

Оценки вариаций аэрозольной оптической толщи по наблюдениям направленных коэффициентов светорассеяния в Юго-Восточном Казахстане

К.Ю. Суковатов¹, В.Е. Павлов¹, В.К. Ошлаков^{2*}

¹ Институт водных и экологических проблем СО РАН
656038, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1

² Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

Поступила в редакцию 30.10.2009 г.

Анализируются архивные данные измерений спектральной прозрачности атмосферы и направленных коэффициентов светорассеяния в Юго-Восточном Казахстане. На основе результатов решения уравнения переноса излучения для предлагаемой радиационной модели атмосферы рассмотрена суточная изменчивость аэрозольной оптической толщи. Выделены три основные группы данных, соответствующие устойчивости оптических параметров атмосферы, постепенному увеличению мутности с уменьшением атмосферной массы и скачкообразным вариациям аэрозольной оптической толщи. При анализе наблюдательных данных учитываются эффекты поглощения света, многократного рассеяния и отражения радиации от подстилающей поверхности.

Ключевые слова: спектральная прозрачность, индикатриса рассеяния, альbedo частиц, уравнение переноса излучения, крупнодисперсный и субмикронный аэрозоль; spectral transmittance, scattering phase function, particle albedo, radiation transfer equation, coarse-dispersed and submicron aerosol.

На базе мировой сети AERONET во многих пунктах земного шара осуществляется мониторинговый сбор информации по спектральным аэрозольным оптическим толщам атмосферы (АОТ) и спектральной яркости дневного неба в альмукантарате и вертикале Солнца [1]. Эта информация широко используется в решениях радиационных задач при наблюдениях Земли из космоса, в климатологических исследованиях и т.п. К сожалению, подобным мониторингом не охвачена обширная территория Казахстана, играющая важную роль в формировании глобального климата Земли. Тем не менее исторически здесь во второй половине XX в. проводились атмосферно-оптические исследования [2]. За 50 лет в Астрофизическом институте (АФИ) АН КазССР был накоплен обширный архив результатов наблюдений. Безусловно, представляется актуальной обработка архивов с последующей публикацией обновленных данных.

В настоящей статье решается следующая задача: по данным измерений направленных коэффициентов светорассеяния, полученных в Юго-Восточном Казахстане, анализируются дневные вариации АОТ. Измерения проводились в степном районе с чахлой растительностью (пос. Кирбалтабай Алма-Атинской области) в августе–сентябре 1976 г. Количественно

оптические толщи поглощения и рассеяния связаны с яркостными характеристиками неба через уравнение переноса излучения.

За основу наблюдательных данных взяты результаты исследования коэффициентов спектральной прозрачности атмосферы P_λ и направленных коэффициентов светорассеяния $f(\varphi)$ (здесь φ – угол рассеяния в альмукантарате Солнца). Анализируемые ниже экспериментальные данные относятся к абсолютно безоблачной атмосфере. Наблюдения P_λ и $f(\varphi)$ осуществлялись на малоугловом фотометре дневного неба [3], снабженном интерференционными светофильтрами с максимумами полос пропускания при 405, 447, 547, 650 и 706 нм и полуширинами полос не более 10 нм. Эпизодически выполнялись измерения альbedo подстилающей поверхности q в тех же длинах волн с помощью альбедометра [4].

Специальное приспособление к фотометру с лампой накаливания позволяло контролировать временные вариации чувствительности аппаратуры и учитывать изменения спектральных коэффициентов пропускания светофильтров в зависимости от нагревания (охлаждения) прибора. Соответственно в значения измеренных величин спектральных потоков прямого солнечного света вносились необходимые поправочные коэффициенты. Следует заметить, что прибор был ориентирован на наблюдения направленных коэффициентов рассеяния $f(\varphi)$ [2, 3], а не яркости неба $B(\varphi)$ в абсолютных единицах. Для определения $f(\varphi)$ использовалось следующее соотношение [5]:

* Константин Юрьевич Суковатов (skonstantiny@gmail.com); Владимир Евгеньевич Павлов (pavlov@iwer.asu.ru); Виктор Константинович Ошлаков (ovk@iao.ru).

$$f(\varphi) = \{An(\varphi)\} / \{\pi n_{0,m}m\}, \quad (1)$$

где A — спектральное альbedo серого экрана, изготовленного из гипса и графита и освещаемого перпендикулярными солнечными лучами; $n(\varphi)$ — спектральная яркость неба в единицах отсчета прибора на угловом расстоянии φ от Солнца; $n_{0,m}$ — яркость экрана в тех же единицах при атмосферной массе m в направлении на Солнце. Экран помещается в специальную V -образную насадку к прибору. Угол входа освещающих его световых лучей с полутенью $2\beta_0$ не превышает 5° . Тем самым задается условие незначительности вклада околосолнечного ореола в освещенность экрана прямыми солнечными лучами в видимой области спектра при значениях атмосферных масс $m < 8 \div 10$ и аэрозольных оптических толщ $\tau_a < 0,3$ [6], имевших место при наблюдениях в Кирбалтабае. Далее этот вопрос будет рассмотрен более подробно.

