

М.А. Дербисалин, Г.Ш. Лившиц, О.Д. Токарев

СТАТИСТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИЗЕМНОГО ГОРОДСКОГО АЭРОЗОЛЯ

Приведены результаты систематических измерений спектральных оптических параметров в приземном слое атмосферы г. Алма-Аты в летнее, весеннее и зимнее время 1985–1987 гг. Получены средние значения и коэффициенты вариаций показателей объемного и обратного рассеяния. Отмечена сезонная повторяемость оптических параметров. Исследуются их связи с синоптическими ситуациями и с относительной влажностью, а также между показателями объемного и обратного рассеяния. Установлено, что флуктуации оптических параметров не зависят от длины волны, метеопараметров и мутности атмосферы, а вариации показателя обратного рассеяния меньше вариаций показателя объемного рассеяния.

Несмотря на обилие исследований оптических параметров приземного аэрозоля, данные, полученные об этой важнейшей компоненте атмосферы, все еще недостаточны и противоречивы. Созданные в настоящее время модели, как правило, дают лишь общее представление о характеристиках дисперсной фазы атмосферы и не выявляют тенденцию к ее изменению под воздействием синоптических и метеорологических факторов. В крупных индустриальных центрах сложность исследования усугубляется тем, что аэрозоль непрерывно пополняется за счет антропогенных источников, работающих нерегулярно и с разной интенсивностью. Для поиска корреляционных связей, выявления роли отдельных факторов, возможности использования тех или иных оптических параметров для контроля и прогноза загрязнения атмосферы нужны статистические данные, полученные в разных метеоситуациях и сезонах.

В данной статье приведены результаты систематических измерений показателей объемного и обратного рассеяния и их флуктуации, стандартных метеопараметров в приземном слое атмосферы г. Алма-Аты в зимний, весенний и летний периоды 1985–1987 гг. Город с трех сторон окружен горами, что определяет слабую проветриваемость его воздушного бассейна. Ветровой режим связан, главным образом, с горно–долинной циркуляцией и отчасти с конвективными потоками, идущими от окраин к острову тепла, расположенному в центральной части города [1]. Основное направление ветра в ночное время — юго-восточное или южное, со стороны гор, вдоль ущелий. Днем преобладает долинный ветер, приносящий в южные районы города воздух с более загрязненных северных окраин. Регулярная смена направлений ветра, а также воздействие конвективных потоков приводит к тому, что городской аэрозоль оказывается достаточно перемешанным, хотя это и не исключает его повышенную концентрацию вблизи мощных источников загрязнения. В таких условиях использование локального метода измерения оптических параметров приземного аэрозоля представляется достаточно обоснованным. По данным ранее проведенных экспериментов [2] не обнаружено заметных отличий в вариациях показателей объемного рассеяния для г. Алма-Аты и в местах, удаленных от крупных промышленных центров, т.е. флуктуации оптических параметров в городе не связаны с воздействием конкретных источников аэрозоля.

Экспериментальная установка располагалась в юго-восточной части города. Измерения проводились, как правило, в вечернее время, что позволяло исследовать приземный слой атмосферы, в котором концентрация аэрозоля была близка к максимальной. Показатель объемного рассеяния σ определялся по показателю направленного светорассеяния $\mu(\varphi^*)$. Согласно [2] угол φ^* , при котором связь σ и $\mu(\varphi^*)$ наиболее тесная, зависит от сезона. Поэтому для зимы был выбран $\varphi^* = 30^\circ$, весной и летом измерения выполнялись соответственно при φ^* , равном 40° и 50° . В качестве показателя объемного рассеяния использовался $\mu(178^\circ) = \mu_\pi$. Для исследования флуктуации оптических параметров σ и μ_π записывались реализации соответствующих показателей направленного светорассеяния. Их длительность варьировалась в зависимости от устойчивости дымки от полминуты до трех минут, а число точек — от 30 до 200. Флуктуации частотой более 1 Гц не учитывались (сглаживались). В результате обработки рассчитывались коэффициенты вариаций оптических параметров: $V_\sigma = S_\sigma/\bar{\sigma}$ и $V_\pi = S_\pi/\bar{\mu}_\pi$, где S_σ и S_π , $\bar{\sigma}$ и $\bar{\mu}_\pi$ — соответственно среднеквадратические отклонения и средние значения оптических параметров для одной реализации.

