

## К ВОПРОСУ О КОСМИЧЕСКОМ КОНТРОЛЕ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ЗОН ПО УРОВНЮ ИХ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ЭМИССИИ В АТМОСФЕРУ АНТРОПОГЕННОЙ ПЫЛИ

### ON THE QUESTION ABOUT CLASSIFICATION OF URBANIZED ZONES ON LEVEL OF ANTHROPOGENIC DUST EMISSION TO THE ATMOSPHERE



**Х. Г. Асадов,**  
Национальное аэрокосмическое  
агентство, г. Баку  
asadzade@rambler.ru

**Kh. Asadov,**  
National Aerospace Agency, Baku



**Н. И. Керимов,**  
Национальное аэрокосмическое  
агентство, г. Баку  
Natiq1975@gmail.ru

**N. Kerimov,**  
National Aerospace Agency, Baku

**С**татья посвящена оптимизации эмиссии в атмосферу антропогенной пыли с урбанизированных зон. Объектом исследования является антропогенная пыль, возникающая в результате человеческой производственной деятельности. Предмет исследования – усовершенствование известной методики оценки суммарной антропогенной пыли, выбрасываемой в атмосферу. Цель исследования – решение задачи достижения суммарной минимальной величины эмитируемой в атмосферу антропогенной пыли путем определения оптимальных величин демографических и экономических показателей регионов по процедуре линейного программирования. Также ставится задача формирования критерия наземной оценки минимального ночного свечения атмосферы, учитывающий оптимальную взаимосвязь природной и антропогенной составляющих суммарной пыли, эмитируемой в атмосферу.

Предложен метод оптимизации основных показателей урбанизированных территорий, который позволяет минимизировать известную суммарную оценку потока антропогенной пыли и совместно рассматривать территории, принадлежащие к различным классам по показателю ночной освещенности. При этом используется разделение урбанизированных территорий по классам в соответствии со значениями показателя совместного индекса ночного свечения (*CNLI*).

Сформулирована и решена модельная задача достижения суммарной минимальной величины эмитируемой в атмосферу антропогенной пыли путем определения таких оптимальных показателей указанных территорий, как плотность населения (*P*), общий внутренний продукт (*GDP*) и уровень экономики страны (*EC*) по процедуре линейного программирования. Определено, что в результате изменения указанных показателей до их оптимальных величин возможен переход рассмотренных урбанизированных территорий в другой класс по показателю ночной освещенности. Предложен новый интегральный показатель оценки эмитируемой в атмосферу антропогенной пыли. Получена формула оптимальной связи между антропогенной и природной пылью, при которой достигается минимум указанной оценки, а также минимум дошедшей до земной поверхности свечения атмосферы

**Ключевые слова:** антропогенная пыль; природная пыль; атмосфера; ночное свечение; линейное программирование; оптимизация; урбанизированная территория; калибрация; аэрозоль; оптическая толщина

The paper is devoted to anthropogenic dust emission from urbanized zones to the atmosphere. The object of the research is anthropogenic dust, occurring as a result of anthropogenic industrial activity. The subject of the research is modification of the known methodic for estimation of total anthropogenic dust emitted to atmosphere. The aim of the research is a solution of the task on achieving minimum of total anthropogenic dust emitted to atmosphere by determination of optimum values of demographic and economic parameters of the mentioned regions, using procedures of linear programming. Also the related aim is formulated as forming of the criterion for ground estimation of minimum night illumination of the atmosphere, taking into account the optimum interrelation of natural and anthropogenic components of total dust emitted to atmosphere.

The method for optimization of major parameters of urbanized territories has made it possible to minimize the known total estimation of anthropogenic dust flow generated and emitted to the atmosphere. The suggested method allows the joint consideration of urbanized territories belonging to different classes by parameter of night time illumination registered by satellites. For this purposes the known division of urbanized territories into classes in line with the value of Joint Index of Night Illumination is used.

The model task on achievement of the joint minimum of emitted to the atmosphere of anthropogenic dust by determination of such optimum parameters of the mentioned territories as density of population, gross domestic product, level of economic development of country using procedure of linear programming is suggested. It is determined that as a result of the mentioned parameters change till their optimum values transition of considered urbanized territories to another class due to the parameter of night time illumination is possible. The new integrated parameter for estimation of anthropogenic dust emitted to the atmosphere is suggested. The formula of optimum relation between anthropogenic and natural dust emitted to the atmosphere upon which the minimum of the mentioned estimation and minimum of the atmospheric illumination reaches the ground surface can be attained

**Key words:** anthropogenic dust; natural dust; atmosphere; night illumination; linear programming; optimization; urbanized territory; calibration; aerosol; optical depth

