

Аппаратно-программный комплекс для контроля содержания атмосферных примесей

А. С. ЗАЯХАНОВ, Г. С. ЖАМСУЕВА, В. В. ЦЫДЫПОВ

Институт физического материаловедения СО РАН,
Улан-Удэ, Россия, e-mail: Lrf@ipms.bscnet.ru

Представлен аппаратно-программный комплекс для контроля содержания аэрозольных и газовых примесей в приземном слое атмосферы, ее метеорологических и турбулентных характеристик. Описан состав и функциональная схема комплекса, структура программного пакета по систематизации и обработке данных автоматизированной системы контроля качества воздуха. Разработанный комплекс позволяет проводить мониторинг содержания веществ, загрязняющих атмосферу, на стационарном пункте при маршрутных и подфакельных наблюдениях.

Ключевые слова: аппаратно-программный комплекс, контроль атмосферных примесей, газоанализаторы, аэрозоль, приземный озон.

The hardware and software complex for control of the content of aerosolic and gaseous impurities in the ground atmosphere, its meteorological and turbulent characteristics is presented. The composition and functional scheme of complex, structure of software for the systematization and data processing of automated air quality monitoring system are considered. This complex allows to carry out the monitoring of the atmospheric impurities content at stationary point, at the routing and flare measurements.

Key words: hardware-software complex, control of the atmospheric impurities, gas analyzer, database, aerosol, surface ozone.

Исследование характеристик примесей является одной из центральных задач современной физики и химии атмосферы. Процессы формирования химического состава, пространственно-временной изменчивости аэрозольных и газовых примесей в приземном слое атмосферы определяются сложным взаимодействием природных и антропогенных источников поступления примесей. В последние десятилетия происходит интенсивное насыщение атмосферы газообразными и аэрозольными примесями от промышленных источников и автотранспорта. Значительное антропогенное воздействие малых газовых составляющих атмосферы на состояние окружающей среды как в региональном, так и в глобальном масштабах, обуславливает необходимость систематических наблюдений за их содержанием в атмосфере, особенно в ее нижнем приземном слое [1—3]. Контроль загрязнения воздуха в населенных пунктах предполагает регулярные и эпизодические обследования на стационарных, маршрутных и передвижных постах наблюдений [4].

При сложившейся организации государственной системы мониторинга сети Гидрометслужбы России данные о концентрациях загрязняющих веществ имеют, в лучшем случае, суточную задержку. Такая система мониторинга, в целом, уже не удовлетворяет современным потребностям государства в информации о состоянии окружающей природной среды. Экологическую безопасность населения невозможно обеспечить без оперативного выявления высоких уровней концентраций различных примесей, а также аварийных выбросов загрязняющих веществ в атмосферу. При возникновении

подобных ситуаций для принятия своевременных мер по ликвидации отрицательных последствий соответствующими органами власти контроль за качеством воздуха должен проводиться в реальном масштабе времени. Решить этот жизненно важный вопрос возможно только с помощью внедрения оперативной автоматизированной системы контроля состава атмосферы.

В настоящее время во многих городах РФ активно внедряются автоматизированные системы мониторинга атмосферы для получения достоверной информации о загрязнении при решении задач и организации мероприятий по охране окружающей среды [5—8]. Характерной особенностью существующих автоматизированных систем является их узкая целевая направленность. Данные системы применяют для мониторинга загрязнения атмосферы, промышленных и природных объектов или в научных целях для исследования климатических изменений. В связи с этим актуально создание гибкой автоматизированной системы, позволяющей одновременно решать вышеперечисленные задачи.

Экологическая оценка атмосферы, основанная на новых методах комплексных экспериментальных исследований содержания в ней примесей, требует привлечения современных средств дистанционного и локального контроля, результатом работы которых является огромный массив данных. Его необходимо систематизировать и обрабатывать с помощью специализированного программного обеспечения (ПО). В связи с этим актуальной задачей является разработка измерительного комплекса (ИК), способного работать как в стационарном, так и в передвижном режиме. Такой комп-

лекс должен включать современные эффективные измерительные средства, позволяющие расширить контроль качества воздуха на производственных и природных объектах, интерфейс, понятный пользователю без специальной подготовки, а также осуществлять поддержку баз данных для реализации распределенного доступа и обработки большого объема информации, получаемой в результате работы ИК.