Альbedo серого экрана A определялось путем сопоставления его яркости с яркостью экрана из химически чистой окиси магния [2, 5].

Для контроля возможных систематических изменений прозрачности атмосферы в течение каждой половины дня множество раз при разных m измерялись $f(8^\circ)$ и $f(60^\circ)$ в длинах волн 547, 650 и 706 нм. Следует сказать, что угол $\varphi = 60^\circ$ выбран не случайно: его для яркости неба можно считать нефелометрическим, поскольку вблизи него яркость слабо зависит от формы аэрозольной индикатрисы рассеяния [2]. Использование в последующем анализе $f(8^\circ)$ и $f(60^\circ)$ позволяло оценивать временную изменчивость крупной и субмикронной фракций аэрозольных частиц. Кроме того, ежедневно при атмосферных массах $3,0 \leq m \leq 4,5$ и $5 \leq m \leq 6$ проводились наблюдения полных абсолютных индикатрис яркости $f(\varphi)$ в интервале углов рассеяния $2^\circ \leq \varphi \leq 140^\circ - 160^\circ$ [7].

Интерпретация экспериментальных данных осуществлялась на основе численных значений $f(\varphi)$, полученных решением уравнения переноса излучения. С этой целью применялся метод Монте-Карло; соответствующее программное обеспечение было подготовлено и любезно предоставлено нам сотрудником ИОА СО РАН Т.Б. Журавлевой [8]. Ее программы, при использовании которых в расчетах яркости учитывается сферичность атмосферных слоев, позволяют при значениях атмосферных масс $m \leq 8 - 10$ и аэрозольных оптических толщ $\tau_a < 0,3$ вычислять в течение нескольких минут угловые характеристики $f(\varphi)$ в области спектра 405 нм со статистической погрешностью, не превышающей 1%. Для более длинноволновых участков спектра время счета $f(\varphi)$ с такой погрешностью обычно заметно меньше 1 мин.

Одним из существенных моментов в выполнении расчетов интенсивности рассеянного света является задание аэрозольной модели атмосферы. При решении этого вопроса мы исходили из данных работы [9]. Представленные в ней для Юго-Восточного Казахстана аэрозольные функции рассеяния $f_a(\varphi)$ были нами аппроксимированы суммой

компонент, обусловленных рассеянием света на ультрамикроскопических, субмикронных и крупнодисперсных частицах [10]. Считалось, что спектр их размеров в каждой указанной группе имеет нормальный логарифмический вид. В дальнейшем анализе данных, полученных в условиях сухого климата, оказалось достаточным использование индикатрис для двух типов фракций: субмикронной и крупнодисперсной. Такое представление индикатрисы в виде суммы двух или более компонент с пофракционным заданием аэрозольной оптической толщи создает определенные удобства при интерпретации экспериментальных данных.

Коэффициенты асимметрии рассеянных аэрозолем световых потоков

$$\Gamma_a = \frac{\int_0^{\pi/2} f_a(\varphi) \sin(\varphi) d\varphi}{\int_{\pi/2}^{\pi} f_a(\varphi) \sin(\varphi) d\varphi} \quad (2)$$

для указанных мод существенно различны: при $\lambda = 405$ нм они соответственно равны 10 и 16.

Задание поглощающих свойств частиц в первом приближении основывалось на результатах лабораторных измерений [11]. Согласно этим данным, в видимой области спектра при $\lambda > 500$ нм вероятность выживания кванта ω для крупнодисперсных частиц глинистого происхождения составляет около 0,95. Светлые глинистые образования и небольшое количество солонцов составляют преобладающую основу верхнего слоя почвы в Кирбалтабае. Ветровая эрозия этого слоя в сочетании с процессами конденсации влаги на частицах при условии длительного отсутствия атмосферных фронтов, что характерно для анализируемого периода наблюдений, в основном и определяют аэрозольный состав нижних слоев воздуха. Кстати, значение $\omega = 0,95$ является типичным для взвешенных по всей высоте атмосферы аэрозольных частиц во многих засушливых зонах земного шара [1]. В дальнейшем анализе измерений P_λ , $f(8^\circ)$ и $f(60^\circ)$ по мере необходимости значения ω уточнялись для каждого конкретного дня наблюдений.