Показатели направленного светорассеяния $\mu(\varphi^*)$ и μ_π определялись одновременно с помощью одинаковых фотометров, размещенных на двух установках, одна из которых работала в диапазоне углов 10° – 175° , а вторая — 172° – 178° . С помощью первой установки определялись показатели направленного светорассеяния в $\text{км}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ по методике, описанной в [3]. Вторая установка позволяла измерять форму индикатрисы рассеяния $\mu(\varphi)/\mu(175^\circ)$. Показатель обратного рассеяния определялся путем «сшивания» данных, полученных одновременно на двух фотометрах для угла 175° . Оптические параметры измерялись в основном для длин волн λ , равных 532, 650 и 993 нм, часть измерений вы-

полнена для λ , равных 405, 446 и 724 нм. Всего было получено 1753 серии измерений показателей объемного и обратного рассеяния. Число реализаций, предназначенных для исследования флуктуации оптических параметров, составило 1460. Разница в объеме данных объясняется тем, что не все серии измерений могли быть использованы для вычислений вариаций в силу недостаточного числа точек.

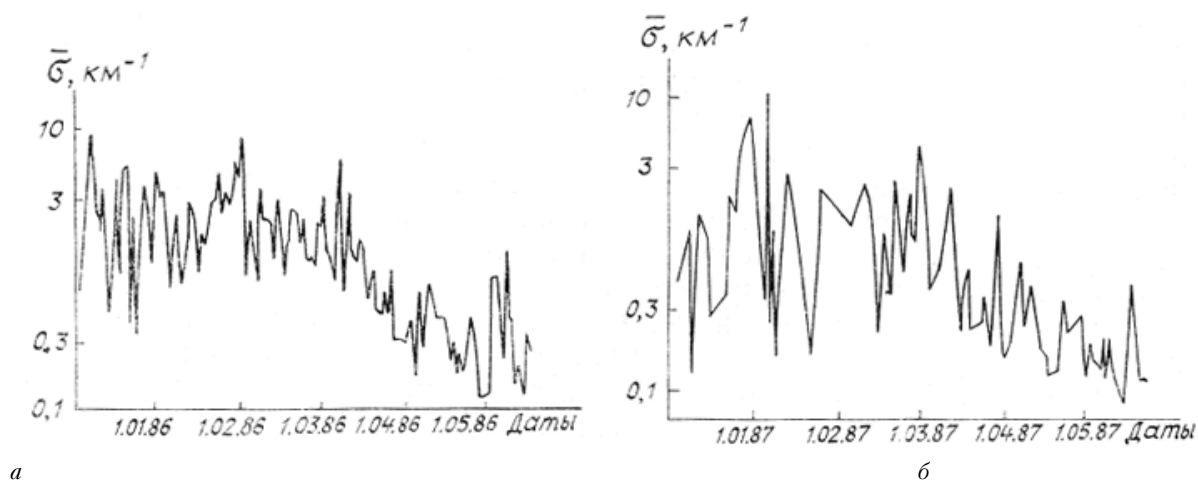


Рис. 1. Сезонный ход показателя объемного рассеяния $\bar{\sigma}_{сут}$, $\lambda = 532$ нм. *а* — 1985—1986 гг.; *б* — 1986—1987 гг.

Переходя к результатам, следует прежде всего отметить, что оптические параметры приземного слоя атмосферы со временем могут достаточно сильно изменяться. Однако их общий сезонный ход в разные годы остается достаточно близким. На рис. 1 показано изменение со временем среднесуточных значений показателя объемного рассеяния $\bar{\sigma}_{сут}$ за зимне-весенний периоды 1985—1986 гг. (*а*) и 1986—1987 гг. (*б*). В качестве $\bar{\sigma}_{сут}$ использовались усредненные данные, полученные за один вечер в течение трех-четырех часов. Число точек для каждой длины волны менялось от трех до десяти в зависимости от программы наблюдений и метеоусловий. Временной ход $\bar{\sigma}_{сут}$, аналогичный представленному на рис. 1, был получен ранее для этих же сезонов в 1983 г. [4].

Сезонная зависимость для лидарного отношения $\xi_{сут} = (\mu_{\pi}/\sigma)_{сут}$ приведена на рис. 2. Наблюдается некоторое отличие в сезонной зависимости этого параметра за периоды 1985—1986 гг. и 1986—1987 гг. В первом из них весной имеет место рост $\xi_{сут}$, во втором такого явного роста нет. Показатель обратного рассеяния в целом повторяет ход сезонной зависимости показателя объемного рассеяния, но в 1986 г. его уменьшение в весенний период выражено не столь отчетливо.

