

РАЗРАБОТКА ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ДЛЯ ЛОКАЛЬНОГО МОНИТОРИНГА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУХА В МЕХИКО

© 2009 г. М. Перевощикова, канд. геогр. наук* ; Г. Э. Сандоваль-Ромеро, канд. техн. наук** ; В. Аргета-Диаз, канд. техн. наук**

* Centro de Estudios Demográficos, Urbanos y Ambientales, El Colegio de México, A.C., Мехико, Мексика

** Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, Universidad Nacional Autónoma de México, Мехико, Мексика

E-mail: mperevochtchikova@colmex.mx, eduardo.sandoval@ccadet.unam.mx, victor.argueta@ccadet.unam.mx

Данная работа посвящена разработке прототипа оптического датчика для проведения наблюдений на локальном уровне за взвешенными частицами в воздухе на территории Мехико, столицы Мексики. В первой части статьи рассматривается городская система атмосферного мониторинга с особым интересом к частицам $PM_{2,5}$ и PM_{10} в связи с их негативным действием как на здоровье человека, так и на ухудшение характеристик оптической связи. В дальнейшем анализируются ее достижения и недостатки, обосновывается необходимость проведения локального мониторинга для чего и предлагается новая техническая схема, построенная на принципе ослабления выходного оптического сигнала при прохождении через открытое пространство. Для реализации работы используются данные официальных источников информации, базы данных наблюдений, интерактивные карты Национальной информационной системы качества воздуха и предварительные результаты экспериментов.

Коды OCIS: 010.1120, 010.3310, 120.4640.

Поступила в редакцию 15.01.2009.

Введение

С середины прошлого века в мире наблюдается стремительный рост урбанизированных территорий, включая появление мегаполисов (или мега-городов) с населением более 5–8 миллионов жителей. Прогнозируется, что к 2030 году около 75% населения будет проживать на урбанизированных территориях, а в случае Мексики 53% населения в 35 больших городах, таких как Мехико, Гуадалахара, Монтеррей, Пуэбла [1]. Стоит отметить, что эта тенденция тесно связана с проявлением проблем деградации природной среды как внутри урбанизированных территорий, так и за их пределами, что в первую очередь связано с загрязнением воздуха, воды и почвы.

Основными загрязняющими веществами, сбрасываемыми в атмосферу городских и промышленных территорий и представляющими опасность для здоровья населения, являются озон (O_3), оксид углерода (CO), оксиды азота (NO_x), диоксид серы (SO_2) и $PM_{2,5}$ и PM_{10} [2] – взвешенные частицы размером меньше 2,5 и 10 мкм соответственно, которые считаются самы-

ми опасными. Они не различимы ни по запаху, ни по размеру, попадают в организм в прямой форме при дыхании и оседают в легких, что с течением времени и увеличением концентраций может привести к серьезным заболеваниям дыхательных путей, сердечной недостаточности и в отдельных случаях к смертельному исходу [3]. Безусловно, опасность частиц определяется их композиционным составом и природой происхождения, которая в основном связана с почвенной эрозией (5–10%), выбросами промышленных предприятий (20–30%), выхлопными газами транспортных средств (порядка 50–70%) и конденсацией газов в фотохимических процессах в атмосфере. Кроме того, наличие в воздухе больших концентраций взвешенных частиц уменьшает видимость и пропускную способность радиосигналов, что в итоге затрудняет работу оптической связи.

В настоящее время во многих крупных городах Мексики существуют сети наблюдений за качеством воздуха, объединенные в единую Национальную информационную систему по качеству воздуха (SINAICA) под ведением Национального

Экологического Института. В частности, в Мехико, столице Мексики, мониторинг состояния воздушной среды осуществляется с середины 1980-х годов и на данный момент представляет по своим достижениям и масштабам пример для многих стран Латинской Америки и даже мира. Однако одной из главных проблем системы наблюдений является невозможность иметь точные данные о степени загрязнения воздуха на локальном уровне, что особенно важно для оповещения населения в реальном времени и непосредственной близости от их местонахождения.

Система мониторинга

В Мехико система мониторинга загрязнения воздуха состоит из одного передвижного центра, лаборатории по стандартам калибровки и четырех оперативных подсистем:

автоматической сети атмосферного мониторинга (РАМА),

ручной сети атмосферного мониторинга (REDMA),

сети измерения атмосферных осадков (REDDA),

сети метеорологических наблюдений (REDMET) (рис. 1).

