОТА, порядка $\pm 10\%$. В Таврическом национальном университете был предложен более точный метод кусочно-линейной аппроксимации – Method of Approximation by Linear Sections – APLS (Терез Э., Терез Г., 2003).

Суть метода APLS заключается в следующем. В реальных условиях оптическая толщина атмосферы меняется в течение наблюдательного дня по произвольному закону $\tau = f(t)$. Эти изменения включают быстрые хаотические флуктуации на временном интервале порядка секунд и менее и относительно медленные изменения сглаженной величины τ . В течение времени регистрации одного отсчета (порядка 5 минут) быстрые флуктуации не играют существенной роли, т. к. они легко могут быть сглажены. Но долговременные изменения (тренд) оптической толщины атмосферы являются тем фактором, который приводит к систематическим погрешностям при использовании метода Бугера-Лэнгли.

Рассуждая подобным образом, очевидно, что наблюдательный день можно разбить на N участков и для каждого из этих участков по нескольким наблюдениям ($n \geq 3$) в моменты времени $t_i, t_{i+1}, \dots, t_{i+n}$ составить систему из n бугеровских уравнений, по которым определить значение величины внеатмосферного значения Солнца $\ln I_{o_i}$ за промежуток времени t (при условии, что ОТА меняется линейно внутри каждого участка). Соответственно, так же определяется $\ln I_{o_i}$ для следующего участка линейно-ломаной кривой. В итоге мы получаем некоторую систему из N -систем избыточных бугеровских уравнений. После совместного решения всех N -систем избыточных бугеровских уравнений, полученных по результатам наблюдений в течение дня, мы получаем N -значений $\ln I_{o_i}$ для всех интервалов времени t_i . Итоговая величина $\ln I_{o^1}$ за наблюдательный день определяется как среднее арифметическое всех $\ln I_{o_i}$.

Метод APLS прошел длительную апробацию в Таврическом национальном университете. Выяснилось, что метод APLS плохо работает (происходят сбои в программе при обработке), если по каким-либо причинам регистрируемый сигнал падает до нуля (например, при прохождении цирусов). Поэтому, фактически метод APLS не позволяет полностью автоматизировать процесс обработки результатов наблюдений, т. к. требует контроля со стороны специалиста.

Поэтому по-прежнему при проведении длительных круглогодичных фотометрических наблюдений при использовании метода атмосферной экстинкции главным остается вопрос отбора дней со стабильными параметрами атмосферы. В наблюдательной практике за критерий истинности измеренных величин $\ln I_{o^1}$ и τ часто принимается сам характер бугеровских линий, полученных при обработке данных. Однако, как показано в монографии Атрощенко и др. (1992), ни прямолинейность бугеровских линий, ни совпадение значений $\ln I_{o^1}$, измеренных до и после полудня, не могут быть критерием оптической стабильности атмосферы.

Абботом и др. (1908–1932) было предложено для отбора дней со стабильными атмосферными параметрами проводить параллельные наблюдения на ореольном фотометре. Метод ореольного фо-

тометра был тщательно исследован Фесенковым (1933) и Пясковской-Фесенковой (1957). Дело в том, что благодаря значительной вытянутости индикатрисы рассеянный аэрозолем свет концентрируется в основном в узкой кольцевой зоне вокруг солнечного диска, ограниченной внешним радиусом примерно 3° . Яркость ореола $V_{ор}$ может составлять от 10^{-3} до 10^{-6} яркости Солнца V_{\odot} , поэтому даже незначительное изменение доли рассеянного аэрозолем света сильно меняет $V_{ор}$.

Однако позже Лифшицем (1985) было показано, что критерий относительной яркости около-солнечного ореола применим только для рассеивающей атмосферы, не содержащей поглощающего аэрозоля. Атмосферный аэрозоль в ряде случаев поглощает излучение (Лифшиц, 1965), и это поглощение изменяется со временем. Поэтому значительные изменения оптической толщины аэрозоля могут происходить при неизменной величине околосолнечного ореола и наоборот. Пясковская-Фесенкова отмечала, что однозначной связи между относительной яркостью околосолнечного ореола и прозрачностью атмосферы не существует. Так, Пясковская-Фесенкова (1957) наблюдала случай, когда недалеко от места наблюдения проехал всадник и поднял пыль. Это вызвало кратковременное резкое увеличение яркости ореола, в то время как бугеровская прямая продолжала оставаться невозмущенной. В свете современных представлений об оптических свойствах аэрозолей становится понятным наблюдавшееся Пясковской-Фесенковой явление.