**В**ведение. Как отмечается в статье «Пространственная база данных HYDE 3.1 о глобальных изменениях землепользования, вызванных деятельностью человека, за последние 12000 лет» [4], минеральная антропогенная пыль играет важную роль в модулировании радиационного форсинга и изменении климата. В ряде трудов [2; 8; 15] все существующие схемы эмиссии антропогенной пыли разделены на три категории: 1) эмпирические схемы; 2) схемы, основанные на упрощенных физических процессах; 3) схемы, основанные на детализированных микрофизических процессах. Рядом авторов [7; 13] отмечено, что пылевой аэрозоль не может быть классифицирован только как природный. В зависимости от зоны происхождения пылевой аэрозоль может быть рассмотрен в качестве либо природной, либо антропогенной пыли. Механизм зарождения природной пыли заключается в воздействии сильного ветра на оголенную земляную поверхность, подъеме и эмиссии пылевых частиц в атмосферу [1; 9]. Антропогенная пыль должна быть рассмотрена как результат зарождения пылевых частиц в результате прямого или косвенного влияния человеческой деятельности [15]. Эмиссии антропогенной пыли возникают в основном из-за ветровой эрозии [14] (косвенной эмиссии антропогенной пыли), а также из-за производственной деятельности человека в таких областях, как строительство, производство цемента, транспорт, сельское хозяйство [4–6]. Вместе с тем, загрязнение нижних слоев атмосферы аэрозолями оказывает влияние на

погодно-климатические аномалии. Следовательно, исследование условий достижения минимальной величины эмитируемой в атмосферу антропогенной пыли в отдельных регионах и странах, характеризующихся индустриальным и сельскохозяйственным развитием, является актуальной задачей.

*Объект исследования* – антропогенная пыль, возникающая в результате человеческой производственной деятельности.

*Предмет исследования* – усовершенствование известной методики оценки суммарной антропогенной пыли, эмитируемой в атмосферу.

*Цель исследования* – формирование критерия наземной оценки минимального ночного свечения атмосферы, учитывающего оптимальную взаимосвязь природной и антропогенной составляющих суммарной пыли, эмитируемой в атмосферу. Задача различения антропогенной пыли от природной подробно рассмотрена в статье И. Н. Соколика и О. Б. Туна [11].

Относительно экспериментального определения количественных показателей антропогенной пыли Ц. С. Зендером, Г. Бинном и Д. Ньюманом [3] высказана мысль, что этот тип пыли состоит из мельчайших частиц, которые накапливаются в планетарном граничном слое (PBL). Согласно сведениям статьи, для аппаратурного различения мелкой пыли антропогенного происхождения от природной мелкой пыли, содержащейся в PBL, можно воспользоваться оценкой таких показателей как интегральная величина деполаризации в слое и интегральная величина

на коэффициента ослабленного обратного рассеяния. Подробно процедура реализации процесса различения изложена в ряде трудов [13; 15].

*Методология исследования. Обзор существующих методов исследования.* Для определения регионов с различной степенью активности генерирования и эмиссии пыли в атмосферу в литературе используются различные критериальные оценки. Так, в статье «Влияние динамической оголенности поверхности на функцию, эмиссию и распределение источника пыли» [4] рассматривается относительный коэффициент  $B$ , определяемый как

$$B = \frac{N_{\leq 0.15}}{N_{total}}, \quad (1)$$

где  $N_{\leq 0.15}$  и  $N_{total}$  – количество пикселей с NDVI (NDVI – нормализованный дифференциальный вегетационный индекс) и  $NDVI < 0,15$ , а также общее количество пикселей в пределах одного исследуемого участка земной поверхности соответственно. Однако критериальная оценка (1), как нам представляется, недостаточно точна из-за подверженности NDVI атмосферному влиянию, и влиянию влажности почвы.

Также используется другой критериальный показатель  $CNLI$  – совместный индекс ночного свечения – городов [10]. Этот показатель использован в Программе метеорологических спутников оборонного назначения (система операционного линейного сканирования) (DMSP/OLS) [16] и определяется следующим образом:

$$CNLI = I \cdot R, \quad (2)$$

$$\text{где } R = \frac{S_N}{S_{total}}, \quad (3)$$

где  $S_N$  – площадь освещаемых городских зон в исследуемом участке;

$S$  – площадь исследуемого участка.

Яркость ночного свечения  $I$  определяется как

$$I = \frac{1}{N_L \cdot DN_M} \cdot \sum_{i=p}^{DN_M} (DN_i \cdot n_i), \quad (4)$$

где  $DN_i$  –  $i$ -й уровень «серого» сигнала свечения;

$n_i$  – количество пикселей, светящихся на уровне  $DN_i$ ;

$P$  – начальный пороговый уровень свечения;

$DN_M$  – максимальный уровень свечения;

$N_L$  – общее количество светящихся пикселей.

Критериальные показатели (1) и (2) используются для общего разграничения городских зон для оценки их вклада в интенсивность эмиссии в атмосферу антропогенной пылью.

