

УДК 551.521; 535.31

Микрофизическая модель аэрозольной атмосферы Беларуси и сопредельных регионов

И.Л. Кацев, Э.П. Зеге, А.С. Прихач*

*Институт физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси
220072, г. Минск, пр. Независимости, 68, Беларусь*

Поступила в редакцию 5.05.2016 г.

Представлена статистическая микрофизическая модель атмосферного аэрозоля для весенне-летне-осеннего периода на территории Беларуси и Польши, разработанная по результатам многолетних измерений на станциях AERONET в г. Минск и Бельск (Польша). Модель может быть использована при выполнении атмосферной коррекции спутниковых данных по результатам космического мониторинга Земли. Согласно этой модели аэрозоль состоит из двух фракций (мелкая и крупная) с логнормальным распределением частиц по размерам и с фиксированными значениями средних размеров и среднеквадратических отклонений, а также с фиксированными значениями действительной и мнимой частей показателя преломления в каждой из них. Крупная фракция аэрозоля состоит из двух частей: сферические и несферические (сфероидальные) частицы. Единственным переменным параметром такой модели является соотношение объемных концентраций мелкой и крупной фракций. Показано, что параметры аэрозольной модели Беларуси и Польши близки к параметрам модели аэрозоля *moderately absorbing*, характерной для Западной Европы.

Ключевые слова: аэрозольная атмосфера, атмосферная коррекция, региональная модель; aerosol atmosphere, atmospheric correction, regional model.

Введение

К настоящему времени разработано большое число методов и алгоритмов для восстановления параметров атмосферного аэрозоля и проведения атмосферной коррекции спутниковых данных по результатам космического мониторинга Земли [1–3]. Некоторые из них используют результаты только спектральных измерений, другие – спектральных и угловых измерений, а наиболее сложные алгоритмы – практически весь объем информации, доступной в оптическом диапазоне: данные спектральных, многоугловых и поляризационных измерений (обзор последних см. в [3]). Однако многие спутниковые инструменты не позволяют получать такой большой объем информации об атмосфере. К ним относятся, в частности, многозональные спутниковые системы высокого пространственного разрешения, к которым принадлежат белорусский спутник БКА и российский спутник Канопус-В.

На БКА и Канопус-В имеются четыре спектральных канала с шириной порядка 40–100 нм. При этом только в трех из них практически отсутствует поглощение атмосферных газов, а в четвертый, в ближнем ИК-диапазоне, попадает полоса поглощения водяного пара. Использование широких спектральных каналов диктуется необходимостью обеспечения достаточно высокого отношения сигнал-шум при высоком пространственном разрешении (порядка 10 м).

Малое число спектральных каналов и сравнительно большая их ширина затрудняют получение информации об аэрозольной атмосфере и, соответственно, выполнение атмосферной коррекции, т.е. восстановление истинных (неискаженных атмосферой) спектральных откликов подстилающей поверхности. Действительно, при малом объеме получаемой информации возможно восстановление лишь малого числа параметров, характеризующих атмосферу и подстилающую поверхность. При этом характеристики атмосферы и поверхности должны определяться одновременно из одних и тех же спутниковых данных. В этом специфика и одна из серьезных проблем обработки данных многозональных спутниковых инструментов. Решение этой задачи невозможно без использования значительного объема априорной информации. Одним из способов привлечения такой априорной информации является использование региональной аэрозольной модели атмосферы.

В настоящей статье представлены результаты по разработке модели аэрозольной атмосферы Беларуси и сопредельных регионов.

1. Микрофизическая модель аэрозольной атмосферы Беларуси и Польши

Микрофизические характеристики аэрозоля восстанавливались на основании обработки результатов многолетних систематических измерений радиометром CIMEL [4] на станциях AERONET в г. Минск

* Иосиф Лейбович Кацев (katsev@light.basnet.by);
Элеонора Петровна Зеге (eleonor@light.basnet.by);
Александр Сергеевич Прихач (alexpr@light.basnet.by).

(Беларусь) и Бельск (Польша). Как известно, радиометр CIMEL производит одновременные измерения оптической толщины атмосферы и яркости неба в альмукантарате на длинах волн 340; 380; 440; 500; 675; 870; 1020 и 1640 нм. По этим данным с помощью алгоритма [5] восстанавливается ряд параметров аэрозольной атмосферы, в частности функция распределения частиц по размерам, комплексный показатель преломления частиц, доля сферических (или несферических) частиц. Функция распределения частиц по размерам восстанавливается в 22 интервалах в диапазоне 0,05–15 мкм. По ней определяются параметры мелкой и крупной аэрозольных фракций. Граница между мелкой и крупной фракциями проводится по минимуму в функции распределения в области 0,439–0,992 мкм.