Проблема контроля устойчивости оптических свойств атмосферы при измерениях коэффициентов прозрачности неоднократно рассматривалась авторами [2, 5, 6, 12]. Заметим, что используемые в NASA методы селекции данных AERONET (разные уровни Level) для отбора безоблачных ситуаций касаются только прямого солнечного света. И даже в этом случае желателен дополнительный анализ данных для обнаружения оптически тонких облаков в направлении на солнечный диск [13]. Если речь идет об определении коэффициентов прозрачности атмосферы в каждый конкретный момент времени с погрешностью не более 1–2%, то необходимо выведение из наблюдений приборной величины внеатмосферного спектрального потока солнечной радиации с соответствующей точностью. Такие методики описаны в [14, 15]; при этом требуется полноценная статистическая обеспеченность наблюдательных рядов. Ее отсутствие в анализируемых

нами архивных материалах заставило прибегнуть к привлечению $f(8^\circ)$ и $f(60^\circ)$ для определения τ_a при конкретных атмосферных массах. Естественно, для этого была использована теория переноса излучения.

Первоначально оценим вклад рассеянного света в освещенность экрана солнечными лучами. Отношение освещенностей прямым E_0 и рассеянным E_{dif} солнечным излучением имеет следующий вид [16]:

$$k = \frac{E_{dif}}{E_0} = \pi m \int_0^{\phi_0} f(\phi) \sin(2\phi) d\phi. \quad (3)$$

При выводе (3) предполагается, что яркость рассеянного света в пределах углов $0 \leq \phi \leq \phi_0$ (околосолнечный ореол) имеет кольцевую симметрию относительно центра солнечного диска. Обычно фотометры дневного неба характеризуются неким предельным углом ϕ_k , причем для углов $\phi < \phi_k$ измеренные значения направленных коэффициентов рассеяния $f(\phi)$ из-за солнечных бликов во входном канале прибора не могут считаться достоверными. В нашем случае $\phi_k = 2^\circ$. В связи с этим при расчетах коэффициента k по формуле (3) возникает необходимость в экстраполяции данных $f(\phi)$, измеренных в углах $\phi \geq \phi_k$, на интервал углов $0^\circ \leq \phi \leq \phi_k$. Для этого могут быть использованы различные модельные приближения, в том числе базирующиеся на предположениях о спектре размеров гигантских частиц.

В равной мере можно использовать и формальный математический прием: аппроксимировать угловую зависимость $f(\phi)$ при $\phi \geq \phi_k$ полиномом n -й степени, а затем на его основе вычислить значения $f(\phi)$ при малых углах вплоть до $\phi = 0$. После применения формулы (3) коэффициенты k позволят в некотором приближении исключить из $n_{0,m}$ добавки, обусловленные диффузным светом. Таким путем можно приблизить к истинным значениям оптические толщи атмосферы, определенные методом Бугера для случая фотометрии экрана, освещенного Солнцем.

В течение ряда дней по данным наблюдений $f(\phi)$ в области малых углов рассеяния ϕ были рассчитаны коэффициенты k , определяющие отношение световых потоков от околосолнечного ореола и прямого солнечного излучения. В расчетах использовался полином 4-й степени. На основе этих расчетов была осуществлена коррекция бугеровских прямых и оценены соответствующие изменения коэффициентов прозрачности и оптических толщ. Соответствующие результаты для коротких длин волн приведены в таблице.

Примеры наблюдаемых прямых Бугера и результат модификации одной из них (для области спектра 405 нм) после исключения диффузного освещения приведены на рис. 1.

Из таблицы видно, что максимальная доля рассеянного света в солнечном потоке, падающем на экран с углом входа $2\phi_0 = 5^\circ$, составляет 7,5%. Его исключение влечет за собой уменьшение коэффи-

циента прозрачности атмосферы на 0,74% и увеличение оптической толщи на 3,9% при ее абсолютной величине около 0,3. С ростом длины волны и особенно при переходе к ИК-области спектра приводимые в таблице цифры существенно уменьшатся.

