

УДК 528.88

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ МЕГАПОЛИСОВ ПО ДАННЫМ КОСМИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

Л. В. КАТКОВСКИЙ^{1), 2)}

¹⁾Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко БГУ,
ул. Курчатова, 7, 220045, г. Минск, Беларусь

²⁾Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

В настоящее время загрязнение атмосферы является одной из самых серьезных проблем экологии. Для контроля за состоянием воздуха применяются методы забора проб на стационарных и автоматических станциях, лидарные наземные измерения и спутниковый мониторинг. В Беларуси контроль за состоянием атмосферы проводится на 66 стационарных станциях Национальной системы мониторинга окружающей среды Республики Беларусь. Основными недостатками метода забора проб на станциях являются его локализованность и неоперативность. Реализованный в работе метод позволяет преодолеть эти недостатки. Оценки загрязнения атмосферы мегаполисов в единицах предельно допустимых концентраций (ПДК) осуществляются по зарегистрированным из космоса спектру отражения территории и ее изображению в красной области видимого диапазона. На основании данных спутников EO-1, Landsat, Sentinel-2 и проведенных расчетов получены интегральные уровни загрязнения (в ПДК) над Минском в 2015 и 2016 гг. Усредненные за квартал расчетные величины загрязнения сравнивались со значениями из ежегодника состояния атмосферного воздуха Национальной системы мониторинга окружающей среды Республики Беларусь. Метод показал хорошее соответствие данных. Однако условия применения и точность указанного метода требуют проведения дальнейших исследований и оценок. В работе проанализированы его достоинства и недостатки, а также намечены пути преодоления выявленных недочетов.

Ключевые слова: дистанционное зондирование; спектр отражения; сдвиг спектра; поглощение; мультиспектральное изображение; красный канал; индекс загрязнения атмосферы; предельно допустимая концентрация (ПДК).

Благодарность. Автор выражает благодарность Д. В. Бондарь за поиск снимков и помощь в проведении расчетов.

Образец цитирования:

Катковский ЛВ. Определение загрязнения атмосферы мегаполисов по данным космической съемки. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика.* 2020;3:4–16. <https://doi.org/10.33581/2520-2243-2020-3-4-16>

For citation:

Katkovsky LV. Determination of atmospheric pollution of megapolis by space data. *Journal of the Belarusian State University. Physics.* 2020;3:4–16. Russian. <https://doi.org/10.33581/2520-2243-2020-3-4-16>

Автор:

Леонид Владимирович Катковский – доктор физико-математических наук, доцент; заведующий лабораторией дистанционной фотометрии отдела аэрокосмических исследований¹⁾, профессор кафедры физики и аэрокосмических технологий факультета радиофизики и компьютерных технологий²⁾.

Author:

Leonid V. Katkovsky, doctor of science (physics and mathematics), docent; head of the laboratory of remote photometry, department of aerospace studies^a, and professor at the department of physics and aerospace technologies, faculty of radiophysics and computer technologies^b.
katkovskyl@bsu.by

DETERMINATION OF ATMOSPHERIC POLLUTION
OF MEGAPOLIS BY SPACE DATAL. V. KATKOVSKY^{a, b}^a*A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems,**Belarusian State University, 7 Kurčatava Street, Minsk 220045, Belarus*^b*Belarusian State University, 4 Niezaliežnasci Avenue, Minsk 220030, Belarus*

At present, air pollution is one of the most serious environmental problems. To monitor the air condition, sampling methods are used at stationary and automatic stations, lidar ground measurements and satellite monitoring. In Belarus, the atmosphere is monitored at 66 stationary stations of the National Environmental Monitoring System of the Republic of Belarus. The main disadvantage of the sampling method at stations is its localization and inoperability. The method implemented in the work overcomes these shortcomings. Estimates of the atmospheric pollution of megacities in units of maximum permissible concentrations (MPC) are carried out using the space reflection spectrum and the image in red region of the visible spectrum. Using data from the EO-1, Landsat, Sentinel-2 satellites, as well as calculations, the integral pollution levels (in MPC) over the city of Minsk were obtained in 2015 and 2016. Estimated pollution values averaged over the quarter were compared with data from the annual of the status of atmospheric air of the National Environmental Monitoring System of the Republic of Belarus. The method showed good agreement between the data. However, the conditions of application and the accuracy of this method require further research and evaluation, the advantages and disadvantages of the method are analyzed in the work, and ways to overcome the identified shortcomings are outlined.

Keywords: remote sensing; reflection spectrum; spectrum shift; absorption; multispectral image; red channel; atmospheric pollution index; maximum permissible concentration (MPC).

Acknowledgements. The author is grateful to D. V. Bondar for the search of images and assistance in the calculations.

Введение

Важнейшей задачей при решении проблемы загрязнения атмосферы является непрерывный мониторинг ее состояния. Известно несколько сотен веществ, загрязняющих атмосферный воздух. Сюда относятся различные газы (такие как диоксиды углерода и серы, оксид азота и т. д.), взвешенные частицы (аэрозоли, сажа, пыль), органические соединения. Поэтому один из возможных подходов к оценке загрязнения – это оценка суммарного загрязнения по всем веществам.

В приземном слое атмосферы толщиной 1–2 км создаются особые условия динамического режима, происходит интенсивный обмен с поверхностью энергией и веществом. В мегаполисах это приводит к возникновению шапки загрязнений над городом. Безветренная погода усиливает концентрацию атмосферных аэрозолей, состоящих в основном из пылевых и сажевых частиц. Кроме того, высокое содержание частиц пыли, сажи увеличивает поглощение солнечной радиации в приземном слое атмосферы, что ведет к росту приземной температуры. Таким образом, мощная шапка загрязнений в приземном слое атмосферы, повышенная температура воздуха у поверхности в летнее время и возникновение смога в результате фотохимических реакций создают неблагоприятные условия для здоровья населения. Поэтому в городах с интенсивной и постоянно присутствующей шапкой загрязнений наблюдается увеличение заболеваемости органов дыхания и глаз, сердечно-сосудистой системы, отмечаются разного рода аллергические реакции [1; 2]. Своевременное выявление опасных тенденций и случаев загрязнения преимущественно продуктами техногенного происхождения и раннее предупреждение об угрозах экологической безопасности являются актуальной задачей, особенно для больших городов.

В рамках дистанционных оптических методов исследований существуют два способа получения информации об атмосфере Земли: 1) активное зондирование лазерными системами (лидарами), наземное и из космоса; 2) пассивное спектральное зондирование (наземные спектры рассеянного излучения Солнца, спектры и мультиспектральные изображения, регистрируемые из космоса). Активные методы зондирования применяются в основном на станциях дистанционного мониторинга атмосферных примесей (EARLINET, CIS-LiNet, GALION и др.), тогда как пассивные методы реализуются и на станциях (AERONET), и из космоса – на спутниках NASA (*the National Aeronautics and Space Administration*), ESA (*the European Space Agency*), национальных космических агентств Германии, Японии, России (Роскосмос) и других стран. Спектры и спектрозональные снимки, полученные с борта Международной космической станции (МКС), снимки Белорусского космического аппарата (БКА) при соответствующей обработке также могут использоваться для оценки загрязнений атмосферы (через оптические толщины) [3–6].

