

УДК 551.521.3

Сравнение однопараметрических и двухпараметрических моделей аэрозольного ослабления для экспериментальных данных аридной зоны Казахстана

Н.Н. Щелканов*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 21.05.2015 г.

Проведено сравнение четырех аэрозольных моделей: двух однопараметрических для приземного слоя аридной зоны Казахстана, двухпараметрической для горизонтальных трасс и двухпараметрической для горизонтальных и наклонных трасс. Показано, что модели, полученные с использованием новых методов построения линейной регрессии и разделения на компоненты, позволяют физически корректно восстанавливать не только значения коэффициентов аэрозольного ослабления, но и их среднеквадратические отклонения.

Ключевые слова: аэрозольное ослабление, однопараметрические модели, двухпараметрические модели; aerosol extinction, one-parametrical models, two-parametrical models.

Введение

Для расчета аэрозольного ослабления в инфракрасной области спектра часто используются однопараметрические и двухпараметрические модели или методики, входными параметрами которых служат коэффициенты ослабления или аэрозольные оптические толщи в видимой области спектра [1–18]. Это связано с тем, что большинство измерений спектральной прозрачности атмосферы проводятся в коротковолновой области спектра 0,4–1 мкм. Как правило, для построения однопараметрических моделей вида $Y = K_0 + K_1X$ используется линейная регрессия Y на X [19], а для построения двухпараметрических моделей вида $Y = K_0 + K_1X + K_2Z$ – регрессия Y на X и Z [20]. Для этих регрессий минимизируются суммы квадратов отклонений ΔY , и мы получаем минимальные значения коэффициентов регрессии K_1 , K_2 и максимальное значение K_0 . При этом следует указать, что теоретически эти регрессии можно использовать только в том случае, когда разброс точек в корреляционной связи величин X , Y и Z обусловлен только их случайными погрешностями. При построении же одно- и двухпараметрических моделей аэрозольного ослабления разброс точек в корреляционной связи величин X , Y и Z обусловлен как случайными погрешностями этих величин, так и неконтролируемыми физическими факторами. Поэтому для расчета коэффициентов регрессии в [21–25] предложены новые формулы,

которые получены с учетом случайных погрешностей измеряемых величин [26]. Цель работы заключается в том, чтобы показать, что модели, полученные с использованием новых формул (обобщенной формулы линейной регрессии [21–23] и нового метода разделения на компоненты [24, 25]), имеют преимущества по сравнению с широко применяемыми классическими формулами – регрессией Y на X и регрессией Y на X и Z .

1. Описание сравниваемых моделей

Для сравнения аэрозольных моделей использовались экспериментальные данные, полученные в аридной зоне Казахстана [27]. Массивы данных для трех сезонов года (весны, лета и осени) составляли 230, 167 и 192 спектров коэффициентов аэрозольного ослабления соответственно. Модельный расчет коэффициентов аэрозольного ослабления $\alpha_p(10,6)$ проводился в области спектра 10,6 мкм для весеннего, летнего, осеннего и общего массивов данных. В качестве входных параметров в четырех моделях использовались коэффициенты аэрозольного ослабления в областях спектра 0,69 и 0,48 мкм – $\alpha(0,69)$ и $\alpha(0,48)$.

Первая и вторая однопараметрические аэрозольные модели имеют вид

$$\alpha_p(10,6) = K_0 + K_1\alpha(0,69), \quad (1)$$

где K_0 и K_1 – коэффициенты регрессии.

Коэффициенты регрессии модели 1 находятся по формуле линейной регрессии $\alpha_p(10,6)$ на $\alpha(0,69)$ (табл. 1).

* Николай Николаевич Щелканов (snn@iao.ru).

Таблица 1

Коэффициенты регрессии модели 1 для весеннего, летнего, осеннего и общего массивов данных

Коэффициенты регрессии модели 1	Массив			
	весенний	летний	осенний	общий
K_0	0,024	0,020	0,011	0,027
K_1	0,164	0,770	0,741	0,348

Коэффициенты регрессии модели 2 находятся по обобщенной формуле линейной регрессии [21–23] с учетом случайных погрешностей измеренных коэффициентов аэрозольного ослабления $\alpha_n(10,6)$ и $\alpha(0,69)$ (табл. 2).