Полная функция распределения объемов аэрозольных частиц по размерам аппроксимируется суммой двух одномодальных логнормальных распределений вида

$$\frac{dV(r)}{d\ln r} = \frac{V_0}{\sigma_v \sqrt{2\pi}} \exp\left[-(\ln r - \ln r_v)^2 / 2\sigma_v^2\right] \quad (1)$$

для мелкой и крупной фракций соответственно, где $V(r)$ – объем частицы радиуса r ; V_0 – полный объем аэрозольных частиц, а медианный радиус r_v и среднеквадратическое отклонение (СКО) натурального логарифма радиусов частиц σ_v определены следующим образом:

$$\ln r_v = \frac{\int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \ln r \frac{dV(r)}{d\ln r} d\ln r}{\int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \frac{dV(r)}{d\ln r} d\ln r}, \quad (2)$$

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{\int_{r_{\min}}^{r_{\max}} (\ln r - \ln r_v)^2 \frac{dV(r)}{d\ln r} d\ln r}{\int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \frac{dV(r)}{d\ln r} d\ln r}}. \quad (3)$$

Как показал анализ, такая аппроксимация в большинстве случаев вполне удовлетворительна.

Результаты статистической обработки данных АERONET в г. Минск и Бельск за период 2003–2009 гг. представлены в табл. 1–3. Здесь приведены средние значения рассматриваемых величин, а также (в процентах от среднего) показаны СКО.

Из табл. 1 видно, что как в Беларуси, так и в Польше средние значения параметров r_v и σ_v для частиц мелкой и крупной фракций достаточно устойчивы по годам и варьируют сравнительно слабо, в то время как отношение объемных концентраций крупной и мелкой фракций изменяется весьма существенно. Заметим, что доля сферических частиц в аэрозольной атмосфере Польши несколько стабильнее, чем в атмосфере Беларуси, т.е. ее вариации меньше.

На рис. 1 параметры r_v и σ_v для мелкой и крупной фракций по данным станций АERONET в г. Минск и Бельск, осредненные за период 2003–2009 гг., представлены в зависимости от месяца наблюдения. Вертикальными линиями показаны среднеквадратические отклонения данных. Из рис. 1 видно, что эти микрофизические параметры аэрозоля для г. Минск и Бельск отличаются сравнительно слабо. Это отличие особенно мало для мелкой фракции, определяющей рассеяние в области углов порядка 100–160°, характерной для спутниковых наблюдений Земли. Кроме того, в весенне-летне-осенний период (март–сентябрь) средние значения этих

Таблица 1

Параметры r_v и σ_v для частиц мелкой и крупной фракций аэрозоля, а также доля сферических частиц и отношение объемных концентраций крупной (V_c) и мелкой фракций (V_f) по данным станции АERONET в г. Минск (верхняя строка) и Бельск (нижняя строка), осредненные по годам за период 2003–2009 гг.

Год	Количество измерений	Частицы мелкой фракции		Частицы крупной фракции		Доля сферических частиц	V_c/V_f
		r_v , мкм	σ_v	r_v , мкм	σ_v		
2003	501	0,174 ± 18%	0,46 ± 19%	3,09 ± 27%	0,62 ± 17%	0,71 ± 54%	1,67 ± 183%
	47	0,241 ± 12%	0,49 ± 09%	2,87 ± 21%	0,66 ± 09%	0,94 ± 19%	0,27 ± 84%
2004	266	0,165 ± 14%	0,44 ± 12%	3,01 ± 13%	0,67 ± 10%	0,85 ± 32%	0,99 ± 67%
	380	0,170 ± 17%	0,44 ± 16%	2,87 ± 21%	0,69 ± 11%	0,79 ± 42%	1,52 ± 308%
2005	498	0,173 ± 20%	0,45 ± 16%	3,08 ± 23%	0,66 ± 13%	0,74 ± 51%	1,25 ± 92%
	682	0,168 ± 17%	0,45 ± 15%	2,91 ± 22%	0,68 ± 11%	0,82 ± 37%	1,27 ± 164%
2006	399	0,173 ± 18%	0,45 ± 13%	3,00 ± 23%	0,68 ± 11%	0,77 ± 45%	1,15 ± 111%
	631	0,172 ± 21%	0,43 ± 15%	2,76 ± 20%	0,67 ± 10%	0,84 ± 35%	1,05 ± 89%
2007	284	0,172 ± 23%	0,45 ± 14%	2,83 ± 23%	0,71 ± 11%	0,62 ± 66%	1,61 ± 158%
	304	0,168 ± 18%	0,45 ± 14%	2,60 ± 31%	0,72 ± 12%	0,60 ± 64%	1,44 ± 88%
2008	394	0,164 ± 14%	0,46 ± 12%	3,08 ± 22%	0,69 ± 13%	0,59 ± 69%	1,85 ± 90%
	583	0,173 ± 19%	0,46 ± 13%	2,94 ± 22%	0,67 ± 11%	0,71 ± 53%	1,85 ± 86%
2009	410	0,169 ± 19%	0,47 ± 17%	3,19 ± 18%	0,68 ± 11%	0,69 ± 54%	1,28 ± 87%
	366	0,173 ± 17%	0,52 ± 19%	3,36 ± 29%	0,67 ± 17%	0,67 ± 59%	1,57 ± 81%

Таблица 2

Параметры r_v и σ_v для частиц мелкой и крупной фракций аэрозоля, а также доля сферических частиц и отношение объемных концентраций крупной и мелкой фракций по данным станции AERONET в г. Минск (верхняя строка) и Бельск (нижняя строка), осредненные по месяцу за период 2003–2009 гг.

