



www.volsu.ru

ЭКОЛОГИЯ И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ

DOI: <https://doi.org/10.15688/jvolsu11.2016.3.3>

УДК 551.510.42

ББК 26.233

ИНФОРМАЦИОННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕРАВНОМЕРНОСТИ КОНЦЕНТРАЦИИ ПРИЗЕМНОГО ОЗОНА В ЗОНЕ АЭРОПОРТА

Татьяна Григорьева Анодина

Доктор технических наук, профессор, председатель,
Межгосударственный авиационный комитет
mak@mak.ru
ул. Большая Ордынка, 22/2/1, 119017 г. Москва, Российская Федерация

Ибрагим Шаиг оглы Магеррамов

Аспирант,
Национальное аэрокосмическое агентство
imaharramov@hotmail.com
ул. С.С. Ахундова, 1, AZ1106 г. Баку, Республика Азербайджан

Аннотация. Статья посвящена исследованию неравномерности распределения концентрации приземного озона в зоне аэропорта. Целью проводимых исследований является разработка метода определения степени пространственной вариации приземного озона между центральным, нетранспортным участком аэропорта, характеризующимся повышенной концентрацией O_3 , и взлетной полосой, характеризующейся минимальной концентрацией O_3 . Приземный озон считается вторичным загрязнителем, фотохимическим оксидантом и основным компонентом смога. Озон способен серьезно повредить дыхательные пути организма человека, поразить легкие. Из-за фитотоксичности O_3 высокая концентрация озона отрицательно влияет на растительность. Скорость генерации поверхностного озона увеличивается при низких концентрациях NO_x вплоть до максимальной величины, и далее увеличение NO_x приводит к удалению радикалов OH из-за их реакции с NO_2 , способствуя снижению скорости фотохимического формирования O_3 .

Отмечается наличие сильной отрицательной корреляции между концентрацией поверхностного озона и его основным прекурсором, каковым является NO . Показано, что корреляционная связь между этими двумя малыми газовыми составляющими ат-

мосферы позволяет выработать новый метод измерения приращения концентрации поверхностного озона в различных точках аэропорта относительно интенсивно эксплуатируемой взлетной полосы. Определено, что усредненная величина таких приращений может быть оценена путем вычисления общего количества информации, вырабатываемого при проведении измерений концентраций NO в сравниваемых точках территории аэропорта вне взлетной полосы.

Ключевые слова: приземный озон, аэропорт, количество информации, измерения, прекурсор.

Введение. Известно, что приземный озон (O_3) считается вторичным загрязнителем, фотохимическим оксидантом и основным компонентом смога. Озон способен серьезно повредить дыхательные пути человека, поразить легкие. Из-за фитотоксичности O_3 высокая концентрация озона отрицательно влияет на растительность. Поверхностный озон, концентрация которого выше 40 ppbv, может повредить урожайные поля, уменьшить способность лесов поглощать карбон [5; 13].

Основными прекурсорами поверхностного озона являются летучие органические соединения (VOC), окись азота (NO_x). Как указывает N. Vanan [13], измерения concentra-

ции приземного озона в станциях мониторинга осуществлялись анализатором типа “Teledyne Ozone Analyzer Model 400 A UV Absorption”, работающего на основе закона Бугера – Бера. На рисунке 1 показаны графики дневного изменения концентраций O_3 , NO_2 и NO, построенные на базе данных измерений, проведенных в городе Путруджая, Малайзия [13].

Как видно из приведенных на рисунке 1 графиков, между концентрациями поверхностного озона и NO_x имеется достаточно сильная отрицательная корреляция.

На рисунке 2 приведена скатерограмма между концентрациями O_3 и NO, измеренными на станции Джерангут, Малайзия.

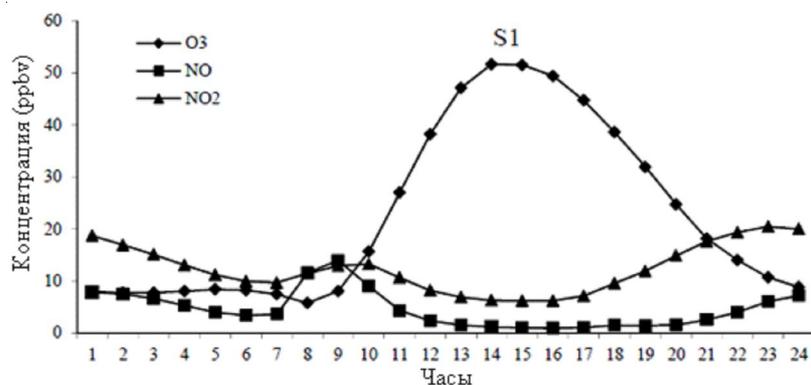


Рис. 1. Дневные изменения концентраций приземного озона, NO и NO_2 [1]

