

АППАРАТУРА И МЕТОДИКА СПЕКТРОМЕТРИИ ПОДВИЖНОСТЕЙ ЛЕГКИХ АЭРОИОНОВ

Х.Ф. Таммет, Ф.Г. Миллер, Э.И. Тамм,
Т.П. Бернотас, А.А. Мирме, Я.Й. Сальм

Введение

Состав легких аэроионов, а вместе с тем и их подвижность являются сверхчувствительными индикаторами микропримесей в воздухе. Спектр подвижности в области перехода от легких к средним и тяжелым ионам может представить существенную информацию для решения проблемы о механизмах генерирования атмосферных аэрозолей. Состав и подвижность легких ионов хорошо изучены для низких давлений и коротких возрастов. Сведения о спектре подвижности легких атмосферных ионов натурального возраста скудны. Высказанное хорошо отражается, например, в обзоре /1/. Противоречивы даже данные разных авторов о границах подвижности легких ионов.

Одна из причин недостаточности информации о спектре натуральных атмосферных ионов — низкая и непроверенная разрешающая способность аппаратуры, что приводит к "размыванию" измеренного спектра по сравнению с действительным. Другая, не менее важная причина — ограниченность наблюдательного материала, что в условиях вариативности спектра в природе может привести к кажущимся противоречиям на уровне случайных примеров.

В настоящей статье описываются аппаратура и методика измерения, позволяющие поставить непрерывные наблюдения за спектром подвижностей в диапазоне легких, а частично и в диапазоне средних аэроионов. Многоканальный метод и полная автоматизация обеспечивают достоверность результатов измерения и возможность накопления обширного наблюдательного материала.

Спектрометр подвижности разработан и изготовлен по заказу Института экспериментальной метеорологии. Авторы выражают глубокую признательность В.В. Смирнову за инициативу разработки аппаратуры, а также всем сотрудникам Аэроэлектрической лаборатории ТГУ, оказавшим помощь при ее изготовлении.

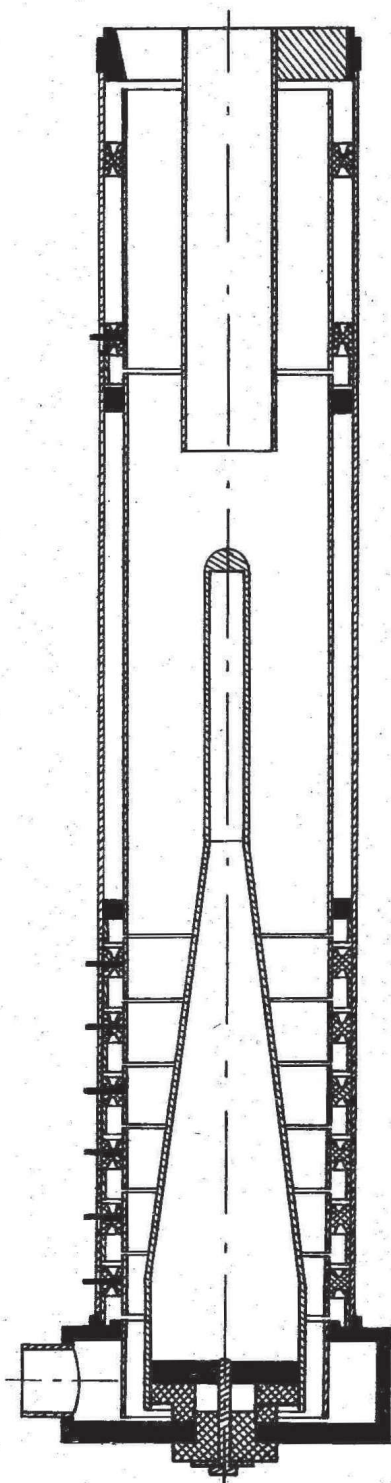


Рис. 1. Измерительный конденсатор.

