

Метод повышения информативности солнечно-фотометрических измерений

Method of increasing the information content of solar photometric measurements

Джахидзаде / Djahidzadeh Sh.

Шане Низами гызы

(zshane@mail.ru)

докторант Национального аэрокосмического агентства,

г. Баку, Азербайджанская Республика

Ключевые слова: атмосфера – atmosphere; измерения – measurements; информативность – information content; аэрозоль – aerosol; оптимизация – optimization.

Статья посвящена исследованию возможности повышения информативности наземных солнечно-фотометрических измерений атмосферного аэрозоля. Анализ пространственного распределения оптической толщины атмосферного аэрозоля показал, что в первом приближении можно выделить два типа законов распределения оптической толщины аэрозоля: нормальный закон и равномерный закон. Определено условие роста информативности измерения оптической толщины аэрозоля при переходе с точки с одним законом распределения в точку с другим законом. Предложен метод и соответствующий алгоритм реализации для составления высокоинформативных маршрутных наземных измерений оптической толщины аэрозоля.

The article is devoted to the study of the possibility of increasing the information content of ground solar photometric measurements of atmospheric aerosol. The analysis of the spatial distribution of the optical thickness of atmospheric aerosol showed that in the first approximation it was possible to distinguish two types of distribution laws of the optical aerosol thickness: normal law and uniform law. The condition of increasing the information content of the aerosol optical thickness measurement during the transition from point with one distribution law to point with another law is determined. A method and an appropriate implementation algorithm for elaborating highly informative ground route measurements of aerosol optical thickness are offered.

Введение

В течение многих лет атмосферный аэрозоль систематически измеряется различными научными коллективами. В результате проведенных исследований накоплен обширный экспериментальный материал, выявлены основные закономерности физико-химических свойств аэрозольных частиц.

Вместе с тем одной из главных проблем экспериментального исследования атмосферного аэрозоля является получение надежных и информативных

данных. При этом следует иметь в виду, что анализ полученных экспериментальных данных может стать успешным при наличии некоторой априорной информации о микрофизических свойствах аэрозоля и общей информации об атмосферных условиях. Как отмечается в [1–3], такой априорной информацией может быть общая микрофизическая модель аэрозоля, которая подтвердила бы информативность новых экспериментальных данных, полученных с помощью измерительных систем. Например, в работе [4] предложены регрессионные уравнения зависимости между основными измеряемыми оптическими параметрами атмосферного аэрозоля и их микрофизическими параметрами, такими как реальная часть коэффициента рефракции, эффективные размеры аэрозольных фракций, концентрация частиц и т.д. Согласно [5–7], указанные регрессионные уравнения позволяют контролировать информативность аэрозольных измерений, проводимых в сети «AERONET».

Вместе с тем, предлагаемый в [4] способ проверки информативности, строго говоря, позволяет оценить информативность или достоверность самой модели, т.к. при экспериментальном обнаружении новых регрессионных связей между оптическими и микрофизическими параметрами возникает необходимость изменения самой регрессионной модели.

Другой подход к определению информативности аэрозольных измерений базируется на экспериментальных данных о возможных реализациях микрофизических параметров частиц и дальнейшем вычислении требуемых оптических характеристик. Например, в работах [8, 9] проанализирована информативность данных поляризационного спектро-нефелометра, полученных при исследовании микрофизических параметров континентального аэрозоля.

В работах [10, 11] к вопросу моделирования окружающей среды и, в частности, информативности атмосферных аэрозольных измерений применен метод вариационного анализа, где использованы функционалы, характеризующие различные модельные компоненты атмосферы, а также некоторые огра-

ничительные условия для решения задач оптимизации деятельности по защите окружающей среды. Однако слишком обобщенный подход, примененный в указанных работах, ограничивает возможности их применения для решения конкретных прикладных задач.

Указанное обстоятельство диктует необходимость применения более приемлемых упрощенных подходов к определению информативности аэрозольных измерений.