Месяц	Количество измерений	Частицы мелкой фракции		Частицы крупной фракции		Доля сферических частиц	V_c/V_f
		r_v , мкм	σ_v	r_v , мкм	σ_v		
Январь	67	0,228 ± 18%	0,57 ± 11%	3,37 ± 23%	0,63 ± 12%	0,80 ± 40%	0,81 ± 180%
	68	0,226 ± 23%	0,53 ± 13%	2,85 ± 31%	0,68 ± 13%	0,71 ± 58%	0,83 ± 177%
Февраль	127	0,208 ± 23%	0,53 ± 16%	3,34 ± 23%	0,64 ± 14%	0,78 ± 43%	1,29 ± 278%
	94	0,212 ± 20%	0,53 ± 14%	2,83 ± 27%	0,66 ± 11%	0,85 ± 34%	0,58 ± 143%
Март	325	0,196 ± 20%	0,49 ± 19%	2,82 ± 24%	0,70 ± 13%	0,82 ± 38%	1,06 ± 114%
	221	0,183 ± 22%	0,49 ± 16%	2,59 ± 29%	0,71 ± 12%	0,80 ± 40%	1,02 ± 210%
Апрель	574	0,165 ± 17%	0,45 ± 12%	2,97 ± 24%	0,71 ± 12%	0,65 ± 61%	1,38 ± 78%
	560	0,168 ± 14%	0,45 ± 13%	2,61 ± 28%	0,72 ± 10%	0,75 ± 45%	1,26 ± 103%
Май	354	0,162 ± 16%	0,44 ± 12%	2,94 ± 21%	0,72 ± 10%	0,53 ± 77%	1,99 ± 178%
	583	0,163 ± 16%	0,44 ± 12%	2,58 ± 22%	0,72 ± 10%	0,66 ± 59%	1,65 ± 81%
Июнь	246	0,164 ± 11%	0,44 ± 12%	2,93 ± 27%	0,68 ± 13%	0,53 ± 74%	2,10 ± 78%
	441	0,162 ± 13%	0,43 ± 12%	2,72 ± 18%	0,69 ± 09%	0,82 ± 38%	1,43 ± 86%
Июль	426	0,161 ± 11%	0,42 ± 11%	2,93 ± 16%	0,65 ± 12%	0,88 ± 30%	1,08 ± 102%
	540	0,159 ± 13%	0,42 ± 12%	3,22 ± 21%	0,64 ± 12%	0,87 ± 32%	1,36 ± 83%
Август	536	0,171 ± 15%	0,45 ± 14%	3,02 ± 13%	0,64 ± 09%	0,84 ± 35%	1,09 ± 97%
	486	0,171 ± 15%	0,46 ± 18%	3,32 ± 26%	0,63 ± 13%	0,75 ± 50%	1,76 ± 261%
Сентябрь	424	0,167 ± 16%	0,46 ± 15%	3,05 ± 22%	0,63 ± 13%	0,72 ± 52%	1,38 ± 96%
	572	0,169 ± 15%	0,46 ± 17%	2,91 ± 20%	0,66 ± 11%	0,81 ± 39%	1,30 ± 108%
Октябрь	158	0,167 ± 15%	0,48 ± 11%	3,45 ± 22%	0,64 ± 15%	0,59 ± 73%	1,18 ± 74%
	306	0,189 ± 18%	0,49 ± 15%	3,04 ± 17%	0,67 ± 11%	0,85 ± 33%	0,83 ± 151%
Ноябрь	54	0,181 ± 19%	0,50 ± 14%	3,76 ± 28%	0,61 ± 23%	0,41 ± 102%	1,67 ± 79%
	74	0,208 ± 24%	0,52 ± 14%	3,08 ± 27%	0,66 ± 14%	0,70 ± 49%	1,02 ± 211%
Декабрь	35	0,199 ± 20%	0,57 ± 13%	2,92 ± 28%	0,68 ± 15%	0,83 ± 37%	0,53 ± 127%
	35	0,215 ± 21%	0,53 ± 11%	2,94 ± 31%	0,68 ± 10%	0,84 ± 24%	4,72 ± 312%
Среднее за апрель–сентябрь		0,165	0,44	2,97	0,67	0,69	1,5
		0,165	0,44	2,89	0,68	0,78	1,46

Таблица 3

Аэрозольная оптическая толщина (АОТ) мелкой фракции аэрозольных частиц по данным станции AERONET в г. Минск (верхняя строка) и Бельск (нижняя строка), осредненная по месяцу за период 2003–2009 гг.