Возникает вопрос: при отсутствии достаточно надежных критериев контроля оптической стабильности атмосферы каковы возможные систематические погрешности полученных из наблюдений внеатмосферных значений интенсивности солнечного потока $\ln I_o^1$ (в инструментальной системе) и, соответственно, значений ОТА? На основании анализа, проведенного методом численного моделирования (Терез Э., Терез Г., 1991), можно сделать вывод, что эти погрешности (по результатам одного дня наблюдений, но при визуально ясном небе) могут достигать десяти и более процентов, что абсолютно неприемлемо ни для астрономических, ни для геофизических исследований. Для увеличения точности возможны два пути:

1. Абсолютная калибровка солнечного фотометра (т. е. определение внеатмосферной инструментальной величины Солнца $\ln I_o$). Однако этот метод не получил широкого распространения, поскольку проведение точных калибровок – исключительно сложный процесс.
2. Обычно солнечные фотометрические исследования проводятся в местах со средним астроклиматом. Поэтому астрономы (и геофизики) стараются набрать как можно больше наблюдательного материала, чтобы затем воспользоваться статистическим усреднением. Определенные из большой серии наблюдений инструментальные величины внеатмосферной яркости Солнца $\ln I_o^1$ затем используются для определения ОТА в отдельные дни и определенные моменты наблюдений t по формуле:

$$\tau_t = (1/X) \cdot \ln (I_o^1/I_t). \quad (3)$$

Это так называемый “короткий” метод Бугера. Коротким методом Бугера можно построить кривые изменения ОТА в течение каждого дня наблюдений. Анализ таких графиков позволяет затем при вторичной обработке результатов использовать только те дни, в течение которых ОТА мало изменялась: тем самым появляется возможность уточнить значение $\ln I_o^1$ и уменьшить погрешность измерений до нескольких процентов (Атрощенко и др., 1992). Однако такой статистический метод (назовем его так) требует участия квалифицированного наблюдателя в процессе обработки результатов наблюдений. Это практически невозможно для поставленной проблемы: мониторинга оптических параметров атмосферы по всему земному шару.

После многолетних поисков оптимального способа автоматической обработки был разработан метод “сужающегося коридора ошибок” (Терез и др., 2010). Суть его заключается в том, что по полученным наблюдениям в течение одного дня методом Бугера-Лэнгли определяются некоторые предварительные внеатмосферные инструментальные значения яркости Солнца $\ln I_o^1$ для каждой длины волны. Далее строится график, на котором отложены все значения $\ln I_o^1(\lambda)$ для каждого дня в течение года и определяется среднее значение $\ln I_o^1_{ср}(\lambda)$ для этого года. Затем задается коридор возможных погрешностей, сначала $\pm 20\%$ (см. рис. 3а), и снова делается обработка наблюдательных

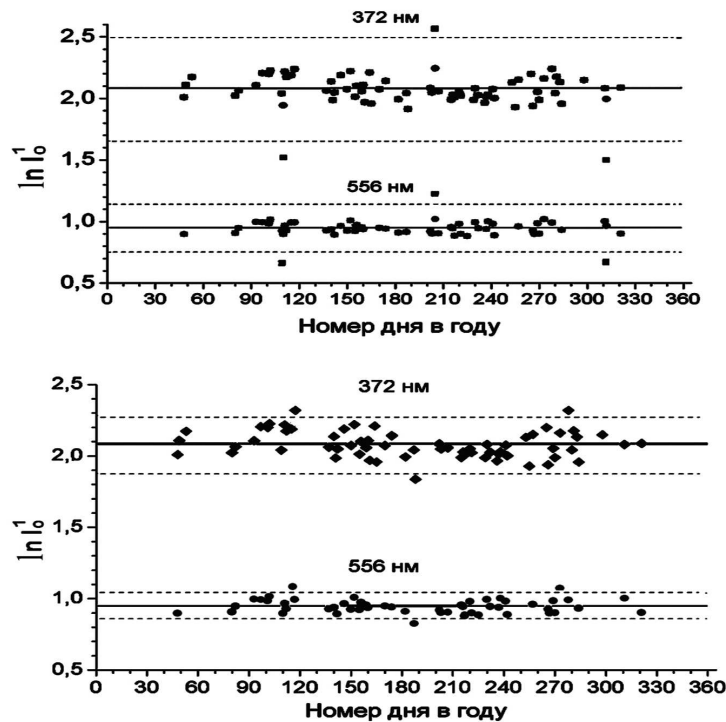


Рис. 3. Величины $\ln I_0^1(\lambda)$, полученные при наблюдениях в 2006 г. при обработке для двух каналов $\lambda = 372$ нм и $\lambda = 556$ нм. Штриховые линии – коридор возможных погрешностей определения $\ln I_0^1(\lambda)$ в отдельные дни наблюдений. Верхний рисунок соответствует коридору $\pm 20\%$, нижний рисунок – коридору $\pm 10\%$

данных за этот же год, но уже точки, соответствующие дням наблюдений, выходящие за пределы $\ln I_{\text{ср}}^1(\lambda) \pm 20\%$, исключаются из обработки.

