

М.В. Панченко, С.А. Терпугова

**ПРИМЕНЕНИЕ ТРЕХСЛОЙНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПРОФИЛЯ СОДЕРЖАНИЯ СУБМИКРОННОГО АЭРОЗОЛЯ В НИЖНЕЙ ТРОПОСФЕРЕ**

*Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск*

Поступила в редакцию 26.07.99 г.

Предлагается в качестве первого приближения в нижней тропосфере использовать представление о трехслойном распределении аэрозоля по высоте: от 0 до  $H_1$  – приземный слой, до  $H_2$  – слой перемешивания, выше – свободная атмосфера. В приземном слое проведена параметризация по барическим образованиям. Высота слоя перемешивания рассчитывалась на основе данных об интегральной прогремости нижних слоев атмосферы. Наклон профиля в слое перемешивания оценивался исходя из его статистической связи с приземным значением коэффициента рассеяния и средней температурой слоя перемешивания.

В настоящей статье, базирующейся на данных самолетных нефелометрических исследований [1, 2] в нижней тропосфере над территорией Западной Сибири, обсуждается вопрос о возможности простой параметризации вертикального профиля содержания субмикронных частиц в нижней тропосфере. В качестве параметра, связанного с объемной концентрацией частиц, рассматривается коэффициент рассеяния при нулевых значениях относительной влажности воздуха  $\sigma_d(H)$  [2].

Проведенные ранее исследования показали, что основные сезонные закономерности изменчивости профилей  $\sigma_d(H)$  неплохо укладываются в представление о трехслойном распределении аэрозоля по высоте [2, 3]. Схематично такое представление изображено на рис. 1. Здесь выделяют следующие диапазоны высот: 1) приземный слой высотой  $H_1$ , в котором наблюдаются значительные суточные вариации аэрозольных и метеорологических параметров; 2) пограничный слой, или слой перемешивания (по определению К.Я. Кондратьева [4, 5] – зона активного турбулентного обмена), в котором высота  $H_2$  изменяется от сезона к сезону и концентрация аэрозоля и его оптические характеристики обычно предполагаются постоянными по высоте; 3) слой свободной атмосферы. Между слоем перемешивания и свободной атмосферой, как правило, существует переходная зона толщиной ~ 200–400 м.

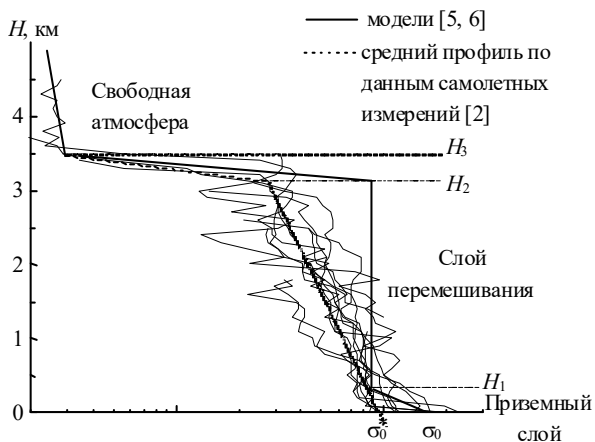


Рис. 1. Схема вертикального профиля коэффициента рассеяния в виде трех слоев

Рассмотрим применимость такого подхода к отдельным реализациям аэрозольного профиля для конкретного региона. Все измеренные профили были проанализированы с точки зрения возможности их представления в виде трех слоев [7]. Точки  $H_1$ ,  $H_2$  и  $H_3$  определялись по графику соответствующего профиля как высоты, где происходит резкое изменение темпа убывания коэффициента рассеяния сухого аэрозоля с ростом высоты. В каждом из слоев профиль аппроксимировался формулой

$$\sigma_d(H) = \sigma_d(H_{0,i}) \exp[-\alpha_i(H - H_{0,i})], \tag{1}$$

где  $H$  – высота;  $\alpha_i$  – параметр, определяющий наклон профиля в соответствующем слое;  $H_{0,i}$  – нижняя граница рассматриваемого слоя.

В табл. 1 даны соответствующие среднесезонные значения высоты и параметра наклона профиля  $\alpha_i$  [см. формулу (1)].