Общая длина - 695 мм, диаметр - 122 мм. Воздух втягивается сверху через сетку и свободно распределяется на внешний кольцевой слой и внутреннюю струю. Внутренняя струя протекает через заземленную трубку, взвешенную сверху тремя радиальными лепестками, один из которых показан в разрезе. Внешний слой протекает через электрическое поле, создаваемое подачей напряжения на верхний 134-миллиметровый внешний электрод, и теряет все легкие ионы. Для уменьшения искажающего действия тяжелых аэроионов направление поля противоположно направлению поля в зоне собирающих обкладок /4/. Бутылкообразная внутренняя обкладка подключена к источнику напряжения и отталкивает измеряемые ионы к внешней обкладке, которая содержит 6 изолированных секций, подключенных к 6 электрометрическим усилителям. Конструкция секций заимствована из работы /5/. Воздух вытягивается снизу через штуцер.

Аппаратура

Основной узел аппаратуры – спектрометр подвижности. Прототипами являются известный прибор Янкера /2/ и десятиканальный спектрометр ТГУ/3/. Новый спектрометр рассчитан на повышенную разрешающую силу и, соответственно, суженный диапазон по подвижности. В нем используются предотвращающая краевой эффект схема с внешней собирающей обкладкой и отдельные электрометрические усилители для каждого канала. Устройство измерительного конденсатора разъясняет рис. 1. Используемые электрометрические усилители описаны в работе /6/.

Измерительный конденсатор и электрометрические усилители заключены в прямоугольный металлический кожух. Под измерительным конденсатором в изолированной секции кожуха расположены вентилятор для протягивания воздуха и электронная схема для автоматического блокирования электрометрических усилителей при перегрузке.

В случае повышенной влажности спектрометр подогревается при помощи электрических лампочек, расположенных вне кожуха по его бокам. Для обеспечения сохранности качества электрометрических изоляторов необходимо к спектрометру подвести тепловую мощность до 100 Вт.

Структура полного комплекта аппаратуры показана на рис. 2.

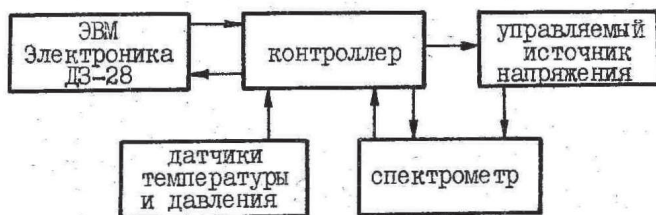


Рис. 2. Структура аппаратуры.

Программу измерения во времени во всех деталях задает ЭВМ, использующая ежеминутные сигналы прерывания от таймера, встроенного в контроллер. Контроллер управляет ключами, замыкающими входы электрометров, и источником напряжения питания внутреннего электрода измерительного конденсатора. Контроллер по командам ЭВМ снимает также сигналы с датчиков температуры и давления и с выходов электрометрических усилите-

лей, преобразует эти сигналы в код и передает ЭВМ. ЭВМ выполняет первичную обработку наблюдений и записывает результаты на кассетную магнитную ленту. Конкретная методика измерения может быть задана произвольно с помощью программы, загружаемой в ЭВМ.

Режим и первичная обработка наблюдений

Процесс наблюдений распределяется на одночасовые циклы. Результаты накапливаются в оперативной памяти ЭВМ и через каждые три часа записываются на магнитную ленту. На две стороны стандартной 90-минутной кассеты помещаются результаты непрерывных наблюдений за 3 месяца.

Внутри одночасового цикла расход протягиваемого воздуха поддерживается постоянным, а напряжение измерительного конденсатора циклически переключается. Полный расход воздуха - 3,34 л/с, расход внешнего кольцевого слоя - 6,97 л/с и центральный (среднегеометрический) расход - 7,62 л/с. Пять возможных напряжений обозначаются U_{2-} , U_{1-} , 0 , U_{1+} , U_{2+} . Напряжения с одинаковыми цифрами и разными знаками в индексе по абсолютному значению равны и имеют разные полярности. Напряжение U_1 обеспечивает относительно центрального расхода для краев собирающих обкладок каналов приведенные к нормальным условиям (101325 Па и 0°C) предельные подвижности:

3,16 2,51 2,00 1,59 1,26 1,00 0,79 $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

Напряжение U_2 обеспечивает предельные подвижности

1,26 1,00 0,79 0,63 0,50 0,40 0,32 $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$.

Нулевое напряжение предусмотрено для обеспечения возможности учета текущего нулевого уровня выходного сигнала электрометров и для оценки аппаратного шума в условиях отсутствия сигналов ионов.