В данной статье описан аппаратно-программный комплекс (АПК) для контроля содержания аэрозольных, газовых примесей в приземном слое атмосферы, ее метеорологических и турбулентных характеристик. Отличием данного АПК по сравнению с автоматизированными системами мониторинга атмосферного воздуха, уже применяемыми в РФ, является включение в его состав средств дистанционного зондирования (фотометра, аэрозольного лидара) и диффузионного спектрометра аэрозолей, которые позволяют проводить многоуровневые и разномасштабные натурные наблюдения, в том числе для контроля смоговых ситуаций.

Состав автоматизированной системы контроля качества воздуха (АСККВ). Для исследования состава и свойств атмосферы в Институте физического материаловедения СО РАН разработана и используется расширенная АСККВ [9]. В ее состав входит следующее оборудование, состоящее из четырех функциональных групп.

1. Газоаналитический блок включает газоанализаторы приземного озона 3.02 П-А, оксидов азота Р-310, диоксида серы С-310А, диоксида углерода ОПТОГАЗ 500.4 производства ЗАО «ОПТЭК» (С.-Петербург), оксида углерода Палладий-3 производства «Аналитприбор» (Смоленск).

Газоанализаторы 3.02 П-А, Р-310, С-310А используют хемилюминесцентный метод измерения массовой концентрации компонентов, ОПТОГАЗ 500 — оптический, Палладий-3 — электрохимический метод.

Газоаналитический блок также содержит комплект средств метрологического обеспечения: стандартные образцы состава в баллонах под давлением, аттестованные источники микропотоков, калибратор «Mod. 8500 Monitor Labs.» для калибровки газоанализаторов С-310А, Р-310, 3.02 П-А. По результатам испытаний, проведенных Центром лабораторного анализа и технических измерений по Сибирскому федеральному округу установлено, что работа газоаналитического блока соответствует требованиям стандарта [10] и Федерального закона РФ от 26 июня 2008 г. № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений».

2. Метеорологический блок состоит из автономных ультразвуковых метеорологических станций в стационарном, двухуровневом и переносном вариантах.

Автоматизированный метеорологический комплекс (АМК) [11], разработанный Институтом мониторинга климато-экологических систем СО РАН (Томск), предназначен для автоматических измерений и регистрации мгновенных и средних значений основных метеорологических параметров атмосферы: температуры воздуха, скорости и направления горизонтального ветра, скорости вертикального ветра, относительной влажности воздуха, атмосферного давления. Отличительной особенностью метеоконкомплекса является использование ультразвукового метода измерений основных ме-

теопараметров, что обеспечивает высокую точность и малую инерционность измерений, компактность измерительной системы [12]. В отличие от метеорологических приборов, используемых на обычных метеостанциях, приборы комплекса имеют более высокую чувствительность и точность, меньшую инерционность, что обеспечивает необходимое для расчета переноса загрязнений качество входных данных. Акустический анемометр в составе комплекса позволяет определять параметры турбулентности.

По стандарту [13] АМК является информационно-измерительной системой и находит широкое применение в метеорологии, производственном контроле в области охраны окружающей среды (экологическом мониторинге), а также научных исследованиях в области физики атмосферы.

3. Аэрозольный блок состоит из диффузионного спектрометра аэрозолей (ДСА) разработки Института химической кинетики и горения СО РАН (г. Новосибирск), предназначенный для измерения дисперсного состава и концентрации высокодисперсных аэрозолей естественного и антропогенного происхождения [14, 15]. Диапазон измеряемых диаметров частиц 3—200 нм, диапазон концентраций, измеряемых без разбавления, менее $5 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$, объемный расход анализируемого аэрозоля $0,06 \text{ м}^3/\text{ч}$. Применяемый в составе АСККВ прибор ДСА модифицирован дополнительным счетчиком аэрозольных частиц ПК.ГТА-0,3-002. Диапазон измеряемых диаметров частиц 300—1000 нм и выше, диапазон концентраций, измеряемых без разбавления, 10^2 — $3 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$, объемный расход анализируемого аэрозоля $0,048 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Для контроля содержания аэрозоля в атмосфере в состав аэрозольного блока также включены высокообъемные пробоотборники взвешенных частиц (TSP), частиц диаметром менее 10 мкм (PM-10) (General Metal Works (GMW) Model GL2000/H TSP Monitor, GMW IP-10 PM10 Monitor [16] и аэрозольный сканирующий лидар «Лоза-М2» [17].