Затем процедура обработки повторялась, но уже коридор возможных погрешностей сужался до $\pm 10\%$ (см. рис. 3б). Теперь те дни, для которых величины $\ln I_{\text{ср}}^1(\lambda)$ выходили за пределы коридора, в обработку не включали. И затем строился окончательный график величин $\ln I_{\text{ср}}^1(\lambda)$ для данного года наблюдений. Важно отметить, что вся процедура обработки методом “сужающегося коридора” делается автоматически по компьютерной программе (Терез и др., 2010), т. е. без участия “человеческого фактора”.

Каковы реальные погрешности полученных среднегодовых величин $\ln I_{\text{ср}}^1(\lambda)$? При проведении больших статистических наблюдений случайные ошибки незначительны. Более существенны систематические погрешности. Они могут быть вызваны как принципиальной неточностью самого метода определения оптической толщины атмосферы (что обсуждалось выше), так и чисто инструментальными причинами: неточным определением длины волны, нелинейностью прибора, неточной наводкой на Солнце, неучтенным рассеянным светом.

Инструментальные погрешности при современной технике фотоэлектрической регистрации и при тщательной отладке аппаратуры в сумме не превышают десятых долей процента. Так как обработка полученных данных, т. е. определение инструментального внеатмосферного солнечного потока – $\ln I_{\text{ср}}^1(\lambda)$ и оптической толщины атмосферы $\tau(\lambda)$, проводится методом наименьших квадратов, то, естественно, могут быть вычислены и случайные среднеквадратичные ошибки. Проведенные расчеты показали, что средние квадратичные ошибки, рассчитанные таким образом, очень малы, десятые доли процента. Но нужно иметь в виду, что это ошибки чисто математические.

Таблица 1. Усредненные среднегодовые величины внеатмосферных инструментальных потоков от Солнца $\ln I_{\text{cp}}^1(\lambda)$ за 2001–2010 годы наблюдений

		$\ln I_{\text{cp}}^1$					
Год	$\lambda_{\text{нм}}$	372	405	453	556	748	1005
	2001		2.160	1.842	1.402	0.982	1.281
2002		2.142	1.831	1.405	0.970	1.254	0.574
2003		2.130	1.747	1.375	0.954	1.214	0.553
2004		2.219	1.867	1.363	0.994	1.280	0.584
2005		2.251	1.859	1.407	0.984	1.271	0.559
2006		2.090	1.840	1.441	0.961	1.262	0.577
2007		2.217	1.794	1.410	0.942	1.220	0.563
2008		2.212	1.900	1.403	0.991	1.249	0.561
2009		2.098	1.787	1.453	0.947	1.223	0.538
2010		2.128	1.837	1.460	0.988	1.240	0.540
$\ln I_{\text{cp}}^1$		2.165	1.830	1.411	0.971	1.249	0.562
$\Delta \ln I_{\text{cp}}^1 / \ln I_{\text{cp}}^1$ (%)		± 4	± 4	± 3	± 2.5	± 3	± 4

Реальные погрешности гораздо больше. Чтобы оценить полные (систематические + случайные) погрешности результатов наблюдений, нужно сравнить измеренные величины внеатмосферных потоков от Солнца $\ln I_{\text{cp}}^1(\lambda)$, полученные при обработке наблюдений, выполненных в разные годы. В данном случае это можно делать, т. к. наблюдения проводились относительным методом, т. е. отсчеты сравнивались с эталоном. В табл. 1 приведены величины значений $\ln I_{\text{cp}}^1(\lambda)$, полученные за десять лет регулярных наблюдений. (Обработка каждого года наблюдений выполнялась независимо.)

Как видно из табл. 1, максимальная разница в величине измеренных среднегодовых значений $\ln I_{\text{cp}}^1(\lambda)$ за десять лет наблюдений составляет от $\pm 2.5\%$ до $\pm 4\%$.

В табл. 1. отсутствуют данные измерений для длины волны $\lambda_{\text{max}} = 940$ нм. В этом спектральном диапазоне, соответствующем полосе поглощения водяного пара, в течение одного дня могут происходить большие изменения отсчетов из-за флуктуаций содержания водяного пара. Поэтому в этом канале погрешности не характеризуют точность фотометрических измерений самого солнечного фотометра СФ-1.

Следует также отметить, что при фотометрических наблюдениях, проводимых французскими фотометрами фирмы SIMEL Electronique, оценить долговременную стабильность фотометрической системы весьма затруднительно, т. к. эти фотометры не имеют внутреннего эталона сравнения. Поэтому каждый прибор работает один год, после чего его отправляют на калибровку. И устанавливается новый фотометр СЕ-318, который также работает только один год.

4 Методика наблюдений

Солнечный фотометр СФ-1 был установлен на башне на высоте 12 м над землей в парковой зоне г. Симферополя. (Координаты $\varphi = 44^\circ 56' 40''$ N и $\lambda = 34^\circ 7' 56''$ E, высота 253 м над уровнем моря). Регулярные солнечные фотометрические наблюдения (мониторинг) начались в Симферополе с 2001 г. (Эпизодические измерения для отладки аппаратуры и методики наблюдений проводились с 1996 г.) Наблюдения начинаются, когда высота Солнца над горизонтом не менее 10° ($\theta < 80^\circ$). Фотометр наводится вручную на Солнце. Далее включается система гидирования, которая следит за Солнцем вплоть до окончания дневных наблюдений. Согласно предварительным исследованиям

было решено проводить наблюдения только в дни с ясной, безоблачной погодой (весь день или до полудня, или после полудня).