Одначасовой цикл распределен на 60 одноминутных интервалов и организован следующим образом:

1 минута - измерение давления и температуры воздуха и вычисление в зависимости от плотности воздуха напряжений U_1 и U_2 ;

2...57 минут - 7 восьмиминутных серий измерений, причем за каждую минуту обрабатываются результаты измерения предыдущей минуты;

58 минута - дополнительное измерение на нулевом напряжении для обеспечения полноты структуры измерений;

59 минута - обработка наблюдений 58-ой минуты;

60 минута - вычисление средних значений и стандартных отклонений по режимам и каналам за час.

Если наблюдалось хоть одно зашкаливание электрометра, то на место стандартного отклонения записывается условное число, которое превышает предел измерения. На каждом третьем часу - запись упакованных результатов на магнитную ленту. Запись выполняется с дублированием.

Восьмиминутная серия содержит наблюдения при напряжениях

$$0 \quad U_{1+} \quad U_{2+} \quad U_{1+} \quad 0 \quad U_{1-} \quad U_{2-} \quad U_{1-} .$$

Объем статистики по разным напряжениям за час будет следующим:

$$U_{2-}-7 \quad U_{1-}-14 \quad 0-15 \quad U_{1+}-14 \quad U_{2+}-7.$$

Диаграмма времени одноминутного цикла изображена на рис. 3.

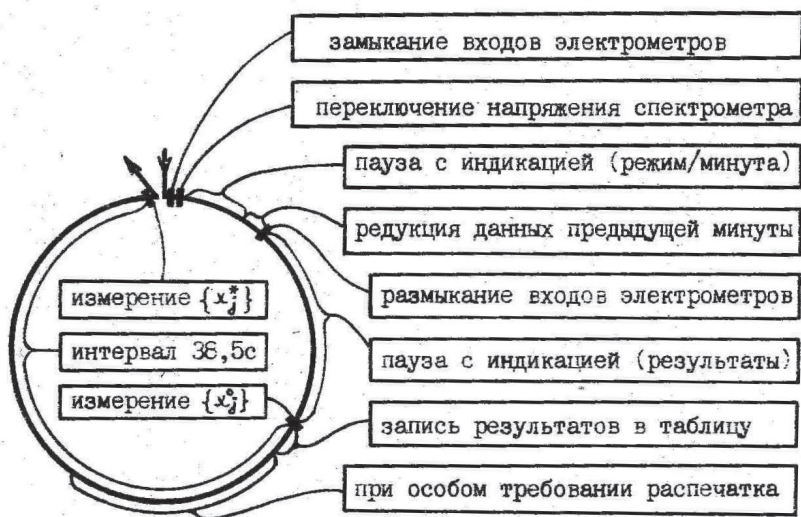


Рис. 3. Диаграмма одноминутного цикла

x_j - сигнал j -того канала, $j = 1 \dots 6$.

Редукция выходных сигналов электрометров соответствует теории RC-режима измерения, изложенной в /7/. Алгоритм следующий:

$$x_j = c_j \left(\frac{x_j^*}{1 - e^{-t/\tau_j}} - \frac{x_j^0}{e^{t/\tau_j} - 1} \right). \quad (1)$$

Здесь t - время между отсчетами (38,5 с),
 τ_j - постоянная времени электрометра (от 53 до 59 с),
 c_j - отношение идеальной ширины канала по подвижности к действительной ширине. Для конкретного измерительного конденсатора эти отношения находятся в промежутке от 0,954 до 1,024. Дополнительно сигнал преобразуется в шкалу концентрации ионов.

Запись на магнитной ленте содержит дату и время, значения давления и температуры воздуха, среднечасовые значения сигналов всех каналов по пяти режимам и стандартное отклонение сигнала по каналам для нулевого режима.

Соответствующая программа ЭВМ "Электроника ДЗ-28" написана на языке Бэйсик с использованием подпрограмм, написанных в машинных кодах.

Методика вычисления спектров

На основе зарегистрированных результатов одночасового цикла наблюдений составляется I2-компонентная логическая запись спектрометра для положительных и другая - для отрицательных ионов по следующей схеме индексации:

Логический канал	1:	I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Физический канал	j :	I	2	3	4	5	6	I	2	3	4	5	6
Напряжение:		U_1	U_1	U_1	U_1	U_1	U_1	U_2	U_2	U_2	U_2	U_2	U_2

Физические каналы пронумерованы сверху вниз (см. рис. 1). Логические каналы 5 и 7, а также 6 и 8 "перекрываются" в том смысле, что они соответствуют совпадающим интервалам подвижности ионов.