Среди антропогенных источников загрязнения атмосферного воздуха наиболее агрессивными являются выхлопные газы автомобильного транспорта, ядерное топливо, пожары, выбросы промышленных предприятий, электроэнергетическая и сельскохозяйственная отрасли.

Очевидна большая необходимость в непрерывном мониторинге концентрации загрязняющих веществ и решении задач, связанных с усовершенствованием вышеуказанных методов, развитием их точности и скорости обработки данных.

Метод дистанционного определения загрязнений по спутниковым данным

Сущность используемого метода, предложенного в работе [7], заключается в дистанционном измерении спектра (например, СПЭЯ) солнечного излучения, дважды прошедшего через атмосферу (уходящего через верхнюю границу атмосферы). По измеренному спектру определяют средневзвешенное значение длины волны и интегральной по спектру энергии излучения, отраженного подстилающей поверхностью и атмосферой, а затем рассчитывают интегральный уровень загрязнения в единицах предельно допустимых концентраций (ПДК) по соответствующей регрессионной зависимости. Одновременно с измерением спектра получают спутниковое изображение той же области поверхности Земли в красном канале 570–670 нм, для которого строится гистограмма распределения пикселей по яркости. Средневзвешенное значение яркости в канале отождествляется с рассчитанной по спектру величиной суммарного загрязнения, а все значения яркости (для каждого пикселя изображения) пересчитываются в ПДК по обратной пропорциональной зависимости. При этом абсолютное распределение загрязнения по площади снимка представляется в виде распределения Рэлея с полученными в ходе реализации метода расчетными характеристиками. Преимуществом данного метода мониторинга является возможность постоянного контроля за большими промышленными территориями.

Физическая основа метода заключается в смещении положения спектра на шкале длин волн и поглощении энергии падающего солнечного излучения видимого диапазона при двукратном прохождении через атмосферу (после отражения от подстилающей поверхности) за счет процессов переизлучения, рассеяния и поглощения загрязнителями атмосферы (молекулами парниковых газов и аэрозолей). Указанные величины спектрального смещения и поглощения излучения непосредственно связываются с суммарной концентрацией веществ, загрязняющих атмосферу [7].

При всех видах возможного взаимодействия солнечного излучения с молекулами загрязнителей, таких как поглощение, рассеяние, флуоресцентное переизлучение, комбинационное рассеяние, интегральный эффект состоит в смещении спектра видимого диапазона в длинноволновую область (табл. 1).

Таблица 1

Сдвиг в спектре излучения, вносимый молекулами атмосферных загрязнителей для длины волны 337,1 нм

Table 1

The emission spectrum shift due to molecules of atmospheric pollutants at a wavelength of 337.1 nm

Вещество-загрязнитель	Длина волны рассеянного излучения, нм	Абсолютная величина смещения, нм
NO ₂	345,7	8,6
SO ₂	350,8	13,7
CO ₂	352,5	15,4
NH ₃	378,8	42,7
C ₂ H ₂	380,3	43,2
H ₂ S	369,0	32,0
CO	363,9	16,8
NO	365,9	18,8
H ₂ O	384,4	47,3

В результате комбинационного рассеяния солнечного света происходит перераспределение энергии между спектральными составляющими видимого диапазона, а регистрируемое спектральное изображение

антропогенно загрязненных участков приобретает преимущественно красноватый или темно-вишневый оттенок. Кроме того, в случаях мощных антропогенных дымок органического и фотохимического происхождения имеет место дополнительное интенсивное поглощение в области красного и ближнего инфракрасного диапазонов спектра.

Таким образом, визуальными признаками загрязненных участков атмосферы при спектральной съемке из космоса являются оранжево-красное смещение спектра рассеянного излучения и темно-вишневый оттенок областей интенсивного поглощения. Очевидно, что чем больше смещение спектра и поглощение энергии падающего светового потока, тем больше загрязнение атмосферы.

Для оценки степени загрязненности атмосферы в настоящее время используется индекс загрязнения атмосферы (ИЗА) [8]. При расчете данного параметра делается предположение, что при значениях на уровне ПДК все загрязняющие вещества одинаково влияют на состояние окружающей среды, а при увеличении концентрации степень воздействия различных загрязнителей возрастает с разной скоростью, зависящей от класса опасности. При этом может проводиться расчет двух индексов загрязнения – ИЗА по отдельно взятому загрязнителю и суммарного, или интегрального, ИЗА, предоставляющего информацию о загрязнении суммой веществ.

Расчет ИЗА для каждого вещества (q_i) проводится по формуле

$$q_i = \left(\frac{m_{\text{ср},i}}{\text{ПДК}_{\text{ср},i}} \right) K_i,$$

где $m_{\text{ср},i}$ – среднегодовая (или среднемесячная) концентрация i -го вещества, $\text{мг}/\text{м}^3$; $\text{ПДК}_{\text{ср},i}$ – его среднесуточная ПДК, установленная согласно ГОСТу, $\text{мг}/\text{м}^3$; K_i – безразмерный фиксированный для каждого вещества коэффициент, обозначающий отношение степени загрязнения атмосферы исследуемым веществом к степени загрязнения диоксидом серы и равный 0,85; 1,0; 1,3; 1,5 для 4, 3, 2, 1-го классов опасности соответственно.

Для расчета загрязненности атмосферы суммой из N веществ используется интегральный ИЗА (q_{Σ}), вычисляемый как

$$q_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N \left[\frac{m_{\text{ср},i}}{\text{ПДК}_{\text{ср},i}} \right] K_i,$$

где $m_{\text{ср},i}$ – среднесуточная концентрация i -го вещества, $\text{мг}/\text{м}^3$. Полученная величина ИЗА показывает, во сколько раз измеренная суммарная концентрация веществ в атмосфере больше допустимого значения. При этом расчет обычно ведется для пяти составляющих, т. е. пяти веществ, которые вносят основной вклад в загрязненность атмосферы, при условии $q_1 > q_2 > q_3 > q_4 > q_5$.