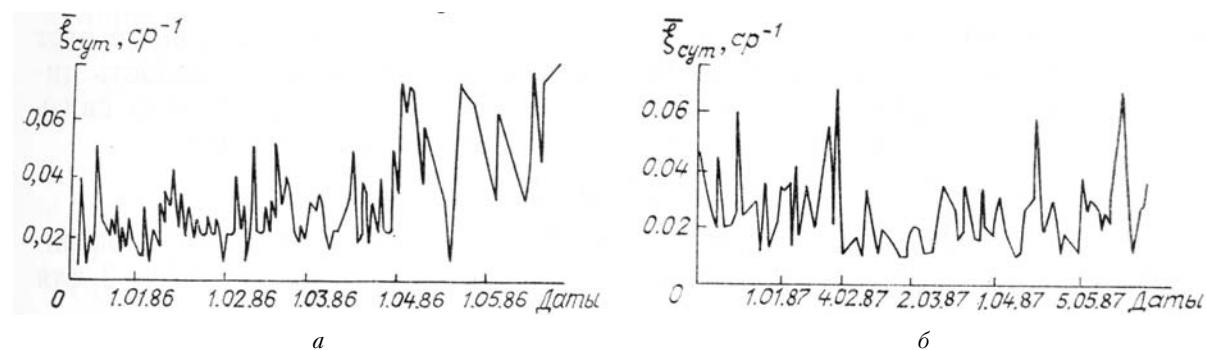


Рис. 2. Сезонный ход лидарного отношения $\xi_{сут}$, $\lambda = 532$ нм. *а* — 1985—1986 гг.; *б* — 1986—1987 гг.

В табл. 1 приведены средние за сезоны значения показателей объемного и обратного рассеяния $\bar{\sigma}_{сез}$ и $\bar{\mu}_{псез}$, лидарного отношения $\bar{\xi}_{сез}$ и его аэрозольной компоненты $\xi_{сез}^a$ для двух длин волн λ . Здесь же даны среднеквадратические отклонения оптических параметров $S_{сез}^{\sigma}$, $S_{сез}^{\mu}$, $S_{сез}^{\xi}$ и $S_{сез}^{\xi^a}$.

Из таблицы видно, что $\bar{\sigma}_{сез}$ зимой в тридцать раз превышает летние значения этого параметра. Несколько большее отличие по сезонам наблюдается для величины обратного рассеяния, а для лидарного отношения сезонные вариации выражены слабее, особенно для $\xi_{сез}^a$, причем величина $\bar{\xi}_{сез}$ возрастает к весеннему сезону.

Зависимость средних значений оптических параметров от сезона

Сезон	Оптические параметры, $\lambda = 532$ нм							
	$\bar{\sigma}_{\text{сез}}$	$S_{\text{сез}}^{\sigma}$	$\bar{\mu}_{\pi\text{сез}}$	$S_{\text{сез}}^{\mu}$	$\bar{\xi}_{\text{сез}}$	$S_{\text{сез}}^{\xi}$	$\bar{\xi}_{\text{сез}}^a$	$S_{\text{сез}}^{\xi a}$
Зима	2,36	2,86	0,0606	0,133	0,0243	0,0132	0,0233	0,0120
Весна	0,685	1,31	0,0238	0,122	0,0299	0,0213	0,0248	0,0235
Лето	0,091	0,123	0,0033	0,0024	0,0435	0,0131	0,0233	0,0123

Сезон	Оптические параметры, $\lambda = 650$ нм							
	$\bar{\sigma}_{\text{сез}}$	$S_{\text{сез}}^{\sigma}$	$\bar{\mu}_{\pi\text{сез}}$	$S_{\text{сез}}^{\mu}$	$\bar{\xi}_{\text{сез}}$	$S_{\text{сез}}^{\xi}$	$\bar{\xi}_{\text{сез}}^a$	$S_{\text{сез}}^{\xi a}$
Зима	1,83	2,80	0,0522	0,122	0,0284	0,0154	0,0280	0,0154
Весна	0,448	0,812	0,0117	0,0198	0,0288	0,0158	0,0257	0,0162
Лето	0,055	0,144	0,0017	0,0020	0,0399	0,0122	0,0280	0,0122

Примечание. Количество данных для $\lambda = 532$ нм: зимой – 359, весной – 280, летом – 205; для $\lambda = 650$ нм: зимой – 317, весной – 243, летом – 202.