Месяц	АОТ мелкой фракции		АОТ крупной фракции	
	440 нм	675 нм	440 нм	675 нм
1	2	3	4	5
Январь	0,15 ± 62%	0,08 ± 64%	0,01 ± 367%	0,01 ± 374%
	0,17 ± 44%	0,09 ± 58%	0,01 ± 183%	0,01 ± 181%
Февраль	0,17 ± 69%	0,09 ± 81%	0,02 ± 385%	0,02 ± 391%
	0,16 ± 58%	0,09 ± 64%	0,01 ± 169%	0,01 ± 170%
Март	0,23 ± 107%	0,11 ± 112%	0,02 ± 212%	0,02 ± 213%
	0,26 ± 55%	0,13 ± 64%	0,04 ± 431%	0,04 ± 428%
Апрель	0,27 ± 77%	0,12 ± 80%	0,03 ± 177%	0,04 ± 177%
	0,28 ± 75%	0,13 ± 83%	0,03 ± 168%	0,04 ± 168%
Май	0,25 ± 83%	0,12 ± 82%	0,04 ± 136%	0,04 ± 137%
	0,20 ± 83%	0,09 ± 90%	0,03 ± 99%	0,03 ± 100%
Июнь	0,16 ± 50%	0,07 ± 49%	0,04 ± 99%	0,04 ± 101%
	0,17 ± 59%	0,07 ± 63%	0,02 ± 65%	0,02 ± 65%
Июль	0,20 ± 55%	0,09 ± 61%	0,02 ± 113%	0,02 ± 115%
	0,22 ± 64%	0,10 ± 73%	0,02 ± 198%	0,02 ± 202%

1	2	3	4	5
Август	0,33 ± 82%	0,16 ± 98%	0,03 ± 272%	0,03 ± 277%
	0,26 ± 73%	0,12 ± 81%	0,03 ± 271%	0,03 ± 266%
Сентябрь	0,31 ± 119%	0,15 ± 139%	0,03 ± 84%	0,03 ± 85%
	0,23 ± 81%	0,11 ± 94%	0,02 ± 92%	0,02 ± 92%
Октябрь	0,17 ± 65%	0,08 ± 68%	0,02 ± 106%	0,02 ± 107%
	0,19 ± 68%	0,10 ± 75%	0,01 ± 286%	0,02 ± 294%
Ноябрь	0,15 ± 62%	0,08 ± 74%	0,02 ± 106%	0,02 ± 109%
	0,21 ± 43%	0,12 ± 51%	0,02 ± 264%	0,03 ± 265%
Декабрь	0,16 ± 62%	0,09 ± 67%	0,01 ± 131%	0,01 ± 129%
	0,18 ± 48%	0,10 ± 57%	0,04 ± 259%	0,04 ± 258%
Среднее за апрель–сентябрь	0,25	0,12	0,032	0,033
	0,23	0,10	0,025	0,027

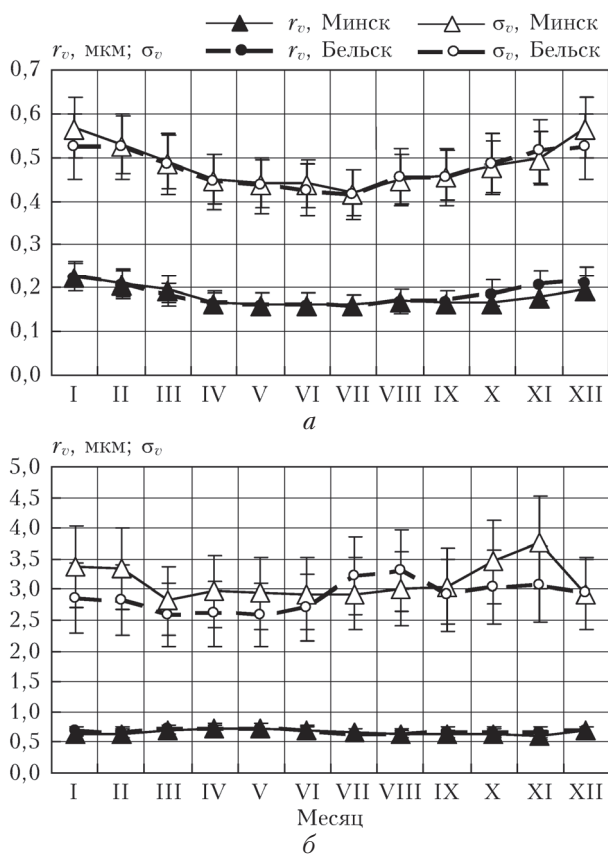


Рис. 1. Параметры r_v и σ_v в функции распределения частиц по размерам (1) для мелкой (а) и крупной (б) фракций аэрозоля по данным станций AERONET в г. Минск и Бельск в зависимости от месяца наблюдения с осреднением за период 2003–2009 гг. Вертикальные линии показывают среднеквадратические отклонения

