

М.А. Бизин, П.К. Куценогий, К.П. Куценогий, В.И. Макаров

Автоматизация нефелометрических измерений массовой концентрации субмикронных атмосферных аэрозолей

Институт химической кинетики и горения СО РАН, г. Новосибирск

Поступила в редакцию 12.03.2006 г.

Предложен способ автоматизации нефелометрических измерений массовой концентрации субмикронной фракции атмосферных аэрозолей на базе промышленного образца фотоэлектрического нефелометра (ФАН-А). Проведена модернизация электрической схемы прибора. Модернизация состояла в разработке и установке дополнительной платы контроллера, основной функцией которой является аналого-цифровое преобразование, и написании программы для управления ею с помощью компьютера. Центральным элементом платы является микроконтроллер, благодаря чему реализованы не только функция преобразования аналоговых данных, но и резервное хранение данных в микросхеме памяти, включенной в схему платы контроллера. Для работы прибора и накопления данных не требуется подключения компьютера. Это важно при измерениях в полевых условиях.

Введение

При исследовании характеристик атмосферных аэрозолей (АА) широко применяются нефелометры. Наиболее часто их используют при изучении оптических свойств АА, загрязняющих атмосферу и влияющих на видимость в ней. В результате этих исследований выяснено, что уменьшение видимости зависит от концентрации, спектра размеров и химического состава АА [1–8].

Теоретические исследования в области оптики атмосферы с использованием теории Ми позволили получить надежные полуэмпирические соотношения, связывающие результаты оптических измерений с данными определения массовой концентрации АА гравиметрическим и другими методами. В частности, выяснилось, что величина светорассеяния частицами АА пропорциональна их массовой концентрации, а коэффициент пропорциональности зависит от спектра размеров и химического состава АА.

Разрабатываются различные варианты нефелометров, которые широко используются не только для наземных и самолетных измерений пространственно-временной изменчивости массовой концентрации АА, но и для качественной оценки их дисперсного и химического состава. В развитых странах налажен промышленный выпуск различных видов нефелометров для исследований и контроля микрофизических и оптических характеристик АА. В нашей стране аналогичные исследования наиболее интенсивно ведутся в Институте физики атмосферы РАН, Институте оптики атмосферы СО РАН, Институте экспериментальной метеорологии, Главной геофизической обсерватории и Санкт-Петербургском университете [9–15].

Необходимо отметить, что при нефелометрических исследованиях оптических характеристик АА или уровня загрязнения атмосферы, за исключени-

ем работ, проводимых в Институте оптики атмосферы, использовалась уникальная аппаратура, созданная самими авторами. Обычно это единичные экземпляры приборов, которые имеют достаточно большие размеры, и эксплуатация такой аппаратуры возможна только специалистами, ее разработавшими. Для нефелометрических измерений оптических характеристик АА в Институте оптики атмосферы СО РАН были разработаны наземный и самолетный компьютерные комплексы, в качестве оптического датчика в них использовался промышленно выпускаемый фотоэлектрический нефелометр типа ФАН [14, 15].

Промышленные образцы нефелометра для изучения аэрозолей производились Загорским приборостроительным заводом еще с 50-х гг прошлого века. Эти приборы предназначались прежде всего для определения эффективности фильтрующих материалов, а также различных аэрозольных исследований в лабораторных условиях. Оптические характеристики оптической схемы нефелометра позволяли измерять аэрозольное светорассеяние в нескольких спектральных интервалах и под разными углами. Кроме того, в них присутствовала возможность измерять поляризационные характеристики рассеянного аэрозолями света. Подробно характеристики нефелометров типа КОЛ (визуальный вариант) или ФАН (фотоэлектрический вариант) изложены в публикациях [16, 17]. В них же приведено описание методики градуировки и расчета характеристик светорассеяния от стандартных аэрозолей с известными оптическими параметрами.

Фотоэлектрические нефелометры последнего поколения ФАН-А, которые производятся с 70-х гг. прошлого столетия, имели выход для автоматической регистрации интенсивности рассеянного излучения на самописец или для подключения к компьютерам

старого поколения. При использовании нефелометра в полевых условиях с применением отечественной компьютерной техники производства 80-х гг. это приводило к большим трудностям из-за громоздкости, значительного веса и большой энергоёмкости комплекса.