Таблица 2

Коэффициенты регрессии модели 2 для весеннего, летнего, осеннего и общего массивов данных

Коэффициенты регрессии модели 2	Массив			
	весенний	летний	осенний	общий
K_0	0,008	0,003	0,001	0,001
K_1	0,402	1,097	0,956	0,809

Модель 3 получена с использованием классической формулы двухпараметрической регрессии [20] и представляет собой двухпараметрическую модель с входными параметрами $\alpha(0,69)$ и $\alpha(0,48)$ [12]:

$$\alpha(\lambda) = \alpha_{см}(0,69) \left(\frac{\lambda}{0,69} \right)^{-n} + \alpha_{гд}(0,69) \frac{K(\lambda)}{K(0,69)}, \quad (2)$$

где

$$\alpha_{см}(0,69) = 0,67\alpha(0,48) - 0,26\alpha(0,69) - 0,023,$$

$$\alpha_{гд}(0,69) = 1,26\alpha(0,69) - 0,67\alpha(0,48) + 0,023$$

– коэффициенты ослабления субмикронной и грубодисперсной фракциями аэрозольных частиц на длине волны 0,69 мкм; $\alpha(0,48)$, $\alpha(0,69)$ – значения коэффициентов аэрозольного ослабления на длинах волн 0,48 и 0,69 мкм; $K(\lambda)$, $K(0,69)$ – коэффициенты, представляющие собой относительный спектральный ход коэффициента ослабления грубодисперсной фракции аэрозольных частиц;

$$n = -\ln\{[\alpha(0,48) - K(0,48)/K(0,69)\alpha_{гд}(0,69)] / [\alpha(0,69) - \alpha_{гд}(0,69)]\} / \ln(0,48/0,69).$$

Для расчета коэффициентов аэрозольного ослабления было взято значение $K(\lambda) = 1$.

Модель 4 получена с использованием нового метода разделения физической величины на две компоненты [24, 25]. Модель представляет собой вторую версию двухпараметрической модели для расчета аэрозольных оптических толщ атмосферы в зенит и коэффициентов аэрозольного ослабления в приземном слое атмосферы [13]:

$$\tau(\lambda) = (\tau_1 - \tau_2)k_1(1 + k_2\tau_2) \left(\frac{\lambda}{\lambda_2} \right)^{-n} + (\tau_2 - (\tau_1 - \tau_2)k_1(1 + k_2\tau_2)) \frac{K(\lambda)}{K(\lambda_2)}, \quad (3)$$

где τ_1 и τ_2 – аэрозольные оптические толщи атмосферы в зенит или коэффициенты аэрозольного ослабления в приземном слое атмосферы на длинах волн λ_1 и λ_2 ($\lambda_1 < \lambda_2$) в коротковолновой области спектра; k_1 , k_2 – параметры подгонки; $K(\lambda)$, $K(\lambda_2)$ – коэффициенты, представляющие собой относительный спектральный ход аэрозольных оптических толщ атмосферы для грубодисперсной фракции частиц;

$$n = -\ln\{[\tau_1 - (\tau_2 - (\tau_1 - \tau_2)k_1(1 + k_2\tau_2)) K(\lambda_1)/K(\lambda_2)] / [(\tau_1 - \tau_2)k_1(1 + k_2\tau_2)]\} / \ln(\lambda_1/\lambda_2).$$

Для расчета аэрозольных оптических толщ использовалось значение $K(\lambda) = 1$. Для пары длин волн $\lambda_1 = 0,48$ мкм, $\lambda_2 = 0,69$ мкм получены следующие значения параметров подгонки: $k_1 = 0,7$, $k_2 = 5$.