На данный момент вся сеть включает в себя 49 станций (175 автоматических и 39 ручных установок), на многих из которых наблюдения ведутся одновременно для разных подсистем [4, 5].

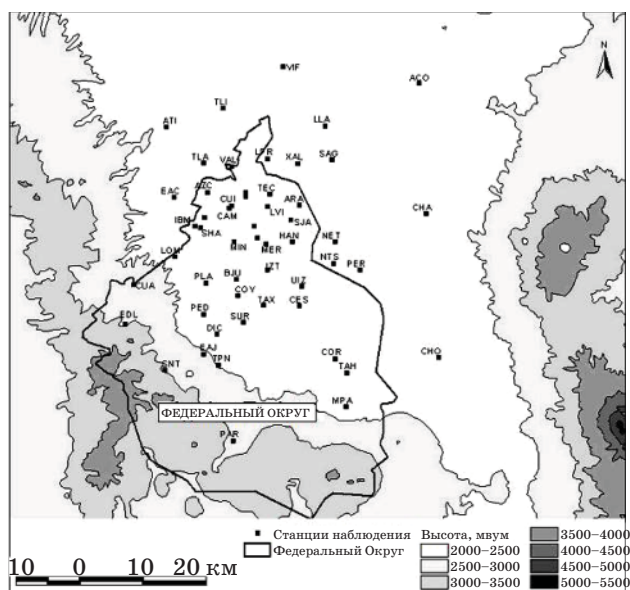


Рис. 1. Расположение станций наблюдения за качеством воздуха в Мехико.

В частности, подсистема РАМА была открыта в 1986 году для атмосферного мониторинга озона, диоксида серы, оксидов азота, оксидов углерода, взвешенных частиц (PM_{10} и $PM_{2,5}$) и сероводорода. С помощью информации, получаемой каждый час с 36 автоматических станций РАМА (24 в Федеральном Округе (Ф.О.)), рассчитывается средний индекс качества воздуха в Мехико (ИМЕСА), который представляется в режиме реального времени на странице Интернета системы SINAICA с рекомендациями населению в зависимости от его значения для принятия определенных мер предосторожности.

На REDMA производятся наблюдения каждые 6 дней за общим показателем взвешенных частиц (PST) и PM_{10} , $PM_{2,5}$ за 24 часа, а также за концентрациями в воздухе некоторых тяжелых металлов (свинец и марганец). Сеть располагает 14-ю дистанционными станциями, 9 из которых находятся в Ф.О.

На REDDA с 1987 года осуществляются еженедельные отборы проб воздуха и дождевой воды для анализа сухого и влажного остатков соответственно и определения главных физико-химических характеристик воды: водородного показателя, электрической проводимости, концентрации анионов (нитраты, сульфаты и хлориды) и катионов (аммоний, кальций, натрий, магний, калий). Это позволяет установить и сравнить зависимости между концентрациями токсических веществ в воздухе и дождевой воде. На данный момент насчитывается 16 полуавтоматических станций (12 в Ф.О.).

Подсистема REDMET имеет функцию мониторинга метеорологических показателей воздуха, которые в свою очередь могут быть использованы для составления климатологических прогнозов и при расчете пространственных и временных моделей распространения загрязняющих веществ. А также представляет информацию по индексу УФ (ультрафиолет) с целью оповещения населения об уровне солнечной радиации и ограничении активности на открытом воздухе. На 15-ти станциях ведется наблюдение за скоростью и направлением ветра, температурой, относительной влажностью, общей и УФ радиацией.

Таким образом, мониторинг взвешенных частиц $PM_{2,5}$ и PM_{10} в Мехико ведется с помощью 23 установок на станциях РАМА и REDMA [6]. Однако стоит отметить ряд проблем, существующих на данный момент [7]. Это неравномерное распределение станций по территории и усреднение параметров по большим территориальным секторам, что не отражает реальную ситуацию на

локальном уровне и теряет смысл для предупреждения населения в непосредственной близости от их местонахождения.