Для оценки смещения спектра солнечного излучения после прохождения через загрязненную атмосферу (в основном за счет комбинационного рассеяния) вводится понятие средневзвешенной длины волны ($\lambda_{\text{ср}}$) [9] видимого диапазона спектра:

$$\lambda_{\text{ср}} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \lambda I_{\lambda} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{\lambda} d\lambda} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i I_{\lambda_i}}{\sum_{i=1}^n I_{\lambda_i}}, \quad (1)$$

где λ_i – длины волн, для которых получены спектральные значения; I_{λ_i} – спектральное значение на i -й длине волны; n – количество спектральных каналов. Следует отметить, что $\lambda_{\text{ср}}$ делит площадь под спектральной кривой на две равные части. Таким образом, вычисляя средневзвешенную длину волны полученного из космоса спектра и сравнивая это число со средневзвешенной длиной волны спектра идеального излучателя (АЧТ), можно найти величину смещения в спектре.

Для учета изменения энергии падающего светового потока в результате поглощения в атмосфере необходимо вычислить полную энергию светового потока и сравнить ее с полной энергией светового потока для эталонного планковского спектра. Расчет полной энергии видимого диапазона спектра (W) выполняется по следующей формуле [10]:

$$W = \int_{\nu_1}^{\nu_2} I_{\nu}^2 d\nu = \int_{370}^{670} \left(\frac{I_{\lambda}}{\lambda} \right)^2 d\lambda = \left(\frac{I_{\lambda}}{\lambda} \right)^2 \sum_i \left(\frac{I_i}{\lambda_i} \right)^2, \quad (2)$$

где I_λ – спектральное значение яркости излучения, усл. ед. При этом для корректного сравнения эталонной спектральной характеристики и измеренного спектра необходимо привести их к единому масштабу посредством нормирования на максимум.

Интегральный ИЗА (q_Σ) зависит от комбинационного рассеяния на молекулах загрязнителей и поглощения света аэрозольной дымкой, поэтому является функцией двух параметров. Регрессионная зависимость q_Σ от перечисленных факторов представлена монотонно возрастающей функцией вида [11]

$$q_\Sigma = \alpha \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{эт}}} \right)^x \left(\frac{W_{\text{эт}}}{W} \right)^y, \quad (3)$$

где α – эмпирический коэффициент пропорциональности искомой регрессионной зависимости; x и y – показатели степени чувствительности функции регрессии к выделенным факторам; $\frac{\lambda}{\lambda_{\text{эт}}}$ – фактор смещения

спектра относительно средневзвешенной длины волны эталонного спектра; $\frac{W_{\text{эт}}}{W}$ – фактор роста потока энергии на поглощение относительно эталонного спектра. В работе [7] с использованием данных по загрязнению контрольных площадок получены следующие значения параметров: $\alpha = 1,2$; $x = 1,5$; $y = 2,6$.

Для оценки пространственного распределения (по площади снимка) уровня загрязнения атмосферы используется гистограмма яркости изображения контрольной площадки региона в красном канале 570–670 нм, снятого со спутника квазидновременно со спектральной характеристикой. Это необходимо для того, чтобы отождествить рассчитанный интегральный уровень загрязнения со средним значением яркости пикселей в красном канале снимка. Для этого вычисляется среднее значение яркости гистограммы (математическое ожидание), которому и будет соответствовать суммарный ИЗА. Для пересчета яркости отдельных пикселей в единицы ПДК окрестность любого значения функции q_Σ можно аппроксимировать отрезком прямой, считая в этой окрестности величину ПДК обратно пропорциональной яркости пикселя. Чем меньше яркость, тем больше поглощение потока молекулами смогов и тем больше ПДК.

Известно, что плотность распределения случайной величины в интервале от нуля до максимальных значений подчиняется закону Рэлея [12]:

$$P(q) = \frac{q}{\sigma^2} \exp\left(\frac{-q^2}{2\sigma^2}\right). \quad (4)$$

Границами интервала распределения данной случайной величины являются минимальное и максимальное значения яркости пикселей в ПДК. Первый момент распределения Рэлея отождествляют со средним значением ПДК. Таким образом, можно получить абсолютные значения ПДК, распределенные по площади снимка.

Тестирование метода оценки уровня загрязнения атмосферы

Для реализации и тестирования рассматриваемого метода были использованы спектрально-зональные изображения за 10 июля 2010 г. спутников Landsat-7 и Landsat-8¹, а также Sentinel-2², для получения спектральной характеристики применялись гиперспектрометр Hyperion³ (спутник EO-1, функционирующий на орбите до начала 2017 г.) и модельный расчет.

В качестве эталонного (опорного) спектра в работе [7] предложено использовать спектр черного тела (функцию Планка) со значением температуры Солнца 5780 К, для корректности сравнения расчетного спектра с экспериментальным эталонная кривая нормируется на собственный максимум.

Средневзвешенная длина волны такого спектра, рассчитанная по формуле (1) для видимого диапазона 370–670 нм, составила 500 нм. Значение $W_{\text{эт}} = 108,4$ усл. ед. было вычислено по формуле (2) путем замены интегрирования суммированием с шагом по λ , равным ширине канала Hyperion (10 нм).

Для получения спектральной характеристики местности использовался снимок Hyperion спутника EO-1, сделанный 10 июля 2010 г. и охватывающий юго-восточные регионы Беларуси (Речицу, Брагин), а также часть украинской территории. Взятая с указанного снимка нормированная на свой максимум спектральная кривая для используемой в методе области спектра 370–670 нм, усредненная по некоторой области интереса, включающей только юго-восток Беларуси, представлена на рис. 1.

¹См.: <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

²См.: <https://earth.esa.int/web/sentinel/>.

³См.: <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

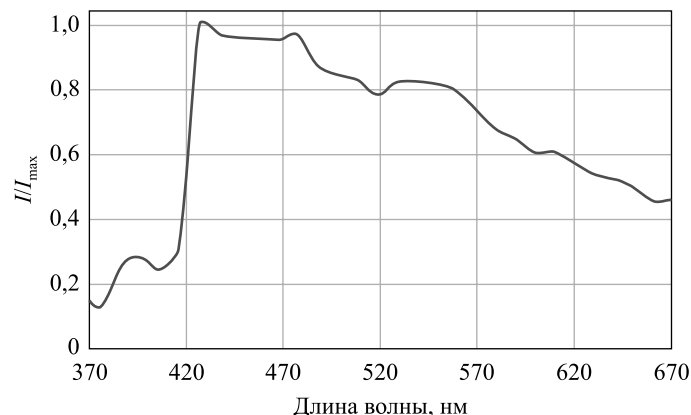


Рис. 1. Экспериментальная спектральная кривая
Fig. 1. Experimental spectral curve

Стоит заметить, что первые семь каналов сенсора Нурегіон предварительно не откалиброваны. Значения яркости для них вычислялись в специализированной программе *COART*⁴. Для максимально точного расчета все параметры (высота Солнца, угол наблюдения, время съемки и т. д.) указаны из метаданных к снимку Нурегіон, взято среднее по региону постоянное альbedo поверхности. Кроме того, были получены данные станции AERONET на ту же дату для Беларуси, а именно оптическая толщина атмосферы. С помощью этих данных был произведен расчет отсутствующих спектральных значений для области 370–427 нм.

