УДК 504.3.054; 550.808

МЕТОД ОПТИМАЛЬНЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК АЭРОЗОЛЯ В ЗОНАХ АНОМАЛЬНОГО АЭРОЗОЛЬНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ

С.Н. Абдуллаева

Институт Аэрокосмической Информатики
Национального Аэрокосмического Агентства
asadzade@rambler.ru

В статье показана возможность оптимизации процедуры аэрозольных измерений вблизи мощного источника аэрозольной эмиссии. Решение вариационной оптимизационной задачи с ограничением, характеризующим точностные требования к серии измерений позволило получить аналитическое решение связывающее угол наблюдения Солнца в момент измерений с геометрическим расстоянием до источника.

Ключевые слова: экологические измерения; аэрозоль; загрязнение атмосферы; оптимизация.

METHOD FOR OPTIMAL ECOLOGICAL MEASUREMENTS OF AEROSOL'S CHARACTERISTICS IN ZONES OF ABNORMAL AEROSOL POLLUTION

S.N. Abdullayeva

Institute of Space Computer science of National Space Agency
asadzade@rambler.ru

In the article the possibility of carrying out of optimal procedure for aerosol measurements near the powerful source of aerosol emission is shown. Solution of variation optimization task with limitations, characterizing the accuracy requirements for series of measurements makes it possible to obtain the analytical formula, linking the angle of vision of the Sun at the moment of measurements with geometrical distance as far as emission source.

Key words: Ecological measurements; aerosol; atmospheric pollution; optimization.

Аэрозольные аномалии, в атмосфере вызывая отрицательные экологические последствия, наносят существенный вред экономике стран и регионов. Аэрозольные аномалии можно разделить на аномалии естественного и антропогенного происхождения. Наглядным примером может служить аномально высокая степень запыленности в странах Юго-восточной Азии из-за частых пылевых бурь, состоящих из пылевых частиц с эффективным диаметром свыше 10 мкм источником которых являются Среднеазиатские пустыни.

Пожалуй, наиболее опасным для здоровья людей являются аэрозоли антропогенного происхождения, характеризующиеся ма-

лым эффективным диаметром аэрозольных частиц, которые обычно меньше 2,5 мкм. Именно такие мелкие частицы, долгое время находясь в подвешанном состоянии в воздухе легко вдыхаемы респираторной системой человека, что, в конечном счете, может привести к разрушению легких. Кроме этого, аэрозоли существенно влияют на климатический режим всей планеты, что представляет собой потенциальную опасность нежелательных климатических изменений при возникновении глобальных аэрозольных аномалий. Все это подчеркивает важность проведения аэрозольных измерений вблизи промышленных и природных объектов, являющихся мощным источником аэрозолей. В настоящей статье мы рассмотрим вопрос о проведении оптимальных аэрозольных измерений вблизи источника аэрозольной аномалии в атмосфере, прототипом которого могут быть факела сжигания попутного газа, трубы цементных производств и т.д.

В дальнейшем аномальное аэрозольное загрязнение будем понимать как неравномерное распределение концентрации q аэрозоля по полю в каком-либо выбранном направлении (рис. 1). Считаем, что эмиссия аэрозолей в атмосферу происходит с точечного источника. При этом, если точечный источник эмиссии аэрозоля находится в точке R_{min}, то верна кривая 1 распределения концентрации, и если в точке R_{max}, то кривая 2.

В настоящей статье ставиться задача оптимизации проведения аэрозольных измерений с точки наблюдения, передвигаемой на оси R. Ставятся следующие требования на цикл измерений по оси R:

1) Должны быть охвачены все точки кривой 1 или 2.

2) Суммарная интегрированная аэрозольная оптическая плотность за весь цикл из-

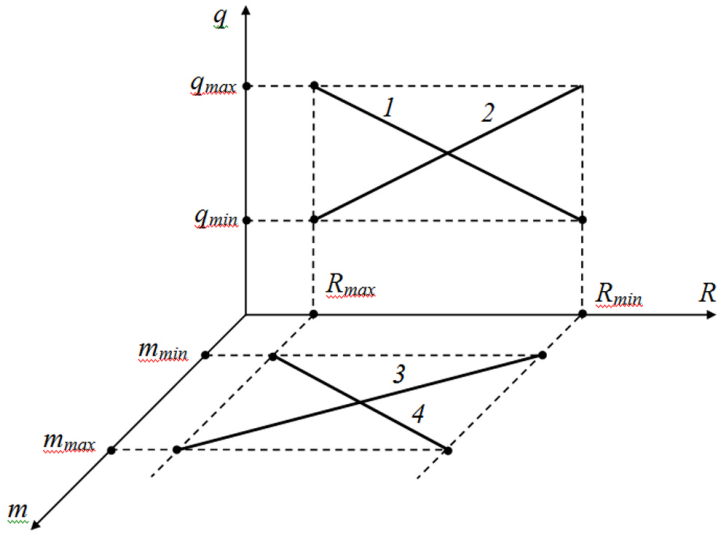

Рис. 1. Взаиморасположение функций q(R) (кривые 1, 2) и m(R) (кривые 3, 4) по отношению к R.

q — концентрация аэрозоля; m — оптическая масса; R — геометрическая координата направления движения измерителя.