Значения коэффициентов k , изменения коэффициентов прозрачности δp и оптических толщ $\delta \tau_a$ после коррективы бугеровских прямых

Дата	Д.п., п.п.	$\lambda = 405 \text{ нм}$				$\lambda = 447 \text{ нм}$			
		$k, \%$	$\delta p, \%$	$\delta \tau_a, \%$	m	$k, \%$	$\delta p, \%$	$\delta \tau_a, \%$	m
23.08	01	3,03	0,30	1,58	9,09	2,73	0,27	1,42	9,07
26.08	01	2,28	0,23	1,19	10,10	2,02	0,20	1,05	10,30
27.08	01	1,36	0,13	0,71	10,20	1,34	0,13	0,70	10,10
28.08	01	3,21	0,32	1,67	8,18	2,73	0,27	1,42	10,40
28.08	02	2,76	0,27	1,44	9,88	2,45	0,24	1,28	10,20
29.08	01	3,39	0,34	1,76	10,10	2,94	0,29	1,53	8,08
29.08	02	2,95	0,29	1,54	9,89	2,67	0,26	1,39	7,98
31.08	01	5,12	0,51	2,67	9,42	4,26	0,42	2,22	9,54
31.08	02	7,51	0,74	3,91	10,90	6,88	0,68	3,59	9,78
01.09	01	6,15	0,61	3,21	10,70	5,58	0,55	2,91	9,88
04.09	01	6,08	0,60	3,17	8,66	4,81	0,48	2,50	10,10
12.09	01	0,56	0,06	0,29	8,48	0,51	0,05	0,27	9,89
14.09	01	1,46	0,14	0,76	8,03	1,35	0,13	0,70	9,42
15.09	01	1,45	0,14	0,75	7,95	1,24	0,12	0,65	8,70
15.09	02	1,58	0,16	0,82	7,84	1,39	0,14	0,72	8,84
16.09	01	1,51	0,15	0,78	7,71	1,36	0,13	0,71	10,70
16.09	02	1,52	0,15	0,79	7,54	1,41	0,14	0,74	8,16
17.09	01	2,29	0,23	1,20	8,12	2,13	0,21	1,11	10,80
17.09	02	3,16	0,31	1,65	8,03	2,63	0,26	1,37	8,27
23.08	01	3,03	0,30	1,58	9,09	2,73	0,27	1,42	9,07
26.08	01	2,28	0,23	1,19	10,10	2,02	0,20	1,05	10,30
27.08	01	1,36	0,13	0,71	10,20	1,34	0,13	0,70	10,10

Примечание. Д.п. — до полудня (01), п.п. — после полудня (02).

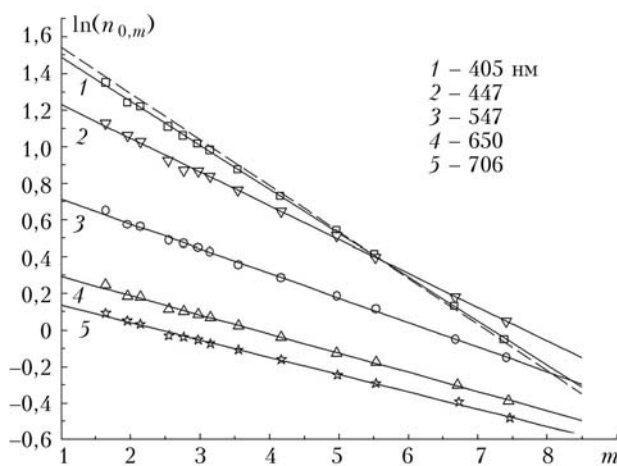


Рис. 1. Прямые Бугера и результат коррективы одной из них (штриховая линия) исключением рассеянного света из суммарного потока, освещающего экран. 31 августа 1976 г. до полудня

Вообще говоря, во всех рассмотренных случаях они лежат в пределах погрешностей бугеровского метода [2]. Но так как «эффект ореола» имеет место всегда, то желателен его повседневный учет, особенно при большой мутности атмосферы.

Представленные на рис. 1 типичные прямые Бугера для разных длин волн получены в Кирбалтабае в течение половины одного из абсолютно безоблачных дней. Обычно в степных условиях Юго-Востока Казахстана тангенсы углов наклона таких прямых к оси абсцисс определяются с погрешностью 1–2%. Однако формально вычисленные таким путем значения коэффициентов прозрачности P_λ из-за систематических изменений мутности атмосферы в течение половины дня могут заметно отличаться от истинных значений, соответствующих каждой конкретной атмосферной массе m . Заметим, что этот эффект неустойчивости оптических свойств атмосферы подробно описан, например, в работах [2, 5, 17]. Ниже приводятся результаты анализа подобных нестабильных ситуаций, в основу которого положены наблюдения направленных коэффициентов рассеяния $f(8^\circ)$ и $f(60^\circ)$ на различных зенитных углах Солнца в спектральных участках 547, 650 и 706 нм.