Нефелометр ФАН-А предназначен для относительного измерения светового потока, рассеянного аэрозолем. Прибор обладает высокой чувствительностью к интенсивности рассеянного света благодаря применению фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) в качестве фоточувствительного элемента.

В наших исследованиях проводятся измерения массовой концентрации атмосферного аэрозоля [18, 19]. Область, в которой эти измерения могут проводиться, включает в себя лабораторные измерения, измерения на стационарных станциях и на подвижных объектах (автомобиль, корабль, самолет). Существенным требованием является необходимость непрерывных измерений, которые могут проводиться длительное время — сутками, месяцами, так как массовая концентрация АА зависит от многих факторов и может резко измениться в любое время. В лаборатории можно создать все благоприятные условия для регистрации аэрозоля, в остальных случаях возникают проблемы:

- перевозки и монтирования установки,
- контроля и управления установкой,
- хранения данных.

Решению этих проблем посвящена данная статья. В ней описана модернизация нефелометра ФАН-А за счет добавления платы контроллера, сконструированной на базе современных электронных компонентов и имеющей стандартный интерфейс связи с компьютером.

Принцип работы нефелометра

Измерение массовой концентрации аэрозоля в нефелометре ФАН-А основано на линейном преобразовании светового потока, рассеянного аэрозольными частицами, в электрический ток. На рис. 1 приведена упрощенная оптическая схема фотоэлектрического измерения светового потока, рассеянного аэрозолем.

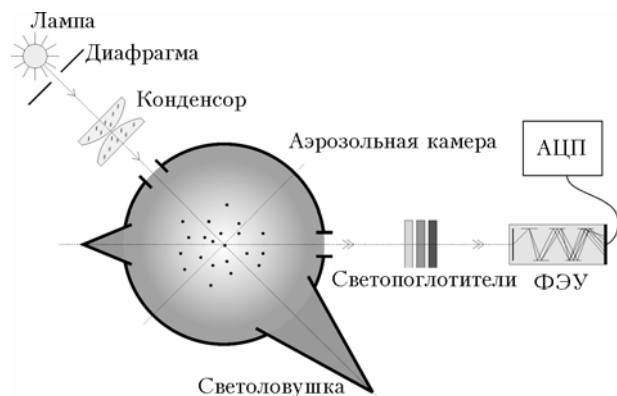


Рис. 1. Упрощенная оптическая схема фотоэлектрического измерения светового потока, рассеянного аэрозолем, в нефелометре ФАН-А

Воздух с аэрозолем прокачивается через аэрозольную камеру, где освещается потоком света от галогенной лампы накаливания 40 Вт. Рассеянный под углом 45° световой поток, интенсивность которого при необходимости ослабляется калиброванными неизбирательными светопоглотителями, преобразуется в электрический сигнал с помощью ФЭУ. К выходу нефелометра можно подключить любой внешний регистрирующий прибор с токовым входом, в частности самописец.

Плата контроллера

Плата контроллера разрабатывалась с целью заменить самописец, тем самым освободить исследователя от необходимости обрабатывать рулоны бумаги.

В основе платы контроллера используется микроконтроллер ATmega8 (http://atmel.com/dyn/products/product_card.asp?part_id=2004) фирмы Atmel (<http://atmel.com>). Выбор данного микроконтроллера обусловлен тем, что он уже содержит в себе 10-битный аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и универсальный асинхронный приемопередатчик (УАПЧ) для связи с компьютером через интерфейс RS232 (COM-порт). Для подключения внешних устройств накопления данных в нефелометре предусмотрен токовый выход сигнала в диапазоне 0–300 мкА. Согласование сигнала с входным уровнем АЦП производится с помощью операционного усилителя, снимающего напряжение с сопротивления 100 Ом, которое подключается к токовому выходу. УАПЧ микроконтроллера требует CMOS-TTL-уровни, т.е. 0–5 В, тогда как COM-порт компьютера использует уровни –12 и +12 В, специальная микросхема-адаптер MAX3323E преобразует уровни и защищает линию связи от высокого статического напряжения.

Описанной схемы достаточно для функционирования всей системы автоматизированного сбора данных. Так было в первой версии платы контроллера, но во время ее эксплуатации оказалось, что при круглосуточном сборе нередко случаи пропадания сети питания на короткие промежутки времени, и если компьютер не защищен от подобных сбоев, данные пропадают до прихода человека.