4. Фотометрический блок включает солнечный фотометр SP-7 разработки Института оптики атмосферы СО РАН (Томск) [18], который применяется для круглогодичных измерений солнечной радиации в различных участках спектра ультрафиолетовый, аэрозольной оптической толщины атмосферы, общего содержания водяного пара и озона. В состав солнечного фотометра SP-7 входят следующие основные узлы и блоки: многоволновый солнечный фотометр со встроенным микроконтроллером; система наведения и слежения за Солнцем; блок датчиков Солнца и метеорологических элементов; блок питания-управления и персональный компьютер.

Метрологическое обслуживание АСККВ проводится ежедневно и представляет собой комплекс организационных и технических мероприятий, направленных на обеспечение достоверности получаемой информации в соответствии с методическими указаниями по поверке, входящими в комплект поставки оборудования и приборов.

В таблице приведены средства измерений и их основные технические характеристики.

Физико-химические измерения

Технические характеристики средств измерений

Средство измерения	Исследуемое вещество	Измеряемая величина	Диапазон измерений	Допускаемая погрешность измерения			
				приведенная, %	относительная, %	абсолютная	
Газоаналитический блок							
Р-310	NO ₂	Массовая концентрация <i>C</i> , мг/м ³	0—0,08	± 25	—	—	
	NO		0,08—1	—	± 25		
3.02П-А	O ₃		0—0,03	± 20	—		—
			0,03—0,5	—	± 20		
Палладий-3	CO		0—3 3—10 10—20 20—0 30—50	—	—	0,75 ± 1,5 ± 2 ± 3 ± 5	
С-310А			SO ₂	0—0,05	± 25	—	—
	0,05—2,0	—		± 25			
ОПТОГАЗ 500.4	CO ₂	<i>C</i> , ppm	0—300	—	± 20	—	
Метеорологический блок							
Метеорологический комплекс АМК	Воздух	Температура воздуха <i>T</i> , °C	–50...+30 +30...+50	—	—	± 0,3 ± 0,5	
		Скорость горизонтального ветра <i>v</i> , м/с	0—40	—	—	±0,5	
		Направление горизонтального ветра <i>D</i> °	0—360	—	—	± 4	
		Скорость вертикального ветра <i>w</i> , м/с	0...15	—	—	±0,25	
		Относительная влажность воздуха <i>r</i> , %, при <i>T</i> > 0 °C <i>T</i> ≤ 0 °C	5—100	—	—	±3 ±6	
		Атмосферное давление <i>P</i> , Па	74,660·10 ³ — 106,658·10 ³	—	—	± 33,3	
Аэрозольный блок							
Диффузионный спектрометр ДСА	Воздух	Счетная концентрация высокодисперсных частиц <i>N</i> , см ^{–3}	менее 5·10 ⁵	± 10	—	—	
		Диаметр частиц <i>d</i> , нм	3—200	± 10	—	—	
Фотометрический блок							
Солнечный фотометр SP-7	Воздух	Аэрозольно-оптическая толщина τ	0—1	—	—	0,01	
		Влагосодержание атмосферы <i>W</i> , г/см ²	0—6	—	—	0,007	

Функциональная схема разработанной АСККВ представлена на рис. 1. Сигналы измерительных каналов приборного оборудования обрабатываются в аналогово-цифровых преобразователях и передаются в компьютерную программу для формирования протоколов измерений.

Результатом работы АСККВ является большой массив файлов различной структуры и содержания. Так, в режиме непрерывного мониторинга АПК записывает более 150000 файлов в год, для систематизации и обработки которых создан

программный пакет, объединяющий результаты измерений в единую базу данных.

Структура программного пакета по систематизации и обработке данных АСККВ. Для создания программного пакета использовали систему быстрой разработки приложений — Delphi. К ее достоинствам относится платформенная независимость, возможность переносить готовый продукт на разные операционные системы с незначительным изменением кода.