Таблица 1

**Среднесезонные значения параметров трехслойной аппроксимации профиля коэффициента рассеяния**

	$H_1$ , км	$H_2$ , км	$H_3$ , км	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$
Зима	0,03	0,28	0,38	0,35	7,5	2,6	0,71
Весна	0,04	1,26	1,58	4,0	0,29	3,0	0,4
Лето	0,06	1,94	2,2	1,9	0,19	5,2	0,44
Осень	0,08	1,25	1,55	3,1	0,34	4,5	0,34

На рис. 2 представлены круговые диаграммы, которые показывают, какой процент реализаций из данного подмассива удовлетворительно описывается трехслойным представлением. Из рисунка видно, что представление вертикального профиля в виде трех слоев справедливо прежде всего летом, зимой же оно применимо только для ограниченного числа ситуаций. Весной и осенью такое представление реализуется в основном в устойчивых погодных условиях в малоподвижных воздушных массах, т.е. трехуровневая модель достаточно хорошо описывает вертикальный профиль аэрозоля для тех ситуаций, когда процесс формирования профиля является достаточно длительным. В иных условиях аэрозольный профиль имеет более сложную многослойную структуру.

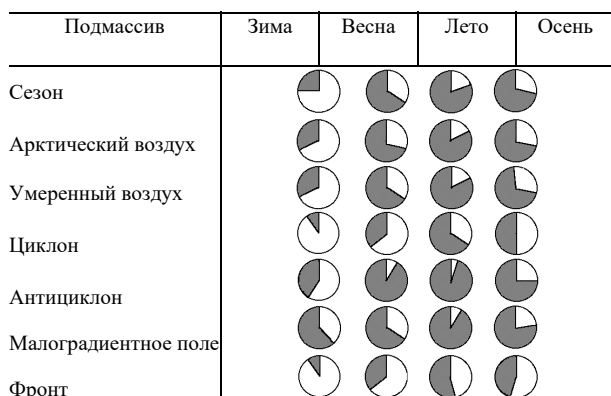


Рис. 2. Применимость трехуровневой модели к описанию вертикальных профилей коэффициента рассеяния в различных синоптических ситуациях

Рассмотрим теперь параметризацию аэрозольного профиля в каждом слое более подробно.

Приземный слой атмосферы высотой ~ 100 м является наиболее изменчивым. В нем происходят самые большие вариации как метеорологических параметров, так и концентрации аэрозольных частиц, и наиболее существенно проявляется влияние подстилающей поверхности, сезона, времени суток, ветра и т.п. В существующих моделях [4–6] для приземного слоя отмечается, что концентрация аэрозоля резко уменьшается с ростом высоты. Однако данные измерений показывают, что это происходит не всегда. Достаточно надежным критерием существования приземного слоя в вертикальном распределении аэрозоля может служить наличие температурной инверсии, но эти данные не всегда доступны, поэтому нами была сделана попытка оценить параметры аэрозольного профиля в приземном слое по синоптическим признакам.

В табл. 2 для разных сезонов представлены данные о том, в скольких процентах реализаций в разных воздушных массах и барических образованиях наблюдается наличие приземного аэрозольного слоя. Ярко выраженный приземный аэрозольный слой летом и осенью практически всегда наблюдается в арктических воздушных массах, а в умеренных массах – лишь в областях повышенного давления. В умеренных массах осенью и для весенних ситуаций параметризацию провести не удастся из-за плохой статистической обеспеченности массива данных.

Какой-либо значимой зависимости существования приземного слоя от времени суток в нашем массиве данных не обнаружено.

В слое перемешивания содержание аэрозоля зачастую предполагается постоянным по высоте [5, 6]. Но, как показывает анализ большого числа экспериментальных данных (на рис. 1 они показаны тонкими линиями), это представление справедливо лишь в качестве первого приближения, поскольку в условиях, когда основные источники аэрозоля расположены у земной поверхности, для обеспечения постоянного по высоте содержания аэрозоля потребовалось бы его практически мгновенное перемешивание.

Для оценки высоты слоя перемешивания в метеорологии используются различные методики [5, 9–11]. Однако при определении этой высоты через активность турбулентного обмена (что с точки зрения основного механизма абсолютно верно) возникает ряд проблем, поскольку на процессы турбулентного обмена по вертикали сильно влияют суточный ход температуры и состояние подстилающей поверхности, а также постепенный межсуточный нагрев (или выхолаживание) всей нижней тропосферы. Аэрозольные процессы гораздо более инерционны, и высота  $H_2$  обусловлена сравнительно длительным перемешиванием частиц по вертикали [11], происходящим в течение времени жизни данной воздушной массы.