2. Анализ результатов сравнения моделей

На рис. 1 приведены коэффициенты аэрозольного ослабления на длине волны 10,6 мкм, измеренные $\alpha_n(10,6)$ и рассчитанные $\alpha_p(10,6)$ по двум однопараметрическим и двум двухпараметрическим моделям аэрозольного ослабления. Сравнение коэффициентов проведено на основе общего массива данных, насчитывающего 589 спектров, где коэффициенты аэрозольного ослабления на длине волны 0,55 мкм достигали значения $0,27 \text{ км}^{-1}$. Для этого массива данных величина значимого коэффициента корреляции с доверительной вероятностью 99,9% составляет 0,14.

Здесь коэффициенты корреляции между $\alpha_n(10,6)$ и $\alpha_p(10,6)$ для двух однопараметрических моделей 1 и 2 равны 0,43, для двухпараметрических моделей 3 и 4 – 0,75 и 0,77 соответственно. На рис. 1 сплошными линиями показаны $\alpha_n(10,6) = \alpha_p(10,6)$, а пунктиром обозначен коридор $\pm 0,026 \text{ км}^{-1}$ с доверительной вероятностью 95% для модели 4. Для модели 1 за пределами этого коридора находится 67 точек (11%), для модели 2 – 76 точек (13%), для модели 3 – 38 точек (6%), для модели 4 – 29 точек (5%). Следует обратить внимание на тот факт, что модели, полученные с использованием классических формул линейной регрессии (модели 1 и 3), при минимальных коэффициентах ослабления дают завышенные значения $\alpha_p(10,6)$, а при максимальных – заниженные. Так, модель 1 дает завышенные значения коэффициентов при $\alpha_n(10,6) < 0,03 \text{ км}^{-1}$ и заниженные – при $\alpha_n(10,6) > 0,07 \text{ км}^{-1}$. Причем эти завышения и занижения коэффициентов ослабления для представленного массива данных достигают $0,03 \text{ км}^{-1}$ и $0,06 \text{ км}^{-1}$ соответственно. Тот же самый недостаток, но в несколько меньшей степени относится и к модели 3, где она дает завышенные значения коэффициентов при $\alpha_n(10,6) < 0,02 \text{ км}^{-1}$ и заниженные – при $\alpha_n(10,6) > 0,09 \text{ км}^{-1}$. Этих недостатков практически нет у модели 4, которая по всем рассмотренным показателям является лучшей.