В процессе наблюдений последовательно измеряется темновой ток и отсчеты в семи вышеуказанных областях спектра, затем сигнал от эталонного светодиода и снова отсчеты в спектральных точках. Все эти данные записываются в компьютер. Полный цикл измерений занимает 20 сек. Интервал между двумя циклами измерений составляет 5 минут.

Фотометр СФ-1 не полностью автоматизирован, в отличие от французских фотометров фирмы CIMEL Electronique. Поэтому наблюдения обслуживаются оператором, который утром включает прибор СФ-1 и выключает вечером, а также при резкой перемене погоды (дождь, туман и т. д.). В конце дня записанная в фотометре СФ-1 информация переписывается на флеш-память. Этим также фотометр СФ-1 отличается от французских солнечных фотометров, в которых текущая информация непосредственно в режиме online передается в NASA/ Goddard Space Flight Center (или его региональные филиалы), где и производится дальнейшая обработка.

5 Учет релеевского рассеяния и молекулярного поглощения

Результатом обработки полученных наблюдательных данных по методике, описанной выше, являются величины оптических толщин атмосферы τ . Но значения τ в общем случае являются суммой трех компонент:

$$\tau = \tau_a + \tau_{\text{рел}} + \tau_m, \quad (4)$$

где τ_a – аэрозольная оптическая толщина (АОТ),

$\tau_{\text{рел}}$ – оптическая толщина релеевской атмосферы,

τ_m – оптическая толщина атмосферы, определяемая истинным молекулярным поглощением.

Для исследования свойств атмосферы данного региона и сравнения с другими регионами основным параметром является аэрозольная оптическая толщина атмосферы τ_a . Согласно формуле (4) для ее определения необходимо предварительно из общей оптической толщины τ вычесть $\tau_{\text{рел}}$ и τ_m .

Остановимся подробнее на определении этих параметров. Оптическая толщина релеевской атмосферы $\tau_{\text{рел}}$ обычно вычисляется по классической формуле, и погрешности ее определения считаются минимальными или вообще не учитываются. Однако в работе Тереза (1990) показано, что коэффициенты релеевского рассеяния, используемые разными авторами, показывают значительное расхождение, особенно в УФ-области спектра, что может приводить к парадоксальным выводам, когда итоговая расчетная величина аэрозольной оптической толщины атмосферы может быть отрицательной величиной. Поэтому для определения релеевской оптической толщины была разработана методика, учитывающая не только величину атмосферного давления, но и другие параметры (температуру, влажность) (Козак и др., 2010).

Второй параметр в формуле (1) τ_m – оптическая толщина атмосферы, определяемая истинным молекулярным поглощением. Определение оптической толщины в полосах истинного молекулярного поглощения представляет собой нетривиальную задачу. Решению этой задачи в каждом отдельном случае обычно посвящено специальное исследование. Обычно при фотометрических исследованиях аэрозольной оптической толщины (АОТ) атмосферы выбираются участки спектра, в которых молекулярное поглощение либо отсутствует, либо минимально. Этот вопрос проанализирован в работе Хамберта и др. (1968), где приведены участки спектра от ближней УФ-области до ближней ИК-области, где молекулярным поглощением O_2 и H_2O можно пренебречь (оно менее 0.03 %). Шесть длин волн, выбранных в солнечном фотометре СФ-1 для наблюдений, находятся в этих участках спектра. Однако в видимой области есть еще две относительно слабые, но очень широкие полосы молекулярного поглощения. Это полоса NO_2 (340–500 нм с максимумом около 410 нм) и полоса O_3 (400–900 нм с максимумом около 600 нм), известная как полоса Шапшюи. Полоса NO_2 очень слабая и даже в максимуме ее можно совсем не учитывать. Однако при наблюдениях вблизи максимума полосы Шапшюи требуется коррекция данных. Так, при $\lambda = 556$ нм молекулярное поглощение озона составляет (при изменении общего содержания O_3 в пределах 270–300 DU) $\tau_m \approx 0.005$.

Как отмечено выше, участок спектра с $\lambda_{\max} = 940$ нм был выбран в области поглощения полосы водяного пара с целью определения количества осажденной воды. В данной работе методика определения осажденной воды не рассматривается.

6 Результаты наблюдений

6.1 Аэрозольная оптическая толщина атмосферы

Полученная в настоящей работе база данных об оптических характеристиках аэрозолей в широкой области спектра (372–1005 нм) с 2001 г. является единственным экспериментом такого масштаба в Украине. В Севастополе (Морской гидрофизический институт) французский солнечный фотометр SE-318 был установлен только в июне 2006 г., а в Киеве (ГАО НАНУ) в 2008 г.