Так, в статье «Оценки косвенных и прямых антропогенных выбросов пыли в глобальном масштабе» [10] для различения урбанизированных территорий по классам используются следующие интервальные значения  $CNLI_i$ ;  $i = (1,3)$ :

- 1)  $0,0 < CNLI_1 \leq 0,1$
- 2)  $0,1 < CNLI_2 \leq 0,3$
- 3)  $0,3 < CNLI_3 \leq 1,0$ .

При этом для конкретной оценки потока антропогенной пыли, эмитируемой в атмосферу урбанизированными территориями различных классов, используются следующие показатели этих территорий:

- 1) плотность населения ( $P$ );
- 2) возможность экономического развития ( $GDP$ ) (Общий внутренний продукт) – рост  $GDP$  на душу населения;
- 3)  $EC$  – уровень экономики страны.

Для определения интенсивности эмиссии пыли в атмосферу применяются функциональные оценки ( $G$ ). В общем случае такие функциональные оценки имеют вид  $G = F(P, GDP, EC)$  для различных классов, указанных в (5).

Вместе с тем интерес представляет обратная задача, заключающаяся в определении таких оптимальных урбанизированных территорий, которые при заданных  $G_i$  для  $i$ -го класса,  $i = (1,3)$  обладали бы одинаковыми оптимальными величинами  $P$ ,  $GDP$  и  $EC$  при условии, что их суммарный вклад в интенсивность эмиссии в атмосферу минеральной пыли достиг бы минимума. Проведенный анализ соответствующей научно-технической литературы показал, что данный вопрос до сих пор и не рассматривался.

Следует отметить, что приведенный критерий (2) основан на спутниковой оценке освещенности атмосферы. Вместе с тем для случая применения наземной оценки освещенности атмосферы в ночное время может быть предложена интегральная оценка освещения атмосферы  $I_0(\tau_n, \tau_{ant})$  в виде

$$I_{01}(\tau_n, \tau_{ant}) = \int_0^{\tau_{ant}^{max}} I(\tau_{ant}) \cdot e^{-[\tau_n + \tau_{ant}]} d\tau_{ant}, \quad (6)$$

где  $\tau_{ant}$  – оптическая толщина антропогенного аэрозоля;

$\tau_n$  – оптическая толщина природного аэрозоля;

$I(\tau_{ant})$  – интенсивность свечения атмосферы.

Оценка (6) основана на следующих предположениях:

– измерения осуществляются по оси «земная поверхность – атмосфера», где  $\tau_{ant}$  изменяется от нуля до  $\tau_{ant\ max}$ ;

– допускается, что освещенность атмосферы, измеряемая на земной поверхности, является показателем потока антропогенного пылевого аэрозоля, эмитированного в атмосферу;

– оптический сигнал на входе наземного измерителя подвергается ослаблению из-за воздействия как природного, так и антропогенного аэрозоля.

Принятие критерия (6) позволяет оценивать величину  $I_0(\tau_n, \tau_{ant})$  допустив существование функциональной зависимости в виде

$$\tau_n = \tau_n(\tau_{ant}). \tag{7}$$

Далее будет показана возможность оптимизации критерия (6) с учетом различных условий, налагаемых на функциональную зависимость (7).

Целью оптимизации является вычисление такой функции (7), при которой обеспечивается минимум дошедшего до земной поверхности ночного свечения атмосферы. Такое уменьшение необходимо для повышения точности различных атмосферных измерений, а также наземных оптических измерений, приводимых в видимом и инфракрасном диапазонах.

*Предлагаемый метод* определения оптимальных величин  $P$ ,  $GDP$  и  $EC$  для трех урбанизированных территорий, относящихся соответственно к классам  $CNLI_i$ ;  $i = \overline{(1,3)}$ , заключается в следующем.

В качестве исходного положения предлагаемого метода используем известные уравнения для вычисления потоков пыли, эмитируемых в атмосферу в урбанизированных территориях [10].

$$G_{di} = \begin{cases} d_1 \cdot P^{\alpha_1} \cdot GDP_{gr}^{\beta_1} \cdot EC^{\gamma_1}; \text{ при } 0 < CNLI \leq 0,1 \\ d_2 \cdot P^{\alpha_2} \cdot GDP_{gr}^{\beta_2} \cdot EC^{\gamma_2}; \text{ при } 0,1 < CNLI \leq 0,3 \\ d_3 \cdot P^{\alpha_3} \cdot GDP_{gr}^{\beta_3} \cdot EC^{\gamma_3}; \text{ при } 0,3 < CNLI \leq 1,0 \end{cases} \tag{8}$$

где  $G_{di}$ ;  $i = \overline{(1,3)}$  (измеряется в мкг·м-2·с-1),

где  $d_1 = 13,67$ ;  $d_2 = 13,72$ ;  $d_3 = 13,67$ ;

$$\alpha_1 = 0,08; \alpha_2 = 0,04; \alpha_3 = 0,08;$$

$$\beta_1 = 0,02; \beta_2 = 0,05; \beta_3 = 0,002;$$

$$\gamma_1 = 1,78; \gamma_2 = 1,56; \gamma_3 = 1,35.$$

Логарифмирование выражений (8) дает

$$\ln \left( \frac{G_{d1}}{d_1} \right) = \alpha_1 \ln P + \beta_1 \ln GDP_{gr} + \gamma_1 \ln EC. \tag{9}$$