Таблица 2

**Количество профилей (%), при моделировании которых нужно учитывать приземный аэрозольный слой**

Весна							
Арктический воздух – 44			Умеренный воздух – 26				
Циклон	–	день	37	Циклон	33	день	14
Антициклон	25	вечер	72	Антициклон	66	вечер	67
Малогradientное поле	–	ночь	33	Малогradientное поле	0	ночь	40
Гребень	50	утро	–	Гребень	–	утро	–
Ложбина	–			Ложбина	–		
Лето							
Арктический воздух – 75			Умеренный воздух – 50				
Циклон	85	день	67	Циклон	25	день	46
Антициклон	75	вечер	50	Антициклон	100	вечер	50
Малогradientное поле	100	ночь	92	Малогradientное поле	100	ночь	52
Гребень	100	утро	100	Гребень	67	утро	–
Ложбина	–			Ложбина	33		
Осень							
Арктический воздух – 63			Умеренный воздух – 57				
Циклон	60	день	57	Циклон	40	день	50
Антициклон	63	вечер	50	Антициклон	67	вечер	52
Малогradientное поле	50	ночь	77	Малогradientное поле	–	ночь	67
Гребень	–	утро	–	Гребень	80	утро	–
Ложбина	34			Ложбина	–		

Отсюда понятно, что имеется возможность в качестве параметра, реагирующего на интенсивность и длительность нагрева (или охлаждения), использовать интегральные характеристики температуры в нижнем слое тропосферы в целом.

При определении высоты слоя перемешивания для каждого профиля была вычислена средняя температура  $\bar{T}_i$  слоев разной высоты. На рис. 3 приведены корреляционные диаграммы между высотой слоя перемешивания и средней температурой слоя от 0 до 3 км. Из рисунка видно, что связь между  $H_2$  и  $\bar{T}_3$  явно нелинейна, а при переходе к логарифмическому масштабу высоты она линейаризуется. В табл. 3 приведены коэффициенты корреляции между высотой  $H_2$  и средней температурой слоев разной высоты. Исходя из этого соотношение между высотой слоя перемешивания  $H_2$  и  $\bar{T}_i$  определялось в виде

$$\ln(H_2) = A_i \bar{T}_i + B_i. \quad (2)$$

**Коэффициенты корреляции между высотой слоя перемешивания и средней температурой слоев атмосферы различной высоты**

$H$ , км	$\rho_{H_2, \bar{T}_i}$	$\rho_{\ln H_2, \bar{T}_i}$
0,5	0,56	0,76
1	0,61	0,80
1,5	0,65	0,80
2	0,67	0,81
2,5	0,70	0,82
3	0,72	0,82
3,5	0,73	0,83
4	0,5	0,87
4,5	0,74	0,84
5	0,73	0,84

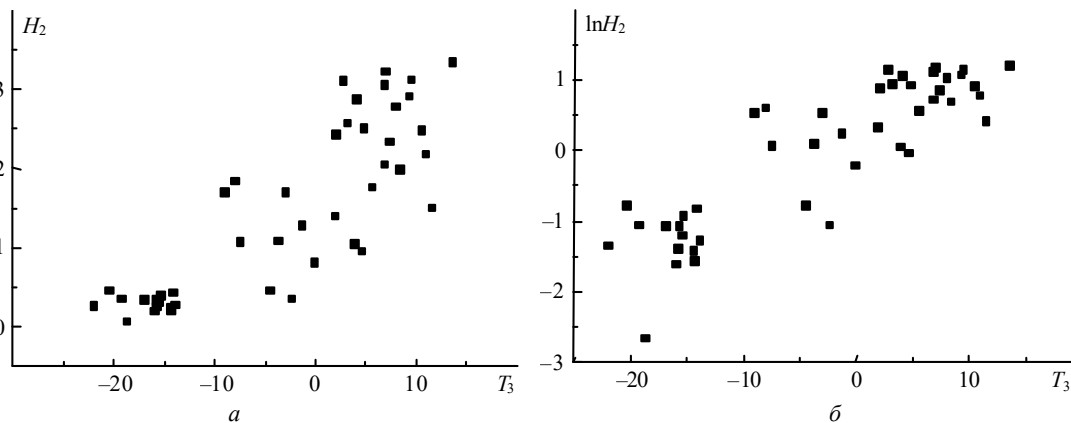


Рис. 3. Корреляционные диаграммы между высотой слоя перемешивания и средней температурой слоя 0–3 км:  $a$  – линейный масштаб по высоте;  $b$  – логарифмический