мерений по оси R не должна превышать заранее заданную величину.

3) Интегральная оценка

$$\int_{R_{min}}^{R_{max}} ln\frac{I_0}{I(\lambda)}dR$$

должна достичь наименьшей величины, где R_{max} — максимальная величина R; $I_0(\lambda)$ — величина Солнечной постоянной на длине волны λ; $I(\lambda)$ — интенсивность излучения на уровне Земли.

Как известно, интенсивность солнечного излучения, прошедшего через атмосферу на уровне Земли может быть оценена по формуле Бугера [1]

$$I=I_0 e^{-(\tau_{оз}+\tau_{аэр}+\tau_{рел})} \quad (1)$$

где $\tau_{оз}$ — оптическая толщина озона; $\tau_{аэр}$ — оптическая плотность аэрозоля; $\tau_{рел}$ — оптическая плотность релеевского рассеяния.

Прологарифмировав выражение (1) имеем

$$\tau_{оз}+\tau_{аэр}+\tau_{рел}=ln\frac{I_0(\lambda)}{I(\lambda)} \quad (2)$$

Далее учитываем, что релеевское рассеяние может быть рассмотрено в качестве систематической погрешности. Проинтегрировав выражение (2) по R (для упрощения выкладок считаем, что $R_{min}=0$) имеем

$$\int_0^{R_{max}}\tau_{оз}dR+\int_0^{R_{max}}\tau_{аэр}dR=\int_0^{R_{max}} ln\frac{I_0(\lambda)}{I(\lambda)}dR \quad (3)$$

Отметим, что оптические толщины озона и аэрозоля, определяются как

$$\tau_{оз}=\mu(R)\beta_{оз};\quad \tau_{аэр}=m(R)\beta_{аэр} \quad (4)$$

где $\beta_{оз}$ — оптическая плотность озона; $\beta_{аэр}$ — оптическая плотность аэрозоля; $\mu(R)$, $m(R)$ — соответственно воздушные массы озона и аэрозоля.

На основании выражения (3) можно сформулировать две оптимизационные задачи оптимальных измерений аэрозолей.

Задача 1. Оптимизация измерения атмосферного аэрозоля вдоль трассы R.

Для решения данной задачи должно быть установлено ограничительное требование к интегральной величине оптической толщины озона т.е.

$$\int_0^{R_{max}}\tau_{оз}\,dR=C_{оз.min}. \quad (5)$$

Известно [1], что при $\alpha>17^o$ где α — угол наблюдения Солнца, имеет место фактическое равенство μ и m т.е. $\mu=m$. С учетом этого рассматриваемая оптимизационная задача может быть сформулирована так: При ограничении (5) найти такую функцию $m(R)$ при которой левая сторона выражения (3) достигает максимальное значение, т.е.

$$\left(\gamma C_{оз.min}+\int_0^{R_{max}}\tau_{аэр}\,dR\right)\to max, \quad (6)$$

где γ - множитель Лагранжа.

Задача 2. При ограничительном условии

$$\int_0^{R_{max}} \tau_{аэр}\, dR = C_{аэр.max} \tag{7}$$

следует найти такую функцию *m(R)*, которая приводит левую сторону выражения (3) к минимальному значению, т.е.

$$\left(\gamma C_{аэр.max} + \int_0^{R_{max}} \tau_{ox}\, dR \right) \to min\ . \tag{8}$$

В настоящей статье мы подробно рассмотрим решение оптимизационной задачи 2.

Рассматриваемая далее задача оптимизации заключается в нахождении оптимальной функции *m(R)*, приводящей левую сторону выражения (4) к минимальной величине при соблюдении ограничительного условия

$$\int_0^{R_{max}} m(R)\,\beta_{аэр}(R)\,dR = C\ . \tag{9}$$

Смысл условия (9) заключается в наложении ограничения на суммарную интегрированную аэрозольную оптическую плотность в проводимых измерениях. Таким образом, критерий оптимальности с учетом (3) и (9) может быть сформулирован следующим образом

$$F = \int_0^{R_{max}} m(R)\beta_{оз}(R)dR + \gamma \int_0^{R_{max}} m(R)\beta_{аэр}(R)dR \to min, \tag{10}$$

где γ- множитель Лагранжа.