параметров достаточно стабильны, а в осенне-зимний период заметно отличаются. Такое отличие может быть связано как с трудными условиями измерений в этот период (малая статистика измерений, влияние облачности и т.д.), так и с реальным изменением свойств аэрозоля. Средние значения r_v и σ_v для устойчивого весенне-летне-осеннего периода равны соответственно 0,165 мкм и 0,44 для мелкой фракции и 2,9 мкм и 0,67 для крупной фракции.

Однако отмеченная выше стабильность величин r_v и σ_v для частиц мелкой и крупной фракций характерна только для среднемесячных значений. В то же время в течение месяца эти параметры варьируют весьма существенно. Это видно как из табл. 2, так и из рис. 1, где вертикальными линиями показаны среднеквадратические отклонения рассматриваемых параметров.

На рис. 2 представлены отношения объемных концентраций крупной и мелкой фракций в распределении аэрозольных частиц по размерам и доля сферических частиц в аэрозоле для г. Минск и Бельск. Вертикальными линиями показаны СКО для данных по г. Минск. Заметим, что в соответствии с методикой обработки данных AERONET считается, что, во-первых, доля сферических частиц одинакова как для мелких, так и для крупных частиц, и, во-вторых, несферические частицы предполагаются сферическими с определенной функцией распределения соотношения осей сфероидов [6]. Видно, что как отношение объемных концентраций крупной и мелкой фракций, так и доля сферических частиц в аэрозоле варьируют весьма заметно, и их нельзя считать стабильными. При этом различия между данными для г. Минск и Бельск лежат в пределах среднеквадратического отклонения.

На рис. 3 показаны действительная и мнимая части показателя преломления частиц на длинах волн 440; 675 и 870 нм по данным станций AERONET в г. Минск и г. Бельск. Как и средний размер частиц, среднемесячные значения мнимой части показателя преломления достаточно стабильны для весенне-летне-осеннего периода (март–сентябрь). Кроме того, как действительная, так и мнимая части показателя преломления слабо зависят от длины волны.

Следует отметить, что значения мнимой части показателя преломления в г. Бельск, как правило, несколько меньше, чем в г. Минск. Это говорит о меньшей поглощательной способности аэрозоля и, соответственно, о несколько большей вероятности выживания фотона для г. Бельск. Следует заметить, что определение комплексного показателя преломления частиц по данным AERONET недостаточно надежно.

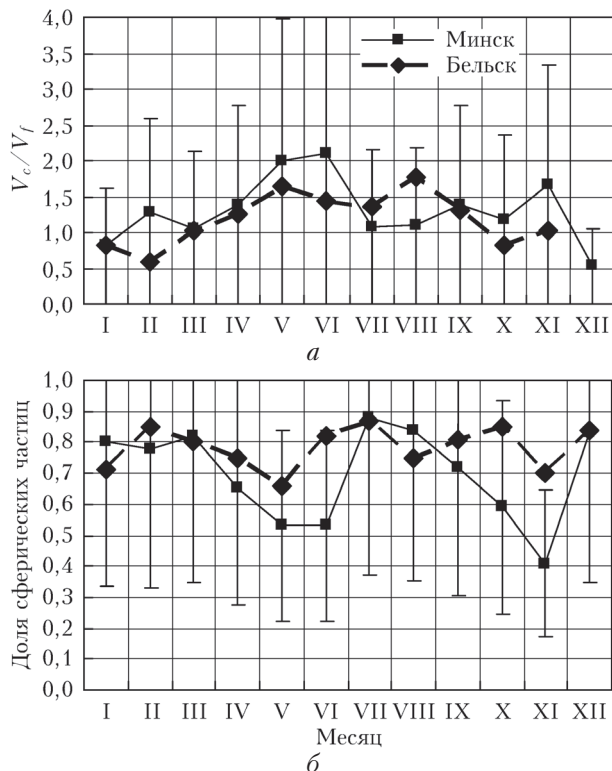


Рис. 2. Отношение объемных концентраций крупной и мелкой фракций в распределении аэрозольных частиц по размерам (а) и доля сферических частиц в аэрозоле (б). Вертикальные линии показывают среднеквадратические отклонения