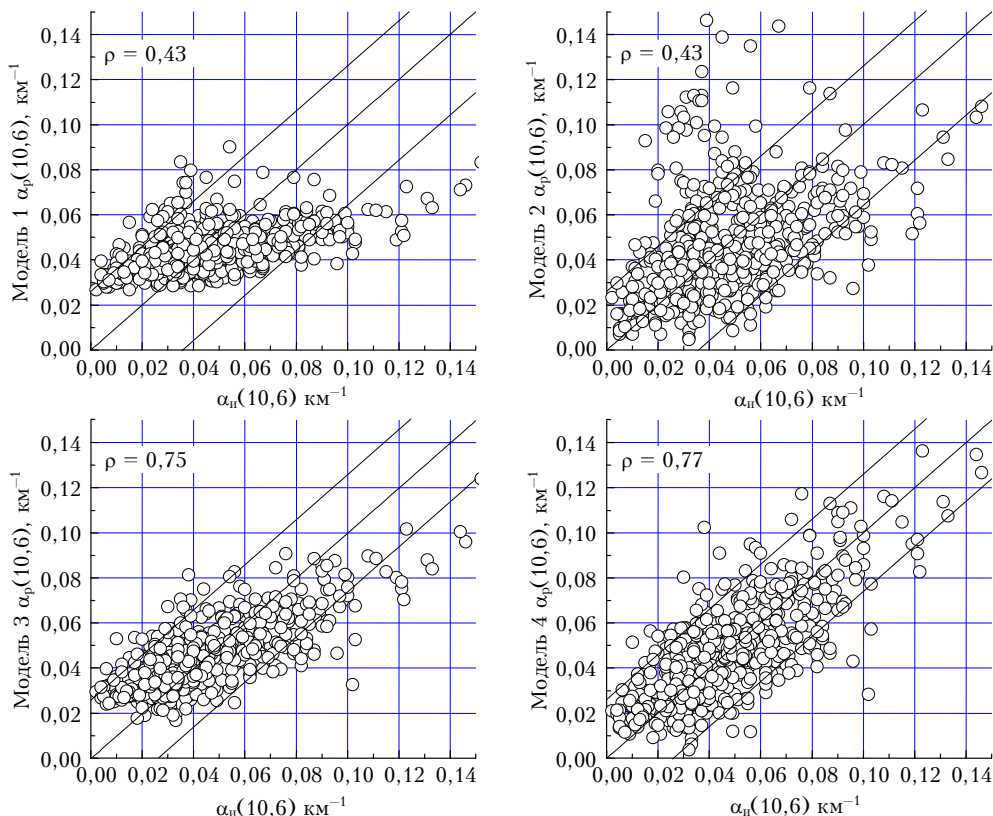


Рис. 1. Сравнение коэффициентов аэрозольного ослабления излучения в области 10,6 мкм, измеренных $\alpha_n(10,6)$ и рассчитанных $\alpha_p(10,6)$ по четырем моделям для общего массива данных

На рис. 2 приведены гистограммы распределения разницы между коэффициентами аэрозольного ослабления на длине волны 10,6 мкм.

Среднеквадратическое отклонение (СКО) числа точек в гистограммах распределения от нормального закона распределения для моделей 1, 2, 3 и 4 составило 12, 11, 7 и 5 соответственно. Таким образом, для моделей 2 и 4, полученных с использованием новых методов построения линейной регрессии, распределение разности $\alpha_n(10,6) - \alpha_p(10,6)$ лучше соответствует нормальному закону распределения, чем для моделей, полученных с применением классических методов. При этом лучше других

нормальному закону распределения соответствует разность $\alpha_n(10,6) - \alpha_p(10,6)$ для двухпараметрической модели 4.

В табл. 3 приведены СКО коэффициентов аэрозольного ослабления на длине волны 10,6 мкм, измеренных $\alpha_n(10,6)$ и рассчитанных $\alpha_p(10,6)$ по моделям 1, 2, 3 и 4 для весеннего, летнего, осеннего и общего массивов данных.

Из табл. 3 видно, что модели 1 и 3, полученные с использованием классических формул линейной регрессии, дают заниженные значения СКО $\alpha_p(10,6)$ на 19–60 и 20–42% соответственно. Для моделей 2 и 4, полученных с использованием новых

Таблица 3

Среднеквадратические отклонения коэффициентов аэрозольного ослабления на длине волны 10,6 мкм, измеренных $\alpha_n(10,6)$ и рассчитанных $\alpha_p(10,6)$ по моделям 1, 2, 3 и 4 для четырех массивов данных. В скобках указаны разность СКО $\alpha_n(10,6) - \text{СКО } \alpha_p(10,6)$ и ее доля по отношению к $\alpha_n(10,6)$

СКО $\alpha_n(10,6)$, км ⁻¹	СКО $\alpha_p(10,6)$ по модели 1, км ⁻¹	СКО $\alpha_p(10,6)$ по модели 2, км ⁻¹	СКО $\alpha_p(10,6)$ по модели 3, км ⁻¹	СКО $\alpha_p(10,6)$ по модели 4, км ⁻¹
<i>Весенний массив</i>				
0,015	0,006 (+0,009 или 60%)	0,014 (+0,001 или 7%)	0,012 (+0,003 или 20%)	0,016 (-0,001 или 7%)
<i>Летний массив</i>				
0,026	0,018 (+0,008 или 31%)	0,026 (0,000 или <2%)	0,016 (+0,010 или 38%)	0,025 (+0,001 или 4%)
<i>Осенний массив</i>				
0,026	0,021 (+0,005 или 19%)	0,026 (0,000 или <2%)	0,015 (+0,011 или 42%)	0,024 (+0,002 или 8%)
<i>Общий массив</i>				
0,025	0,011 (+0,014 или 56%)	0,025 (0,000 или <2%)	0,015 (-0,010 или 40%)	0,023 (+0,002 или 8%)