Значимость оптических наблюдений в Симферополе существенно возрастает, если учесть, что исследования оптических параметров атмосферы проводились в Крыму на Карадагской геофизической обсерватории с 1972 г. и продолжают по настоящее время. Используется советский солнечный фотометр М-83 с полностью ручным управлением и регистрацией сигналов наблюдателем по отсчетам микроамперметра. В видимой и ближней УФ-областях спектр регистрируется сурьмяно-цезиевым фотоэлементом + усилитель постоянного тока в 6 участках (344 нм, 369 нм, 463 нм, 530 нм, 572 нм, 627 нм), выделяемых с помощью набора стеклянных светофильтров, имеющих очень высокую стабильность. Ранее этот фотометр входил в региональную сеть измерений СССР. Каждые два года проводилась общесоюзная калибровка и сверка всех солнечных фотометров сети, а данные измерений публиковались в сборниках Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова (Гущин, 1973–1991). После распада Советского Союза фотометр М-83, находящийся на Карадаге, калибровался в оптической лаборатории Симферопольского госуниверситета. А после начала эксплуатации нового автоматического фотометра СФ-1 калибровка проводилась совместно. Поэтому данные, полученные фотометром М-83 с 1972 г. и по настоящее время, могут быть сопоставимы с измерениями солнечного фотометра СФ-1.

На рис. 4а и 4б показаны кривые изменения аэрозольной оптической толщины (АОТ), измеренные фотометром М-83 (при $\lambda = 530$ нм) и фотометром СФ-1 (при $\lambda = 556$ нм). При этом было учтено, что для атмосферы Крыма τ_a при $\lambda = 556$ нм (т. е. в Симферополе) в среднем на 0.015 меньше, чем для $\lambda = 530$ нм (на Карадаге) (Терез Э., Терез Г., 2002).

Изменения τ_a для Симферополя построены по среднедневным измерениям, для Карадага – по среднемесячным. Как видно из рис. 4а, для Симферополя (точки на графике) наблюдается сильный разброс среднедневных значений. Впрочем, такой же разброс имеется и для Карадагских среднедневных наблюдений. Просто для удобства сравнения данные для Карадага приведены среднемесячные. Временные максимумы на кривой τ_a с 1975 по 1991 гг., по-видимому, связаны с большими вулканическими извержениями в этот период. Этот эффект отмечен в целом ряде других работ (например, Охврил и др., 2009), где в эти же годы зарегистрированы большие изменения в значениях актинометрической прозрачности атмосферы, связанные с извержениями вулканов. Резкое увеличение непрозрачности атмосферы (т. е. увеличение τ_a) в 1982 г. после извержения вулкана Эль-Чичон было зарегистрировано также в Крымской астрофизической обсерватории по ночным наблюдениям Мошкалевым (1984).

Очень интересным результатом является значительное уменьшение аэрозольной оптической толщины (т. е. увеличение прозрачности) атмосферы в Крыму начиная с 1992 по 1993 гг. (рис. 4а). Такой же эффект отмечен в работе (Охврил и др., 2009) при исследовании актинометрической прозрачности атмосферы в восточной Европе. Логическое объяснение этого явления только одно – резкое уменьшение антропогенного воздействия на атмосферу после распада СССР и остановки многих промышленных объектов.

Как видно из рис. 4б, аэрозольная толщина атмосферы для Карадага больше, чем для Симферополя. Это подтверждается кривыми на рис. 5, где показаны внутригодовые изменения τ_a для Симферополя и Карадага. График построен по данным среднемесячных значений τ_a , усредненных за десять последних лет (2001–2010 гг.). Вероятно большие значения τ_a на Карадаге (до 0.3 в летнее