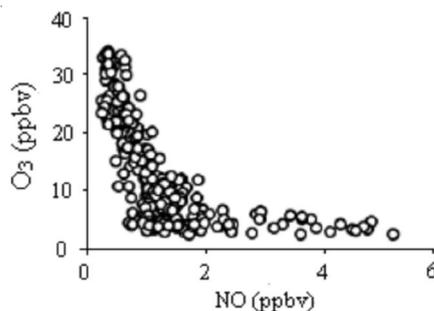


Рис. 2. Скатерограмма между измеренными величинами концентрации O_3 и NO [1]

Известно, что скорость генерации поверхностного озона увеличивается при низких концентрациях NO_x вплоть до максимальной величины, и далее увеличение NO_x приводит к удалению радикалов OH из-за их реакции с NO_2 , способствуя снижению скорости фотохимического формирования O_3 [1; 8; 11; 14].

Приземный озон подвержен сильным сезонным, эпизодическим и дневным изменениям [3; 4; 10].

Согласно экспериментальным исследованиям, проведенным с помощью радиометра РМА 2200, предназначенного для измерения интенсивности UVB радиации (280–315 нм), а также анализатора ML 9811, осуществляющего измерение концентрации озона в диапазоне (0–2000 мкг/м³), было обнаружено наличие значительной положительной корреляции между интенсивностью UVB радиации и концентрацией приземного озона при коэффициенте корреляции равной 0,52.

Между концентрациями O_3 и NO имеется логарифмическая взаимосвязь [2; 6; 9; 12]. В то же время между концентрациями O_3 и NO_2 существует типичная линейная зависимость. Между концентрациями NO и NO_x была обнаружена связь в виде степенной функции, а также найдена сильная линейная взаимосвязь между концентрацией O_3 и отношением концентраций $\left(\frac{\text{NO}_2}{\text{NO}}\right)$ [17].

Согласно Т.С. Селегей [12], высокая степень эмиссии NO из автомобильного транспорта приводит к низкой концентрации приземного озона вдоль магистралей. Аналогичная закономерность имеет место применительно к интенсивно используемой взлетной полосе аэропортов [7; 17]. В то же время существует многомерная регрессионная зависимость между концентрацией поверхностного озона и всеми факторами, наступающими в качестве прекурсора генерации O_3 [7; 15; 16; 18; 19]. Общеизвестно, что линейная регрессионная модель является аппроксимацией первого порядка нелинейной зависимости, что позволяет выработать новые методы измерения пространственной вариации концентрации приземного озона на базе общих свойств линейных и нелинейных моделей.

Цель исследований. Целью исследований в настоящей статье является разра-

ботка метода определения степени пространственной вариации приземного озона между центральным, нетранспортным участком аэропорта, характеризующимся повышенной концентрацией O_3 , и взлетной полосой, характеризующейся минимальной концентрацией O_3 .

Предлагаемый метод. Как было отмечено выше, между концентрацией приземного озона C_{O_3} и показателями факторов – прекурсоров генерации O_3 – существует линейная регрессионная связь в виде:

$$C_{\text{O}_3} = \alpha_1 F_1 + \alpha_2 F_2 + \dots + \alpha_n F_n, \quad (1)$$

где $F_i, i = (\overline{1, n})$ – i -й фактор – прекурсор O_3 ; $\alpha_i, i = (\overline{1, n})$ – коэффициенты регрессии.