О возможности применения информационного метода к анализу распределения атмосферного аэрозоля

В основе предлагаемого подхода к решению данной задачи лежит теория информации, созданная К. Шенноном и математически обоснованная Н. Винером. Приведем некоторые базовые положения теории информации. Согласно [12], если для измерения непрерывного сигнала используется квантователь, т.е. обычный аналого-цифровой преобразователь, то количество информации в выборке случайных величин $x_1, x_2, \dots, x_n$ с вероятностью их появления $P(x_1), P(x_2), \dots, P(x_n)$ может быть оценено как

$$I = -n \sum_{i=1}^n W(x_i) \Delta x \cdot \log_2 [W(x_i) \Delta x] \quad (1)$$

При этом количество информации на один символ определяется как

$$i = -\sum_{i=1}^n W(x_i) \cdot \log_2 [W(x_i) \Delta x] - \log_2 (\Delta x) \quad (2)$$

где

$$\sum_{i=1}^n W(x_i) \Delta x = 1 \quad (3)$$

Формулу (2) в непрерывном виде можно записать как [2]:

$$i = -\int_{-\infty}^{\infty} W(x) \cdot \log_2 W(x) dx - \log_2 (\Delta x) \quad (4)$$

При этом если в экспериментальных измерениях используется один и тот же квантователь, то для определения информативности можно использовать первый член в (4).

Следовательно, при проведении аэрозольных измерений количество информации при одном измерении может быть определено как

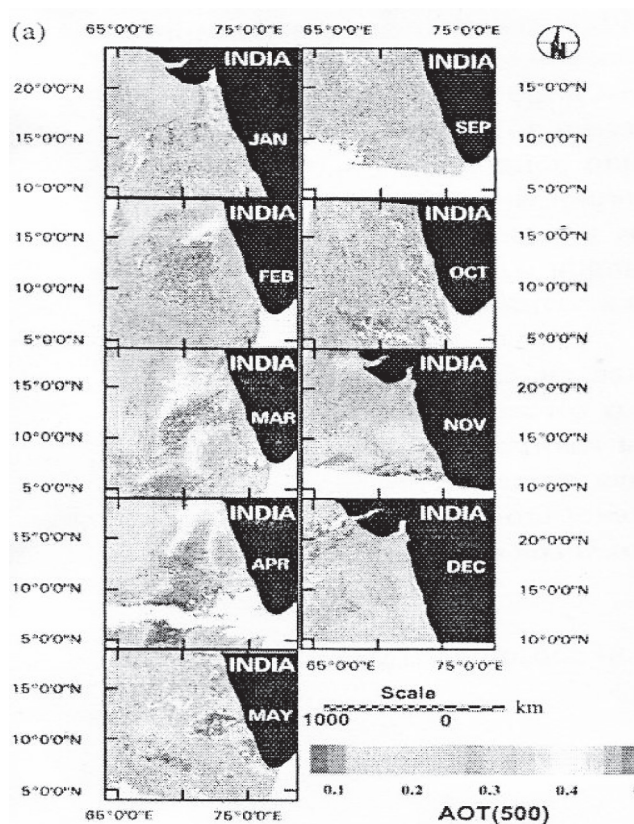


Рис. 1. Пространственное распределение оптической толщины аэрозоля над обширной территории Индийского субконтинента между 15°N и 20°N и 65°E и 75°E [13]

$$i = - \int_{-\infty}^{\infty} W(x) \cdot \log W(x) dx \quad (5)$$

где $W(x)$ – плотность вероятности распределения оптической толщины аэрозоля.

В общем случае функция $W(x)$ может быть определена как в результате временных измерений в одной географической точке, так и при кратковременных измерениях в различных наземных точках. В дальнейшем будем рассматривать вероятность распределения в различных географических точках единой зоны, вычисленную на основе измерений, проведенных за достаточно короткое время. Приведем некоторые примеры экспериментально полученных законов распределения. Как видно из аэрозольных карт обширной зоны Индии (рис. 1), в феврале вероятностное распределение аэрозоля подчинялось практически равномерному закону [13]. При этом оптическая толщина аэрозоля была на уровне 0,3; а в интервале январь–май изменялась в пределах $0,2 \div 0,5$. Вместе с тем пространственное распределение оптической толщины аэрозоля часто подчиняется нормальному закону, логнормальному закону или закону Вейбулла [4].

В качестве другого примера на рис. 2 приведены гистограммы распределения оптической толщины аэрозоля в различных регионах Земного шара [14].

Принятые обозначения :

$\Delta N/N$ – относительное количество аэрозольных частиц;

a – Черное море;
 b – Близко к континенту;
 c – Томск (Сибирь)
 d – Среднеокеаническая зона;
 e – Южный Океан (Российская Антарктическая станция).

Предлагаемый метод

В целом для анализа информативности маршрутных аэрозольных измерений в первом приближении можем предположить, что закон вероятностного распределения атмосферного аэрозоля носит дуальный характер, т.е. оно может подчиняться либо равномерному закону, либо нормальному закону. Покажем, что такое упрощение позволяет выработать порядок составления маршрута аэрозольных измерений в смысле обеспечения перехода с низкоинформативной зоны на высокоинформативную зону или наоборот.