Сопоставление экспериментальных значений $f(8^\circ)$ с $f(60^\circ)$ для Кирбалтабая показало, что коэффициент корреляции между ними в течение конкретного дня меняется от 0,60 до 0,98 и в среднем составляет 0,78, причем для всех трех длин волн. Расчеты $f_1(8^\circ)$ и $f_1(60^\circ)$ в приближении однократного рассеяния в рамках используемой аэрозольной модели атмосферы свидетельствуют, что за формирование первой величины в основном ответственны крупнодисперсная и субмикронная, а второй – субмикронная и ультрамикроскопическая моды частиц [6]. Компоненты многократного рассеяния $f_2(\varphi)$ и отражения света от подстилающей поверхности f_q могут в существенной мере влиять на зависимость суммарных величин $f(8^\circ) = f_1(8^\circ) + f_2(8^\circ) + f_q$ и особенно $f(60^\circ) = f_1(60^\circ) + f_2(60^\circ) + f_q$ от атмосферной массы m . Согласно расчетам [6, 7, 17–19] в случае неизменности рассеивающих свойств атмосферы, т.е. при независимости аэрозольной оптической толщи τ_a и соответственно $f_1(60^\circ)$ от атмосферной массы m , значения $f(60^\circ)$ в видимой области спектра в летних условиях обязательно должны увеличиваться за счет роста компоненты $f_2(\varphi)$ с приближением Солнца к горизонту. Эффект тем значимей, чем больше зенитный угол Солнца (или m), короче длина волны λ и больше оптическая толщина рассеяния. Противоположную, но заметно меньшую роль во временном ходе $f(8^\circ)$ и $f(60^\circ)$ играет летнее альbedo подстилающей поверхности q [20].

Для того чтобы оценить дневную изменчивость аэрозольных оптических толщ с помощью измеренных величин направленных коэффициентов светорассеяния на разных зенитных углах Солнца, поступим следующим образом. Определим оптические толщи τ из наклона прямых Бугера к оси абсцисс (см. рис. 1) и вычислим значения

$$\tau_a^B = \tau_a - \tau_m - \tau_{O_3}, \quad (4)$$

где τ_m – молекулярная толщина рассеяния при среднем атмосферном давлении, τ_{O_3} – спектральная

оптическая толщина поглощения света атмосферным озоном в полосе Шапюи при его среднем содержании. Для полученных таким путем ориентировочных значений аэрозольной оптической толщи при задании соответствующих зенитных углов Солнца z , альbedo однократного рассеяния частиц $\omega = 0,95$, отражательной способности подстилающей поверхности q и молекулярной толщи τ_m выполним расчеты $f(8^\circ)$ и $f(60^\circ)$ путем решения уравнения переноса излучения. При этом используем часто принимаемое на практике условие, согласно которому поглощающий слой озона находится над рассеивающим слоем воздуха. Вытянутость аэрозольной индикатрисы определяется соотношением оптических толщ грубодисперсной и субмикронной фракций, о котором шла речь выше. Будем считать это соотношение в течение каждого конкретного дня одним и тем же. Естественно, первоначально вычисленные путем решения уравнения переноса направленные коэффициенты светорассеяния могут заметно отличаться от наблюдательных данных. Варьируя закладываемые в расчеты оптические параметры методом итераций, добьемся соответствия результатов вычислений наблюдениям $f(\varphi)$ с учетом погрешностей последних. Результаты расчетов направленных коэффициентов светорассеяния и приближение их к наблюдательным данным с помощью метода итераций показаны на рис. 2. Напомним, что относительные ошибки измерений $\delta f(\varphi)$ равны 3–4%.

В итоге имеем 4 основных варианта соотношений между аэрозольными оптическими толщинами τ_a^B и τ_a , использованными в исходных расчетах $f(8^\circ)$ и $f(60^\circ)$ и после их согласования с наблюдательными данными. Первый вариант характеризуется изначальным согласием τ_a^B и τ_a в пределах погрешностей измерений для всего рассматриваемого интервала зенитных углов z . Следуя Е.В. Пясковской-Фесенковой [2], назовем такие дни «устойчивыми в оптическом отношении». Их процентное содержание в Кирбалтабае составляет чуть менее 40%. Напомним, что измерения проводились при полном отсутствии облачности.