Во второй версии платы контроллера (рис. 2) были добавлены энергонезависимая память и часы реального времени с отдельным питанием от трех часовых батареек.

Микроконтроллер считывает входной сигнал с частотой 10 выборок в секунду, затем среднее за 1 мин записывает в энергонезависимую память и ставит временную метку последней записи. Памяти хватает на хранение данных, записанных в течение последних 68 ч (2 дня 20 ч) при циклической записи. Компьютер не обязательно держать подключенным к плате контроллера, достаточно присоединять его в нужные моменты времени и считывать накопленную в памяти информацию. Также в плату контроллера заложена возможность управления поддиапазонами измерения массовой концентрации

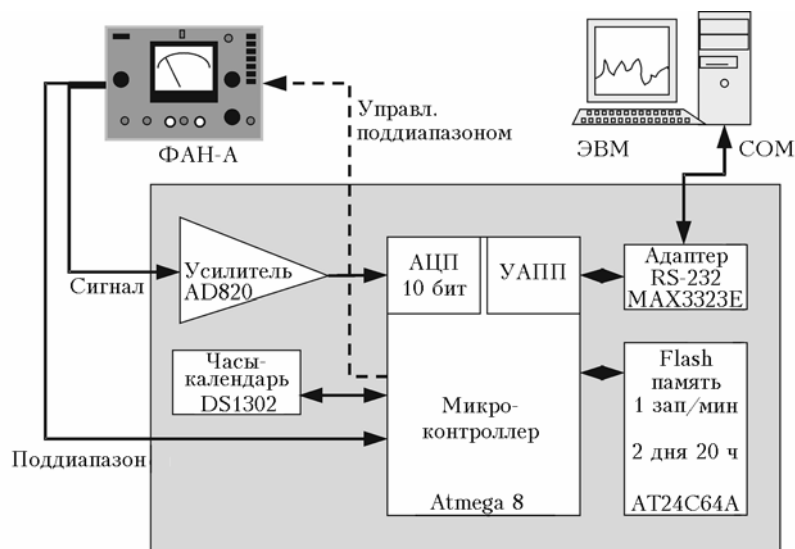


Рис. 2. Блок-схема платы контроллера нефелометра

аэрозоля, когда сигнал меняется в широких пределах и выходит за границу измерения с текущей чувствительностью.

Плата контроллера монтируется внутри корпуса нефелометра (рис. 3).



Рис. 3. Нефелометр ФАН-А. Положение платы контроллера внутри корпуса нефелометра

Программное обеспечение

Программа для микроконтроллера писалась на языке программирования Си для AVR, в ней реализованы функции чтения выборок из АЦП, приема и передачи сообщений через УАПП, установки и чтения текущего времени, записи данных в память и чтения из памяти, обработки прерываний от таймера, синхронизации данных после пропадания питания.

Программа для компьютера или для пользователя написана на языке программирования Delphi

под операционную систему Windows, имеет графический интерфейс (рис. 4).

В программе можно настроить параметры СОМ-порта, выбрать директорию для записи файлов, настроить время на плате контроллера, считать данные из памяти платы. Программа при установлении связи с платой контроллера начинает отображать сигнал, разворачивающийся во времени с посекундным обновлением. Предусмотрены три типа получаемой информации: сигнал при прокачке атмосферного воздуха, сигнал при прокачке фильтрованного воздуха и сигнал нуля прибора. Запись каждого сигнала осуществляется при нажатии соответствующей кнопки в окне программы при предварительной (вручную) установке необходимых механических коммутаций на приборе. Все три сигнала необходимы для получения калиброванных данных, массовая концентрация субмикронной фракции АА при этом линейно связана с отношением светорассеяния на аэрозоле к светорассеянию на чистом воздухе.

При нажатии на кнопку меню «Статистика» открывается окно, в котором можно посмотреть сигналы за весь период измерения и провести предварительную обработку: получить абсолютное значение массовой концентрации АА, а также таблицы для среднечасовой кривой и суточного цикла всего периода измерения.