Целевой функционал составим в виде

$$F = \chi_1 \cdot \ln \left( \frac{G_{d1}}{d_1} \right) + \chi_2 \cdot \ln \left( \frac{G_{d2}}{d_2} \right) + \chi_3 \cdot \ln \left( \frac{G_{d3}}{d_3} \right), \tag{10}$$

где  $\chi_1, \chi_2, \chi_3$  – весовые коэффициенты логарифмических частных оценок потоков пыли, задаваемые экспертами.

С учетом (9) и (10) имеем

$$F = (\ln P) \cdot (\alpha_1 \chi_1 + \alpha_2 \chi_2 + \alpha_3 \chi_3) + (\ln GDP_{gr}) \cdot (\beta_1 \chi_1 + \beta_2 \chi_2 + \beta_3 \chi_3) + (\ln EC) \cdot (\gamma_1 \chi_1 + \gamma_2 \chi_2 + \gamma_3 \chi_3) \tag{11}$$

Уравнения (9) и (11) с учетом следующих ограничительных условий представляют собой задачу линейного программирования

$$\begin{cases} \ln \left( \frac{G_{d1}}{d_1} \right) \leq C_{01} \\ \ln \left( \frac{G_{d2}}{d_2} \right) \leq C_{02} \\ \ln \left( \frac{G_{d3}}{d_3} \right) \leq C_{03} \end{cases}, \tag{12}$$

где  $C_{01}, C_{02}, C_{03}$  – постоянные, задаваемые экспертами.

Названная задача вычисления оптимальных модельных значений  $P_{opt}, GDP_{gr,opt}, EC_{opt}$  может быть решена при заданных  $\chi_1, \chi_2, \chi_3$  относительно  $\ln P, \ln GDP_{gr}$  и  $\ln EC$  по процедуре линейного программирования используя симплексный метод. Далее вычисляются  $G_{di}$ ;  $i = \overline{(1,3)}$  и ставится задача определения пороговых значений  $G_{di}$ ;  $i = \overline{(1,3)}$ , соответствующих общепринятым пороговым значениям  $CNLI$  равным 0; 0,1; 0,3 и 1,0 [10].

Для этого составляются три множества где элементами множеств  $G_{di}$  оказываются

$$\left. \begin{aligned} G_{d1} &= \{G_{d1j}\}; \text{ где } 0 < (CNLI)_{1j} \leq 0,1; \text{ где } j = \overline{(1, k_1)} \\ G_{d2} &= \{G_{d2l}\}; \text{ где } 0,1 < (CNLI)_{2l} \leq 0,3; \text{ где } l = \overline{(1, k_2)} \\ G_{d3} &= \{G_{d3m}\}; \text{ где } 0,3 < (CNLI)_{3m} \leq 1; \text{ где } m = \overline{(1, k_3)} \end{aligned} \right\}, \tag{13}$$



те урбанизированные территории, у которых показатель CNLI находится в пределах, указанных в (13).

Для определения взаимного функционального соответствия между элементами  $G_{d_1j}, G_{d_2l}, G_{d_3k}$  и значениями показателя CNLI определяются минимальные и максимальные значения этих элементов в  $G_{di}, G_{d_2}, G_{d_3}$ .

Далее составляется калибровочная кривая  $G_d = f(CNLI)$ , где точки  $G_d^{(1)}, G_d^{(2)}$  и  $G_d^{(3)}$  определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} C_d^{(1)} &= \frac{(G_{d_1j})_{max} + (G_{d_2k})_{min}}{2} \\ C_d^{(2)} &= (G_{d_2k})_{max} + (G_{d_3b})_{min} \\ C_d^{(3)} &= (G_{d_3l})_{max}. \end{aligned} \quad (14)$$

После построения калибровочной линии (рис. 1) осуществляется проверка по калибровочной линии того, приводят ли вычисленные оптимальные значения  $P, GDP_{gr}$  и  $EC$  к переходу вычисленных по формулам (6) значений  $G_{di}$  к другой зоне CNLI. Если такой переход имеет место, то считается, что проведенная оптимизация может дать действенный эффект в деле уменьшения свечения атмосферы.