Приняв $F_1 = C_{\text{NO}}$, запишем уравнение (1) для двух сравниваемых пространственных точек (точка, взятая вдоль взлетной полосы, и точка, находящаяся вне зоны влияния взлетной полосы). Имеем:

$$C_{\text{O}_3,1} = \alpha_1 F_{1\text{min}} + \alpha_2 F_2 + \dots + \alpha_n F_n, \quad (2)$$

$$C_{\text{O}_3,2} = \alpha_1 F_{1\text{max}} + \alpha_2 F_2 + \dots + \alpha_n F_n. \quad (3)$$

При этом считаем, что значения факторов $F_i, i = (\overline{2, n})$ не изменяются. Из выражений (2) и (3) получим

$$\Delta C_{\text{O}_3} = C_{\text{O}_3,2} - C_{\text{O}_3,1} = \alpha_1 (F_{1\text{max}} - F_{1\text{min}}). \quad (4)$$

Таким образом, для выбранных двух характерных точек приращение ΔC_{O_3} может быть оценено по величине приращения прекурсора F_1 при неизменности $F_i, i = (\overline{2, n})$.

Вышеуказанное заключение в первом приближении верно и для нелинейных моделей зависимости $C_{\text{O}_3} = \varphi(F_1)$, так как линейные регрессионные модели являются линейным приближением нелинейных регрессионных моделей.

В качестве нелинейной модели регрессионной зависимости и C_{NO} воспользуемся следующим выражением [7]:

$$C_{\text{O}_3} = -a \ln(C_{\text{NO}}) + b, \quad (5)$$

где $a = 11,072$; $b = 95,163$.

Запишем выражение (5) для двух рассматриваемых точек проведения измерений. Имеем

$$C_{O_3, \max} = -a \ln(C_{NO, \min}) + b, \quad (6)$$

$$C_{O_3, \min} = -a \ln(C_{NO, \max}) + b. \quad (7)$$

Из выражений (6) и (7) получим

$$\begin{aligned} \Delta C_{O_3} &= C_{O_3, \max} - C_{O_3, \min} = \\ &= \ln(C_{NO, \min})^{-a} + \ln(C_{NO, \max})^a = \ln \left(\frac{C_{NO, \max}}{C_{NO, \min}} \right)^a. \end{aligned} \quad (8)$$

Из выражения (8) получим

$$C_{O_3, \max} = C_{O_3, \min} + a \cdot \ln \left(\frac{C_{NO, \max}}{C_{NO, \min}} \right). \quad (9)$$

Таким образом, согласно предлагаемому методу, для вычисления специфического приращения концентрации O_3 между двумя выбранными характерными точками измерений следует воспользоваться выражением (8). При этом значение $C_{O_3, \max}$ может быть вычислено по формуле (9) и по результатам измерений $C_{O_3, \min}$, $C_{NO, \max}$ и $C_{NO, \min}$.

Модельные исследования. Рассмотрим модельный случай проведения измерений $\Delta C_{O_3, i}$ между несколькими точками B_i вне взлетной полосы с соответствующими точками A_i вдоль полосы (рис. 3).

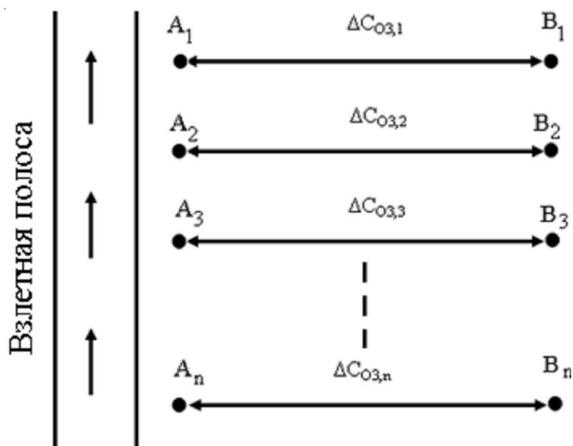


Рис. 3. Модель измерения между несколькими точками B_i вне взлетной полосы с соответствующими точками A_i вдоль полосы

В соответствии с формулой (8) суммарное значение измеренных величин $\Delta C_{O_3, i}, i = (1, n)$ определим как

$$\Delta C_{O_3, \Sigma} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta C_{O_3, i}}{a} = n \cdot \ln \left(\frac{C_{NO, \max}}{C_{NO, \min}} \right). \quad (10)$$

Однако правая часть выражения (10) определяется с точностью некоторого постоянного множителя d количество информации при проведении n измерений концентрации NO . Следовательно, формула (10) приобретает вид:

$$\Delta C_{O_3, ep} = \frac{d \cdot M(C_{NO})}{n}. \quad (11)$$

Таким образом, согласно результату проведенного модельного исследования, усредненная величина разности концентрации поверхности озона в рассматриваемой ситуации пропорциональна величине количества информации, извлекаемого при проведении измерений $C_{NO, \max}$ и $C_{NO, \min}$ в соответствующих точках измерений.