Таким образом, на основании вышеизложенного может быть предложена следующая микрофизическая модель аэрозольной атмосферы для весенне-летне-осеннего периода на территории Беларуси и Польши. Аэрозоль состоит из двух фракций (мелкая и крупная) с логнормальным распределением частиц по размерам типа (1) в каждой из них и с фиксированными значениями параметров r_v и σ_v , а также с фиксированными значениями действительной и мнимой частей показателя преломления. Крупная фракция аэрозоля состоит из двух частей: сферические и несферические (сфероидальные) частицы. Долю сферической части можно приблизительно оценить по регрессионному соотношению $y = 1,04 - 0,255V_c/V_f$. Единственным переменным параметром такой модели является соотношение V_c/V_f объемных концентраций крупной и мелкой фракций. Фиксируемые параметры такой микрофизической модели аэрозольной атмосферы представлены в табл. 4 (n и χ – действительная и мнимая части комплексного показателя преломления аэрозольных частиц).

2. Сравнение параметров аэрозоля в Беларуси и сопредельных регионах

Можно ожидать, что предложенная микрофизическая модель аэрозольной атмосферы может использоваться не только для территорий Беларуси и Польши.

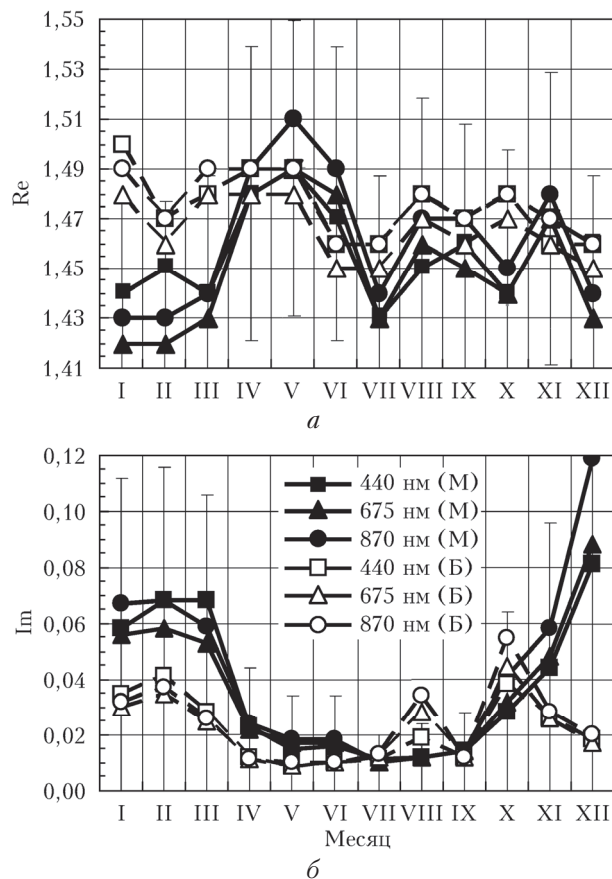


Рис. 3. Действительная (а) и мнимая (б) части показателя преломления частиц на длинах волн 440; 675 и 870 нм по данным станций AERONET в г. Минск (М) и Бельск (Б). Вертикальные линии показывают среднеквадратические отклонения

Анализ огромного массива данных, собранных по всему миру, позволил авторам [7, 8] классифицировать сферическую фракцию аэрозоля по регионам. При этом было выделено три типа аэрозоля сферической фракции: умеренно поглощающий (moderately absorbing), слабо поглощающий (weakly absorbing, или non-absorbing) и сильно поглощающий (strongly absorbing). В соответствии с классификацией [7, 8] Беларусь, как и Польша и вся Западная Европа, попадают в зону умеренно поглощающего (moderately absorbing) аэрозоля. Поэтому можно ожидать, что модель аэрозоля, выработанная на основании совместного анализа измерений в Беларуси и Польше, окажется пригодной для обработки спутниковых данных для всей Европы.

В табл. 5 представлено сравнение параметров микрофизической модели аэрозольной атмосферы для весенне-летне-осеннего периода для территорий Беларуси и Польши и модели MODIS (moderately absorbing) по данным [7, 8]. Видно, что параметры аэрозольной модели Беларуси близки к параметрам модели moderately absorbing, т.е. к параметрам аэрозоля для Западной Европы.