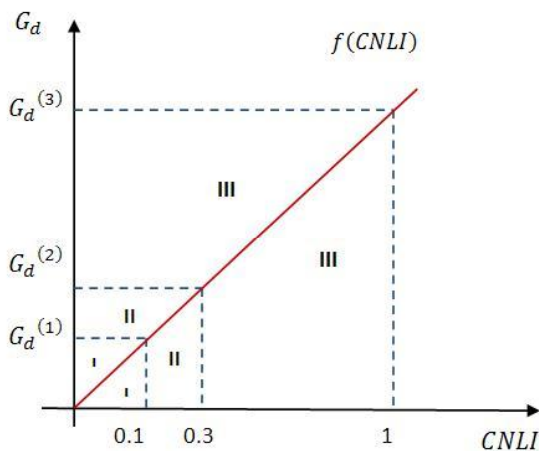


Рис. 1. Построение калибровочной линии  $G_d = f(CNLI)$ ; I, II, III – зоны соответствия  $G_d$  к CNLI / Fig. 1 Construction of calibration line  $G_d = f(CNLI)$ ; I, II, III – conformity zone  $G_d$  to CNLI

Рассмотрим возможность оптимизации измерений, проводимых по критерию (6). Приняв условие существования функции (7), наложим на нее следующее ограничительное условие:

$$I_{02}(\tau_n, \tau_{ant}) = \int_0^{\tau_{antmax}} \tau_n(\tau_{ant}) d\tau_{ant} = C_1, \quad (15)$$

где  $C_1 = const$ .

Физический смысл (15) заключается в том, что с ростом  $\tau_{ant}$  составляющая  $\tau_n$  может расти или уменьшаться в зависимости от экстенсивного или интенсивного характера человеческой деятельности (рис. 2).

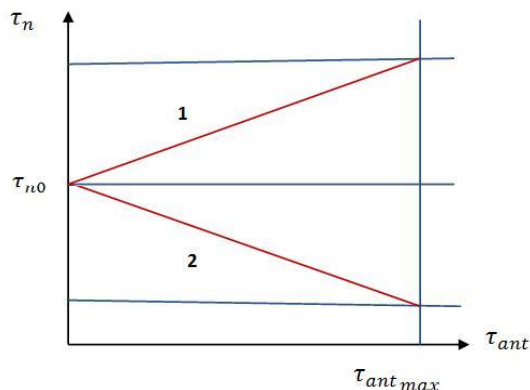


Рис. 2. Изменение функции  $\tau_n = \tau_n(\tau_{ant})$  в зависимости от экстенсивного или интенсивного характера развития антропогенной деятельности: 1 – линия экстенсивного развития, когда рост  $\tau_{ant}$  сопровождается ростом  $\tau_n$ ; 2 – линия интенсивного развития антропогенной деятельности, когда рост  $\tau_{ant}$  приводит к уменьшению  $\tau_n$  / Fig.2. Function change  $\tau_n = \tau_n(\tau_{ant})$  depending on the extensive or intensive nature of anthropogenic activity development: 1 – line of extensive development, when growth  $\tau_{ant}$  is accompanied by growth  $\tau_n$ ; 2 – line of intensive development of anthropogenic activity, when growth  $\tau_{ant}$  leads to reduction of  $\tau_n$

Если в первом приближении вероятности появления указанных двух тенденций развития антропогенной деятельности взять равными 0,5, то условие (15) может быть рассмотрено в качестве реального факта динамики развития широкомасштабных урбанизируемых зон.

С учетом выражений (6) и (15) можно составить задачу безусловной вариационной оптимизации

$$\begin{aligned} I_0 &= I_{01}(\tau_n, \tau_{ant}) + \lambda \cdot I_{02}(\tau_n, \tau_{ant}) = \\ &= \int_0^{\tau_{antmax}} I(\tau_{ant}) \cdot e^{-[\tau_n(\tau_{ant}) + \tau_{ant}]} d(\tau_{ant}) + \\ &+ \lambda \cdot \int_0^{\tau_{antmax}} \tau_n(\tau_{ant}) \cdot d(\tau_{ant}), \end{aligned} \quad (16)$$

где  $\lambda$  – множитель Лагранжа.

Решение оптимизационной задачи (16) по методу Эйлера – Лагранжа предусматривает выполнение условия

$$\frac{d\{I(\tau_{ant}) \cdot e^{-[\tau_n(\tau_{ant}) + \tau_{ant}] + \lambda \cdot \tau_n(\tau_{ant})}\}}{d(\tau_n(\tau_{ant}))} = 0, \quad (17)$$

Из него получим

$$I_0(\tau_{ant}) \cdot e^{-[\tau_n(\tau_{ant})+\tau_{ant}]} + \lambda = 0. \quad (18)$$

Из выражения (18) находим

$$\tau_n(\tau_{ant}) = \ln \left[ \frac{\lambda}{I_0(\tau_{ant})} \right] - \tau_{ant}. \quad (19)$$

Из выражений (15) и (19) имеем

$$\int_0^{\tau_{antmax}} \ln \left[ \frac{\lambda}{I_0(\tau_{ant})} \right] d(\tau_{ant}) - \int_0^{\tau_{antmax}} \tau_{ant} d\tau_{ant} = C_1. \quad (20)$$