Формат данных на диске

На жесткий диск компьютера ежеминутно записывается средний за 1 мин сигнал. Записанный сигнал имеет размерность относительных единиц АЦП. Зная калибровку, можно получить абсолютные значения. Данные в файле идут в несколько колонок: в первой колонке указывается время, во второй — значение сигнала, в третьей — поддиапазон измерения, в четвертой — метка, указывающая

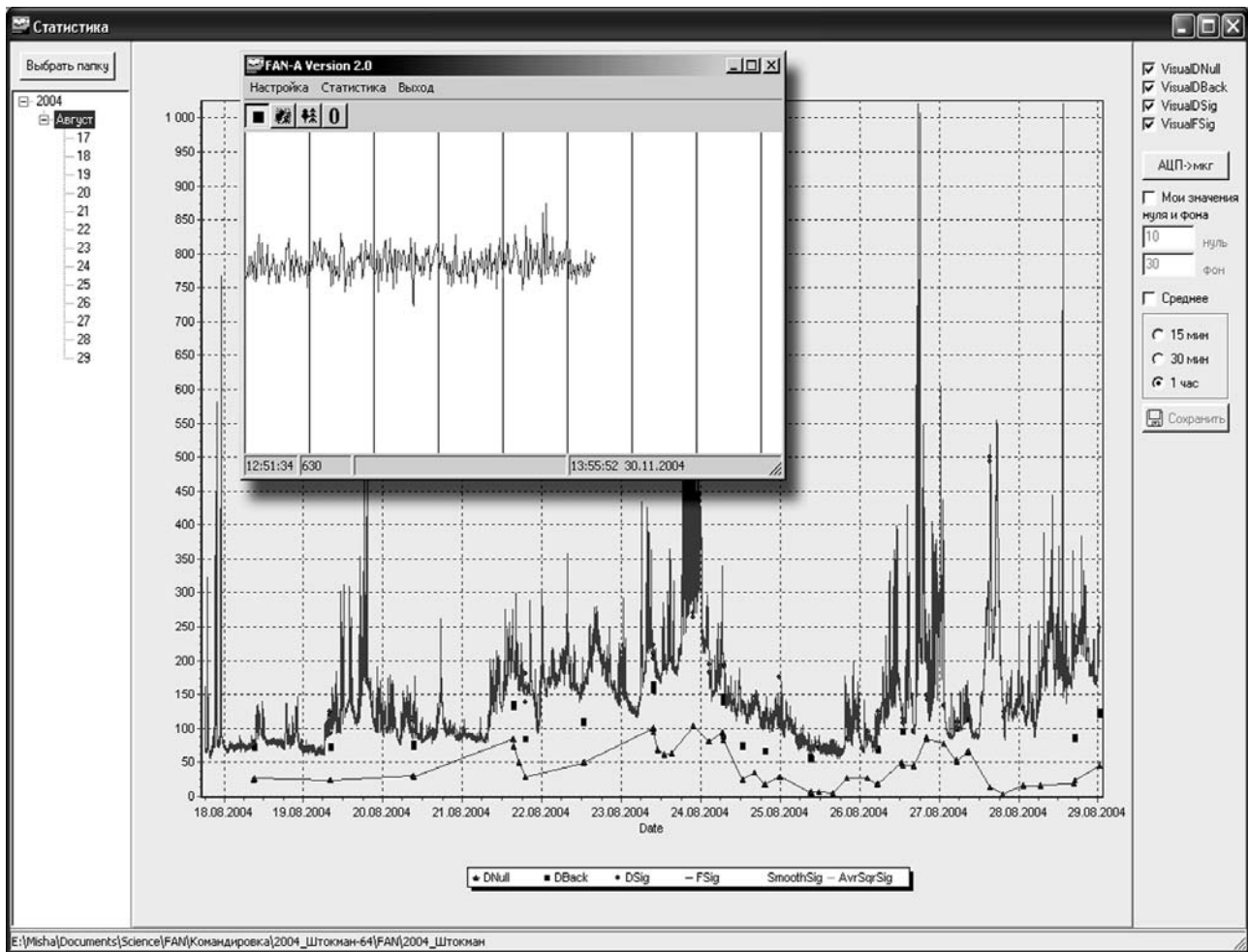


Рис. 4. Графический интерфейс программы управления контроллером нефелометра. Вверху слева – окно управления с посекундным отображением сигнала (интервал между вертикальными линиями – 1 мин). Внизу – весь сигнал с минутным разрешением

на тип сигнала. Файл имеет текстовый формат, поэтому его легко импортировать в хорошо известные программы, обрабатывающие большие массивы данных (Excel, Origin, MatLab и др.).