На рис. 2 представлена структура связей составных частей программного пакета систематизации и обработки данных АСККВ, которая разрабатывалась исходя из четырех типов приборов, входящих в автоматизированную систему. Программный пакет состоит из шести подпрограмм.

«Метеостанция АМК» выбирает статистические отчетные данные, определяемые пользователем метеорологические и турбулентные параметры, из массива файлов.

«Газоаналитика» собирает данные газоанализаторов атмосферного воздуха и выбросов загрязняющих веществ предприятий, вычисленные параметры техногенных выбросов передает и использует в программе расчета распространения атмосферных примесей от антропогенных источников [18].

«Фотометр SP-7» проводит выборку и усреднение аэрозольно-оптической толщины на разных длинах волн и общего влагосодержания, определяемых солнечным фотометром SP-7, вычисляет статистические параметры рядов за указанный период времени.

«Спектрометр ДСА» проводит выборку и усреднение общей счетной концентрации и распределения аэрозольных частиц по размерам в диапазонах 1,6—200 и 300—1000 нм, определяет статистические параметры рядов за указанный период времени.

«Синхронизация» использует выходные данные подпрограмм «Метеостанция АМК», «Газоаналитика», «Фотометр SP-7», «Спектрометр ДСА» и записывает их в единый текстовый файл.

«База данных» предназначена для записи в таблицу синхронизированных данных, являющихся итогом работы подпрограммы «Синхронизация».

«Метеостанция АМК», «Газоаналитика», «Фотометр SP-7» и «Спектрометр ДСА» содержат процедуры для вычисления статистических характеристик временных рядов: среднее, минимальное и максимальное значения, дисперсия, коэффициенты асимметрии и эксцесса.

Алгоритмы подпрограмм построены на импортировании данных из файлов, генерируемых оборудованием. Поскольку данные имеют текстовый формат, реализация алгоритмов осуществляется исходя из структуры файлов с использованием развитых средств обработки среды Delphi.

Описание работы аппаратно-программного комплекса.

Программное обеспечение метеорологической станции АМК представляет программный комплекс, который автоматически сохраняет результаты измерений на жестком диске компьютера в виде файлов в задаваемые сроки наблюдений. Выходными данными ПО метеокомплекса являются усредненные значения метеорологических величин и их статистические характеристики, а также определяемые параметры турбулентности атмосферы.

Результаты измерений ДСА и счетчиком аэрозольных частиц ПК.ГТА-0,3-002 сохраняют в текстовых файлах, которые содержат информацию о дате и времени выполнения измерений и полученные данные о счетных концентрациях аэрозоля по диаметрам. Выходными данными работы программного пакета солнечного фотометра SP-7 являются файлы, содержащие спектральные характеристики прозрачности атмосферы [18].



Рис. 1. Функциональная схема автоматизированной системы контроля качества воздуха

Универсальное ПО «Recv_com» газоанализаторов ЗАО «ОПТЭК» (С.-Петербург) обрабатывает и выводит в файл сигналы встроенных АЦП. Выходной файл программы является текстовым и содержит дату, время и результаты измерений концентраций газа. Также в файл может выводиться информация о результатах периодической внутренней калибровки прибора.

Программный пакет систематизации и обработки данных измерений АСККВ представляет стандартное Windows-приложение, иницируемое запуском исполняемого файла. Главное окно программы имеет меню с шестью кнопками быстрого доступа. Запуск подпрограмм «Метеостанция АМК», «Фотометр SP-7», «Спектрометр ДСА» и «Газоаналитика» иницирует процедуру открытия файлов, в ходе которой пользователь может выбрать необходимые для обработки файлы.

Подпрограмма «Синхронизация» обеспечивает запись выходных данных, полученных в результате выполнения подпрограмм «Метеостанция АМК», «Фотометр SP-7», «Спектрометр ДСА» и «Газоаналитика», в общую таблицу по признаку равенства даты и времени измерений. После выполнения подпрограммы автоматически открывается окно сохранения результирующего файла в текстовом формате. Выбор текстового формата обоснован его универсальностью. Файлы, сохраненные в таком формате, могут быть прочитаны приложениями, работающими в различных операционных системах. Для более детального анализа контроля содержания атмосферных примесей результирующий файл экспортируется в такие приложения как Microsoft Excel, Statistica, Origin Pro.