Сопоставление полученных результатов с характером процессов атмосферной циркуляции привело к следующему выводу. Уменьшение прозрачности атмосферы зимой обусловлено воздействием отрога сибирского антициклона. Устойчивая холодная погода способствует образованию температурных инверсий, что ведет к накоплению аэрозоля. Прорывы южных циклонов и западные вторжения теплых фронтов разрушают инверсию. Иногда при этом в весенний период росту σ способствуют вторжения холодных фронтов, сопровождающиеся понижением температуры и ростом относительной влажности, в результате чего образуются плотные дымки. В основном же для весны характерно разрушение инверсий, что является причиной роста прозрачности.

Общие тенденции в изменении параметров σ и μ_{π} дают основание ожидать корреляционную связь между этими величинами. Вопрос этот важен, ибо при его положительном решении возникает возможность дистанционных измерений показателя объемного рассеяния. Часто связь между $\lg\sigma$ и $\lg\mu_{\pi}$ описывается уравнением линейной регрессии

$$\lg\sigma = a \lg\mu_{\pi} + b,$$

где a и b – коэффициенты регрессии. Расчеты показали, что коэффициенты a и b зависят от сезона, что подтверждают данные табл. 2 для различных участков спектра.

Следует отметить, что летом связь между $\lg\sigma$ и $\lg\mu_{\pi}$ аппроксимируется двумя прямыми, точка пересечения которых зависит от длины волны. Для зимы и весны величины коэффициентов a и b хорошо согласуются с данными других исследований [3, 5]. Однако из [6] следует, что с ростом мутности коэффициент a уменьшается, тогда как в данной работе обнаружено его уменьшение летом, когда прозрачность атмосферы велика. Скорее всего это можно объяснить влиянием молекулярного рассеяния. Повышение прозрачности атмосферы ведет к росту относительного вклада молекулярной компоненты как в показатель объемного рассеяния σ , так и в показатель обратного рассеяния. Однако из-за асимметрии световых потоков, рассеянных в переднюю и заднюю полусферы, эти оптические параметры изменяются по-разному. Поскольку показатель объемного рассеяния тесно связан с показателем направленного светорассеяния $\mu(\varphi^*)$, последний целесообразно сравнить с μ_{π} для аэрозольной и молекулярной атмосферы. В первом случае отношение $\mu_a(\varphi^*)/\mu_a(170^\circ)$, например по данным [5], изменяется для $\varphi^* = 30-50^\circ$ в летний период от 3 до 11, зимой от 6 до 18. В то же время отношение $\mu_m(\varphi^*)/\mu_m(180^\circ)$ составляет для этих же углов 0,7–0,9 (индексы «м» и «а» относятся соответственно к молекулярной и аэрозольной компонентам). Поэтому величина показателя объемного рассеяния определяется в основном аэрозольной компонентой, тогда как обратное рассеяние в большей степени зависит от молекулярной. А поскольку последняя отличается заметной стабильностью, то и вариации обратного рассеяния с ростом прозрачности атмосферы будут меньше, чем у показателя объемного рассеяния (см. табл. 3).

Коэффициенты уравнения регрессии для различных сезонов

Коэффициенты регрессии	Зима			Весна	
	$\lambda = 532$ нм	$\lambda = 650$ нм	$\lambda = 993$ нм	$\lambda = 532$ нм	$\lambda = 650$ нм
a	0,94	1,01	1,03	0,64	0,75
b	1,60	1,60	1,60	0,74	1,27
Лето, $\lambda = 532$ нм					
	$\mu_z < 0,002 \text{ км}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ $\sigma < 0,05 \text{ км}^{-1}$		$\mu_z > 0,002 \text{ км}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ $\sigma > 0,05 \text{ км}^{-1}$		
a	0,00			0,90	
b	-1,30			1,38	
Лето, $\lambda = 650$ нм					
	$\mu_z < 0,001 \text{ км}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ $\sigma < 0,03 \text{ км}^{-1}$		$\mu_z > 0,001 \text{ км}^{-1} \cdot \text{ср}^{-1}$ $\sigma > 0,03 \text{ км}^{-1}$		
a	0,10			0,37	
b	-0,96			0,81	

Примечание. Количество данных для $\lambda = 993$ нм – 147. Для других длин волн см. табл. 1.