Во втором варианте (около 50% данных) имеет место регулярное превышение наблюдаемых величин $f(8^\circ)$ и $f(60^\circ)$ над вычисленными, если в расчетах используются аэрозольные оптические толщи τ_a^B из соотношения [4]. Различие становится особенно заметным при малых атмосферных массах. Требуется введение существенных поправок при переходе от τ_a^B к τ_a , чтобы возникло согласие расчетных значений $f(8^\circ)$ и $f(60^\circ)$ с экспериментальными. При этом оказывается необходимым моделирование процесса систематического увеличения оптической толщи с уменьшением зенитного угла Солнца. Подобное поведение аэрозольной компоненты во времени подробно описано В.А. Смеркаловым. Он считает случаи регулярного возрастания τ_a с уменьшением m типичными и предлагает свои способы определения аэрозольной оптической толщи атмосферы в каждый конкретный момент времени [17].

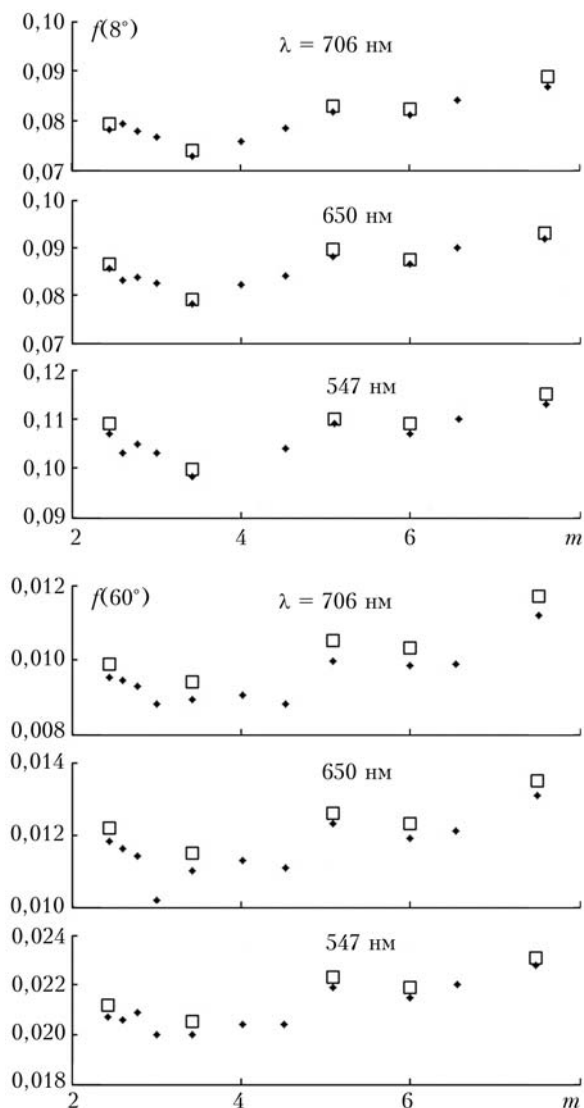


Рис. 2. Наблюдаемые (ромбы) и расчетные (квадраты) коэффициенты направленного светорассеяния в функции атмосферной массы m для разных длин волн 14.09.76 до полудня

Для третьего варианта характерны бессистемные скачки вычисленных аэрозольных оптических толщ τ_a^B , значения которых обеспечивают удовлетворительное согласие расчетных и наблюдаемых значений $f(8^\circ)$ и $f(60^\circ)$. Часто эти скачки заметно превышают абсолютные погрешности измерений $\Delta\tau_a$ (иногда в несколько раз). Их проявления наиболее вероятны в дни с большой атмосферной мутностью, чаще всего в полуденное время и при малых углах рассеяния. Скачки проще всего связать с появлением горизонтальных неоднородностей в атмосфере типа пылевых облаков либо с увеличением активности процесса эрозии в полуденное время.

Четвертый вариант соотношений (всего несколько случаев) составляют данные, соответствующие регулярному превышению расчетных значений $f(8^\circ)$ и $f(60^\circ)$ над данными измерений, если в вычислениях используются значения τ_a^B из фор-

мулы (4). Вряд ли такой эффект связан с систематическим улучшением прозрачности воздуха к полудню и ее последующим ухудшением к вечеру. Мы склонны связывать этот результат с недоучетом аэрозольного (возможно, отчасти озонного) поглощения при формировании изначальной модели. Другими словами, в эти дни вероятность выживания кванта для аэрозольных частиц ω скорее всего меньше значения 0,95, принимаемого в первоначальных расчетах. Соответственно при введении в расчеты новых значений ω и τ_a^B в итоге следует изменить и оптические толщи аэрозольного рассеяния.