Проведенный расчет величины средневзвешенной длины волны и полной энергии дал следующие результаты: $\lambda_{\text{ср}} = 516,3$ нм, $W = 66,7$ усл. ед. Наблюдается смещение в длинноволновую область средневзвешенной длины волны (на 16 нм относительно эталонных 500 нм) и довольно сильное затухание энергии (примерно в 2 раза).

Имея эталонные и экспериментально измеренные значения $\lambda_{\text{ср}}$ и W , можно найти значение суммарного (интегрального) ИЗА для пяти основных составляющих в единицах ПДК (по формуле (3)): $q_{\Sigma} = 4,45$ ПДК. Таким образом, загрязнение юго-восточной части Беларуси суммой веществ в среднем составило около 4,5 ПДК, что соответствует низкой загрязненности согласно следующей классификации: $\text{ИЗА} < 5$ – низкий уровень; $5 < \text{ИЗА} < 8$ – повышенный уровень; $8 < \text{ИЗА} < 13$ – высокий уровень; $\text{ИЗА} > 13$ – очень высокий уровень.

Заметим, что в данном случае интегральный уровень загрязнения суммой частиц получен для момента (даты) съемки. Стандартный ИЗА, принятый еще в 1979 г. (в Беларуси рассчитывается с 1982 г.), имеет некоторые особенности. При его расчете учитываются среднемесячные и (или) среднегодовые концентрации. Однако среднесуточные колебания могут лежать в более широком диапазоне, в то время как ИЗА на основе среднемесячных показателей будет находиться в более узких границах.

Для оценки пространственного распределения загрязнений был выбран космический снимок, максимально близкий по времени и местности к снимку гиперспектрометра. Он получен спутником Landsat-7 10 июля 2010 г. в 8:40 утра. Облачность сцены – 8 %, размеры и разрешение снимка – 7521×8361 пк, 30 м для видимого и инфракрасного диапазонов (рис. 2). Для анализа необходим красный канал изображения, который у Landsat-7 соответствует диапазону 630–690 нм.

Спектрозональный снимок Landsat-7 охватывает значительно большую по площади территорию, чем гиперспектральный, поэтому для оценки используем область интереса на снимке Landsat-7, содержащую только ту часть Беларуси, по которой был вычислен спектр из гиперспектрального изображения (по координатам углов гиперспектрального снимка) с общим количеством пикселей 2 292 804. Гистограмма яркостей красного канала (8-битные значения DN) представлена на рис. 3.

Для сопоставления относительных значений яркости пикселей с величинами ПДК ищется средневзвешенное значение яркости пикселей по следующей формуле:

$$I_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^n n_i I_i}{\sum_{i=1}^n n_i},$$

где n_i – количество пикселей с яркостью I_i . Для нашего случая получаем $I_{\text{ср}} \approx 88$ цифровых единиц, которому ставится в соответствие среднее значение загрязненности 4,45 ПДК.

⁴См.: <https://satcorps.larc.nasa.gov/jin/coart.html>.



Рис. 2. Область изучения (углы помечены кнопками) на спутниковом изображении (*Google Maps*) и на композитном цветном снимке гиперспектрометра Hyperion

Fig. 2. Study area (corners are marked with buttons) on the satellite image (*Google Maps*) and on the composite color image of the Hyperion hyperspectrometer

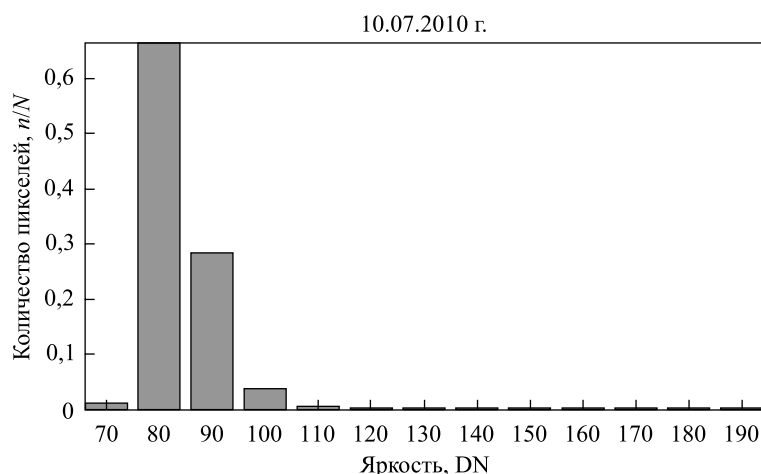


Рис. 3. Гистограмма яркости пикселей для контрольной площадки

Fig. 3. Histogram of pixel brightness for the control area

Окрестность любого значения суммарного загрязнения (функции регрессии (3)) можно аппроксимировать отрезком прямой, считая в этой окрестности величину ПДК обратно пропорциональной яркости. Минимальная яркость снимка составляет 78 единиц, что соответствует $78/88$ средней яркости. Коэффициент обратной пропорциональности равен 1,128. Следовательно, максимальное значение ПДК контрольной площадки составит $4,45 \cdot 1,128 = 5,02$, минимальное – $4,45 \cdot 88/196 = 1,99$, а распределение ПДК по площади дается распределением Рэлея (4), среднеквадратическое отклонение σ которого находится отождествлением математического ожидания распределения со средним значением ПДК, т. е.

$$m = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma = 4,45, \text{ откуда } \sigma = 3,56.$$

Для проверки полученного значения интегрального загрязнения обратимся к архивам данных о состоянии атмосферного воздуха государственного учреждения «Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды» Министерства

природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь⁵. Третий квартал 2010 г. характеризовался средними показателями загрязнения. Так, концентрации оксида углерода, диоксида азота и фенола составляли 0,2–0,3 ПДК; стабильно низкими оставались уровни диоксида серы, аммиака, свинца, кадмия, бензапирена; содержание формальдегида равнялось 0,7–0,8 ПДК; загрязненность твердыми частицами варьировалась от 1,8 до 3,7 ПДК для разных точек местности. Таким образом, среднее значение загрязнения составило 4,25 ПДК, что близко к расчетному (4,45 ПДК).