Таблица 3

Результаты статистической обработки коэффициентов вариаций показателей объемного и обратного рассеяния

Статистические характеристики коэффициентов вариаций	Зима	Весна	Лето
	Число реализаций		
	555	477	428
$V_\sigma, \%$	5,0	7,1	6,9
$S_\sigma, \%$	4,4	6,6	6,3
$V_\pi, \%$	3,2	5,0	2,5
$S_\pi, \%$	4,0	6,5	2,8
$R(V_\pi, V_\sigma)$	$0,711 \pm 0,021$	$0,699 \pm 0,023$	$0,655 \pm 0,028$
$R(V_\pi, \sigma)$	$0,309 \pm 0,038$	$0,245 \pm 0,043$	$0,182 \pm 0,047$
$R(V_\pi, r)$	$0,208 \pm 0,041$	$0,122 \pm 0,045$	$0,082 \pm 0,048$

Средняя погрешность восстановления $\lg \sigma$ по $\lg \mu_\pi$ зависит от сезона. Для зимы она равна в видимой области спектра 20–25%, а для $\lambda = 993$ нм – 30–35%. Для летних данных погрешность составляет около 30%.

Корреляционная связь оптических параметров с относительной влажностью r слабая. Для показателя объемного рассеяния коэффициенты корреляции R , как правило, больше уровня значимости R^* , рассчитанного по критерию Стьюдента для вероятности 0,95 [7]. Однако они не превышают 0,40. Для обратного рассеяния и лидарного отношения R практически не больше R^* . Причин слабой корреляции несколько: неоднородность воздушной массы, связанная с множеством различных источников загрязнения, роль ветрового режима, обуславливающего смену локальных воздушных масс, и содержание негигроскопичных сажевых частиц. В результате влияние влажности на показатель рассеяния становится неоднозначным, хотя и проявляется общая тенденция увеличения σ с ростом r .

Анализ отдельных синоптических ситуаций для зимнего периода показал, что в антициклонах имеет место некоторая связь между показателем объемного рассеяния и температурой: коэффициент корреляции равен 0,315. Это связано с усилением инверсии температуры, способствующей накоплению аэрозоля. Коэффициент корреляции между σ и относительной влажностью примерно такой же, как и для всего сезона: 0,199.

Исследования флуктуации показателей объемного и обратного рассеяния показали, что вариации этих оптических параметров не зависят от длины волны, по крайней мере, в интервале 405–993 нм. Поэтому числовые массивы V_σ и V_π по длинам волн не разделялись. Средние значения \bar{V}_σ и \bar{V}_π , их среднеквадратические отклонения S_σ^V и S_π^V для трех сезонов приведены в табл. 3. Здесь же даны коэффициенты корреляции между вариациями обратного рассеяния и тремя параметрами: V_σ , σ и r . Из таблицы видно, что вариации показателя обратного рассеяния для всех сезонов меньше вариаций показателя объемного рассеяния. Причем отношение V_σ/V_π для зимы, весны и лета соответственно равно 1,58; 1,42; 2,80. На наш взгляд, могут быть две причины различной сезонной зависимости вариаций V_σ и V_π . Во-первых, как следует из [2], для г. Алма-Аты характерен разный спектральный ход σ летом и зимой, что свидетельствует о различном составе аэрозоля в эти сезоны. Во-вторых, как отмечалось в [3], показатели обратного рассеяния и ослабления имеют отличающиеся спектральные зависимости, что связано с неодинаковой чувствительностью рассеяния «назад» и ослабления к частицам разного размера [8].

Это подтверждается также данными о коэффициентах корреляции между вариациями V_σ и V_π . Несмотря на то, что реализации для $\mu(\phi^*)$ и μ_π записывались одновременно, коэффициенты корреляции между V_σ и V_π равны 0,7 и не зависят от сезона.

Как следует из табл. 3, коэффициенты корреляции вариаций обратного рассеяния с показателем объемного рассеяния и с относительной влажностью зависят от сезона, убывая от зимы к лету по мере увеличения прозрачности атмосферы, однако в целом они невелики.

Используя данные о вариациях показателя объемного рассеяния, можно оценить оптическую устойчивость атмосферы. С этой целью были отобраны серии измерений, в которых $V_\sigma \leq 5\%$. Для зимы их оказалось 66%, для весны 49% и для лета 47%. Относительно большое число случаев с устойчивыми дымками в зимний период связано с антициклональной активностью и с инверсией температуры. Ветровой режим, обусловленный горно-долинной циркуляцией воздуха, в этот период выражен слабее.