Дадим математическое обоснование предлагаемого метода. Известно [15], что если $f(x)$ непрерывна на отрезке $[a, b]$, а функция $g(x)$ интегрируема, то существует такая точка на отрезке $[a, b]$, применительно к которой справедливо равенство

$$\int_a^b f(x)g(x)dx = f(c) \int_a^b g(x)dx \quad (6)$$

Примем: $a = -\infty$; $b = \infty$

Выражение (5) напомним как для случая нормаль-

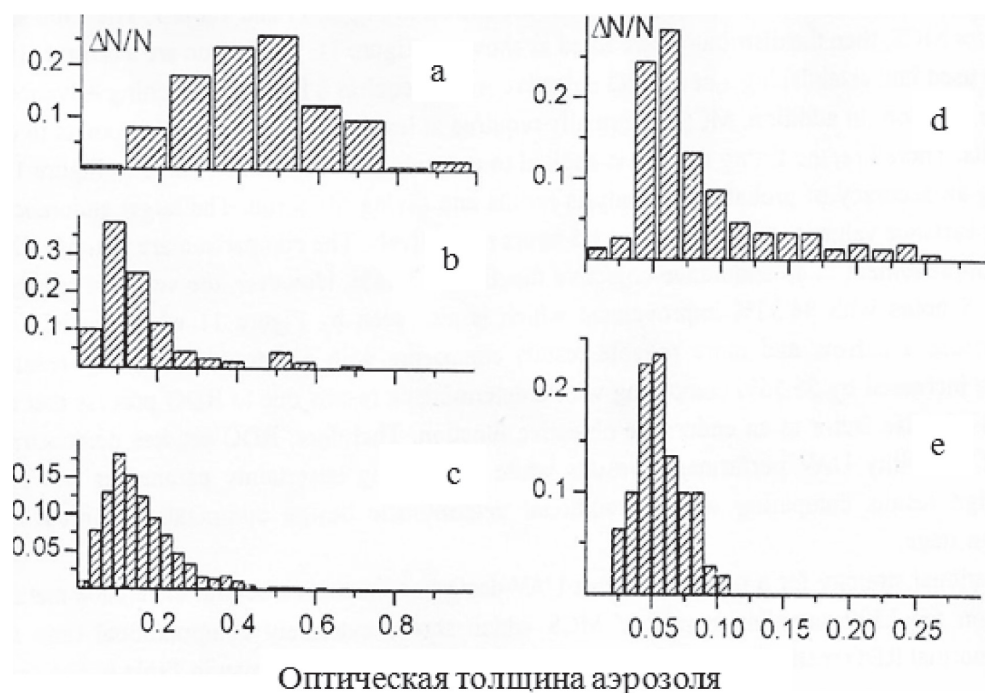


Рис. 2. Гистограммы распределения оптической толщины аэрозоля в различных регионах Земли [14]

ного распределения, так и для случая равномерного распределения:

$$\begin{aligned} & \int_{-\infty}^{\infty} W_n(x) \log_2(W_n(x)) dx = \\ & = \log_2(w_n(x_{c_1})) \int_{-\infty}^{\infty} W_n(x) dx = \log_2(w_n(x_c)) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} & \int_{-\infty}^{\infty} W_p(x) \log_2(W_p(x)) dx = \\ & = \log_2(w_p(x_{c_1})) \int_{-\infty}^{\infty} W_p(x) dx = \log_2(w_p(x_c)) \end{aligned} \quad (8)$$

где: x_{c_1}, x_{c_2} – фиксированные точки в интервале $(-\infty; \infty)$.

Исследуем условие перехода от географической зоны с нормальным законом распределения оптической плотности аэрозоля к зоне с равномерным распределением, при котором можно было бы достичь повышения информативности проводимых измерений.