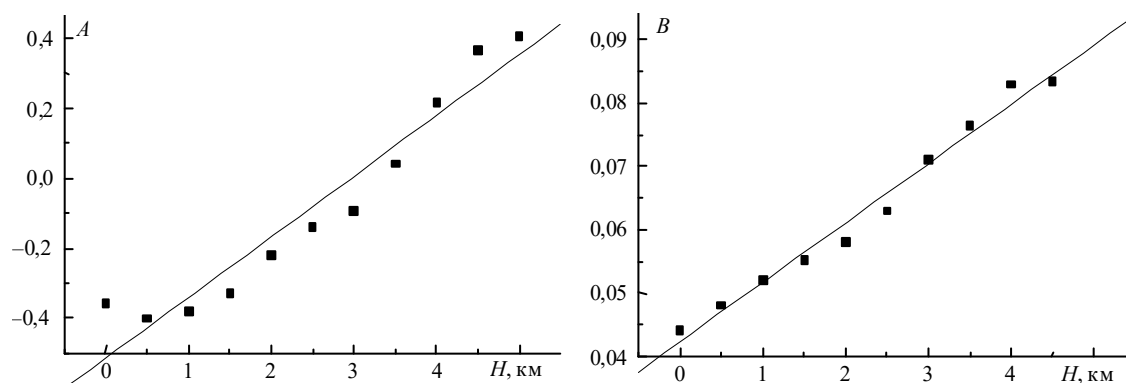


Рис. 4. Коэффициенты регрессионного уравнения для восстановления высоты слоя перемешивания

На рис. 4 приведены зависимости коэффициентов  $A$  и  $B$  от высоты слоя, в котором производилось усреднение температуры. Видим, что зависимости близки к линейным, что дает основание оценить данные коэффициенты по соответствующим регрессионным уравнениям:

$$A = -0,514 + 0,173 H; \quad (3)$$

$$B = 0,042 + 0,0094 H.$$

Следовательно, для оценки высоты  $H_2$  можно воспользоваться следующей единой зависимостью:

$$H_2 = 0,6 \exp [(0,04 + 0,01 \tilde{H}) T_{\tilde{H}} + 0,2 \tilde{H}], \quad (4)$$

где  $T_{\tilde{H}}$  – средняя температура слоя, °С, имеющего высоту  $\tilde{H}$ , км.

Основными факторами, определяющими наклон профиля в слое перемешивания, могут быть следующие:

- 1) мощность приземных источников аэрозоля;
- 2) скорость переноса аэрозоля по вертикали.

В качестве параметра, характеризующего интенсивность приземных источников аэрозоля, может рассматриваться приземное значение коэффициента рассеяния  $\sigma_0$ . (При оценке параметров слоя перемешивания [8] приземный слой не рассматривался. В случае, когда на экспериментальных данных он отчетливо проявлялся, для анализа и восстановления  $\sigma(H)$  использовалось значение  $\sigma_0^*$ , определяемое путем экстраполяции профиля в слое перемешивания до земной поверхности).

Известно, что скорость упорядоченных вертикальных движений в атмосфере определяется градиентом температуры [12, 13]. И естественно, на первом этапе была сделана попытка связать параметр наклона профиля в слое перемешивания  $\alpha_2$  со средним градиентом температуры в этом слое.

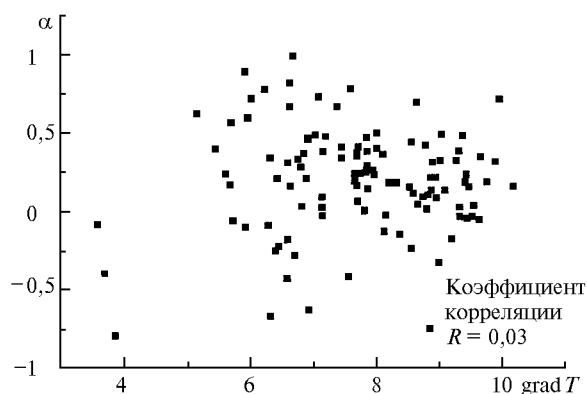


Рис. 5. Корреляционная диаграмма между коэффициентом наклона профиля в слое перемешивания и средним градиентом температуры

Соответствующая корреляционная диаграмма и значение коэффициента корреляции приведены на рис. 5. Из рисунка видно, что напрямую данные параметры между собой не связаны. Это вполне понятно, поскольку перемешивание аэрозоля по вертикали является процессом гораздо более инерционным, чем вариации температурной стратификации. Поэтому гораздо логичнее связать наклон профиля не с градиентом, а со средней прогретостью нижних слоев атмосферы (под прогретостью будем понимать среднюю температуру слоя атмосферы от подстилающей поверхности до некоторой высоты  $H$ ).