Вес логических каналов I...6 определяется по зарегистрированной дисперсии нулевого сигнала $\sigma_j^2/14$, а вес логических каналов 7...12 - по дисперсии $\sigma_j^2/7$ соответственно объемам внутрисуточной статистики по напряжению U_1 и U_2 .

10-компонентный спектр $\{\varphi_j\}$ определяется как набор фракционных концентраций со следующим разбиением шкалы подвижности:

I 2 3 4 5 6 7 8 9 IO
 3,16 2,51 2,00 1,59 1,26 1,00 0,79 0,63 0,50 0,40 0,32.

Подвижность выражается в единицах $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$. Если не учитывать аппаратный шум, то каждая компонента логической записи выражается как линейная комбинация фракционных концентраций

$$y_i = \sum_j G_{ji} \varphi_j. \quad (2)$$

Спектрометр устроен, шкалы подвижности определены и первичная обработка наблюдений выполнена так, чтобы максимально приблизиться к идеальной ситуации, когда каждый ион осаждается на "собственный" электрод своей фракции, и таблица коэффициентов G , которая называется аппаратной матрицей, состоит из нулей и единиц, в каждой строке - по одной единице.

В идеальной ситуации и при равной точности всех компонент записи оптимальный алгоритм обработки наблюдений прост:

$$\left. \begin{array}{l} \text{для } i = 1 \dots 4 \quad \varphi_i = y_i, \\ \text{для } i = 5 \dots 6 \quad \varphi_i = (y_i + y_{i+2})/2, \\ \text{для } i = 7 \dots 10 \quad \varphi_i = y_{i+2}. \end{array} \right\} \quad (3)$$

Для учета отклонения аппаратной матрицы от идеальной и неравноточности каналов обработку наблюдений следует выполнить по алгоритму наименьших квадратов (см., например, /9/):

$$\left. \begin{array}{l} C = (G^T D^{-1} G)^{-1}, \\ K = C G^T D^{-1}, \\ \varphi = K y. \end{array} \right\} \quad (4)$$

D - 10×10 -диагональная матрица, на диагонали которой стоят дисперсии ошибок измерения по каналам. На диагонали 10×10 матрицы C появляются дисперсии ошибок измерения фракционных концентраций. Преобразование $y \rightarrow \varphi$ называется проявлением спектра и 10×10 матрица K - проявителем.

Упрощения, которые приводят к идеальной аппаратной матрице, предусматривают бесконечно узкую трубу впуска ионизированного воздуха в измерительный конденсатор. Отклонение от этого условия приводит к тому, что ионы одной фракции осаждаются не только на собственный электрод, а и на соседние. К тому же приводит тепловая диффузия ионов. При выводе аппаратной матрицы эти эффекты в первом приближении могут быть

учтены на основе теоретических оценок. Существенные затруднения вызывает учет эффекта турбулентной диффузии. Как известно /10/, турбулентность в основном вносится в измерительный конденсатор из внешней среды и является поэтому изменчивой во времени. В универсальной аппаратной матрице можно учитывать лишь минимальный уровень турбулентности, в противном случае часть спектров будет "перепроявлено". Признаком "перепроявления" является появление отрицательных выбросов на флангах острых пиков в оценке спектра. Для установления допустимого уровня учета турбулентной диффузии проведен вычислительный эксперимент проявления 30 наиболее точно зарегистрированных записей при разных оценках интенсивности турбулентности. При этом была допущена линейная зависимость ширины гауссовой функции сглаживания от номера канала. Крутизна этой зависимости подобрана по критерию точности процесса проявления - восстановления записей, поскольку неправильная оценка крутизны приведет к неправильному восстановлению отношений сигналов "перекрывающихся" каналов 5-7 и 6-8. Принятая в основу обработки наблюдений оценка аппаратной матрицы следующая:

0,97	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,03	0,95	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,05	0,91	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,08	0,85	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,11	0,77	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,15	0,70	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,97	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,93	0,03	0,00	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,87	0,06	0,00	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,10	0,79	0,10	0,00
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,14	0,85	0,00

В случае единичных ошибок всех компонент записи эта матрица приводит к таким ошибкам во фракционных концентрациях: 1,03 1,06 1,11 1,19 0,81 0,85 1,07 1,17 1,33 1,22.