Заключение. Наличие сильной отрицательной корреляции между концентрацией поверхностного озона и его основным прекурсором, каковым является NO , позволяет выработать новый метод измерения приращения концентрации поверхностного озона в различных точках зоны аэропорта вне взлетной полосы относительно интенсивно используемой взлетной полосы. Показано, что усредненная величина таких приращений может быть определена в качестве общего количества информации, вырабатываемого при проведении измерений концентраций NO в сравниваемых точках территории аэропорта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аналитический обзор. Качество воздуха в крупнейших городах России за десять лет : 1998–2007 гг. – СПб. : Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, 2009. – 133 с.
2. Аргучинцева, А. В. Моделирование распределения антропогенных примесей в пограничном слое атмосферы города Улан-Батора / А. В. Аргучинцева, В. К. Аргучинцев, Л. В. Убонова // География и природные ресурсы. – 2008. – № 2. – С. 55–59.
3. Белан, Б. Д. Суточный ход концентрации приземного озона в районе г. Томска / Б. Д. Белан, Т. К. Складьева // Метеорология и Гидрология. – 2001. – № 5. – С. 50–60.

4. Богаткин, О. Г. Основы авиационной метеорологии. РГГМУ / О. Г. Богаткин. – СПб. : Изд-во РГГМУ, 2009. – 339 с.
5. Воробьев, В. И. Синоптическая метеорология / В. И. Воробьев. – Л. : Гидрометеиздат, 1971. – 340 с.
6. Вышинский, В. В. Струйно-вихревой след самолета: проблемы экологии и безопасности полета / В. В. Вышинский, А. Л. Стасенко // Математическое моделирование. – 1999. – № 4 (11). – С. 100–116.
7. Егоров, В. Изучение механизма поступления озона, двуокиси серы и азота в приземный слой атмосферы / В. Егоров, Б. Пастухов, Ю. Першин // Проблемы фонового мониторинга состояния природной среды. – Л. : Гидрометеиздат, 1986. – Вып. 4. – С. 96–105.
8. Звягинцев, А. М. Основные характеристики изменчивости содержания озона в нижней тропосфере над Европой / А. М. Звягинцев // Метеорология и Гидрология. – 2004. – № 10. – С. 46–55.
9. Исследование суточной динамики вертикального распределения озона в пограничном слое атмосферы / П. Н. Антохин, В. Г. Аршинова, М. Ю. Аршинов [и др.] // Труды Института Общей Физики им. А. М. Прохорова. – 2015. – Т. 71. – С. 127–135.
10. Морозова, М. М. Экологическая безопасность при взаимодействии объектов гражданской авиации с окружающей средой / М. М. Морозова, В. Н. Морозова, Т. В. Сафонова. – Ульяновск : УВАУ ГА (И), 2013. – 124 с.
11. Обзор состояния окружающей среды в городе Новосибирске за 2013 г. – Электрон. текстовые дан. – Режим доступа: www.degkh.ru/ecology/overview_of_the_environment_in/2014_obzor.pdf. – Загл. с экрана.
12. Селегей, Т. С. Изменчивость содержания приземного озона в атмосферном воздухе Новосибирска и его зависимость от метеорологических факторов / Т. С. Селегей, Н. Н. Филоненко, Т. Н. Ленковская // География и природные ресурсы. – 2011. – № 3. – С. 78–83.
13. Characteristics of Ozone Concentrations at Stations with Different Backgrounds in the Malaysian Peninsula / N. Banan, M. T. Latif, L. Juneng, F. Ahamad // Aerosol and Air Quality Research. – 2013. – № 13 (3). – P. 1090–1106. – DOI: 10.4209/aaqr.2012.09.0259.
14. Climate Services for Supporting Climate Change Adaptation Supplement to the Technical Guidelines for The National Adaptation Plan Process // GFCS. Global framework for climate services. – Geneva : World Meteorological Organization, 2016. – 50 p.
15. Gardner, M. W. Artificial Neural networks (the multilayer perceptron) – a review of applications in the atmospheric sciences / M. W. Gardner, S. R. Dorling // Atmospheric Environment. – 1998. – Vol. 32. – P. 2627–2636.
16. High spectral resolution ozone absorption cross-section. Part 1: Measurements, data analysis and comparison with previous measurements around 293K / V. Gorshelev, A. Serdyuchenko, M. Weber [et al.] // Atmospheric Measurement Techniques. – 2014. – Vol. 7. – P. 609–624.
17. Measuring air pollutants in an international Romania airport with point and open path instruments / I. Ionel, D. Nicolae, F. Popescu [et al.] // Romanian Journal of Physics. – 2011. – Vol. 56. – № 3–4. – P. 507–519.
18. NO and NO₂ Emission Ratios Measured from In-Use Commercial Aircraft during Taxi and Takeoff / C. Scot, H. S. Joanne, D. N. David, J. John // Environmental Science Technology. – 2004. – Vol. 38. – P. 6078–6084.
19. Popp, P. J. Method for commercial aircraft nitric oxide emission measurements / P. J. Popp, G. A. Bishop, D. H. Stedman // Environmental Science Technology. – 1999. – Vol. 3 (33). – P. 1542–1555.