Некоторые результаты применения метода для Минска

В связи с тем что в настоящее время в свободном доступе нет гиперспектральных космических снимков, в том числе для территории Беларуси (спутник EO-1 прекратил свою работу в начале 2017 г.), предлагается решить проблему отсутствия измеренных спектров уходящего излучения, необходимых в рассматриваемом методе, путем замены их на расчетные спектры, получаемые с использованием данных местной станции сети AERONET. Таким образом, измеренные на станции оптические толщины атмосферы фактически через рассчитанные на их основе спектры позволяют перейти к нахождению ИЗА. Далее проводится тестирование предлагаемого метода определения общего загрязнения атмосферы с применением расчетных спектров и снимков Landsat, Sentinel-2 над территорией Минска. При этом спектры были вычислены с учетом реальных оптических толщин атмосферы минской станции сети AERONET и постоянного по спектру альбеда поверхности (среднего для городской среды) с помощью программы расчета уходящего излучения на верхней границе атмосферы *COART*. Очевидно, что трансформация расчетного спектра солнечного излучения после двукратного прохождения атмосферы определяется физическими механизмами рассеяния и поглощения излучения, заложенными в программе расчета. Главным «загрязнителем» здесь считается атмосферный аэрозоль, от которого зависит оптическая толщина атмосферы.

Был отобран и обработан ряд снимков Landsat-8 за 2015 и 2016 гг. для Минска, удовлетворяющих критерию низкой облачности (до 10 %). Приведем примеры обработки на некоторые из дат: 26 августа 2016 г., 4 апреля 2016 г., 28 марта 2016 г., 24 августа 2015 г., 14 июня 2015 г., 11 апреля 2015 г. Они выбраны таким образом, чтобы имелись почти безоблачные снимки Landsat и данные об оптической толщине атмосферы по измерениям минской станции AERONET на эти даты.

Расчет спектральных кривых проводился в программе *COART* с указанием высоты Солнца и оптической толщины атмосферы на основе данных AERONET на те же даты. Для повышения точности расчета также сравнивались вычисленные спектральные значения со значениями AERONET, полученными на четырех длинах волн. Спектральные кривые для разных дат изображены на рис. 4.

После нормирования относительно единицы всех спектральных кривых был произведен расчет средневзвешенных длин волн, полной энергии спектра и интегральных загрязнений в ПДК. Результаты вычислений приведены в табл. 2.

Таблица 2

Расчетные параметры спектров и полученные ПДК

Table 2

Calculated spectral parameters and obtained MPC

Дата	Средневзвешенная длина волны, нм	Полная энергия спектра, усл. ед.	Интегральное загрязнение, ед. ПДК
11.04.2015 г.	519,7	78	3,20
14.06.2015 г.	517,3	82	2,62
24.08.2015 г.	519,3	78	2,97
28.03.2016 г.	518,7	77	3,10
04.04.2016 г.	518,7	77	3,10
26.08.2016 г.	520,3	88	2,18

Из снимков Landsat на эти даты выделен Минск, а затем вычислена статистика по площади. Гистограммы яркостей красного канала каждого изображения представлены на рис. 5. Минимальные, максимальные и средневзвешенные значения яркости для каждого снимка, а также минимальные и максимальные значения загрязнения приведены в табл. 3.

⁵См.: <http://rad.org.by/articles/vozduh/>; <https://opendata.by/dataset/1119/resource/fb2b1b4e-e983-48ca-9f7b-835f096a5e6d#{}>.

Таблица 3

Яркости в красном канале снимков Landsat и соответствующие загрязнения

Table 3

Brightness in the red channel of Landsat images and corresponding pollution

Дата	Яркость, DN			Загрязнение, ед. ПДК	
	Минимальная	Максимальная	Средняя	Минимальное	Максимальное
11.04.2015 г.	78	203	91	1,43	3,73
14.06.2015 г.	87	234	97	1,09	2,92
24.08.2015 г.	79	209	97	1,38	3,65
28.03.2016 г.	77	141	88	1,93	3,54
04.04.2016 г.	78	185	91	1,52	3,62
26.08.2016 г.	77	150	89	1,29	2,52

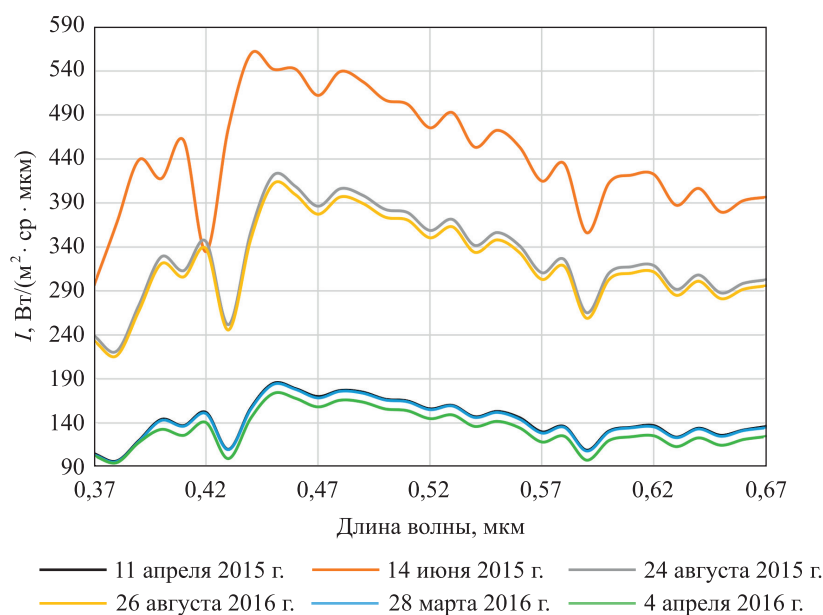


Рис. 4. Расчетные спектры яркости уходящего солнечного излучения на верхней границе атмосферы

Fig. 4. Calculated brightness spectra of outgoing solar radiation at the top of the atmosphere

На фрагменте снимка (в красной полосе) спутника Landsat-8 за 26 августа 2016 г. (рис. 6) цифрами показаны 10 зон Минска (кроме зон водоемов и растительности), отличающихся более темным цветом пикселей. Для этих 10 зон определены максимальные значения загрязнения по минимальной яркости пикселей для каждой зоны. Полученные величины загрязнения лежат в диапазоне от 2,36 до 2,44 ПДК. Контрольные площадки (зоны) включают улицы Минска (Жилуновича, Тимирязева, Жудро, Радиальную, Каховскую и т. д.), для которых, по данным ежегодника состояния атмосферного воздуха в Беларуси, в августе зафиксированы повышенные уровни загрязнения.

Близкие значения загрязнений подтверждены по Минску также с использованием красной полосы изображения сенсора MSI со спутника Sentinel-2. Было получено, что на участках в районе улиц Орловской, Каховской, Кропоткина и Тимирязева уровень загрязнения практически постоянно превышает норму в 1,5–2,0 раза. Идентификация загрязненных участков проводилась по географическим координатам снимка.