Из (20) находим

$$\ln \left[ \frac{\lambda}{I_0(\tau_{ant})} \right] \cdot \tau_{antmax} = C_1 - \frac{\tau_{antmax}^2}{2}. \quad (21)$$

Из (21) получим

$$\ln \lambda = \frac{C_1}{\tau_{antmax}} - \frac{\tau_{antmax}}{2} + \ln \left[ \frac{\lambda}{I_0(\tau_{ant})} \right]$$

или

$$\lambda = \frac{\exp \left[ \frac{C_1}{\tau_{antmax}} - \frac{\tau_{antmax}}{2} \right]}{I_0(\tau_{ant})}. \quad (22)$$

Учитывая выражения (19) и (22), получим

$$\tau_n(\tau_{ant}) = \ln \left[ \frac{\exp \left[ \frac{C_1}{\tau_{antmax}} - \frac{\tau_{antmax}}{2} \right]}{I_0(\tau_{ant})} \right] - \ln I_0(\tau_{ant}) - \tau_{ant} = \frac{C_1}{\tau_{antmax}} - \frac{\tau_{antmax}}{2} - 2 \ln I_0(\tau_{ant}) = A - \tau_{ant}, \quad (23)$$

где  $A = \frac{C_1}{\tau_{antmax}} - \frac{\tau_{antmax}}{2} - 2 \ln I_0(\tau_{ant}). \quad (24)$

С учетом (6) и (22) имеем

$$I_{01}(\tau_n, \tau_{ant})_{opt} = \int_0^{\tau_{antmax}} I_0(\tau_{ant}) \exp^{-[A-\tau_{ant}+\tau_{ant}]} d\tau_{ant} = \exp(-A) \cdot \int_0^{\tau_{antmax}} I_0(\tau_{ant}) \cdot d\tau_{ant}. \quad (25)$$

Результаты проведенного анализа позволяют определить выигрыш в уменьшении степени освещенности атмосферы, доходящей до земной поверхности, т. е. одного из источников «светового загрязнения» земной поверхности.

*Результаты исследования и их обсуждение.* Конкретный выигрыш в уменьшении степени освещенности атмосферы, дошедшей до земной поверхности, в оптимальном режиме определим как

$$k = \frac{I_{01}(\tau_n, \tau_{ant})_{opt}}{I_{01}(\tau_n, \tau_{ant})} = \frac{\exp(-A) \cdot \tau_{antmax}}{\int_0^{\tau_{antmax}} \exp[-(\tau_n(\tau_{ant})+\tau_{ant})] dt}. \quad (26)$$

Например, при неоптимальной зависимости

$$\tau_n(\tau_{ant}) = A - 2\tau_{ant}. \quad (27)$$

Из (26) и (27) получим

$$k = \frac{\tau_{antmax}}{\int_0^{\tau_{antmax}} \exp(\tau_{ant}) \cdot d\tau_{ant}}. \quad (28)$$

Так, при  $\tau_{antmax} = 1$  имеем  $k = \frac{1}{e}$ ; при  $\tau_{antmax} = 0,1$  получим  $k \approx \frac{0,1}{1}$ . Таким образом, при вычисленном оптимальном режиме всегда обеспечивается уменьшение суммарной оценки  $I_0$ .

*Заключение.* Предложенный метод оптимизации основных показателей урбанизированных территорий позволяет определить потенциал в деле минимизации эмиссии антропогенной пыли в атмосферу, который следует учитывать при разработке перспективных градостроительных проектов и экологически обоснованных планов экономического развития урбанизированных регионов. При этом, предлагаемый метод позволяет совместно рассматривать урбанизированные территории, принадлежащие к различным классам по показателю *CNLI*.

По результатам исследования достигнуты определенные результаты:

- сформулирована и решена модельная задача гипотетической оценки суммарной минимальной величины эмитируемой в атмосферу антропогенной пыли путем определения оптимальных величин показателей территорий *P*, *GDP* и *EC* по процедуре линейного программирования;

- предложен интегральный критерий наземной оценки ночного свечения атмосферы, учитывающий взаимосвязь природной и антропогенной составляющей пыли, эмитируемой в атмосферу. Показано, что при оптимальной взаимосвязи названных составляющих минеральной пыли может быть достигнуто значительное ослабление свечения атмосферы, достигающей земной поверхности в виде «светового загрязнения».