Далее на конкретных примерах проиллюстрируем результаты коррекции значений τ_a^B , полученных из прямых Бугера с использованием $f(8^\circ)$, $f(60^\circ)$ и теории переноса излучения.

На рис. 3, а показана связь τ_a^B и τ_a для первой группы дней, которые квалифицированы нами как оптически устойчивые. Для них относительное отклонение τ_a^B от τ_a составляет 8%.

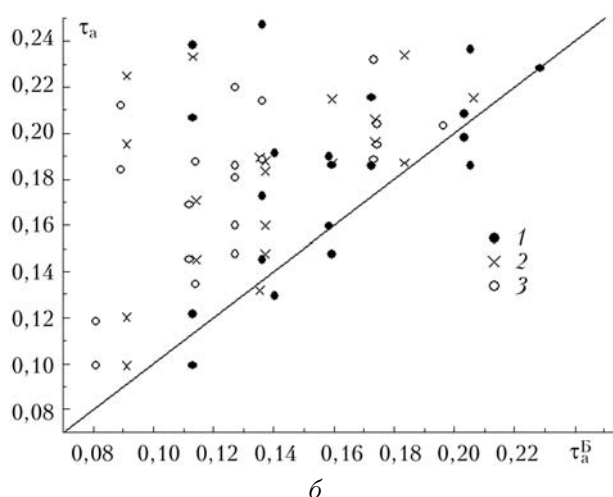
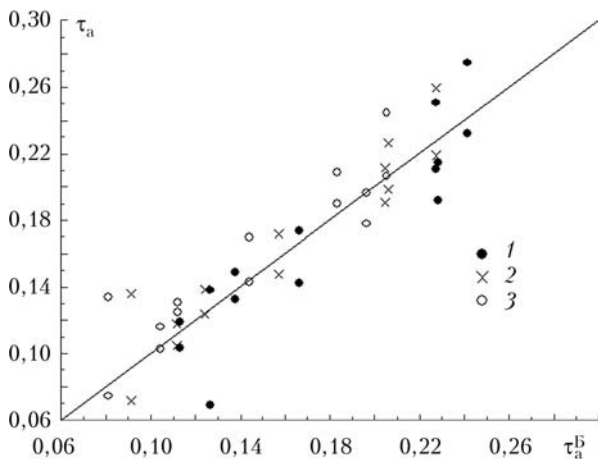


Рис. 3. Наблюдаемые τ_a^B и скорректированные τ_a значения аэрозольных оптических толщ в оптически устойчивые (а) и неустойчивые (б) дни для длин волн 547 (1), 650 (2) и 706 нм (3). Угол наклона прямой к оси абсцисс составляет 45°

По данным наблюдений оптических характеристик атмосферы именно в такие дни целесообразно решать обратные задачи по восстановлению атмосферных параметров: погрешности будут минимальными.

На рис. 3, б представлены скорректированные значения аэрозольных оптических толщ τ_a и соответствующие им значения τ_a^B , полученные по методу Бугера в дни с систематическим ростом мутности к полудню и ее уменьшением после полудня. Видно, что τ_a отличается от τ_a^B при малых атмосферных массах (верхние точки графика) более чем в 2 раза.

Изложенный выше подход к оценке правдоподобия получаемых по методу Бугера оптических толщ может быть рекомендован для практического применения в тех случаях, когда объем полученных данных невелик: в нашем случае период наблюдений не превышал 2 мес. При наличии длительных рядов наблюдений более приемлемо использование методик, предложенных, например, в работах [14, 15].

Авторы благодарны Т.Б. Журавлевой за возможность использования разработанных ею программ в расчетах направленных коэффициентов рассеяния.