Статистическая обработка реализаций, отобранных по критерию $V_\sigma \leq 5\%$, показала, что разброс данных о показателе объемного рассеяния довольно значителен: вариации внутри числовых массивов превышают 100% для любого сезона, т.е. дымки с 5%-ной вариацией прозрачности отличаются широким диапазоном по плотности.

Таблица 4

Зависимость от длины волны первого собственного вектора Ψ^1 и соответствующая ошибка разложения δ

λ , нм	Ψ_σ^1	Ψ_μ^1	Ψ_ξ^1
532	0,763	0,794	0,189
650	0,608	0,550	0,344
993	0,219	0,261	0,920
δ , (%)	15,9	23,2	16,4

С целью проверки однородности зимних данных с $V_\sigma \leq 5\%$ был выполнен векторный анализ 51 реализации для трех длин волн (532, 650 и 993 нм) и трех оптических параметров (σ , μ_π и ξ). Он показал, что есть отклонения в спектральных зависимостях. Как видно из табл. 4 первый собственный вектор Ψ^1 непостоянен. Причем характер его изменчивости одинаков для оптических параметров σ , μ_π и противоположен для ξ . В табл. 4 приведены также ошибки разложения по первому вектору, показывающие, с какой точностью можно восстановить оптические параметры в длинах волн 650 и 993 нм по результатам измерений для $\lambda = 532$ нм.

Следует отметить, что погрешности подобных исследований существенно зависят от количества выбранных для обработки спектральных участков и критерия отбора наблюдательного материала.

В заключение следует отметить, что приведенные выше результаты статистической обработки указывают на явные повторяющиеся закономерности в сезонном изменении оптических параметров, которые являются хорошими индикаторами метеорологических ситуаций и движения воздушных масс. При изменении условий показатели объемного рассеяния варьируют в десятки раз, чутко реагируя на действие различных факторов. Именно это свойство приводит к тому, что взаимная корреляция отдельных оптических параметров и в особенности корреляция их с метеопараметрами выражены слабо. Это, в частности, характерно и для связи оптических характеристик с относительной влажностью, существенная роль которой ослабляется действием других факторов.

Исследования флуктуации показателей объемного и обратного рассеяния показывают, что оценка вариаций прозрачности атмосферы по данным об изменчивости лидарного рассеяния будет систематически заниженной. Это следует учитывать при разработке оптико-локационных прогностических моделей.

Авторы выражают благодарность с.н.с. Г.П. Базалицкой за помощь в проведении статистической обработки данных.

1. Климат г. Алма-Аты. Л.: Гидрометеоздат. 1985. 263 с.
2. Дербисалин М.А., Лившиц Г.Ш., Токарев О.Д. //Изв. АН СССР. ФАО. 1986. Т. 22. № 6. С. 588–594.
3. Торопова Т.П., Косьяненко А.Б. и др. //В кн.: Поле рассеянного излучения в земной атмосфере. Алма-Ата: Наука. 1974. С. 32–90.
4. Дербисалин М.А., Лившиц Г.Ш., Токарев О.Д. //В кн.: Материалы III Всес. совещания по распространению лазерного излучения в дисперсной среде. Ч. 1. Обнинск. 1985. С. 85–88.
5. Дербисалин М.А., Токарев О.Д., Торопова Т.П. //В кн.: Оптическое зондирование атмосферы. Алма-Ата: Наука. 1985. С. 58–78.
6. Ковалев В.А., Балденков Г.Н., Козинцев В.И. //Изв. АН СССР. ФАО. 1987. Т. 23. № 6. С. 611–615.
7. Крамер Г. Математические методы статистики. М.: Мир. 1975. 641 с.
8. Пришивалко А.П., Науменко Е.К. //Изв. АН СССР. ФАО. 1973. Т. 9. № 6. С. 660–663.

Казахский пединститут
им. Абая, Алма-Ата

Поступила в редакцию
30 марта 1988 г.

M. A. Derbisalin, G. Sh. Livshitz, O. D. Tokarev. Statistical Analysis of Industrial Aerosol Optical Parameters in Ground Atmospheric Layer.

The results of the long-term regular measurements on the spectral optical parameters of the ground atmospheric layer over Alma-Ata (Kazakhstan) in different seasons of 1985–1987 are reported. The mean volume scattering and backscattering factors and the coefficients of their variations are obtained. The aerosol optical parameters are found to be independent of wavelength, meteorological conditions and atmospheric turbidity. The backscattering variations are shown to be less pronounced than the volume scattering fluctuations.