Эксперименты

Было проведено несколько экспедиций с использованием модернизированного нефелометра, все измерения были успешными. Самые жесткие условия проведения измерений были в экспедиции на научно-исследовательском судне «Профессор Штокман». Нефелометр был помещен на пеленгаторную палубу в специально сооруженную конструкцию, защищающую приборы от дождя и ветра (рис. 5).

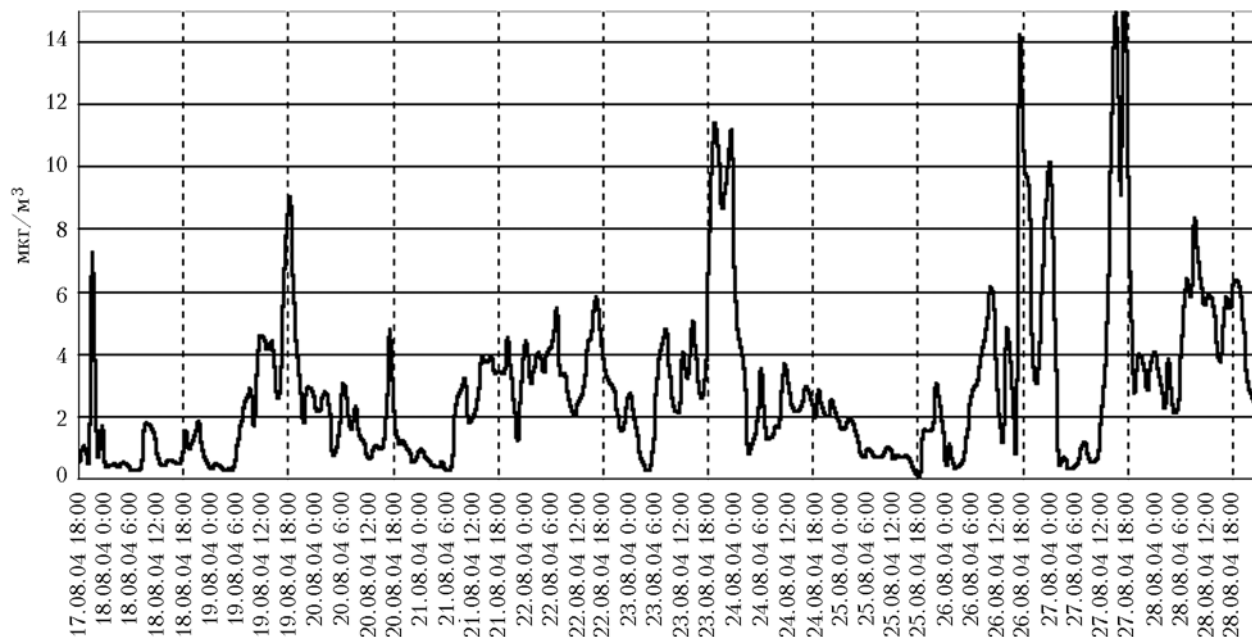
В процессе работы произошел один сбой в сети питания на полчаса, связанный с внешними факторами, после чего работа нефелометра автоматически возобновилась. На рис. 4 представлены данные в том виде, в котором они считываются с прибора, а на рис. 6 те же данные, переведенные в абсолют-

ные значения массовой концентрации субмикронной фракции АА.



Рис. 5. Экспедиция на НИС «Профессор Штокман» по Белому морю. Нефелометр располагается в специально собранном укрытии (в центре фотографии), защищающем от дождя, ветра и брызг во время шторма

Сигнал за весь период измерения (НИС «Профессор Штокман», рейс 64, Белое море, 17–28 августа 2004)



Суточный цикл (НИС «Профессор Штокман», рейс 64, Белое море, 17–28 августа 2004)