## Список литературы

1. Ginoux P., Zhao M., Prospero J. M., Gill T. E., Hsu N. C. Global-scale attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates based on MODIS Deep Blue aerosols product. URL: <https://www.agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2012RG000388> (дата обращения: 15.11.2019). Текст: электронный.
2. Han Z., Ueda H., Matsuda K., Zhang R., Arai K., Kanai Y., Hasome H. Model study on particle size segregation and deposition during Asian dust events in March 2002 // *Journal of Geophysical Research*. 2004. Vol. 109.
3. Kim D., Chin M., Bian H., Tan Q., Brown M. E., Zheng T., You R., Diehl T., Ginoux P., Kucsera T. The effect of the dynamic surface bareness on dust source function, emission and distribution // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2013. Vol. 118, No. 2. P. 871–886.
4. Klein G. K., Beusen A., Van Drecht G., DeVos M. The HYDE 3.1 spatially explicit database of human – induced global land – use change over the past 12.000 years // *Global Ecology and Biogeography*. 2011. Vol. 20, No. 1. P. 73–86.
5. Moulin C., Chiapello I. Impact of human – induced desertification on the intensification of Sahel dust emission and export over the last decades. URL: <https://www.agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2006GL025923> (дата обращения: 12.11.2019). Текст: электронный.
6. Munkhtsetseg E., Shinoda M., Ishizuka M., Mikami M., Kimura R., Nikolic G. A livestock trampling function for potential emission rate of wind-blown dust in a Mongolian temperate grassland. URL: [https://www.researchgate.net/publication/313825732\\_A\\_Livestock\\_Trampling\\_Function\\_for\\_Potential\\_Emission\\_Rate\\_of\\_Wind-blown\\_Dust\\_in\\_a\\_Mongolian\\_Temperate\\_Grassland](https://www.researchgate.net/publication/313825732_A_Livestock_Trampling_Function_for_Potential_Emission_Rate_of_Wind-blown_Dust_in_a_Mongolian_Temperate_Grassland) (дата обращения: 17.11.2019). Текст: электронный.
7. Penner J. E., Charlson R. J., Hales J. M., Laulainen N. S., Leifer R., Novakov T., Ogre J., Radke L. F., Schwartz S. E., Travis L. Quantifying and minimizing uncertainty of climate forcing by anthropogenic aerosols // *Bulletin of American Meteorological Society*. 1994. Vol. 75, No. 3. P. 375–400.
8. Shao Y. P., Dong C. H. A review on East Asian dust storm climate, modeling and monitoring // *Global and Planetary Change*. 2006. Vol. 52. P. 1–22.
9. Shao Y. P. Simplification of a dust emission scheme and comparison with data. URL: <https://www.agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2003JD004372> (дата обращения: 14.11.2019). Текст: электронный.
10. Siyu Chen, Nanxuan Jiyang, Jianping Huang, Zhou Zhang, Xiaodan Guan, Xiaojun Ma, Yuan Luo, Jiming Li, Xiaorui Zhang, Yanting Zhang Estimations of indirect and direct anthropogenic dust emission at the global scale // *Atmospheric Environment*. 2019. Vol. 200. P. 50–60.
11. Sokolik I. N., Toon O. B. Direct radiative forcing by anthropogenic airborne mineral aerosol // *Nature*. 1996. Vol. 381. P. 681–683.
12. Sutton P. Modeling population density with nighttime satellite imagery and GIS // *Computers, Environment and Urban Systems*. 1997. Vol. 21, No. 3–4. P. 227–244.
13. Tegen I., Fung I. Contribution to the atmospheric mineral aerosol load from land surface modification // *Journal of Geophysical Research*. 1995. Vol. 100. P. 18707–18726.
14. Xi X., Sokolik I. N. Seasonal dynamic of threshold friction velocity and dust emission in Central Asia // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2015. Vol. 120, No. 4. P. 1536–1564.
15. Zender C. S., Bian H., Newman D. Mineral dust entrainment and deposition (DEAD) model: Description and 1990s dust climatology. URL: <http://www.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2002JD002775/pdf> (дата обращения: 15.11.2019). Текст: электронный.
16. Zhou L., Shi P. J., Chen J., Ichinose T. Application of compounded night light index derived from DMSP/OLS data to urbanization analysis in China in the 1990s // *Acta Geographica Sinica*. Vol. 58, No. 6. P. 893–902.

## References

1. Ginoux P., Zhao M., Prospero J. M., Gill T. E., Hsu N. C. *Global-scale attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates based on MODIS Deep Blue aerosols product* (Global-scale attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates based on MODIS Deep Blue aerosols product). URL: <https://www.agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2012RG000388> (Date of access: 15.11.2019). Text: electronic.
2. Han Z., Ueda H., Matsuda K., Zhang R., Arai K., Kanai Y., Hasome H. *Journal of Geophysical Research* (*Journal of Geophysical Research*), 2004, vol. 109.
3. Kim D., Chin M., Bian H., Tan Q., Brown M. E., Zheng T., You R., Diehl T., Ginoux P., Kucsera T. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (*Journal of Geophysical Research: Atmospheres*), 2013, vol. 118, no. 2, pp. 871–886.
4. Klein G. K., Beusen A., Van Drecht G., DeVos M. *Global Ecology and Biogeography* (*Global Ecology and Biogeography*), 2011, vol. 20, no. 1, pp. 73–86.