Сравнительный пример проявления спектра по алгоритмам (3) и (4) приведен на рис. 4.

Как видно из примера, проявление сводится к небольшой корреляции оценки спектра по сравнению с простым переносом записи согласно тривиальному алгоритму (3). При выборе алгоритма (4) учитывались и дополнительные цели - корректный

учет неравноточности каналов и построение оценки случайных ошибок измерения фракционных концентраций.

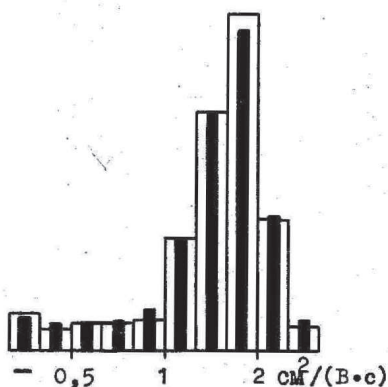


Рис. 4. Пример проявления спектра.

Ступенчатая гистограмма получена по алгоритму (4), жирные вертикальные линии в центрах столбцов — по тривиальному алгоритму (3). Проявлен спектр отрицательных ионов, измеренный в 4 ч. 13.06.85 в Тахкузе. Фракции нумеруются справа налево.

Л и т е р а т у р а

1. Mohnen V.A. Formation, Nature, and Mobility of Ions of Atmospheric Importance. — In *Electrical Processes in Atmospheres*. Darmstadt: Dr. Dietrich Steinkopff Verlag, 1977, p. 1-17.
2. Yunker E.A. The Mobility-Spectrum of Atmospheric Ions. — *Terr. Magn. Atmos. Elect.*, 1940, vol. 45, p. 127 - 132.
3. Сальм Я.И. Десятиканальный спектрометр аэроионов. — В кн.: *Методы и приборы биоинформации и контроля параметров окружающей среды: Межвузовский сб.* Л.: ЛЭТИ, 1981, вып. 150, с. 34-38.

4. Салым Я.И. Устройство для определения спектра аэроионов. Авт. свид. СССР, кл. МКИ Н 01 J 39, № 938336, заявл. 14.II.80., опубл. 23.06.82. Бюлл. № 23.
5. Мирме А.А., Тамм Э.И., Таммет Х.Ф. Электрогранулометр аэрозольных частиц с широким пределом измерения. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1981, вып. 588, с. 84-92.
6. Миллер Ф.Г. К разработке электрометров прямого усиления для многоканальных спектрометров аэроионов. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1981, вып. 588, с. 124-132.
7. Таммет Х.Ф. К технике электрической гранулометрии аэрозолей. - Уч.зап. Тарт. ун-та, 1980, вып. 534, с. 55-79.
8. Бернотас Т.П., Кольк Э.Э., Мирме А.А., Рейнарт А.Э., Таммет Х.Ф. Система сбора и обработки данных в спектрометрии аэрозолей и аэроионов. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1985, вып. 707, с. 46-53.
9. Таммет Х.Ф. Введение в линейную конечномерную теорию спектрометрии. - Таллин: Валгус, 1975. - 100 с.
10. Салым Я.И. Экспериментальное исследование действия турбулентной диффузии в аспирационном счетчике аэроионов. - Уч. зап. Тарт. ун-та, 1969, вып. 239, с. 68-91.

APPARATUS AND METHODS FOR THE SPECTROMETRY
OF SMALL AIR IONS

H. Tammet, F. Miller, E. Tamm, T. Bernotas,
A. Mirme and J. Salm

S u m m a r y

The authors have designed an automatic air-ion spectrometer (Fig. 1). Partial concentrations of 10 logarithmically uniformly distributed fractions in the range of $0.32-3.2 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ can be measured by this apparatus. The apparatus is completed by a microcomputer, a controller and sensors of temperature and pressure (Fig. 2). The computer predicts the program of operations and carries out preliminary data processing.

Data have been collected on compact cassettes. In the second stage of data processing data will be transmitted to another computer which uses the least mean squares technique [4] for a correct presentation of spectra.