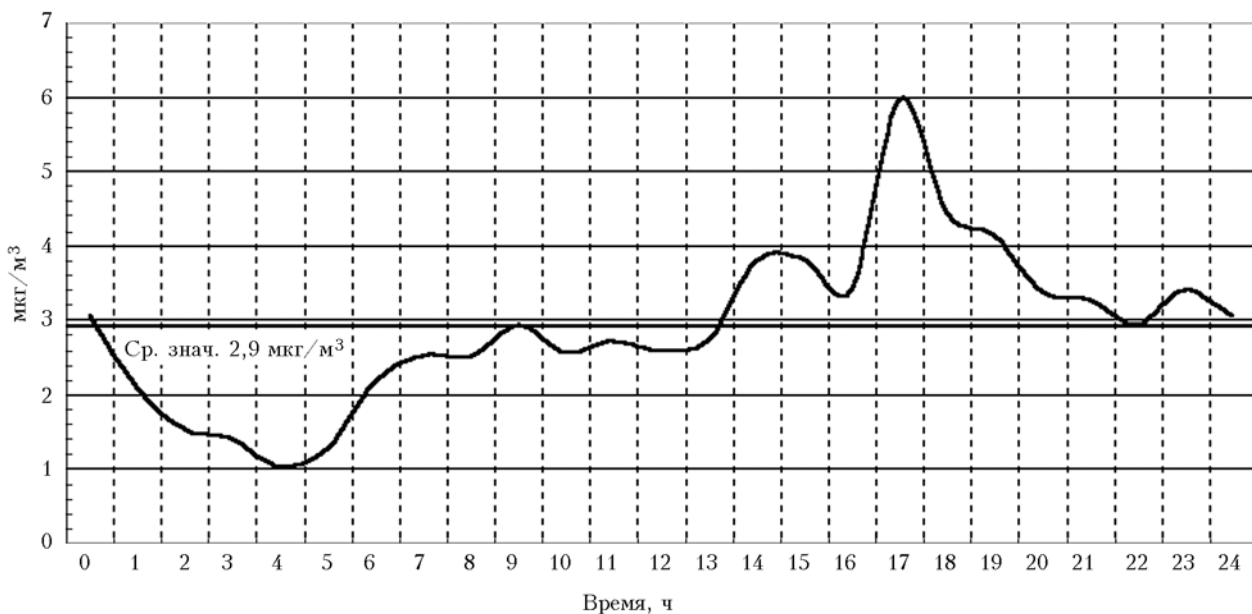


Рис. 6. Результаты, полученные при непрерывных измерениях. Верхняя диаграмма – среднечасовая массовая концентрация субмикронной фракции АА за весь период измерения. Нижняя диаграмма – суточный цикл для данного периода измерения

Заклучение

Произведена автоматизация сбора данных с нефелометра в память компьютера через стандартный интерфейс последовательной передачи данных (СОМ-порт), тем самым прибор не привязан к конкретному компьютеру.

Осуществлен резервный сбор данных во встроенную энергонезависимую память платы контроллера.

Поддерживается накопление данных в автономном режиме (без компьютера) в течение 2 дней 20 ч с защитой от пропадания электрического питания прибора.

Написаны программы управления и взаимодействия компьютера с платой контроллера.

Модернизированный нефелометр успешно эксплуатировался в экспедициях, а также на стационарной станции в п. Ключи.

Авторы выражают благодарность сотрудникам Института океанологии РАН им. П.П. Ширшова академику А.П. Лисицину и В.П. Шевченко за предоставленную возможность участия в экспедициях на территории Белого моря.

Исследования проводились при частичной поддержке гранта ИП СО РАН № 169.