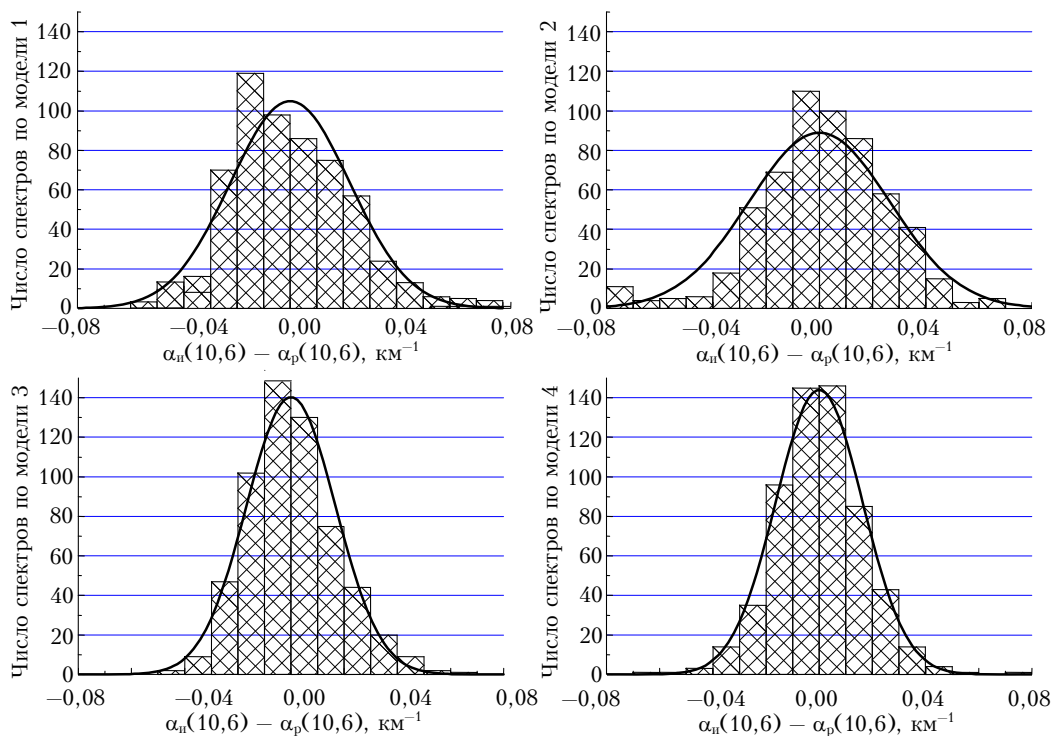


Рис. 2. Распределение разницы между коэффициентами аэрозольного ослабления на длине волны 10,6 мкм, измеренными $\alpha_n(10,6)$ и рассчитанными $\alpha_p(10,6)$ по четырем моделям для общего массива данных

формул линейной регрессии, различия между измеренными и рассчитанными значениями СКО не превышают 7–8%, и только эти модели можно рекомендовать для оценки СКО коэффициентов аэрозольного ослабления.

Для оценки качества моделей можно рассчитать их случайные среднеквадратические погрешности (СКП) по модифицированной формуле [19]:

$$\begin{aligned}
 \text{СКП}(10,6) = & \left[\text{СКО}^2(\alpha_n(10,6) - \alpha_p(10,6)) - \delta_{\text{сл}}^2 \alpha_n(10,6) - \right. \\
 & \left. - \left(\frac{\partial \alpha_p(10,6)}{\partial \alpha(0,69)} \right)^2 \delta_{\text{сл}}^2 \alpha(0,69) - \left(\frac{\partial \alpha_p(10,6)}{\partial \alpha(0,48)} \right)^2 \delta_{\text{сл}}^2 \alpha(0,48) \right]^{1/2}, \quad (4)
 \end{aligned}$$