Заметим, что, как показывает анализ приведенных в [7, 8] данных, параметры r_v и σ_v для мелкой и крупной сферических фракций для moderately

Таблица 4

**Параметры микрофизической модели аэрозольной атмосферы
для весенне-летне-осеннего периода на территории Беларуси и Польши**

Мелкая фракция		Крупная фракция			n	χ
r_v , МКМ	σ_v	r_v , МКМ	σ_v	Доля сферической части		
0,165	0,44	2,97	0,67	$1,04 - 0,255V_c/V_f$	1,47	0,015

Таблица 5

**Параметры микрофизической модели аэрозольной атмосферы для весенне-летне-осеннего периода
для территорий Беларуси и Польши и модели MODIS**

Модель		Мелкая фракция		Крупная фракция		n		χ	
		r_v , МКМ	σ_v	r_v , МКМ	σ_v	440 нм	1020 нм	440 нм	1020 нм
Беларусь и Польша	Среднее	0,165	0,44	2,95	0,67	1,463	1,478	0,015	0,016
	СКО	0,025	0,06	0,6	0,08	0,06		0,015	
	Среднее \pm СКО	0,14–0,19	0,38–0,50	2,35–3,55	0,59–0,75	1,41–1,53		0–0,03	
MODIS		0,15	0,44	3,3	0,75	1,43 (0,55 нм)		0,007 (0,55 нм)	
						1,42 + 0,03 λ		0,006 + 0,002 λ	

absorbing, weakly absorbing, а также для сферической компоненты аэрозоля сравнительно слабо зависят от оптической толщины аэрозольного слоя. Комплексный показатель преломления частиц определяется по данным AERONET не очень точно и, как показывает анализ, подвержен большим вариациям. Поэтому нам представляется нецелесообразным учитывать в модели аэрозоля зависимость микрофизических параметров от оптической толщины аэрозольного слоя.

Интересно сравнить сезонные изменения аэрозольной оптической толщины в Беларуси и соседних регионах. На рис. 4, а показаны аэрозольные оптические толщины, осредненные по месяцу на разных длинах волн, по данным станций AERONET в г. Минск, Бельск и Тыравере (Эстония) [9]. Видно, что сезонный ход АОТ для этих регионов очень похож. В частности, обращает на себя внимание минимум в июне и максимумы в апреле и августе, которые наблюдаются во всех трех регионах. Как отмечалось в работе [9], июньский минимум АОТ в Эстонии наблюдался еще с 1994 г. В [9] он объясняется очищением атмосферы, вследствие появления свежей растительности, ограничивающей образование пылевого аэрозоля, и небольшим числом лесных пожаров.

Несмотря на схожесть сезонного изменения аэрозольной оптической толщины в Беларуси и Эстонии, микрофизическая структура аэрозоля в этих регионах несколько отличается. На рис. 4, б показано соотношение АОТ мелкой и крупной фракций аэрозоля, осредненных по месяцу на разных длинах волн по данным станций AERONET в г. Минск, Бельск и Тыравере. Видно, что в Эстонии доля крупной фракции аэрозоля больше, чем в г. Минск и Бельск. По-видимому, здесь сказывается близость моря. Можно предположить, что заметную роль играет крупный аэрозоль типа океаник. Тем не менее во всех трех регионах АОТ мелкой фракции существенно больше, чем крупной. Если учесть, что мелкая фракция больше рассеивает в заднюю полу-

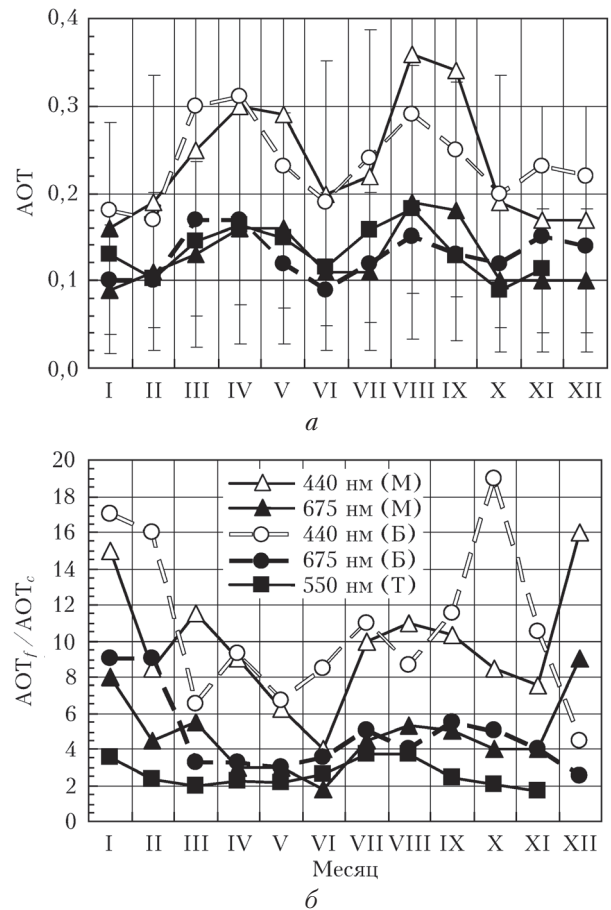


Рис. 4. Аэрозольные оптические толщины (а) и соотношение АОТ мелкой (AOT_f) и крупной (AOT_c) фракций аэрозоля (б), осредненные по месяцу на разных длинах волн, по данным станций AERONET в г. Минск (М), Бельск (Б) и Тыравере (Т)

сферу по сравнению с крупной фракцией, то становится очевидным, что вклад аэрозольной атмосферы в регистрируемый на спутнике сигнал практически полностью определяется мелкой фракцией.