Перспективы локального мониторинга

В плане развития системы атмосферного мониторинга в Мехико на 2012 год [7] и в принятой программе конкретных действий Департамента по Окружающей Среде Федерального Округа (ДОСФО) [6] предусмотрены следующие пункты по улучшению работы сети, непосредственно связанные с темой исследования данной работы:

- увеличение количества станций, включая передвижные установки, и расширение зоны действия мониторинга,
- включение новых загрязняющих веществ в список проводимых измерений,
- проведение постоянного контроля работы аппаратуры по измерению концентрации $PM_{2,5}$ и PM_{10} ,
- внедрение в систему мониторинга видеокамер для определения в режиме реального времени параметра “видимости” в открытом пространстве,
- повышение качества статистической обработки по расчетам прогнозов концентраций озона и $PM_{2,5}$ за 24 часа,
- принятие мер по распространению информации,
- разработка оборудования для проведения программы мониторинга в микро-пространствах для оценки риска здоровью населения.

Стоит отметить, что в настоящее время на вооружении ДОСФО для измерения концентрации взвешенных частиц в стационарных условиях (на станциях сети мониторинга) имеется аппаратура, основанная на процессе всасывания объемов воздуха и взвешивания частиц, прошедших фильтры определенного размера. Для измерения концентрации углеводородов, CO , CO_2 и NO_x на подвижных объектах применяется системный продукт *ESP AccuScanTM Remote Sensing*, работающий на оптическом принципе отражения инфракрасного или ультрафиолетового излучения, и который используется для измерения концентраций указанных веществ в выхлопных газах автомобилей на улицах города. Прибор произведен в США [8] и с успехом применяется не только в Мексике, но и в других странах мира, как например, в Австралии, Канаде, Египте, Германии, Тайване и Англии. Расчеты концентраций ведутся по изменению частоты поглощения оптического сигнала при прохож-

дении среды с различными загрязнителями, при этом для ключевых элементов загрязнений, таких как углеводороды, CO , CO_2 и NO_x , длины волн установлены, и этот сигнал для каждого из них поступает из персонального источника излучения [9], который впоследствии трансформируется в электрический сигнал. В связи с этим данный прибор отличается громоздкостью и, кроме этого, высокой ценой.

По приборам, построенным на оптическом принципе, хотя в большинстве своем и для других целей, существует достаточное количество публикаций на международном уровне. Еще в середине прошлого века автором работ [10, 11] была предложена схема, в дальнейшем широко используемая в спектроскопии, и заключающаяся в том, что луч света проходит длинный оптический путь в открытом, но ограниченном по размеру пространстве посредством множественного отражения от зеркал. При этом ослабление выходного оптического сигнала связывается (при технически корректной установке и регулировке зеркал) исключительно с поглощением света взвешенными частицами, находящимися в воздухе. В работе [12] этот принцип подробно рассматривается и применяется с целью разработки новой микроэлектромеханической системы для улучшения оптической связи. В работе [13] показано, что световой сигнал можно использовать для измерения ухудшения характеристик оптической связи при прохождении в свободном пространстве при плохой погоде, в частности, при повышенной концентрации водяного пара – при тумане, дожде (до 80 мм/час) и снеге. Схема прибора при этом достаточно проста и включает в себя лазерный диод с линзой, отражатель и приемник сигнала. Авторами предлагается использовать данный прибор в городских условиях, проводя наблюдения по “видимости” между высотными зданиями. В работе [14] тот же принцип используется для измерения потери выходного оптического сигнала от резервных систем (10–100 Мбит/с, расстояние до 1000 м) при плохих локальных погодных условиях. В последствии данная идея легла в основу работы [15] по измерению концентраций взвешенных частиц в воздухе на локальном уровне.

На практике оборудование для наблюдения за взвешенными частицами в целях персонального мониторинга, разработанное еще 20 лет назад в США [16] и используемое в последние годы в Мексике [17], имеет ту же базу, что и стационарное оборудование, установленное на станциях

наблюдения за качеством воздуха в Федеральном Округе. Небольшой по размерам прибор построен на принципе всасывания объемов воздуха на уровне дыхательного аппарата человека и последующей обработки результатов в лаборатории взвешиванием частиц, прошедших определенный размер фильтров для PM_{10} и $PM_{2,5}$, с последующей химической абсорбцией для определения ограниченного числа загрязняющих веществ, составляющих эти частицы. Однако прибор отличается как физическим неудобством при его использовании из-за объемности и веса, необходимости постоянного ношения человеком, исключительно индивидуальной зоны действия и чрезвычайно высокой стоимости.