где $\text{СКО}(\alpha_n(10,6) - \alpha_p(10,6))$ – СКО разности $\alpha_n(10,6) - \alpha_p(10,6)$; $\delta_{\text{сл}} \alpha_n(10,6)$, $\delta_{\text{сл}} \alpha(0,69)$, $\delta_{\text{сл}} \alpha(0,48)$ – случайные среднеквадратические погрешности из-

мерения коэффициентов ослабления $\alpha_n(10,6)$, $\alpha(0,69)$ и $\alpha(0,48)$; $\frac{\partial \alpha_p(10,6)}{\partial \alpha(0,69)}$, $\frac{\partial \alpha_p(10,6)}{\partial \alpha(0,48)}$ – частные производные. СКП модели $\alpha_p(10,6)$ численно равна СКО разности $\alpha_n(10,6) - \alpha_p(10,6)$ при условии, что случайные погрешности $\delta_{\text{сл}} \alpha_n(10,6)$, $\delta_{\text{сл}} \alpha(0,69)$, $\delta_{\text{сл}} \alpha(0,48)$ равны нулю. СКП модели определяется диапазоном изменчивости функции распределения аэрозольных частиц по размерам и их оптических постоянных.

В табл. 4 приведены значения параметров, необходимых для расчета СКП-моделей. Здесь СКО $(\alpha_n(10,6) - \alpha_p(10,6))$ – СКО разности $\alpha_n(10,6) - \alpha_p(10,6)$ на длине волны 10,6 мкм; $\delta_{\text{сл}} \alpha_n(\lambda)$ – случайные среднеквадратические погрешности измеренных коэффициентов ослабления на трех длинах волн $\lambda = 10,6; 0,69$ и $0,48$ мкм; $\bar{\alpha}_n(10,6)$, $\bar{\alpha}(0,69)$, $\bar{\alpha}(0,48)$ – средние значения измеренных коэффициентов ослабления.

Таблица 4

Среднеквадратические отклонения разности между коэффициентами аэрозольного ослабления, измеренными $\alpha_n(10,6)$ и рассчитанными $\alpha_p(10,6)$ по четырем моделям, случайные среднеквадратические погрешности коэффициентов ослабления $\delta_{\text{сл}} \alpha(\lambda)$ и их средние значения для трех длин волн $\lambda = 10,6; 0,69$ и $0,48$ мкм

Массив	СКО($\alpha_n(10,6) - \alpha_p(10,6)$), км ⁻¹				$\delta_{\text{сл}} \alpha(\lambda)$, км ⁻¹	$\bar{\alpha}_n(10,6)$, км ⁻¹	$\bar{\alpha}(0,69)$, км ⁻¹	$\bar{\alpha}(0,48)$, км ⁻¹
	Модель 1	Модель 2	Модель 3	Модель 4				
Весенний	0,014	0,016	0,014	0,015	0,004	0,035	0,066	0,104
Летний	0,018	0,020	0,018	0,019	0,005	0,062	0,054	0,058
Осенний	0,017	0,018	0,017	0,015	0,003	0,048	0,049	0,065
Общий	0,022	0,026	0,017	0,016	0,004	0,047	0,057	0,078

В табл. 5 приведены СКП моделей $\alpha_p(10,6)$, рассчитанные по формуле (4) для весеннего, летнего, осеннего и общего массивов данных.

Таблица 5

Случайные среднеквадратические погрешности четырех моделей $\alpha_p(10,6)$

Массив	Модель 1	Модель 2	Модель 3	Модель 4
Весенний	0,013	0,015	0,012	0,012
Летний	0,017	0,019	0,016	0,015
Осенний	0,017	0,018	0,016	0,013
Общий	0,022	0,025	0,016	0,013

Из табл. 5 видно, что для однопараметрических моделей 1 и 2 случайные среднеквадратические погрешности составили 0,013–0,025 км⁻¹, а для двухпараметрических моделей 3 и 4 – 0,012–0,016 км⁻¹. При этом для двухпараметрической модели 4 погрешности оказались минимальными и составили 0,012–0,015 км⁻¹.