Вышеуказанное условие имеет вид:

$$\log(w_p | x_{c_2}) > \log(w_n | x_{c_1}) \quad (9)$$

Из выражения (9) находим

$$w_p | x_{c_2} > w_n | x_{c_1} \quad (10)$$

Если учесть, что

$$w_n | x_{c_1} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x_{c_1}^2}{\sigma^2}} \quad (11)$$

где: σ – с.к.о. переменной x .

$$w_p | x_{c_2} = \frac{1}{2a} \quad (12)$$

то тогда находим

$$\frac{1}{2a} > \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x_{c_1}^2}{\sigma^2}} \quad (13)$$

Из (13) получим:

$$x_{c_1} > \sigma \sqrt{\ln \left[\frac{2a}{\sqrt{2\pi}\sigma} \right]} \quad (14)$$

Рассмотрим частный случай, когда: $\sigma = a$

В этом случае из (14) находим

$$x_{c_1} > a \sqrt{\frac{1}{2} \ln \frac{2}{\pi}} \quad (15)$$

Таким образом, при удовлетворении условия (15) вышеуказанный переход от зоны с нормальным

распределением в зону с равномерным распределением может привести к увеличению информативности аэрозольных измерений. Очевидно, что условие

$$x_{c_1} < a \sqrt{\frac{1}{2} \ln \frac{2}{\pi}} \quad (16)$$

характеризует тот случай, когда обратный переход может привести к повышению информативности, а при

$$x_{c_1} = a \sqrt{\frac{1}{2} \ln \frac{2}{\pi}} \quad (17)$$

вышеуказанные переходы не приведут к повышению информативности аэрозольных измерений. Таким образом, предлагаемый метод организации высокоинформативных пространственных аэрозольных измерений алгоритмически может быть изложен следующим образом:

– Определение закона распределения оптической толщины атмосферного аэрозоля в исходной точке.

– Определение закона распределения оптической толщины атмосферного аэрозоля в последующей точке.

– Определение показателей b и x_{c_1} для той точки, где закон распределения оптической толщины аэрозоля является нормальным законом.

– Определение показателя a для той точки, где закон распределения равномерный.

– Переходы из одной точки в другую при проведении пространственных аэрозольных измерений осуществлять по следующему критерию:

– переход с точки с нормальным распределением в точку с равномерным распределением приведет к росту информативности, если условие (15) будет удовлетворено;

– обратный переход приведет к росту информативности измерений, если условие (16) будет удовлетворено.

При условии (17) любой из предполагаемых переходов не приведет к повышению информативности проводимых аэрозольных измерений.

Экспериментально-модельные исследования

Для проверки полученных теоретических положений были использованы результаты ранее проведенных измерений оптической толщины аэрозоля атмосферы с использованием солнечного фотометра, разработанного в НИИ Аэрокосмической информатики Национального аэрокосмического агентства Азербайджанской республики. Измерения проводились по двухволновому методу построения диаграмм Ленгли. Измерения проводились в двух зонах города Баку: 1. В Наримановском районе, вблизи от сталелитейного завода в 09.00 и 13.00; 2. Вблизи от поселка Ахмедлы, где промышленные предприятия отсутствуют.

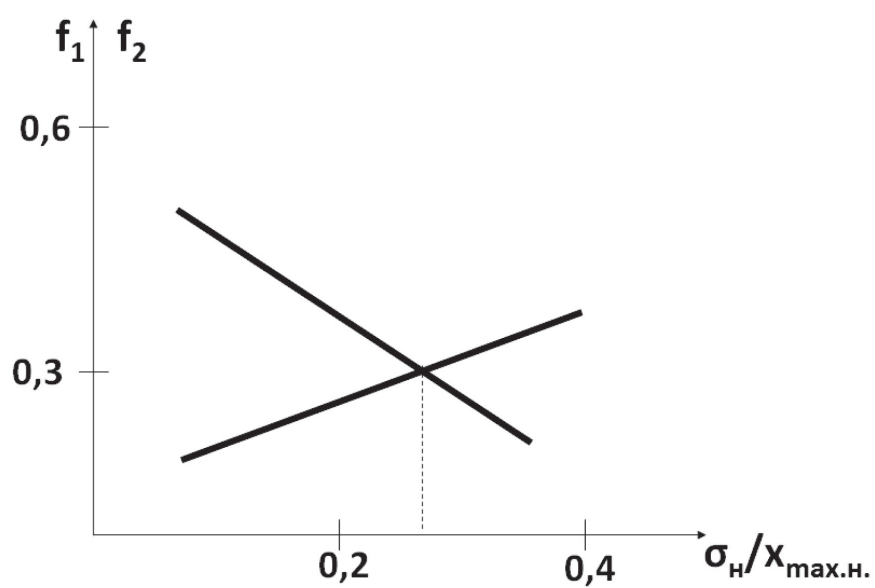


Рис. 3. Графическое отображение условия (21)