Локальный оптический датчик

Исходя из всего вышесказанного, в данной работе предлагается новая экономичная схема локального датчика для измерения концентраций PM_{10} и $PM_{2,5}$, рассчитанного на площадь действия до 10 м^2 , в основу работы которого положен принцип действия ячейки [10, 11].

Оптическая схема датчика состоит из трех одинаковых полусферических зеркал (отражателей), где одно зеркало располагается напротив двух других на расстоянии радиуса вогнутости $R = 40\text{ см}$, одинакового для всех зеркал. При этом центр вогнутости (ЦВ) зеркала 1 находится

посередине между 2 и 3, центры которых в свою очередь расположены на зеркале 1 на равном расстоянии друг от друга ($2d$). Установка имеет горизонтальное положение, хотя и подразумевается, что в дальнейшем данная схема может быть использована на поверхностях с небольшим наклоном при предварительно выверенных углах отражения (рис. 2). В качестве входного сигнала в работе используется лазерное излучение с длиной волны 632 нм , а для имитации загрязнения воздуха – водяной пар, увеличение концентрации которого отражается на уменьшении выходного оптического сигнала, преобразованного на фотоприемнике (ФП) в электрический.

Сигнал инфракрасного излучения поступает на небольшое входное зеркало, установленное под первым зеркалом таким образом, что отражение с него проходит на зеркало 2, и поскольку данное расстояние представляет собой фокусное расстояние, световой луч отражается на зеркало 1 (первое отражение), с которого выходит на зеркало 3 и возвращается на первое (второе отражение), повторяя в дальнейшем весь обратный путь (рис. 3). В целом, в эксперименте отрабатывается схема, при которой оптический путь светового сигнала достигает $14,8\text{ м}$, отражаясь от зеркал 37 раз.

Учитывая, что взвешенные частицы имеют сложный химический состав, в работе [18] были проведены расчеты по определению коэффициента поглощения оптического сигнала для

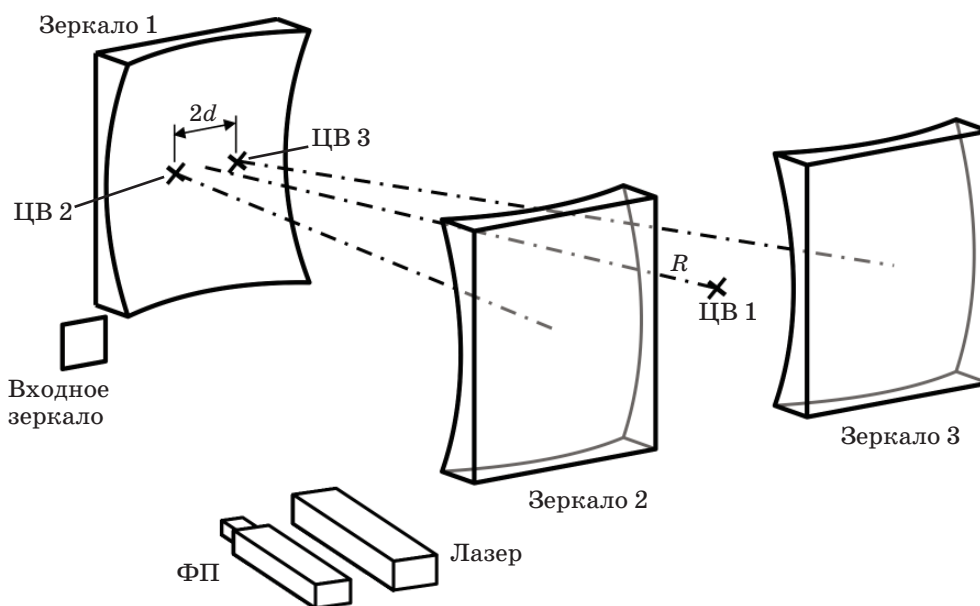


Рис. 2. Схема датчика на оптической основе для определения взвешенных частиц в воздухе.