Подпрограмма «База данных» использует результирующий файл, получаемый подпрограммой «Синхронизация», для записи в базу данных (БД). Таблица БД имеет стандартизованную форму типа ТЗА, в ее начале представлены общие сведения о пункте и дате наблюдений. Таблица состоит из 140 полей и поля ключевого идентификатора. Число столбцов

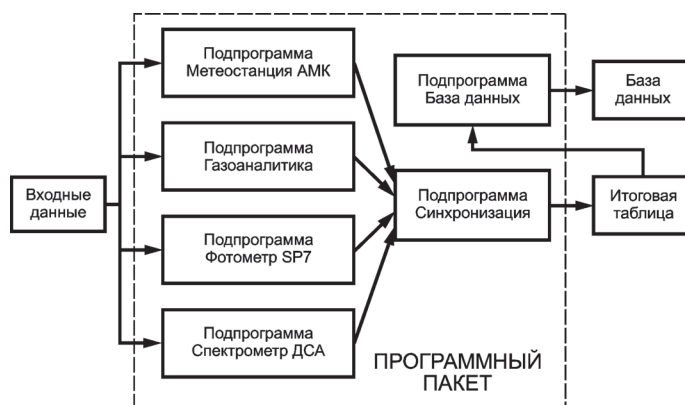


Рис. 2. Структурная схема связей в программном пакете

обусловлено общим количеством параметров, измеряемых АСККВ. В соответствии с ключевым идентификатором в строки таблицы последовательно занесены данные наблюдений с 10-минутным интервалом. Информация структурирована на четыре составных блока по типу измеряемых параметров: метео, примеси, фотометр, спектрометр. Подпрограмма «База данных» содержит процедуру восстановления БД метеорологических и турбулентных характеристик атмосферы, поставляемой в составе ПО метеорологического комплекса АМК. Данная процедура запускается пользователем только после создания выходного массива данных. Результатом работы является восстановленная таблица БД, которая может быть использована в ПО метеорологического комплекса. В составе подпрограммы также имеется процедура записи в БД параметров выбросов промышленных предприятий.

В целом АПК контроля содержания атмосферных примесей — современная распределенная система измерений и обработки данных, функционирующая в масштабе реального времени. Открытая архитектура аппаратного и ПО позволяет наращивать состав измерительной аппаратуры и вводить новые алгоритмы контроля состояния окружающей среды, развивать и модернизировать уже внедренные системы.

Заключение. Разработан аппаратно-программный комплекс, предназначенный для контроля содержания атмосферных загрязняющих веществ на стационарном пункте, проведения маршрутных и подфакельных наблюдений, а также для автоматизации процессов измерений, сбора, хранения и обработки получаемой информации. Комплекс может использоваться для научных исследований природных сред, процессов и явлений. В настоящее время с помощью разработанного комплекса формируется база данных аэрозольных частиц по размерам, а также турбулентных и радиационных характеристик атмосферы для Байкальского региона.

Работа выполнена в рамках Программы Президиума РАН № 4.12, интеграционного проекта СО РАН № 8 и РФФИ (гранты № 12-05-98055-р_сибирь_а, № 13-05-92219-Монг_а).

Л и т е р а т у р а

1. **Израэль Ю. А.** Состояние и комплексный мониторинг природной среды и климата. Пределы изменений. М.: Наука, 2001.
2. **Кондратьев К. Я., Жвалев В. Ф.** Первый глобальный эксперимент ПИГАП. Аэрозоль и климат. Л.: Гидрометеоздат, 1981.
3. **Zhamsueva G. S., Zayakhanov A. S., Tsydyrov V. V., Ayurzhanaev A. A., Azzaya D., Oyunchimeg D.** Assessment of small gaseous impurities in atmosphere of arid and semi-arid territories of Mongolia // *Atmospheric Environment*. 2008. V. 42. N. 3. P. 582—587.
4. **ГОСТ 17.2.3.01—86.** Охрана природы. Атмосфера. Приборы для отбора проб воздуха населенных пунктов. Общие технические требования.
5. **Аршинов М. Ю., Белан Б. Д., Давыдов Д. К., Ивлев Г. А., Козлов А. В., Пестунов Д. А., Покровский Е. В., Толмачев Г. Н., Фофанов Ф. В.** Посты для мониторинга парниковых и окисляющих атмосферу газов // *Оптика атмосферы и океана*. 2007. Т. 20. № 1. С. 53—61.