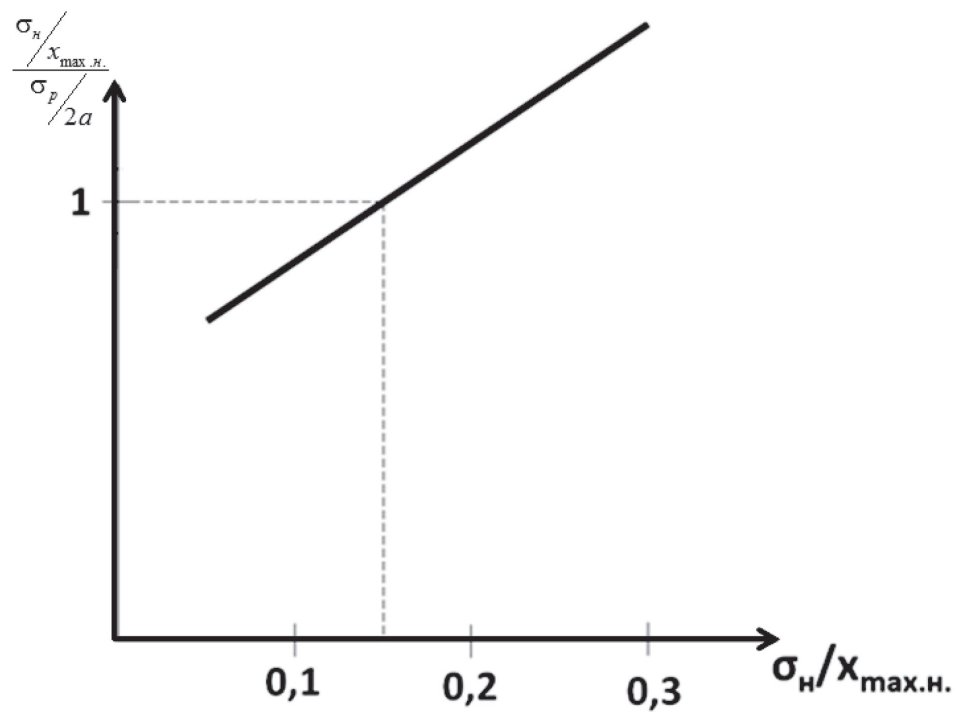


Рис. 4. Графическое изображение условия (20)

Для экспериментальной оценки информативности результатов аэрозольных измерений использовался упрощенный показатель

$$\gamma = \frac{\sigma}{x_{\max}} \quad (18)$$

Использование показателя γ объясняется эвристически тем, что чем больше разброс результатов измерений, тем больше измерения считаются информативными. Методика проводимых экспериментально-модельных исследований заключается в следующем:

1. Условие превышения информативности результатов измерений с равномерным распределением (результаты измерений, проведенных в поселке Ахмедлы, г. Баку) результатов измерений с нормальным распределением (измерения в Наримановском районе) сформулировано в виде:

$$\frac{\sigma_n}{x_{\max, n}} < \frac{\sigma_p}{2a} \quad (19)$$

$$\text{или } \frac{\sigma_n / x_{\max, n}}{\sigma_p / 2a} < 1 \quad (20)$$

где: σ_n – с.к.о. при нормальном распределении;
 σ_p – с.к.о. при равномерном распределении;
 $x_{\max, n}$ – максимальная величина, измеренная при нормальном распределении.

2. Для нахождения значения σ_n , ниже которого выполняется условие (20), формула (14) была переписана в виде:

$$\frac{x_{cl}}{\sigma_n} > \sqrt{\ln \left[\frac{2a / x_{\max, n}}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_n / x_{\max, n}} \right]} \quad (21)$$

3. Осуществляется поиск пороговой величины $\sigma_n / x_{\max, n}$, где при известной величине $\sigma_p / 2a$, выполняются условия (19) и (21).

Результаты проведенных вычислений по вышеуказанной методике проведены на рис. 3 и рис. 4.

Цифрами показаны:

1 – график функции $f_1 = \frac{x_{cl}}{\sigma_n}$

2 – график функции

$$f_2 = \sqrt{\ln \left[\frac{2a / x_{\max, n}}{\sqrt{2\pi} \cdot \frac{\sigma_n}{x_{\max, n}}} \right]}$$

Как видно из графических данных, представленных на рис. 3 и рис. 4, при $\frac{\sigma_n}{x_{\max}} \leq 0,18$ выполняются оба условия, т.е. условия (20) и (21). Следовательно, в

этом случае проведение аэрозольных измерений в зоне, где оптические толщины аэрозоля распределены по равномерному закону, оказываются более информативными.