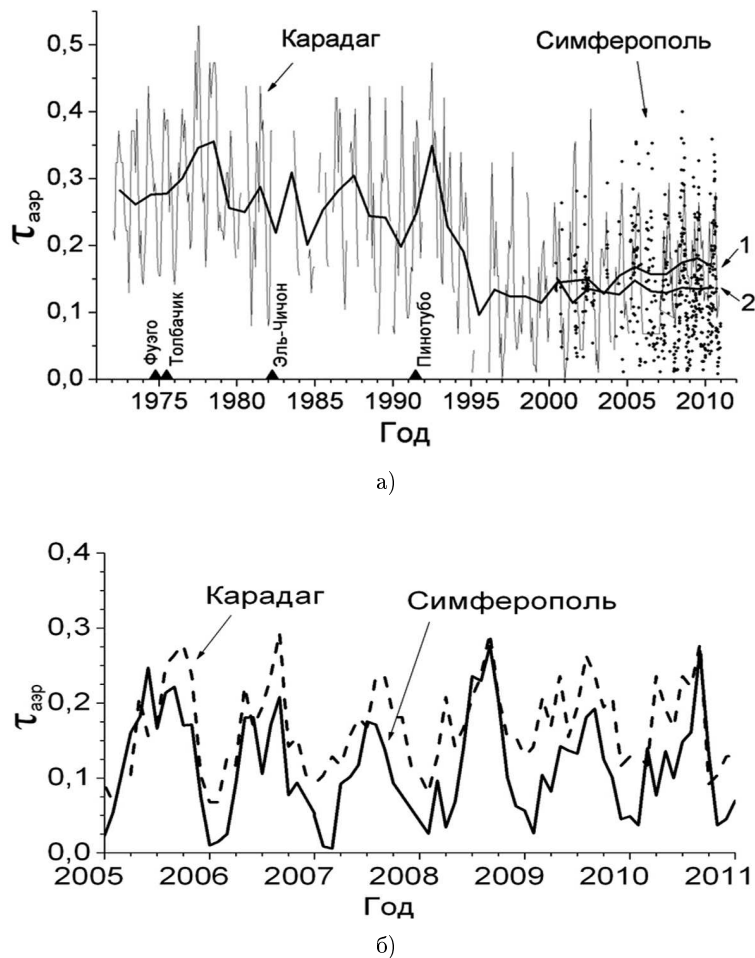


Рис. 4. а) Аэрозольная оптическая толщина для Симферополя и Карадага для $\lambda = 556$ нм и 530 нм соответственно. Данные τ_a для Симферополя приведены среднедневные (точки), для Карадага (тонкие линии) – среднемесячные. Жирные линии – среднегодовые значения τ_a . б) То же, что и на (а), но в увеличенном масштабе за последние годы 2005–2010. Все кривые построены по среднемесячным значениям τ_a , приведенным к длине волны $\lambda = 556$ нм

время) связаны с тем, что в атмосфере Карадага (берег моря) всегда присутствует значительное количество водного аэрозоля. Это предположение подтверждается наблюдениями, сделанными в Севастополе на французском фотометре СЕ-318 (Яковлева, Толкаченко, 2008), по данным которых в летнее время значения τ_a могут достигать до 0.4. Правда, эти наблюдения были пока весьма кратковременные (один год) и не могут отражать статистических закономерностей.

6.2 Параметр Ангстрема

Одной из основных характеристик атмосферного аэрозоля является спектральное распределение аэрозольной оптической толщины $\tau_a(\lambda)$, формирующееся как результат ослабления света аэрозольными частицами, неоднородно распределенными как по высоте атмосферы, так и по физическим размерам. При всем многообразии функции $\tau_a(\lambda)$ общий характер ее определяется максимальной величиной в коротковолновой области спектра и монотонным степенным спадом с ростом длины

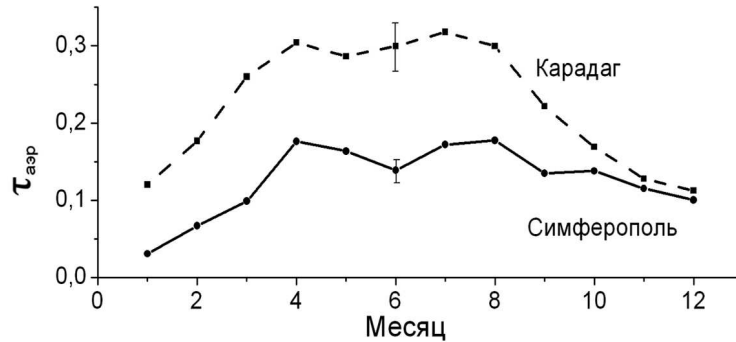


Рис. 5. Внутригодовые изменения τ_a в Симферополе и на Карадаге

волны. Для удобства сравнения характера экспоненциального спада $\tau_a(\lambda)$ при проведении массовых измерений оптических параметров разных регионов удобно ввести параметр, который бы показывал характер экспоненциального спада $\tau_a(\lambda)$. Такой параметр представляет собой параметр Ангстрема и определяется как

$$A = -\frac{\ln \frac{\tau_a^1}{\tau_a^2}}{\ln \frac{\lambda_1}{\lambda_2}} = \Lambda \ln \frac{\tau_a^1}{\tau_a^2}, \quad (5)$$

где τ_a^1 — аэрозольная оптическая толщина для λ_1 ,

τ_a^2 — аэрозольная оптическая толщина для λ_2 ,

Λ — спектральный разделительный фактор каналов, равный $\Lambda = -1/\ln \frac{\lambda_1}{\lambda_2}$.