По аналогичной методике для получения средних по кварталам уровней загрязнения по Минску за 2015 и 2016 гг. рассчитаны спектры уходящего излучения на каждую дату, для которой были доступны данные минской станции AERONET. Таким образом, только на основании спектров, рассчитанных по

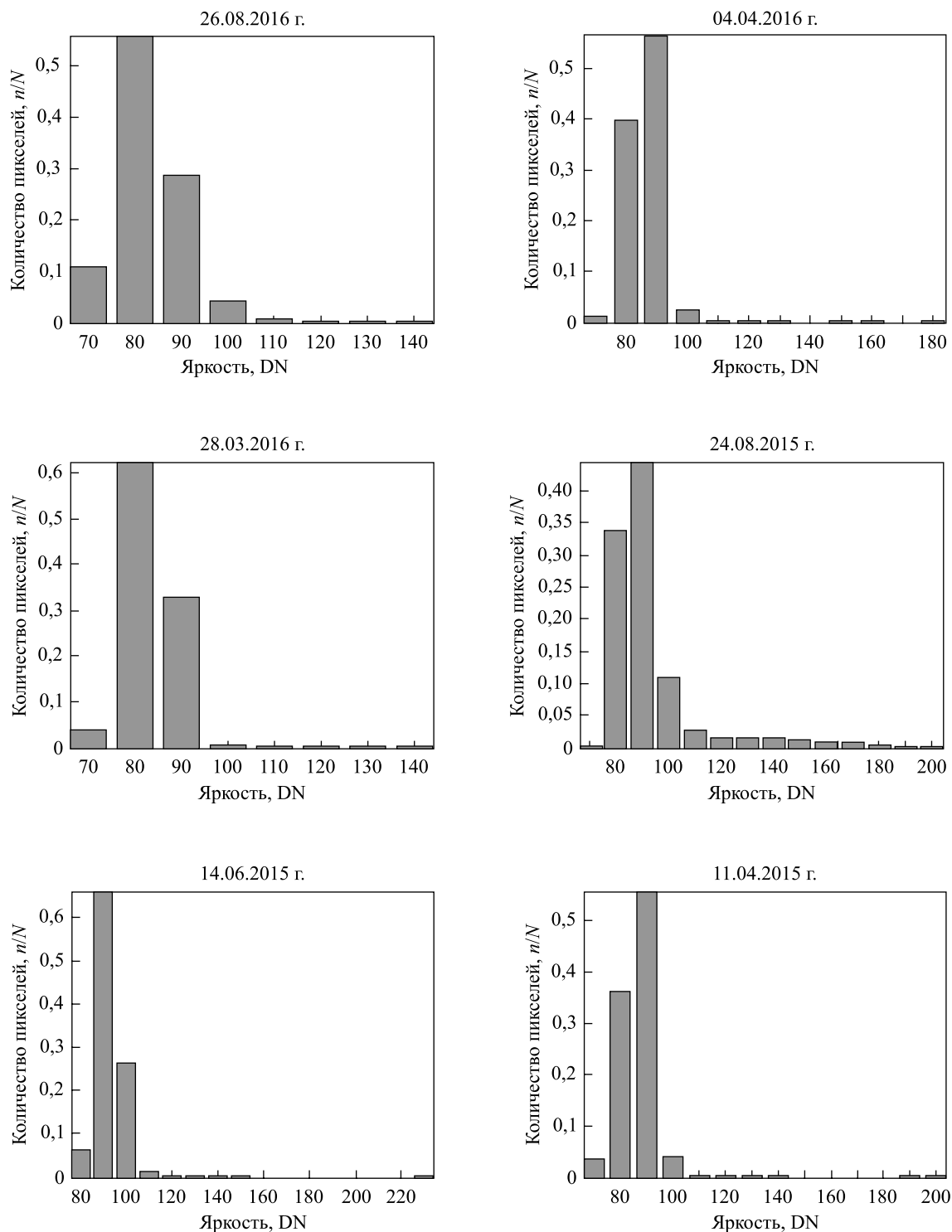


Рис. 5. Распределение пикселей красного канала по яркости для сцен разных дат по Минску

Fig. 5. Distribution of pixels of the red channel in terms of brightness for scenes of different dates in Minsk

данным станции AERONET, были вычислены средние уровни интегрального загрязнения на ряд дней в эти годы, а затем рассчитаны средние уровни для каждого квартала в целях сравнения с данными ежегодника состояния атмосферы. На рис. 7 представлены сглаженные изменения суммарного среднего уровня загрязнения за 2015 и 2016 гг. При определении среднего показателя загрязнения по данным ежегодника учитывалось количество дней с превышением суточных концентраций, а также делалось предположение, что в остальные дни превышений не было.

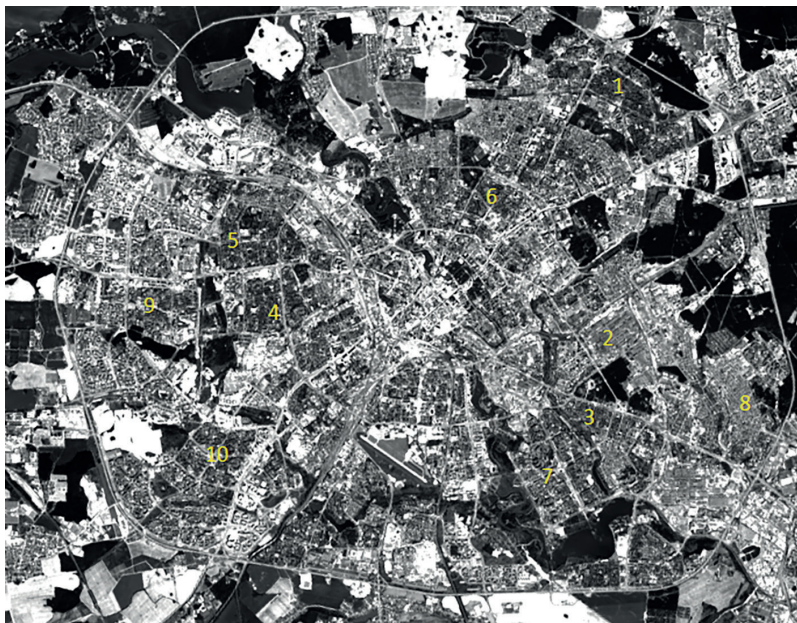


Рис. 6. Снимок Минска в красном канале (спутник Landsat-8, 26 августа 2016 г.)