5. Moulin C., Chiapello I. *Impact of human – induced desertification on the intensification of Sahel dust emission and export over the last decades* (Impact of human – induced desertification on the intensification of Sahel dust emission and export over the last decades). URL: <https://www.agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2006GL025923> (Date of access: 12.11.2019). Text: electronic.
6. Munkhtsetseg E., Shinoda M., Ishizuka M., Mikami M., Kimura R., Nikolic G. *A livestock trampling function for potential emission rate of wind-blown dust in a Mongolian temperate grassland* (A livestock trampling function for potential emission rate of wind-blown dust in a Mongolian temperate grassland). URL: [https://www.researchgate.net/publication/313825732\\_A\\_Livestock\\_Trampling\\_Function\\_for\\_Potential\\_Emission\\_Rate\\_of\\_Wind-blown\\_Dust\\_in\\_a\\_Mongolian\\_Temperate\\_Grassland](https://www.researchgate.net/publication/313825732_A_Livestock_Trampling_Function_for_Potential_Emission_Rate_of_Wind-blown_Dust_in_a_Mongolian_Temperate_Grassland) (Date of access: 17.11.2019). Text: electronic.
7. Penner J. E., Charlson R. J., Hales J. M., Laulainen N. S., Leifer R., Novakov T., Ogre J., Radke L. F., Schwartz S. E., Travis L. *Bulletin of American Meteorological Society* (Bulletin of American Meteorological Society), 1994, vol. 75, no. 3, pp. 375–400.
8. Shao Y. P., Dong C. H. *Global and Planetary Change* (Global and Planetary Change), 2006, vol. 52, pp. 1–22.
9. Shao Y. P. *Simplification of a dust emission scheme and comparison with data* (Simplification of a dust emission scheme and comparison with data). URL: <https://www.agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2003JD004372> (Date of access: 14.11.2019). Text: electronic.
10. Siyu Chen, Nanxuan Jiyang, Jianping Huang, Zhou Zhang, Xiaodan Guan, Xiaojun Ma, Yuan Luo, Jiming Li, Xiaorui Zhang, Yanting Zhang *Atmospheric Environment* (Atmospheric Environment), 2019, vol. 200, pp. 50–60.
11. Sokolik I. N., Toon O. B. *Nature* (Nature), 1996, vol. 381, pp. 681–683.
12. Sutton P. *Computers, Environment and Urban Systems* (Computers, Environment and Urban Systems), 1997, vol. 21, no. 3–4, pp. 227–244.
13. Tegen I., Fung I. *Journal of Geophysical Research* (Journal of Geophysical Research), 1995, vol. 100, pp. 18707–18726.
14. Xi X., Sokolik I. N. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (Journal of Geophysical Research: Atmospheres), 2015, vol. 120, no. 4, pp. 1536–1564.
15. Zender C. S., Bian H., Newman D. *Mineral dust entrainment and deposition (DEAD) model: Description and 1990s dust climatology* (Mineral dust entrainment and deposition (DEAD) model: Description and 1990s dust climatology). URL: <http://www.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2002JD002775/pdf> (Date of access: 15.11.2019). Text: electronic.
16. Zhou L., Shi P. J., Chen J., Ichinose T. *Acta Geographica Sinica* (Acta Geographica Sinica), 2015, vol. 58, no. 6, pp. 893–902.

#### Коротко об авторах

Асадов Хикмет Гамид оглы, д-р техн. наук, профессор, начальник отдела атмосферных измерений, Национальное аэрокосмическое агентство, г. Баку, Азербайджанская Республика. Область научных интересов: дистанционное зондирование, экология, атмосферные исследования, информационно-измерительная техника  
asadzade@rambler.ru

Керимов Натиг Исрафил оглы, начальник отдела координации научных исследований, Национальное аэрокосмическое агентство, г. Баку, Азербайджанская Республика. Область научных интересов: дистанционное зондирование, экология, атмосферные исследования  
Natiq1975@gmail.ru

#### Briefly about the authors

Asadov Khikmat Hamid oglu, doctor of technical sciences, professor, head of Atmospheric Measurement department, National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan. Sphere of scientific interests: remote sensing, ecology, atmospheric research, information-measuring equipment

Kerimov Natig Israfil oglu, head of Research Coordination department, National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan. Sphere of scientific interests: remote sensing, ecology, atmospheric research

#### Образец цитирования

Асадов Х. Г., Керимов Н. И. К вопросу о космическом контроле урбанизированных зон по уровню их оптического излучения и эмиссии в атмосферу антропогенной пыли // Вестник Забайкальского государственного университета. 2020. Т. 26, № 1. С. 6–13. DOI: 10.21209/2227-9245-2020-26-1-6-13.

Asadov H., Kerimov N. On the question about classification of urbanized zones on level of anthropogenic dust emission to the atmosphere // Transbaikalian State University Journal, 2020, vol. 26, no. 1, pp. 6–13. DOI: 10.21209/2227-9245-2020-26-1-6-13.

Статья поступила в редакцию: 28.12.2019 г.  
Статья принята к публикации: 14.01.2020 г.