Если исходить из классической теории юнговского распределения аэрозольных частиц по размерам и вытекающего из этого экспоненциального уменьшения аэрозольной оптической толщины при увеличении длины волны, то значение параметра Ангстрема в этом случае не зависит от выбора длин волн λ_1 и λ_2 . Однако в реальной атмосфере распределение аэрозоля в большей или меньшей степени отличается от юнговского. Это приводит к тому, что коэффициенты Ангстрема, которые определяются по соотношению АОТ в разных длинах волн, могут несколько зависеть от участка спектра, по которому эти коэффициенты вычисляются. Так, в данной работе для Симферополя было принято, что $\lambda_1 = 556$ нм и $\lambda_2 = 1005$ нм, а для Карадага $\lambda_1 = 344$ нм и $\lambda_2 = 627$ нм. (В ИК-области спектра на Карадаге наблюдения не проводились.) На рис. 6 приведены вычисленные по данным наблюдений параметры Ангстрема для Симферополя (точки) и Карадага (сплошные линии). Параметр Ангстрема дает представление о распределении частиц аэрозоля по размерам. Как видно из рис. 6, среднегодовой параметр Ангстрема для Карадага ($\approx 1,5$) существенно больше, чем для Симферополя ($\approx 0,7$). Это говорит о том, что на Карадаге, в основном, аэрозоль представлен мелкими частицами (тонкая мода), в то время как в Симферополе частицы аэрозоля гораздо крупнее. Более детальную картину дает гистограмма частоты тех или иных аэрозолей в данной атмосфере. Так, на рис. 7 показана, в качестве примера, гистограмма, построенная для одного из летних дней 2009 г. в Симферополе.

Из рис. 7 ясно видно преобладание частиц грубой моды (крупные частицы, по-видимому, антропогенного происхождения) с параметрами Ангстрема 0,2–1,4. В то же время на гистограмме обнаруживается и второй максимум с параметрами Ангстрема 1,8–2,1. Это, очевидно, вызвано наличием мелкодисперсной фракции морского аэрозоля, заносимого ветром с Черного моря.

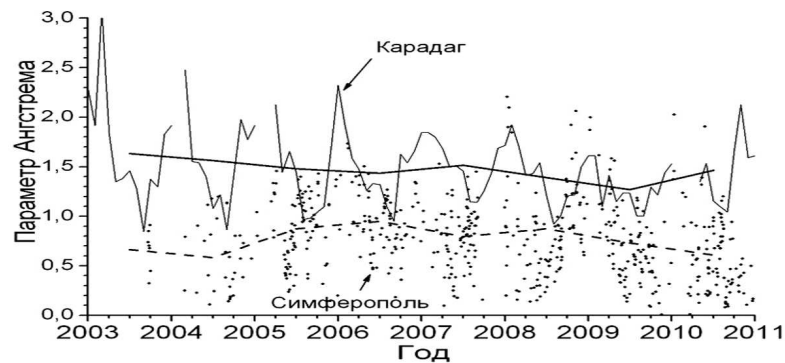


Рис. 6. Параметр Ангрстрема по данным наблюдений в Симферополе (точки) и на Карадаге (сплошная линия, показывающая среднемесячные значения) за период 2003–2010 гг. Жирными линиями (сплошной и пунктирной) показаны среднегодовые изменения параметров Ангрстрема

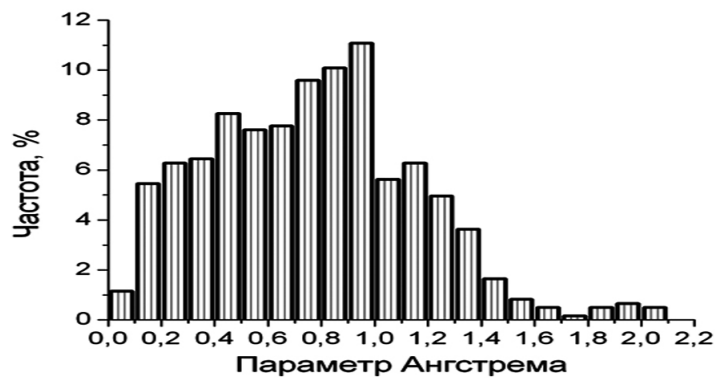


Рис. 7. Результаты исследования аэрозольной оптической толщины атмосферы в Симферополе в летнее время

7 Выводы

Только в последние десятилетия стало понятно, что одним из основных атмосферных параметров, влияющих на погоду, и в долговременном масштабе на изменение климата Земли, являются данные о пространственных и временных вариациях оптических характеристик аэрозоля. Атмосферные аэрозоли, образованные как антропогенными (горящая биомасса, сажа, дым и т. д.), так и естественными источниками (пыль, морская соль) в значительной степени (хотя и косвенно) воздействуют на радиационный бюджет Земли, приводя, с одной стороны, к рассеиванию и поглощению солнечного излучения, а с другой стороны, обеспечивают концентрацию облачных ядер (микрокапель воды), что, в конечном счете, приводит к образованию облаков.

В настоящей работе представлены результаты долговременных исследований оптических параметров атмосферы Крыма. Основной итог работы – это создание базы данных по спектральной оптической толщине атмосферы за 2001–2010 годы (а это примерно 100 наблюдательных дней в год в течение 10 лет). С учетом данных наблюдений, полученных на Карадагской геофизической станции (с 1972 г.), можно утверждать, что это самый длинный (и непрерывный) ряд спектральных фотометрических наблюдений не только в Украине, но и в странах бывшего СССР. Хотя нельзя не отметить многочисленные исследования параметров атмосферы, проводимые эпизодически в от-

дельных регионах России, прежде всего в Москве (наблюдения на французском фотометре ЕС-318 были начаты также в 2001 г.), Санкт-Петербурге и Томске.