1. *Aerosol Robotic Network (AERONET)*, <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>
2. Пяскова-Фесенкова Е.В. Исследование рассеяния света в земной атмосфере. М.: Изд. АН СССР. 1957. 219 с.
3. Глушко В.Н., Иванов А.И., Лившиц Г.Ш., Павлов В.Е., Федюлин И.А. Яркость и поляризация безоблачной атмосферы. Алма-Ата: Наука, 1979. 201 с.
4. Иванов А.И., Лившиц Г.Ш., Тем Э.Л. Сезонные изменения альбедо местности по измерениям поляризации света неба // Рассеяние и поглощение света в атмосфере. Алма-Ата: Наука, 1971. С. 56–58.
5. Лившиц Г.Ш. Рассеяние света в атмосфере. Алма-Ата: Наука, 1965. 177 с.
6. Мулдашев Т.З., Павлов В.Е., Тейфель Я.А. О контроле устойчивости оптических свойств атмосферы // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1991. Т. 27. № 8. С. 831–841.
7. Павлов В.Е., Суковатов К.Ю. Метод Монте-Карло как основа разработки методики контроля стабильности прозрачности атмосферы // Вычислительные тех-

нологии Т.13. Вестн. КазНУ им. Аль-Фараби. Сер. математика, механика, информатика. № 4(59). Ч. 3. Совместный выпуск. 2008. С. 15–20.

8. Журавлева Т.Б., Насртдинов И.М. Численное моделирование угловой структуры яркости неба вблизи горизонта при наблюдении с Земли. Часть I. Аэрозольная атмосфера // Оптика атмосфер. и океана. 2003. Т. 16. № 5–6. С. 537–545.
9. Антюфеев В.С., Иванов А.И., Лившиц Г.Ш., Михайлов Г.А. Определение аэрозольных индикатрис рассеяния безоблачной атмосферы в спектральной области 0,55–2,4 мкм // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1980. Т. 16. № 2. С. 146–154.
10. Мулдашев Т.З., Павлов В.Е., Тейфель Я.А. Об определении аэрозольной оптической толщи по яркости неба в видимой области спектра // Оптика атмосфер. и океана. 1989. Т. 2. № 11. С. 1130–1134.
11. Глушко В.Н., Лившиц Г.Ш., Ташенов Б.Т., Молчанов В.А. Исследование поглощения света в аэрозолях // Рассеяние и поглощение света в атмосфере. Алма-Ата: Наука, 1971. С. 70–73.
12. Ку-Нан Лиоу. Основы радиационных процессов в атмосфере. Л.: Гидрометеоздат, 1984. 376 с.
13. Щелканов Н.Н. Влияние слабой облачности на спектральный ход эффективной высоты атмосферы // Оптика атмосфер. и океана. 2008. Т. 21. № 10. С. 876–879.
14. Ignatov A.M., Dergileva I.I., Sakerin S.M., Kabanov D.M. An algorithm for the sun photometer calibration // Proc. IGARSS'93. 1993. Tokyo, Japan, Institute of Electronic. P. 1091–1093.
15. Sakerin S.M., Kabanov D.M. Spatial Inhomogeneities and Spectral Behavior of Atmospheric Aerosol Optical Depth over the Atlantic Ocean // J. of the Atmos. Sci. 2002. V. 59. N 3. P. 484–500.
16. Рябинина Н.Г. Прозрачность атмосферы и яркость дневного неба в полосе поглощения озона: Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Алма-Ата, 1981. 326 с.
17. Смеркалов В.А. Прикладная оптика атмосферы. СПб.: Гидрометеоздат, 1997. 334 с.
18. Павлов А.В., Павлов В.Е., Мулдашев Т.З. Угловая структура многократно рассеянного света безоблачной атмосферы // Оптика атмосфер. и океана. 1996. Т. 9. № 5. С. 688–693.
19. Павлов В.Е., Хвостова Н.В. Аэрозольное поглощение однократно и многократно рассеянного света в безоблачной атмосфере // Оптика атмосфер. и океана. 2008. Т. 21. № 2. С. 127–130.
20. Павлов В.Е. О контроле устойчивости оптических свойств атмосферы при малых и больших оптических толщах // Атмосферная оптика. М.: Наука, 1968. С. 63–66.

K.Yu. Sukhovatov, V.E. Pavlov, V.K. Oshlakov. Estimates of aerosol optical depth variations from measurements of directed light scattering coefficients in the Southeast Kazakhstan.

We analyze the archive data of measurements of spectral atmospheric transmittance and directed light scattering coefficients in the Southeast Kazakhstan. Based on the results of solution of the radiation transfer equation for the proposed radiation atmospheric model, the problem was considered on the daily variation of the aerosol optical thickness. Three basic data groups were proposed, corresponding to the stability of optical atmospheric mass and stepwise variations of aerosol optical thickness. When analyzing the observation data, we consider the light absorption effects, as well as the effects of multiple scattering and radiation reflection from the underlying surface.