6. **Аршинов М. Ю., Белан Б. Д., Зуев В. В., Зуев В. Е., Копалевский В. К., Лиготский А. В., Мелешкин В. Е., Панченко М. В., Покровский Е. В., Рогов А. Н., Симоненков Д. В., Толмачев Г. Н.** TOR-станция мониторинга атмосферных параметров // *Оптика атмосферы и океана*. 1994. Т. 7. № 8. С. 1085—1092.

7. **Сарычев С. А., Дудина Л. И., Запевалов М. А., Кузьминых И. П., Полетаева Н. В.** Система экологического мониторинга Сочи-2014 // *Проблемы гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды* / Под ред. И. П. Кузьминых. Обнинск: ГУ «ВНИИГМИ-МЦД». 2010. Т. IV. С. 62—72.

8. **Еланский Н. Ф., Маркова Т. А.** Суточные вариации приземной концентрации озона по измерениям с вагона-лаборатории вдоль Транссибирской железнодорожной магистрали // *Физика атмосферного аэрозоля: Труды междунар. конф. М. Диалог-МГУ*, 1999. С. 437—442.

9. **Заяханов А. С., Жамсуева Г. С., Цыдыпов В. В., Аюржанаев А. А.** Автоматизированная система контроля загрязнения атмосферы // *Измерительная техника*. 2008. № 12. С. 52—56; **Zayakhanov A. S., Zhamsueva G. S., Tsydyrov V. V., Ayurzhanaev A. A.** Automated system for monitoring atmospheric pollution // *Measurement Techniques*. 2008. V. 51. N. 12. P. 1342—1346.

10. **ГОСТ 17.2.02—81 (СТ СЭВ 2598-80).** Охрана природы. Атмосфера. Общие требования к методам определения загрязняющих веществ.

11. **Азбукин А. А., Богушевич А. Я., Ильичевский В. С., Корольков В. А., Тихомиров А. А., Шелевой В. Д.** Ультразвуковой комплекс АМК-03 для измерения метеорологических и турбулентных характеристик атмосферы // *Приборы и техника эксперимента*. 2006. № 4. С. 162—163.

12. **Богушевич А. Я.** Ультразвуковые методы оценивания метеорологических и турбулентных параметров атмосферы // *Оптика атмосферы и океана*. 1999. Т. 12. № 2. С. 170—175.

13. **ГОСТ Р 52931—2008.** Приборы контроля и регулирования технологических процессов. Общие технические условия.

14. **Ankilov A. e. a.** Intercomparison of number concentration measurements by various aerosol particle counters // *Atm. Res*. 2002. V. 62. P. 177—207.

15. **Ankilov A., Baklanov A., Colhoun M. e. a.** Particle size dependent response of aerosol counters // *Ibid. Res*. 2002. Vol. 62. P. 209—237.

16. **Балин Ю. С., Байрашин Г. С., Коханенко Г. П., Клемашева М. Г., Пеннер И. Э., Самойлова С. В.** Аэрозольно-рамановский лидар «Лоза-M2» // *Квантовая электроника*. 2011. Т. 41. № 10. 945—949.

17. **Сакерин С. М., Кабанов Д. М., Ростов А. П., Турчинович С. А., Турчинович Ю. С.** Система сетевого мониторинга радиационно-активных компонентов атмосферы. Ч. I. Солнечные фотометры // *Оптика атмосферы и океана*. 2004. Т. 17. № 4. С. 354—360.

18. **Свид-во** об офиц. регистрации программы для ЭВМ 2006613795 «Программный комплекс расчета полей концентрации атмосферных примесей от различных источников выбросов» / А. А. Аюржанаев, А. С. Заяханов, В. В. Цыдыпов, Г. С. Жамсуева // *Программы для ЭВМ, базы данных, топологии и интегральных микросхем*.

Дата принятия 21.10.2014 г.