Таблица 4

**Полные и частные коэффициенты корреляции наклона профиля в слое перемешивания с логарифмом приземного значения коэффициента рассеяния и средней температурой слоя атмосферы 0–3 км**

Коэффициент корреляции	Весна	Лето	Осень	Все сезоны
$\rho_{\alpha, \ln \sigma_0}$	0,37	0,55	0,51	0,50
$\rho_{\alpha, \bar{T}}$	0,32	0,45	0,38	0,41
$\rho_{\alpha, \ln \sigma_0   \bar{T}}$	0,52	0,65	0,55	0,57
$\rho_{\alpha, \bar{T}   \ln \sigma_0}$	0,15	0,20	0,16	0,18

Для восстановления профиля были использованы приземное значение коэффициента рассеяния и средняя температура слоя 0–3 км  $\bar{T}_3$ . В табл. 4 приведены полные и частные коэффициенты корреляции между указанными параметрами для разных сезонов и всего массива данных.

Далее возможны два способа оценки наклона профиля:

1) по одному параметру  $\sigma_0$ . В этом случае было построено следующее регрессионное уравнение:

$$\alpha_2 = 0,89 + 0,24 \ln \sigma_0; \quad (5)$$

2) по двум параметрам  $\sigma_0$  и  $\bar{T}_3$  (строилась двухпараметрическая линейная регрессия):

$$\alpha_2 = 0,26 + 0,1 \ln \sigma_0 + 0,02 \bar{T}_3, \quad (6)$$

где  $\sigma_0$  в  $\text{км}^{-1}$ , температура в  $^{\circ}\text{C}$ .

В табл. 5 приведена среднеквадратическая ошибка определения параметра  $\alpha_2$ .

Таблица 5

**Среднеквадратическая ошибка определения параметра наклона профиля в слое перемешивания**

Среднеквадратическое отклонение	Весна	Лето	Осень
Исходный массив	0,37	0,34	0,37
Определение по $\sigma_0$	0,25	0,18	0,24
Определение по $\sigma_0$ и $T$	0,20	0,14	0,20

Для свободной атмосферы были взяты среднесезонные значения параметров профиля, поскольку понятно, что в этом слое содержание аэрозоля уже гораздо меньше связано с приземными источниками в пункте наблюдения и имеет некий региональный характер. Следовательно, и восстановление профиля с использованием лишь значения  $\sigma_0$  нецелесообразно. На рис. 6 приведены среднеквадратические ошибки

$$\varepsilon(H) = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [\sigma_{\text{восст}}(H) - \sigma_{\text{изм},i}(H)]^2}$$

восстановления профиля коэффициента рассеяния «сухого» аэрозоля для разных сезонов в случае учета одного ( $\sigma_0$ ) или двух ( $\sigma_0$  и  $\bar{T}_3$ ) параметров для восстановления профиля в слое перемешивания.

Из рис. 6 видно, что учет приземного значения коэффициента рассеяния и средней температуры нижних слоев атмосферы позволяет достичь уменьшения среднеквадратической ошибки восстановления вертикального профиля аэрозоля в слое перемешивания более чем в два раза по сравнению с дисперсией исходного массива данных для сезонов года, когда основные источники аэрозоля расположены у земной поверхности.