Заключение

Еще раз подчеркнем, что представленная микрофизическая модель атмосферного аэрозоля является малопараметрической, и единственный переменный параметр в ней — соотношение объемных концентраций мелкой и крупной фракций. Модель такого типа может быть особенно полезна при атмосферной коррекции данных многозональных спутниковых систем высокого пространственного разрешения с ограниченным объемом получаемой оптической информации. Близость параметров этой модели к аэрозольной модели MODIS позволяет надеяться на эффективность ее использования в достаточно широкой географической зоне умеренно поглощающего аэрозоля.

В заключение отметим, что разработанная микрофизическая модель аэрозольной атмосферы прошла успешную апробацию при обработке данных многозональной спутниковой системы БКА.

Авторы признательны Я.О. Грудо за большую помощь в обработке данных AERONET.

Работа выполнена при поддержке программы Союзного государства «Мониторинг-СГ».

1. Dubovik O., Herman M., Holdak A., Lapyonok T., Tanre D., Deuze J.L., Ducos F., Sinyuk A., Lopatin A. Statistically optimized inversion algorithm for enhanced retrieval of aerosol properties from spectral multi-angle polarimetric satellite observations // *Atmos. Measur. Technol.* 2011. V. 4. P. 975–1018. DOI: 10.5194/amt-4-975-2011.
2. *Satellite aerosol remote sensing over land* / A.A. Kokhanovsky, G. de Leeuw (Eds.). Berlin: Springer-Praxis, 2009. 388 p.

3. Kokhanovsky A.A., Davis A.B., Cairns B., Dubovik O., Hasekamp O.P., Sano I., Mukai S., Rozanov V.V., Litvinov P., Lapyonok T., Kolomiets I.S., Oberemok Y.A., Savenkov S., Martin W., Wasilewski A., Noia A.Di, Stap F.A., Rietjens J., Xu F., Natraj V., Duan M., Cheng T., Munro R. Space-based remote sensing of atmospheric aerosols: The multi-angle spectro-polarimetric frontier // *Earth-Sci. Rev.* 2015. V. 145. P. 85–116. DOI: 10.1016/j.earscirev.2015.01.012.
4. CIMEL Electronique. URL: <http://www.cimel.fr/?lang=en>
5. Dubovik O. Optimization of numerical inversion in photopolarimetric remote sensing, in photopolarimetry in remote sensing / G. Videen, Y. Yatskiv, M. Mishchenko (Eds.). Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2004. P. 65–106.
6. Dubovik O., Sinyuk A., Lapyonok T., Holben B.N., Mishchenko M., Yang P., Eck T.F., Volten H., Munoz O., Veihelmann B., van der Zande W.J., Leon J.-F., Sorokin M., Slutsker I. Application of spheroid models to account for aerosol particle nonsphericity in remote sensing of desert dust // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. D11208. DOI: 10.1029/2005JD006619.
7. Levy R.C., Remer L., Mattoo S., Vermote E., Kaufman Y.J. Second-generation operational algorithm: Retrieval of aerosol properties over land from inversion of moderate resolution imaging spectroradiometer spectral reflectance // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. D13211. DOI: 10.1029/2006JD007811.
8. Levy R.C. The dark-land MODIS collection 5 aerosol retrieval: Algorithm development and product evaluation // *Satellite Aerosol Remote Sensing over Land* / A.A. Kokhanovsky, G. de Leeuw (Eds.). Berlin: Springer-Praxis, 2009. P. 33–82.
9. Kannel M., Ohvril H., Okulov O., Kattai K., Neiman L. Spectral aerosol optical depth prediction by some broadband models. Validation with AERONET observations // *Proc. of the Estonian Academy of Sciences.* 2014. V. 63, N 4. P. 404–416.

I.L. Katsev, E.P. Zege, A.S. Prikhach. Atmosphere aerosol microphysical model for Belarus and adjacent regions.

This paper presents a statistical microphysical model of atmospheric aerosols for the spring-summer-autumn period for the territory of Belarus and Poland developed at the base of long-term measurements at AERONET stations, carried out in Minsk and in Belsk (Poland). This model can be used for atmospheric correction of the Earth satellite monitoring data. Under this model aerosol consists of two fractions (fine and coarse), each of them having a lognormal particle size distribution, a fixed average size and rms, and fixed values of the real and imaginary parts of the refractive index. An aerosol coarse fraction consists of two components, containing spherical and non-spherical (spheroidal) particles. The only variable parameter of this model is the ratio of volume concentrations of fine and coarse fractions. It is shown that the parameters of the developed Belarus and Poland aerosol model are very close to those for the moderately absorbing aerosol model used for West Europe.