Заключение

Таким образом, использование новых формул линейной регрессии [21–25] позволяет получать физически корректные однопараметрические и двухпараметрические модели для расчета коэффициентов аэрозольного ослабления. Физическая корректность моделей заключается в двух моментах. 1. При использовании новых формул линейной регрессии экспериментальные и расчетные данные разбросаны вокруг прямой с наклоном, равным единице, и модели дают корректные значения коэффициентов ослабления. В то же время модели, полученные с использованием классических формул линейной регрессии, при малых значениях коэффициентов аэрозольного ослабления дают завышенные значения и при больших – заниженные. 2. При использовании новых формул регрессии среднеквадратические отклонения экспериментальных и расчетных данных оказываются близкими между собой, в то время как модели, рассчитанные по классическим формулам, всегда дают заниженные значения СКО коэффициентов аэрозольного ослабления.

Результаты сравнения коэффициентов аэрозольного ослабления, измеренных $\alpha_d(10,6)$ и рассчитанных $\alpha_p(10,6)$ на длине волны 10,6 мкм, и анализа их разности для двух однопараметрических и двух двухпараметрических моделей по всем сравниваемым параметрам (число точек, выпадающих за пределы коридора $\pm 0,026$ км⁻¹, близость к нормальному закону распределения, минимум случайной среднеквадратической погрешности модели) показали, что двухпараметрическая модель для горизонтальных и наклонных трасс [13], полученная с использованием нового метода разделения на компоненты [24, 25], наилучшим образом описывает экспериментальные данные, полученные в аридной зоне Казахстана.

1. Малкевич М.С., Георгиевский Ю.С., Чавро А.И., Шукуров А.Х. Статистические характеристики спектральной структуры ослабления радиации в приземном слое воздуха // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1977. Т. 13, № 12. С. 1257–1267.
2. Горчаков Г.И., Свириденков М.А. Статистическая модель оптических характеристик атмосферной дымки // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1979. Т. 15, № 1. С. 53–59.
3. Филиппов В.Л., Макаров А.С., Иванов В.П. Статистические характеристики ослабления видимой и ИК-радиации в приземном слое атмосферы // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1979. Т. 15, № 3. С. 257–265.
4. Горчаков Г.И., Емиленко А.С., Свириденков М.А. Однопараметрическая модель приземного аэрозоля // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1981. Т. 17, № 1. С. 39–49.
5. Филиппов В.Л., Макаров А.С., Иванов В.П. Построение региональных полумпирических моделей оптических характеристик атмосферы // Докл. АН СССР. 1982. Т. 265, № 6. С. 1353–1356.
6. A preliminary cloudless standart atmosphere for radiation computation. World climate research programme. WCP-112, WMO/TD N 24. 1986. 60 p.
7. Веретенников В.В., Кабанов М.В., Панченко М.В., Фадеев В.Я. Однопараметрическая модель дымки в задачах зондирования // Оптика атмосфер. 1988. Т. 1, № 2. С. 25–31.
8. Кабанов М.В., Панченко М.В., Пхалагов Ю.А., Веретенников В.В., Ужegov В.Н., Фадеев В.Я. Оптические свойства прибрежных атмосферных дымок. Новосибирск: Наука, 1988. 201 с.
9. Панченко М.В., Польшкин В.В., Пхалагов Ю.А., Щелканов Н.Н. Статистические связи оптических и микрофизических характеристик аэрозоля аридной зоны // Оптика атмосфер. и океана. 1993. Т. 6, № 8. С. 905–912.
10. Hess M., Koepke P., Schult I. Optical properties of aerosols and clouds: The software package OPAC // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 1998. V. 79, N 5. P. 831–844.
11. Shchelkanov N.N., Pkhalagov Yu.A. Two-Parameterical Model of Aerosol Extinction in the Wavelength Range 0.4–12 μm // Proc. SPIE – The International Society for Optical Engineering. 1999. V. 3983. P. 32–35.
12. Щелканов Н.Н., Пхалагов Ю.А. Двухпараметрическая модель аэрозольного ослабления для атмосферных дымок // Оптика атмосфер. и океана. 1999. Т. 12, № 12. С. 1089–1092.
13. Щелканов Н.Н. Двухпараметрическая модель аэрозольного ослабления в области спектра 0,4–12 мкм для горизонтальных и наклонных трасс // Оптика атмосфер. и океана. 2002. Т. 15, № 12. С. 1114–1117.
14. Белов В.В., Тарасенков М.В., Пискунов К.П. Параметрическая модель солнечной дымки в видимой и УФ-области спектра // Оптика атмосфер. и океана. 2010. Т. 23, № 4. С. 294–297.
15. Panchenko M.V., Zhuravleva T.B., Terpugova S.A., Polkin V.V., Kozlov V.S. An empirical model of optical and radiative characteristics of the tropospheric aerosol over West Siberia in summer // Atmos. Meas. Tech. 2012. V. 5, N 7. P. 1513–1527.
16. Щелканов Н.Н., Пхалагов Ю.А. Однопараметрические сезонные модели аэрозольного ослабления в области спектра 0,44–11,5 мкм для приземного слоя атмосферы аридной зоны // Оптика атмосфер. и океана. 2014. Т. 27, № 8. С. 673–678.