REFERENCES

1. *Analiticheskiy obzor. Kachestvo vozdukh v krupneyshikh gorodakh Rossii za desyat let: 1998–2007 gg.* [Analytic Review. Air Quality in the Largest Russian Cities for the 10-year Period]. Saint Petersburg, Ministerstvo prirodnnykh resursov i ekologii Rossiyskoy Federatsii, 2009. 133 p.
2. Arguchintseva A.V., Arguchintsev V.K., Ubonova L.V. Modelirovanie raspredeleniya antropogennykh primesey v pogranichnom sloe atmosfery goroda Ulan-Batora [Modeling the Distribution of Anthropogenic Contaminants in the Atmospheric Boundary Layer in Ulan Bator]. *Geografiya i prirodnye resursy*, 2008, no. 2, pp. 55–59.
3. Belan B.D., Sklyadieva T.K. Sutochnny khod kontsentratsii prizemnogo ozona v rayone g. Tomsk [The Diurnal Variation of the Concentration of Ground-Level Ozone in Tomsk]. *Meteorologiya i Gidrologiya*, 2001, no. 5, pp. 50–60.
4. Bogatkin O.G. *Osnovy aviatsionnoy meteorologii. RGGMU* [Basics of Aeronautical Meteorology. RSHU]. Saint Peterburg, Izd. RGGMU, 2009. 339 p.
5. Vorobyev V.I. *Sinopticheskaya meteorologiya* [Synoptic Meteorology]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1971. 340 p.
6. Vyshinskiy V.V., Stasenko A.L. Struynovikhrevoysled samoleta: problemy ekologii i bezopasnosti poleta [Vortex Wake of the Aircraft: the Problem of Environment and Flight Safety]. *Matematicheskoe modelirovanie*, 1999, no. 4 (11), pp. 100–116.
7. Egorov V., Pastukhov B., Pershin Yu. Izuchenie mekhanizma postupleniya ozona, dvoukisi

sery i azota v prizemnyy sloy atmosfery [The Study of the Mechanism of Afflux of Ozone, Sulfur Dioxide and Nitrogen in the Surface Layer of the Atmosphere]. *Problemy fonovogo monitoringa sostoyaniya prirodnoy sredy* [Problems of Background Monitoring of the Natural Environment]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1986, iss. 4, pp. 96-105.

8. Zvyagintsev A.M. Osnovnye kharakteristiki izmenchivosti sodержaniya ozona v nizhney troposfere nad Evropoy [The Main Characteristics of Ozone Variability in the Lower Troposphere over Europe]. *Meteorologiya i Gidrologiya*, 2004, no. 10, pp. 46-55.

9. Antokhin P.N., Arshinova V.G., Arshinov M.Yu. Issledovanie sutochnoy dinamiki vertikalnogo raspredeleniya ozona v pogranichnom sloe atmosfery [The Study of Daily Dynamics of the Vertical Distribution of Ozone in the Atmospheric Boundary Layer]. *Trudy Instituta Obshchey Fiziki im. A.M. Prokhorova*, 2015, vol. 71, pp. 127-135.

10. Morozova M.M., Morozova V.N., Safonova T.V. *Ekologicheskaya bezopasnost pri vzaimodeystvii obyektov grazhdanskoy aviatsii s okruzhayushchey sredoy* [Environmental Security at the Interaction of Civil Aviation Facilities with the Environment]. Ulyanovsk, UVAU GA (I) Publ., 2013. 124 p.