Заключение

Таким образом, проведенный анализ позволил определить порядок чередования географических зон при поведении пространственных аэрозольных измерений, позволяющий обеспечить высокую информативность результатов измерений. Полученные в настоящей работе результаты могут быть полезными при проведении сетевых и маршрутных аэрозольных измерений, а также при построении локальных или региональных сетей измерения и контроля атмосферного аэрозоля.

В заключение сформулируем основные выводы проведенного исследования:

1. Анализ пространственного распределения оптической толщины атмосферного аэрозоля показал, что в первом приближении можно выделить два типа законов распределения оптической толщины аэрозоля: нормальный закон и равномерный закон.

2. Определено условие роста информативности измерения оптической толщины аэрозоля при переходе с точки с одним законом распределения в точку с другим законом.

3. Предложен метод и соответствующий алгоритм реализации для составления высокоинформативных маршрутных наземных измерений оптической толщины аэрозоля.

Литература

1. Кугейко, М. М. Уравнения множественной регрессии для фракционных концентраций атмосферного аэрозоля и спектральных значений коэффициента ослабления / М.М. Кугейко, С.А. Лысенко // Журнал прикладной спектроскопии. – 2006. – Т. 736, № 6. – С. 807–812.
2. Кугейко, М. М. Определение интегральных микрофизических параметров многокомпонентных аэрозолей по данным зондирования атмосферы локационными системами на основе ND: YAG-ЛАЗЕРА / М.М. Кугейко, С.А. Лысенко // Оптика и спектроскопия. – 2009. – Т. 107, № 1. – С. 166–172.
3. Коршунов, В. А. О восстановлении интегральных параметров тропосферного аэрозоля по данным двухволнового лидарного зондирования / В.А. Коршунов // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2007. – Т. 43, № 5. – С. 671–687.
4. Lisenko, S. F. Regression approach to analyzing the informativity and interpretation of aerosol optical measurements / S.F. Lisenko, M.M. Kugeinko // Journal of Applied Spectroscopy. – Vol. 76, No. 6. – P. 826–839.
5. Кондратьев, Л. С. Свойства, процессы образования и последствия воздействий атмосферного аэрозоля: от нано

– до глобальных масштабов / К.Я. Кондратьев, Л.С. Ивлев, В.Ф. Крапивин. – Издательство «ВВМ», 2007. – 859 с.

6. Variability of aerosol and spectral lidar and backscatter and extinction ratios of key aerosol types derived from selected Aerosol Robotic Network locations / C. Cattrall [et al.] // Journal of geophysical research-atmospheres. – 110(D10). – D10SA11.

7. AERONET aerosol robotic network [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://aeronet.gsfc.nasa.gov>, свободный. – Загл. с экрана.

8. Comparison of black carbon content, aerosol optical and microphysical characteristics in Moscow and the Moscow region [Электронный ресурс] / М.А. Sviridenkov [et al.] // Fifteenth ARM Science team meeting proceedings, Daytona beach, Florida, 14–18 march 2005. – Режим доступа: http://www.arm.gov/publications/proceeding/conf15/extended_abs/sviridenkov_ma.pdf, свободный. – Загл. с экрана.

9. Активная спектрофелометрия микрофизических характеристик субмикронного аэрозоля / М. В. Паченко [и др.] // Оптика атмосферы и океана. – 2004. – Т. 17, № 05–06. – С. 428–436.

10. Baklanov, A. Mathematical modelling of the influence of mining on the environment / A. Baklanov // LUMA Journal, Leeds University. – 1990. – P. 123–131/

11. Baklanov, A. Modelling of the atmospheric radionuclide transport: local to regional scale / A. Baklanov // Numerical Mathematics and Mathematical Modelling. – Moscow, INM RAS 2, 2000. – P. 244–266.

12. Теоретические основы информационно-измерительных систем / под ред. В.П. Бабака. – Киев, 2014. – 832 с.

13. Aerosol optical thickness and spatial variability along coastal and offshore waters of the eastern Arabian Sea / B. HarilalMenon [et al.] // ICES Journal of Marine Science. – 2011. – No. 68(4). – P. 745–750.

14. Aerosol optical depth of the atmosphere over the ocean in the wavelength range 0.37–4 μm / S.M. Sakerin // International Journal of Remote Sensing. – 2008. – Vol. 29, No. 9. – P. 2519–2547.

15. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1968. – 719 с.