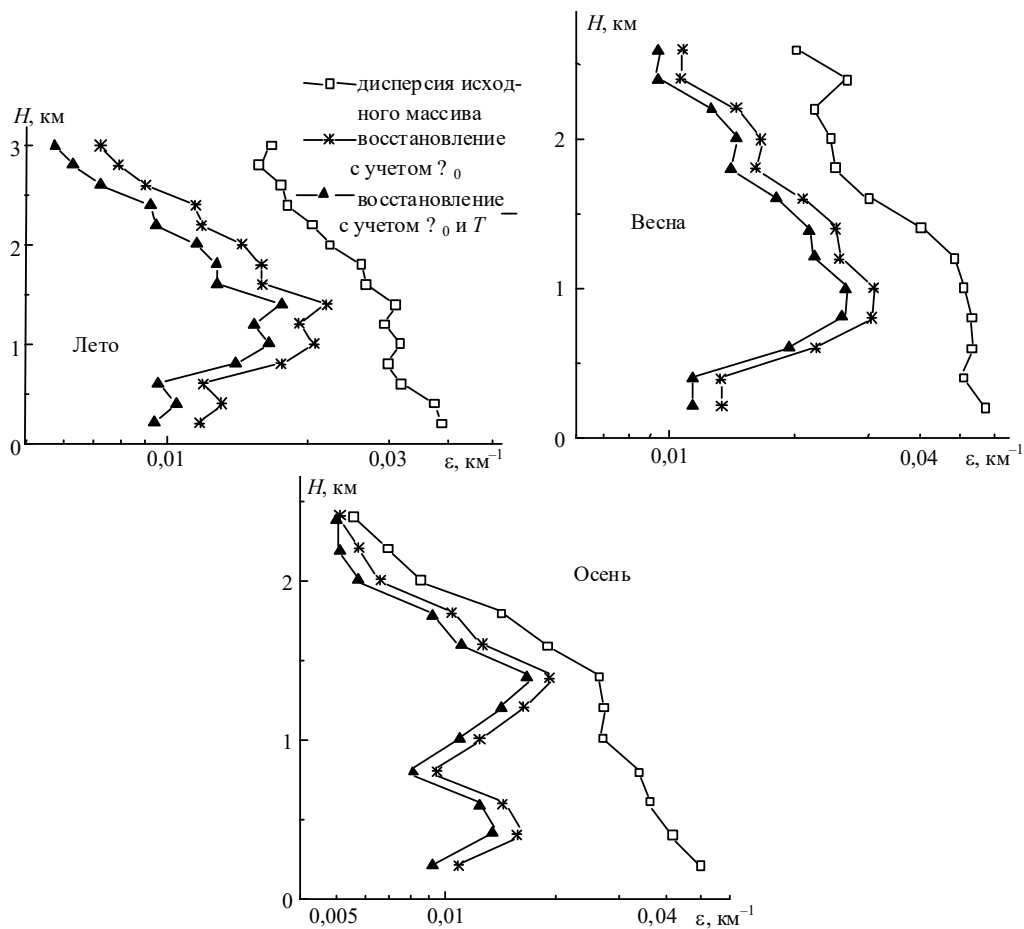


Рис. 6. Среднеквадратическая ошибка восстановления профиля аэрозольного коэффициента рассеяния в слое перемешивания для разных сезонов

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант № 95-05-14195.

1. Панченко М.В., Терпугова С.А. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. № 8. С. 1022–1032.
2. Панченко М.В., Терпугова С.А. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. № 8. С. 1033–1044.
3. Дябин Ю.П., Танташев М.В., Мирумянц С.О., Марусяк В.Д. // Изв. АН СССР. Сер. ФАО. 1977. Т. 13. № 11. С. 1205–1211.
4. Аэрозоль и климат / Под ред. К.Я. Кондратьева. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 542 с.
5. Кондратьев К.Я., Москаленко Н.И., Поздняков Д.В. Атмосферный аэрозоль. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 224 с.
6. Зув В.Е., Креков Г.М. Оптические модели атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 256 с.

7. Терпугова С.А., Панченко М.В. // II Межреспубл. симп. «Оптика атмосферы и океана»: Тез. докл. Томск, 1995. С. 78.
8. Терпугова С.А., Панченко М.В. // III Межреспубл. симп. «Оптика атмосферы и океана»: Тез. докл. Томск, 1996. С. 83.
9. Белан Б.Д. // Оптика атмосферы и океана. 1994. Т. 7. № 8. С. 1045–1054.
10. Бызова Н.Л., Гаргер Е.К., Иванов В.Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 280 с.
11. Кузнецова И.Н. // Труды Гидрометцентра СССР. 1989. Вып. 289. С. 99–103.
12. Динамическая метеорология / Под ред. Д.Л. Лайхтмана. Л.: Гидрометеоздат, 1976. 608 с.
13. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1984. 752 с.

**M.V. Panchenko, S.A. Terpugova. Description of Vertical Profile of Submicron Aerosol Content in Low Troposphere Through Three-layer Representation.**

Three-layer vertical distribution of aerosol in low troposphere may be accepted as the first approximation: ground layer from 0 to  $H_1$ , up to  $H_2$  is the mixing layer, and higher is the free atmosphere. Parametrization over baric formations has been made for the ground layer. The height of the mixing layer was calculated from the data on integral heating of low atmospheric layers. The profil slope in the mixing layer was estimated based on its statistical correlation to its mean temperature and near-ground value of the scattering coefficient.