В представленной работе выполнен лишь предварительный анализ полученных наблюдательных данных. Дальнейшие исследования закономерностей пространственной и временной зависимости оптических свойств аэрозоля, а также исследований размеров и природы аэрозольных частиц планируются как совместная работа как с украинскими оптическими станциями, недавно подключившимися к мониторингу параметров атмосферы (Севастополь, 2006 г., Киев, 2008 г.), так и с европейскими станциями, установившими солнечные фотометры системы AERONET в последнее десятилетие.

В заключение авторы выражают глубокую благодарность руководителю Карадагской геофизической обсерватории Г.К. Гущину за предоставление данных наблюдений за несколько последних лет, еще не включенных в справочную литературу.

Литература

- Аббот и др. (Abbot C.G., Ardrich L.B., Fowle F.E.) // *Annals of the Astrophysical Observatory of the Smithsonian Institution. 1908–1932. V. 2–5. U.S. Govt. Printing Office.*
- Атрощенко И.Н., Гадун А.С., Гопасюк С.И. и др. // *Вариации глобальных характеристик Солнца. Киев: Наукова думка. 1992.*
- ВМО // *Report of the WMO workshop on the measurements of atmospheric optical depth and turbidity. / Ed. Bruce Hicks. Silver Spring, Maryland. 6–10 December, 1993. Obtainable from WMO as Technical Document N 659 (Geneva, Switzerland).*
- Гущин Г.П. // *Общее содержание атмосферного озона и спектральная прозрачность атмосферы. Л.: Гидрометеиздат. 1973–1991.*
- Гущин Г.П., Виноградова Н.Н. // *Суммарный озон в атмосфере. Л.: Гидрометеиздат. 1983.*
- Гущин Г.П. // *Методы, приборы и результаты измерения спектральной прозрачности атмосферы. Л.: Гидрометеиздат. 1988.*
- Кабанов Д.М., Сакерин С.М., Сутормин А.М., Турчинович С.А. // *Оптика атмосферы и океана. 1993. № 4. С. 444.*
- Козак и др. (Kozak A.V., Panteleev S.K., Sosnovsky V.K., et al.) // *Proceeding of SPIE (USA). 1997. № 3237. P. 162.*
- Козак А.В., Метлов В.Г., Терез Г.А., Терез Э.И. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 2010. Т. 106. № 1. С. 125.*
- Лифшиц Г.Ш. // *Рассеяние света в атмосфере. Алма-Ата. Изд. АН КазССР. 1965.*
- Лифшиц Г.Ш. // *Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1985. Т. 21. № 2. С. 139.*
- Мошкалев В.Г. // *Астрон. циркуляр. 1984. № 1309. С. 4.*
- Никонов В.Б. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв. 1976. Т. 54. С. 129.*
- Охврил и др. (Ohvriil H., Teral H., et al.) // *J. Geophys. Res. 2009. V. 1. Issue 4. P. D00D12.*
- Пясковская-Фесенкова Е.В. // *Исследование рассеяния света в земной атмосфере. М.: Изд. АН СССР. 1957.*
- Терез Г.А. // *Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1990. Т. 26. № 5. С. 550.*
- Терез Э., Терез Г. // *Кинем. и физ. небесн. тел. 1991. Т. 7. № 5. С. 68.*
- Терез Э., Терез Г. (Terez E., Terez G.) // *J. of Appl. Meteorology. 2002. V. 41. P. 1060.*
- Терез Э., Терез Г. (Terez E.I. and Terez G.A.) // *J. of Geophys. Res. 2003. V. 108. V. D22. P. 61.*
- Терез Э.И., Терез Г.А., Козак А.В. // *Свидетельство о регистрации авторского права № 32315 от 04.03.2010 г. на компьютерную программу “Определения и анализ долговременных оптических параметров земной атмосферы”.*
- Фесенков В.Г. // *Астрон. журн. 1933. Т. 10. № 3. С. 249.*
- Фрелих (Fröhlich S.) // *Solar Irradiance Variability, in Solar Variability and its Effect on climate. Chapter 2: Solar Energy Flux Variations. American Geophysical Union. Geophysical Monograph Series. 2004. N. 141.*
- Хамберт и др. (Humbert J., Rosis-Saulgeot A-M.) // *Annales d’Astrophysique. 1968. V. 31. № 6. P. 589.*

Холбен и др. (Holben B.N., Eck T.F., Slutsker I., et al.) // AERONET Rem. Sens. Environ. 1998. № 66.
Р. 1.

Яковлева Д.В., Толкаченко Г.А. // Радиоп физика и электроника. 2008. Т. 13. № 2. С. 185.