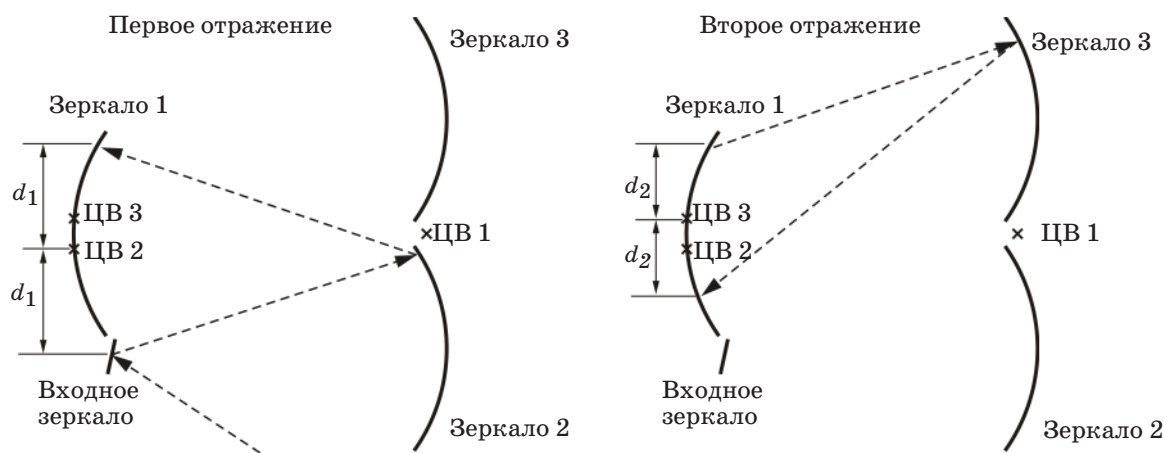


Рис. 3. Схема действия оптического датчика.

элементарного углерода и серы (как одних из самых значимых загрязнителей, связанных с органическими и промышленными выбросами). Базируясь на исследованиях [19], авторами были установлены длины волн в 7,46, 6,29 и 5,45 мкм для определения SO_2 , NO_2 и NO и для частиц размером 2,5 мкм. Эти данные, тем не менее, нуждаются в дальнейшем экспериментальном подтверждении.

Заключение

В результате проведенной работы отмечено, что в Мехико с 1986 года существует достаточно развитая система мониторинга, входящая в Национальную информационную систему по качеству воздуха. Четыре оперативные подсистемы насчитывают 49 станций наблюдения, на 23 из которых осуществляется наблюдение за взвешенными частицами. И хотя данная сеть занимает по достижениям и эффективности работы первую позицию в Латинской Америке, количество станций не отвечает потребностям мегалополиса в связи с их неравномерным распределением по территории и усреднением параметров загрязнения воздуха по большим территориальным секторам, что не отражает реальную ситуацию на локальном уровне.

В этой связи в работе была предложена новая экономичная схема локального датчика измерения концентраций PM_{10} и $\text{PM}_{2,5}$, рассчитанного на площадь действия до 10 м^2 в стационарных условиях, например, в государственных и учебных заведениях, офисах и на предприятиях, и основанного на принципе ослабления оптиче-

ского сигнала при прохождении в свободном пространстве, связанного с поглощением света взвешенными частицами. Также были проведены расчеты по определению коэффициента поглощения оптического сигнала для элементарного углерода и серы и установлены длины волн в 7,46, 6,29 и 5,45 мкм для определения SO_2 , NO_2 , NO и для частиц размером 2,5 мкм.

В перспективах дальнейших исследований по данному прибору предполагается опытное определение длины волны для других элементов, составляющих взвешенные частицы и представляющие интерес с точки зрения негативного влияния на здоровье. В будущем – создание оптического датчика для измерения концентраций мультиэлементов с периодичной отправкой светового сигнала с заданной длиной волны с одного источника во избежание громоздкости конструкции.

Настоящая работа была выполнена при поддержке проектов UNAM-PAPIIT 115906 и CONACYT-J50494.