Fig. 6. Photo of Minsk in the red channel (Landsat-8 satellite, 2016 August 26)

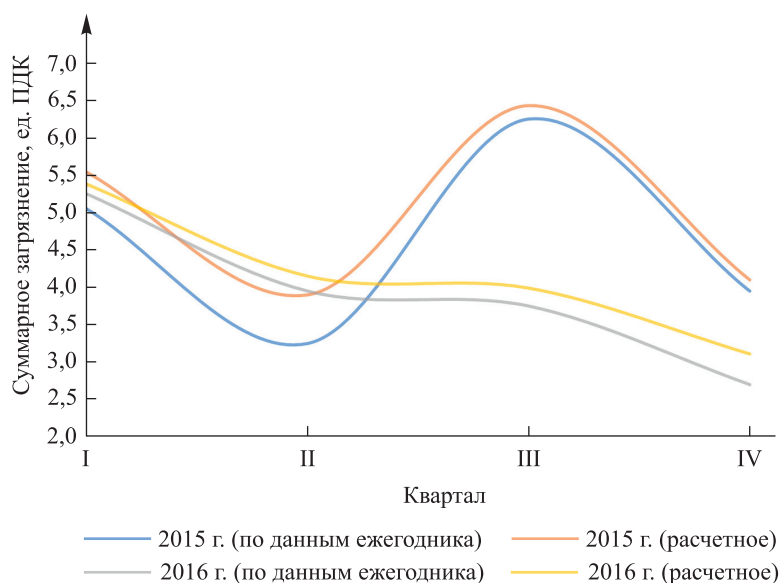


Рис. 7. Суммарный уровень загрязнения в Минске за 2015 и 2016 гг.

Fig. 7. The total level of pollution in Minsk for 2015 and 2016

На рис. 7 имеется некоторое расхождение между расчетными данными и данными ежегодника. Это объясняется тем, что архивы не содержат достаточно полной информации об уровне загрязнения в каждый из дней, кроме того, при вычислении среднего показателя делались некоторые предположения исходя из тех данных, что представлены в ежегоднике. Расчетный метод по спектру позволяет определять суммарную концентрацию загрязнителей, а стационарные и автоматические станции предоставляют измерения лишь некоторых отдельных веществ. Видно, что в 2016 г. отмечается незначительное снижение числа загрязнителей в атмосфере во втором полугодии.

Заключение

На примере изображений юго-восточной части Беларуси за июль 2010 г., полученных спутниками Landsat-7 и EO-1, был проверен метод определения концентрации загрязняющих веществ в атмосфере в единицах ПДК на основе спектра отражения территории и ее изображения в красном канале видимого

диапазона. Полученное значение в ПДК сравнивалось с уровнем загрязненности из архива данных о состоянии атмосферного воздуха в Беларуси. Сравнение показало, что метод обладает достаточно высокой точностью (около 5 % при использовании спектра, измеренного из космоса, и не хуже 18 % для спектров, рассчитанных по данным минской станции сети AERONET). После обработки серии данных было проанализировано состояние атмосферы над Минском в 2015–2016 гг.

Рассмотренный метод определения интегрального загрязнения атмосферы обладает как достоинствами, так и недостатками.

Достоинствами дистанционного метода мониторинга являются возможность широкого охвата территории, достаточно высокая достоверность и быстрота обработки, зондирование в труднодоступных местах. С другой стороны, для повышения точности данного метода необходимо, чтобы на снимке присутствовали контрольные площадки с известными уровнями загрязнения.

Отметим также наиболее существенные недостатки метода и пути их преодоления. Во-первых, в методе никак не учитывается влияние коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) подстилающей поверхности на спектр излучения системы атмосфера – поверхность, регистрируемый из космоса. При этом влияние КСЯ на указанный спектр может быть преобладающим. Сильно загрязненная атмосфера над светлой поверхностью (например, бетонной) и чистая атмосфера над темной поверхностью (например, водной толщей или темной почвой) могут давать одинаковое уменьшение спектра (интерпретируемое в методе как поглощение атмосферы). При этом большую роль будет играть и пространственное разрешение спектра (размер спектрометрируемой площадки, для гиперспектрометров это примерно проекция пикселя на Землю), которым определяется степень неоднородности КСЯ исследуемой площади.

Преодолеть этот недостаток можно, если в качестве информационного спектра использовать не полный спектр уходящего излучения, а часть его, называемую вкладом атмосферной дымки. При записи решения уравнения переноса для спектра уходящего излучения на верхней границе атмосферы обычно используется представление в виде нескольких слагаемых (чаще двух) [13], одним из которых является излучение, не взаимодействовавшее с подстилающей поверхностью, – яркость атмосферной дымки. Именно эта яркость напрямую зависит от загрязнения атмосферы. Для выделения яркости дымки необходимо предварительно проводить атмосферную коррекцию спутниковых данных [13].

Во-вторых, слабой стороной метода является использование в качестве эталонного спектра функции Планка с температурой Солнца. Представляется, что несколько лучшим вариантом было бы использование в качестве такового экспериментального спектра излучения от Солнца, приходящего на верхнюю границу атмосферы, поскольку в этом спектре присутствуют фраунгоферовы линии поглощения (отсутствующие в планковском), которые в методе опять же будут учитываться как поглощение атмосферы. Но еще лучшим вариантом эталонного спектра был бы расчетный спектр атмосферы с теми же геометрическими параметрами (углы Солнца и измерения), что и измеренный из космоса спектр, с учетом только процессов рассеяния и поглощения в абсолютно чистой атмосфере (без аэрозоля и газовых примесей), включающий лишь влияние рэлеевского (молекулярного) рассеяния и поглощения основных газовых компонентов атмосферы (например, только водяного пара, кислорода и озона). Этот спектр можно рассчитать с высокой точностью, если определены оптические параметры атмосферы в результате процедуры атмосферной коррекции [13].

Относительно неплохие полученные результаты метода можно объяснить тем, что выходным параметром выступает интегральное (по сумме веществ и их воздействий) загрязнение, а в качестве входных параметров (в регрессионном уравнении) используются интегральные по спектру величины (относительная средневзвешенная длина волны и относительное интегральное поглощение). Кроме того, при получении регрессионного уравнения система атмосфера – поверхность рассматривалась как «черный ящик», что «сгладило» влияние неучтенных процессов (в частности, некорректно заданный эталонный спектр и др.).

Наконец, подчеркнем, что для полной реализации метода необходимо наличие измеренного из космоса спектра и связанного с ним (по времени и пространству) изображения в красной полосе видимого диапазона. Именно такие данные присутствуют в составе информации, регистрируемой с борта МКС аппаратурой «Видеоспектральная система» (ВСС) [14], разработанной и созданной в Институте прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко БГУ. Измеряемые ВСС данные содержат трехканальное спектрально-пространственное изображение (с красным каналом) и более 256 отдельных спектров высокого разрешения с различных пространственных зон этого изображения, координатно «привязанных» к нему.

В дальнейшем планируется разработать усовершенствованную версию метода, устраняющую указанные выше недостатки, и использовать данные измерений ВСС, которые будут проведены над промышленными зонами (центрами) в различных регионах.

Интегральный уровень загрязнения, который рассчитывается в настоящее время с учетом среднемесячных и (или) среднегодовых концентраций, не может корректно показать реальную оценку загрязнения атмосферы за более короткие промежутки времени (отдельные дни). Необходим пересмотр

методик расчета ИЗА. Спутниковый мониторинг позволяет получать уровни загрязнения суммой частиц и газов в момент зондирования, что является важным при выявлении чрезвычайных ситуаций (выбросов или трансграничного переноса загрязнителей) и оперативном предупреждении населения о неблагоприятных экологических условиях.