11. *Obzor sostoyaniya okruzhayushchey sredy v gorode Novosibirsk za 2013 g.* [Overview of the Environment in the City of Novosibirsk for 2013]. Available at: www.degkh.ru/ecology/overview_of_the_environment_in..2014_obzor.pdf.

12. Selegey T.S., Filonenko N.N., Lenkovskaya T.N. Izmenchivost sodержaniya prizemnogo ozona v atmosfernom vozdukh Novosibirsk i ego zavisimost ot meteorologicheskikh faktorov [Variability of Ground-Level Ozone in the Ambient Air of Novosibirsk and Its

Dependence on the Meteorological Factors]. *Geografiya i prirodnye resursy*, 2011, no. 3, pp. 78-83.

13. Banan N., Latif M.T., Juneng L., Ahamad F. Characteristics of Ozone Concentrations at Stations with Different Backgrounds in the Malaysian Peninsula. *Aerosol and Air Quality Research*, 2013, no. 13 (3), pp. 1090-1106. DOI: 10.4209/aaqr.2012.09.0259.

14. Climate Services for Supporting Climate Change Adaptation Supplement to the Technical Guidelines for The National Adaptation Plan Process. *GFCS. Global framework for climate services*. Geneva, World Meteorological Organization, 2016. 50 p.

15. Gardner M.W., Dorling S.R. Artificial Neural Networks (the Multilayer Perception) – a Review of Applications in the Atmospheric Sciences. *Atmospheric Environment*, 1998, vol. 32, pp. 2627-2636.

16. Gorshelev V., Serdyuchenko A., Weber M. High spectral resolution ozone absorption cross-section. Part 1: Measurements, data analysis and comparison with previous measurements around 293K. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2014, vol. 7, pp. 609-624.

17. Ionel I., Nicolae D., Popescu F. Measuring air pollutants in an international Romania airport with point and open path instruments. *Romanian Journal of Physics*, 2011, vol. 56, no. 3-4, pp. 507-519.

18. Scot C., Joanne H.S., David D.N., John J. NO and NO₂ Emission Ratios Measured from In-Use Commercial Aircraft during Taxi and Takeoff. *Environmental Science Technology*, 2004, vol. 38, pp. 6078-6084.

19. Popp P.J., Bishop G.A., Stedman D.H. Method for commercial aircraft nitric oxide emission measurements. *Environmental Science Technology*, 1999, vol. 3 (33), pp. 1542-1555.

INFORMATION METHOD FOR DETERMINATION OF UNEVENNESS OF GROUND-LEVEL OZONE CONCENTRATION IN AIRPORT ZONE

Tatyana Grigoryevna Anodina

Doctor of Technical Sciences, Professor, Chairman,
Intergovernmental Aviation Committee
mak@mak.ru
Bolshaya Ordynka St., 22/2/1, 119017 Moscow, Russian Federation

Ibragim Shaig ogly Magerramov

Postgraduate Student,
National Aerospace Agency
imaharramov@hotmail.com
S.S. Akhundova St., 1, AZ1106 Baku, Republic of Azerbaijan

Abstract. The article is devoted to research of unequal distribution of concentration of ground ozone in airport zone. The purpose of the article is development of method for determination of level of spatial variation of ground ozone between the central zone characterized by high concentration of ozone and the take-off zone characterized by minimum concentration of ozone. The presence of strong negative correlation between the concentration of ground ozone and its major precursor NO is pointed out. The ground ozone is the secondary pollutant, photochemical oxidant and the main component of smog. Ozone can damage the respiratory channels of human, lungs. The high concentration of ozone negatively effects vegetation due to its phytotoxicity. Speed of ground ozone generation increases upon low concentrations of NO_x up to its maximum value, and then the increase of NO_x leads to removal of OH radicals due to reaction with NO₂ and promotes the decrease of speed of photochemical formation of ozone.

The authors point out the strong negative correlation between the concentration of ground-level ozone and NO. It is shown that these two gas components of atmosphere make it possible to develop the new method for measuring of augmentation of concentration of ground-level ozone in different points of airport in comparison with intensively used take-off and landing zone. It is determined that the averaged amount of such augmentations can be estimated by calculation of total amount of information, produced upon measurements of concentration of NO in compared points of airport territory out of take-off zone.

Key words: ground-level ozone, airport, amount of information, measurement, precursor.