Для решения указанной оптимизационной задачи воспользуемся методом Эйлера. Имеем

$$\frac{dF}{dm(R)} = \beta_{оз}(R) + \gamma\,\beta_{аэр}(R) = 0\ . \tag{11}$$

Из (11) имеем

$$\beta_{аэр}(R) = -\frac{\beta_{оз}(R)}{\gamma}\ . \tag{12}$$

С учетом (9) и (12) имеем

$$\gamma = -\frac{\beta_{оз}(R)}{C} \int_0^{R_{max}} m(R)\,dR \tag{13}$$

Учитывая (13) в (11) имеем

$$\int_0^{R_m} m(R)dR = \frac{C}{\beta_{аэр}(R)}\ . \tag{14}$$

Из (14) имеем

$$\beta_{аэр}(R) = \frac{C}{\int_0^{R_{max}} m(R)\,dR}\ . \tag{15}$$

Учтя (15) в (11) имеем

$$\frac{dF}{dm(R)} = \beta_{оз}(R) + \frac{\gamma C}{\int_0^{R_{max}} m(R)\,dR}\ . \tag{16}$$

Из (16) имеем

$$\frac{d^2F}{dm(R)^2} = -\frac{\gamma C\, m'(R)}{m^2(R)}\ . \tag{17}$$

Проанализируем выражение (17). Для того, чтобы решение (14) было правильным, т.е. удовлетворяющим условию (8), с учетом отрицательной величины γ, следует потребовать условие неотрицательности *m'(R)*, т.е. *m'(R)>0.* Таким образом, из полученного выражения (17) можно прийти к следую-

щему заключению. Если измерительный сканирующий фотометр расположен вблизи точки с максимальной концентрацией аэрозоля, и его движение осуществляется в сторону минимальной концентрации, то величина *m'(R)* должно быть положительной и решение (14) вышерассмотренной оптимизационной задачи обеспечивает минимальную величину *F*. Из выражения (14) имеем

$$m(R)=\frac{C\left|\beta'_R(R)\right|}{2\beta^2_{аэр}(R)}. \quad (18)$$

Таким образом, найдено аналитическое выражение для функциональной зависимости воздушной массы от геометрической координаты. Физически, режим оптимальных измерений должен быть осуществлен путем увеличения *m* по трассе *R*, что достигается путем изменения угла наблюдения.

Как указано в [2], решение полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии для непрерывного точечного наземного источника аэрозоля может быть записано в виде

$$q(R)=q(0)exp\left[-A\left(\frac{R}{\sigma_R}\right)^s\right], \quad (19)$$

где *q(0)* — концентрация аэрозоля в точке *R=0; A* и σ- постоянные коэффициенты;σ_R- среднеквадратическое отклонение *R*.

Известно [3], что оптическая плотность атмосферного аэрозоля может быть определена следующей эмпирической формулой

$$\beta_{аэр}=B(\lambda=1\ мкм)\lambda^{-\alpha}, \quad (20)$$

где B(λ=1 мкм)- коэффициент турбидности атмосферы; α — показатель Ангстрома.

В рассматриваемом случае можно принять, что

$$B(\lambda=1\ мкм)=k\,q(R)=k\,q(0)exp\left[-A\left(\frac{R}{\sigma_R}\right)^s\right], \quad (21)$$

где *k=const* .

Тогда с учетом (21) и (21) имеем

$$\beta_{аэр}=k\,q(0)exp\left[-A\left(\frac{R}{\sigma_R}\right)^s\right]\lambda^{-\alpha} \quad (22)$$

С учетом (22) и (18) имеем

$$m(R)=\frac{k\,C\cdot A\cdot S\cdot R^{s-1}}{2\sigma_R^s\cdot q(0)\,exp\left[-A\left(\frac{R}{\sigma_R}\right)^s\right]\lambda^{-\alpha}}. \quad (23)$$

Таким образом, показано, что в рассматриваемой задаче оптимальных атмосферных измерений величина m(R) должно увеличиваться с увеличением R. Как видно из выражения (23) для точной физической реализации полученной функциональной взаимосвязи параметров m и R возможен вариант наличия некоторого временного интервала между фотометрическими измерениями под разным углом. Однако, такой временной интервал обычно не длиться более 12–14 часов, в течение которой аномальная аэрозольная обстановка, созданная мощным источником мелкодисперсного аэрозоля вряд ли существенно изменится.

Таким образом, показано, возможность осуществления оптимальных аэрозольных измерений в непосредственной вблизи ис-

точника мелкодисперсного аэрозоля при априорном задании показателя точности всей серии измерений.

Результаты полученные в данной работе могут быть использованы в экологических целях, при расчете и определении степени загрязненности атмосферы в производственных зонах.

Список литературы

1. Гушин Г.П., Виноградова Н.Н. Суммарный озон в атмосфере. Л., Гидрометеоиздат, 1988.

2. Бызова Н.Л., Гаргер Е.К., Иванов В.Н. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты примеси. Л., Гидрометеоиздат, 1991.

3. O'Neill N.T., T.F. Eck, B.N. Holben, A. Smirnov, O. Dubovik, and A. Royer (2001). Bimodal size distribution influences on the variation of Angstrom derivatives in spectral and optical depth space // Journal Geophys. Res., 106 (D9), 9787–9806.