17. *Shchelkanov N.N., Pkhalagov Yu.A.* One-parameter seasonal models of aerosol extinction for the near-ground layer of the atmosphere in arid zone // Proc. SPIE. 2014. V. 9292. 3U. 7 p.
18. *Сакерин С.М., Береснев С.А., Кабанов Д.М., Корниенко Г.И., Николашкин С.В., Поддубный В.А., Тащилин М.А., Турчинович Ю.С., Holben V.N., Smirnov A.* Анализ подходов моделирования годового и спектрального хода аэрозольной оптической толщи атмосферы в регионах Сибири и Приморья // Оптика атмосфер. и океана. 2014. Т. 27, № 12. С. 1047–1058.
19. *Зайдель А.Н.* Погрешности измерений физических величин. Л.: Наука, 1985. 112 с.
20. *Кramer Г.* Математические методы статистики. М.: Мир, 1975. 648 с.
21. *Shchelkanov N.N.* Application of a generalized formula of linear regression for construction of one-parameter models of aerosol extinction // Proc. SPIE – The International Society for Optical Engineering. 2004. V. 5743. P. 384–392.
22. *Щелканов Н.Н.* Обобщенный метод построения линейной регрессии и его применение для построения однопараметрических моделей аэрозольного ослабления // Оптика атмосфер. и океана. 2005. Т. 18, № 1–2. С. 86–90.
23. *Щелканов Н.Н.* Новый метод нахождения коэффициентов линейной регрессии между двумя физическими величинами // Вестн. ТГУ. Управление, вычислительная техника и информатика. 2010. № 4 (13). С. 91–96.
24. *Shchelkanov N.N.* Iterative method of separation of the extinction coefficients into two components // Proc. SPIE. 2006. V. 6522. 65221O. 5 p.
25. *Щелканов Н.Н.* Новый метод разделения физической величины на две компоненты // Вестн. ТГУ. Управление, вычислительная техника и информатика. 2013. № 4 (25). С. 125–128.
26. *Щелканов Н.Н.* Методы вычисления случайных погрешностей параметров окружающей среды из экспериментальных данных // Оптика атмосфер. и океана. 2012. Т. 25, № 9. С. 815–821.
27. *Пхалагов Ю.А., Ужегов В.Н., Щелканов Н.Н.* Аэрозольное ослабление оптического излучения в атмосфере аридной зоны // Оптика атмосфер. и океана. 1994. Т. 7, № 10. С. 1318–1329.

N.N. Shchelkanov. Comparison of one-parametrical and two-parametrical models of aerosol extinction for experimental data of an arid zone of Kazakhstan.

Comparison of four aerosol models is carried out: two one-parametrical models for a ground layer of an arid zone of Kazakhstan, two-parametrical model for horizontal routes and two-parametrical model for horizontal and inclined routes. It is shown that the models received with use of new methods of creation of linear regression and division into components allow one to restore physically correctly not only values of coefficients of aerosol extinction, but also their mean square deviations.