ЛИТЕРАТУРА

1. CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). Estadísticas del agua en México. М.: CONAGUA, 2007. 259 p.
2. AMC (Academia Mexicana de Ciencias). Ambiente y salud // Revista Ciencia. 2007. V. 57. № 4. P. 96.
3. SEMARNAT (Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales). Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales. М.: SEMARNAT, 2005. 375 p.
4. INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Información). Estadísticas del Medio Ambiente

- del Distrito Federal y Zona Metropolitana 2002. M.: INEGI, SMA-GDF, 2005. 452 p.
5. SIMAT (Sistema de Monitoreo Atmosférico). Mapa interactivo. Página web, 2008: <http://www.sma.df.gob.mx/simat/pnrednueva.htm>
 6. SMA-GDF (Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno Distrito Federal). La calidad del aire en la Zona Metropolitana del Valle de México 1986–2006. Informe del estado y tendencias de la contaminación atmosférica. M.: SM-GDF, 2007. 34 p.
 7. *Perevochtchikova M.* Environmental monitoring in the Mexico City metropolitan area: the current situation // Environmental quality in the large cities and industrial zones: problems and management / Ed. by RSHU. 2009. (In edition).
 8. ESP. ESP AccuScan™ Remote Sensing (RSD3000) Device. Environmental Systems Products Holding Inc. East Granby, CT, USA. Web site, 2008: www.etest.com
 9. RSD. RSD Calculations: a Brief Description. The remote sensing device. Web site, 2008: www.rsd-remotesensing.com
 10. *White J.U.* Long optical paths of large aperture // J. Opt. Soc. Amer. 1942. V. 32. № 5. P. 285–288.
 11. *White J.U.* Very long optical paths in air // J. Opt. Soc. Amer. 1976. V. 66. № 5. P. 411–416.
 12. *Anderson B.L., Argueta-Diaz V., Abou-Galala F., Radhakrishnan G., Higgins R.J.* Optical Cross Connect Switch Based on Tip/Tilt Micromirrors in a White Cell // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. 2003. V. 9. № 2. P. 579.
 13. *Kukshya V., Rappaport T.S., Izadpanah H., Tangonan G., Guerrero R.A., Mendoza J.K., Lee B.* Free-space optics and high-speed RF for next generation networks propagation measurements // IEEE 56 th Proceedings of Vehicular Technology Conference. VTC 2002-Fall. V. 1. P. 616–620.
 14. *Leitgeb E., Bregenzer J., Fasser P., Gebhart M.* Free space optics – extension to fiber-networks for the “last mile” // Proceedings of Lasers and Electro-Optics Society LEOS. 2002. V. 2. № 10–14. P. 459–460.
 15. *Sandoval Romero G.E., Argueta Diaz V.* Mid-infrared gas sensor for pollutants: case study, Mexico City // Poster presentations of RIAO-OPTICALS'07 Conference. 2007.
 16. *Morandi M.T., Stock T.H., Contant C.F.* A comparative study of respirable particulate microenvironmental concentrations and personal exposures // Environmental monitoring and assessment. 1988. V. 10. № 2. P. 105–122.
 17. *González de la Luz G.* Evaluación de exposición personal a contaminantes atmosféricos (Ozono, dióxido de nitrógeno, partículas menores a 10 y 2,5 micrómetros) en adultos mayores que habitan en la Zona Metropolitana del Valle de México // Memorias del Congreso XVI FEMISCA. 2008.
 18. *Argueta Diaz V., Sandoval Romero G.E.* Effects of pollutants in free-space optical communication: case study, Mexico City // Abstracts of the International Conference Fundamentals of Laser Assisted micro- and nanotechnologies. 2007. 106 p.
 19. *Schkolnik G., Chand D., Hoffer A., Andreae M., Erlick C., Swietlicki E., Rudich Y.* Constraining the density and complex refractive index of elemental and organic carbon in biomass burning aerosol using optical and chemical measurements // Atmos. Environ. 2007. V. 41. № 5. P. 1107–1118.
 20. *Kukshya V., Rappaport T.S., Izadpanah H., Tangonan G., Guerrero R.A., Mendoza J.K., Lee B.* Free-space optics and high-speed RF for next generation networks propagation measurements // Proceedings of Vehicular Technology Conference. 2002. V.1. P. 616–620.
 21. *Schkolnik G., Chand D., Hoffer A., Andreae M., Erlick C., Swietlicki E., Rudich Y.* Constraining the density and complex refractive index of elemental and organic carbon in biomass burning aerosol using optical and chemical measurements // Atmos. Environ. 2007. V. 41. № 5. P. 1107–1118.