1. Charlson R.J. Atmospheric Visibility to Aerosol Mass Concentration // *Rev. Environ. Sci. Technol.* 1969. V. 3. N 10. P. 913–918.
2. Tombach I., Allard D. Intercomparison of Visibility Measurement Methods // *J. Air Pollution Control Assoc.* 1980. V. 30. N 2. P. 134–142.
3. Charlson R.J., Covert D.S., Tokiwa Y., Muller P.K. Multiwave Nephelometer Measurement in Los Angeles Smog Atmosol. III. Comparison to light Extinction by NO₂ // *Aerosols and Atmospheric Chemistry* / Ed. by G.M. Hidy. N.Y.: Academic Press, 1972. P. 333–338.
4. Charlson R.J., Ahlquists N.C., Horvath H. On the generality of correlation of atmospheric aerosol mass concentration and light scatter // *Atmos. Environ.* 1968. V. 2. P. 455–464.
5. Kretzshmar J.S. Comparison between Three Different Methods for the Estimation of Total Suspended Matter in Urban Air // *Atmos. Environ.* 1975. V. 9. N 10. P. 931–934.
6. Lee R.E., Caldwell J.S., Morgan G.B. The Evaluation of Methods for Measuring Suspended Particulates in Air // *Atmos. Environ.* 1972. V. 6. N 9. P. 593–622.
7. Scheff P.A., Wadden R.A. Comparisons of Three Methods of Particulate Measurement in Chicago Air // *Atmos. Environ.* 1979. V. 13. N 5. P. 639–643.
8. Ensor D., Charlson R., Ahlquist N., Whitby K., Husar R., Liu B. Multiwavelength nephelometer measurements in Los Angeles smog aerosol: 1. Composition of calculated and measured light scattering // *Aerosols and Atmospheric Chemistry* / Ed. By G.M. Hidy. N.Y.: Academic Press, 1972. P. 315–324.
9. Горчаков Г.И., Розенберг Г.В. Корреляционные связи между оптическими характеристиками мелкодисперсных дымок // *Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана.* 1967. Т. III. № 6. С. 611–620.
10. Горчаков Г.И., Емиленко А.С., Исаков А.А., Свириденко М.А., Сидоров В.Н. Временной ход оптических и микрофизических характеристик субмикронной фракции приземного аэрозоля по данным АФАЭКС-79 // *Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана.* 1983. Т. 19. № 11. С. 1226–1231.
11. Емиленко А.С., Сидоров В.Н. Синхронные концентрации субмикронного аэрозоля в Москве и Подмосковье // *Контроль состояния воздушного бассейна г. Москвы. Препр. / ИФА РАН. (М.)* 1992. № 9. Ч. II. С. 93–104.
12. Сидоров В.Н. Вариация содержания субмикронного аэрозоля в приземном слое (Подмосковье, 1991) // Там же. С. 105–115.
13. Ивлев Л.С. Химический состав и структура атмосферных аэрозолей. Л.: Изд-во ЛГУ, 1982. 364 с.
14. Кабанов М.В., Панченко М.В., Пхалагов Ю.А., Веретенников В.В., Ужegov В.Н., Фадеев В.Я. Оптические свойства прибрежных атмосферных дымок. Новосибирск: Наука, 1988. 201 с.
15. Панченко М.В. Нефелометрия в комплексных исследованиях атмосферного аэрозоля: Дис. ... док. физ.-мат. наук. Томск, 1994. 513 с.
16. Коган Я.И. Применение нефелометров для изучения аэрозолей // *Приборы и техника лабораторной работы.* 1958. № 2. С. 215–219.
17. Коган Я.И., Панкратова М.Е. Зависимость светорассеяния от размера частиц в аэрозольных нефелометрах с углом наблюдения 90° и 135° // *Коллоид. ж.* 1969. Т. XXXI. № 4. С. 623–626.
18. Куценогий П.К., Буфетов Н.С., Киров Е.И., Шуйский С.И. Динамика суточных и сезонных циклов аэрозолеобразования в атмосфере по измерениям в Новосибирской области // *Оптика атмосфер. океана.* 1995. Т. 8. № 9. С. 1355–1365.
19. Куценогий П.К. Сезонная изменчивость суточного цикла массовой концентрации субмикронной фракции континентального атмосферного аэрозоля в удаленных территориях // *Химия в интересах устойчивого развития.* 2002. Т. 10. № 5. С. 627–635.

M.A. Bizin, P.K. Kutzenogii, K.P. Kutzenogii, V.I. Makarov. Automation of the nephelometric measurements of the mass concentration of submicron atmospheric aerosols.

A method is proposed of automation of the nephelometric measurements of the mass concentration of a submicron fraction of atmospheric aerosols on the basis of the commercial sample of photoelectric nephelometer (FAN-A). The electric scheme of the device was improved both by developing and installing an additional controller board and by creating a program for computer management. The main function of the controller board is analog-digital conversion (ADC). The central element of the board is a microcontroller used to realize not only a function of analog data conversion but also back-up data storage in the memory microchip included in the ADC board scheme. The device can operate and data can be accumulated without computer, which is of importance for field measurements.