Библиографические ссылки

1. Mallone S, Stafoggia M, Faustini A, Gobbi GP, Marconi A, Forastiere F. Saharan dust and associations between particulate matter and daily mortality in Rome, Italy. *Environmental Health Perspectives*. 2011;119(10):1409–1414. DOI: 10.1289/ehp.1003026.
2. Melnikova I, Donchenko V, Boreisho A, Morozov A. Laser complexes for the solution of the inverse problem of ecological monitoring. In: *Proceedings of the 25th International laser radar conference; 2010 July 5–9; Saint Petersburg, Russia*. New York: Curran Associates; 2011. p. 131–133.
3. Катковский ЛВ. *Многоспектральное дистанционное зондирование. Теория и методы повышения эффективности*. Саарбрюккен: LAP LAMBERT Academic Publishing; 2011. 396 с.
4. Belyaev BI, Katkovsky LV, Kabashnikov VP, Nekrasov VP. Optical remote sounding of aerosol formations on base of numerical simulation of the scattering radiation. In: *Proceedings of the 1996 International geoscience and remote sensing symposium (IGARSS'96); 1996 May 28–31; Lincoln, NE, USA. Part 1*. [S. l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 1996. p. 19–21. DOI: 10.1109/IGARSS.1996.516231.
5. Беляев БИ, Беляев МЮ, Десинов ЛВ, Катковский ЛВ, Сармин ЭЭ. Обработка спектров и изображений с фотоспектральной системы в космическом эксперименте «Ураган» на МКС. *Исследование Земли из космоса*. 2014;6:54–65.
6. Мартинов АО, Катковский ЛВ, Станчик ВВ, Беляев БИ. Исследование атмосферы с помощью сканирующего солнечного спектрополяриметра. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. 2018;3:20–30.
7. Бондур ВГ, Воробьев ВЕ, Давыдов ВФ, Корольков АВ, авторы; Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, правообладатель. *Способ определения загрязнения атмосферы мегаполисов*. РФ патент 2010100107/28. 2010.
8. Какарека СВ. Оценка суммарного загрязнения атмосферного воздуха. *География и природные ресурсы*. 2012;2:14–20.
9. Schwartz S. *Visual Perception: a clinical orientation*. 4th edition (optometry). New York: McGraw-Hill Education – Europe; 2009. 488 p.
10. Заездный АМ. *Основы расчетов по статистической радиотехнике*. Москва: Связь; 1969. 448 с.
11. Половко АМ. *Mathematica для студентов*. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург; 2007. 368 с.
12. Прокис Дж. *Цифровая связь*. Москва: Радио и связь; 2000. 800 с.
13. Katkovsky LV, Martinov AO, Siliuk VA, Ivanov DA, Kokhanovsky AA. Fast atmospheric correction method for hyperspectral data. *Remote Sensing*. 2018;10(11):1698. DOI: 10.3390/rs10111698.
14. Беляев БИ, Беляев МЮ, Сармин ЭЭ, Гусев ВФ, Десинов ЛВ, Иванов ВА и др. Устройство и летные испытания научной аппаратуры «Видеоспектральная система» на борту российского сегмента МКС. *Космическая техника и технологии*. 2016;2(13):70–79.

References

1. Mallone S, Stafoggia M, Faustini A, Gobbi GP, Marconi A, Forastiere F. Saharan dust and associations between particulate matter and daily mortality in Rome, Italy. *Environmental Health Perspectives*. 2011;119(10):1409–1414. DOI: 10.1289/ehp.1003026.
2. Melnikova I, Donchenko V, Boreisho A, Morozov A. Laser complexes for the solution of the inverse problem of ecological monitoring. In: *Proceedings of the 25th International laser radar conference; 2010 July 5–9; Saint Petersburg, Russia*. New York: Curran Associates; 2011. p. 131–133.
3. Katkovskii LV. *Mnogospektral'noe distantsionnoe zondirovanie. Teoriya i metody povysheniya effektivnosti* [Multispectral remote sensing. Theory and methods of increasing efficiency]. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing; 2011. 396 p. Russian.
4. Belyaev BI, Katkovsky LV, Kabashnikov VP, Nekrasov VP. Optical remote sounding of aerosol formations on base of numerical simulation of the scattering radiation. In: *Proceedings of the 1996 International geoscience and remote sensing symposium (IGARSS'96); 1996 May 28–31; Lincoln, NE, USA. Part 1*. [S. l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers; 1996. p. 19–21. DOI: 10.1109/IGARSS.1996.516231.
5. Belyaev BI, Belyaev MYu, Desinov LV, Katkovskii LV, Sarmin EE. Spectra and images processing from Photospectral system in space experiment «Hurricane» on the ISS. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2014;6:54–65. Russian.
6. Martinov AO, Katkouski LV, Stanchick VV, Belyaev BI. Investigation of the atmosphere with a scanning solar spectropolarimeter. *Journal of the Belarusian State University. Physics*. 2018;3:20–30. Russian.
7. Bondur VG, Vorob'ev VE, Davydov VF, Korol'kov AV, inventors; Federal Service for Intellectual Property, Patents and Trade-marks, assignee. *The method for determining atmospheric pollution of megacities*. Russian Federation patent 2010100107/28. 2010.
8. Kakareka SV. [Assessing total atmospheric air pollution]. *Geografiya i prirodnye resursy*. 2012;2:14–20. Russian.
9. Schwartz S. *Visual Perception: a clinical orientation*. 4th edition (optometry). New York: McGraw-Hill Education – Europe; 2009. 488 p.
10. Zaezdnyi AM. *Osnovy raschetov po statisticheskoi radiotekhnike* [Fundamentals of calculations in statistical radio engineering]. Moscow: Svyaz'; 1969. 448 p. Russian.
11. Polovko AM. *Mathematica dlya studentov* [Mathematica for students]. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg; 2007. 368 p. Russian.
12. Prokis Dzh. *Tsifrovaya svyaz'* [Digital communication]. Moscow: Radio i svyaz'; 2000. 800 p. Russian.
13. Katkovsky LV, Martinov AO, Siliuk VA, Ivanov DA, Kokhanovsky AA. Fast atmospheric correction method for hyperspectral data. *Remote Sensing*. 2018;10(11):1698. DOI: 10.3390/rs10111698.
14. Belyaev BI, Belyaev MYu, Sarmin EE, Gusev VF, Desinov LV, Ivanov VA, et al. Design and flight tests of science hardware video-spectral system on board the Russian segment of the ISS. *Space Engineering and Technology*. 2016;2(13):70–79. Russian.

Статья поступила в редколлегию 05.06.2020.
Received by editorial board 05.06.2020.