

**В.В. Дёмин, С.Г. Степанов**

## **Исследование ориентационных характеристик модельных кристаллических аэрозолей голографическим методом**

*Томский государственный университет  
Институт оптического мониторинга СО РАН, г. Томск*

Поступила в редакцию 5.01.2000 г.

Рассматриваются особенности и возможности голографического исследования ориентационных характеристик кристаллического атмосферного аэрозоля. Разработан лабораторный стенд, проведены эксперименты по голографической регистрации модельного аэрозоля и получены данные об ориентации аэрозольных микрочастиц в электрическом поле. Разрешение выбранной голографической схемы обеспечивает изучение кристаллов в диапазоне размеров, соответствующих кристаллическим облакам.

### **Введение**

В атмосфере присутствуют несферические аэрозольные частицы различной природы: кристаллы соли, частицы антропогенного происхождения, кристаллы льда и т.п. Одним из примеров таких аэрозольных образований являются кристаллические облака, состоящие из ледяных кристаллов различной формы, как правило, с выраженной анизотропией геометрических размеров (см., например, [1]). В отличие от капельных аэрозолей, оптические свойства которых определяются, в основном, показателем преломления и распределением частиц по размерам, оптические свойства кристаллических аэрозолей существенно зависят еще от формы и ориентации частиц по отношению к зенитному и азимутальному углам.

Одной из проблем, возникающих при исследованиях распространения естественного и лазерного излучения в кристаллических аэрозолях [2–5], является определение взаимосвязи поляризационных характеристик рассеянного излучения с ориентацией аэрозольных частиц. В настоящее время ориентацию частиц определяют косвенно, по поляризации рассеянного излучения, что предполагает ряд допущений, наличие априорной информации об аэрозоле и приводит к существенным погрешностям. Поэтому достаточно актуальной является задача разработки прямых методов бесконтактного контроля ориентации аэрозольных частиц.

Для решения поставленной задачи нами предлагается использовать импульсную голографию. Действительно, этот метод бесконтактен, позволяет за время лазерного импульса (10–50 нс) зарегистрировать информацию о размерах, форме, положении в пространстве каждой отдельной микрочастицы исследуемого объема дисперсной среды. Особенности и ограничения голографических методов регистрации ансамблей микрочастиц достаточно полно исследованы (см., например, [6–8]). Показана возможность определения голографическими методами не только геометрических, но и оптических характеристик микрочастиц [9, 10].

В данной статье дана схема лабораторного стенда и описаны эксперименты по определению ориентации микрочастиц модельного аэрозоля в электрическом поле голографическим методом с целью выяснения особенностей и возможностей голографии при решении поставленной задачи.

### **Моделирование кристаллического аэрозоля**

В качестве моделируемого объекта были выбраны кристаллы льда, содержащиеся в атмосферных облаках. Известно, что в этих облаках преобладают пластинки и столбчатые кристаллы [1] с диапазоном размеров порядка  $10^2$ – $10^3$  мкм.

Получение модельных ледяных аэрозольных микрокристаллов требует создания сложных, громоздких и дорогостоящих установок (см., например, [3]). В настоящей работе для моделирования использовались кристаллические порошки, отбор которых выполнялся исходя из указанных выше диапазона размеров и форм. Кроме этого, для более полного соответствия моделируемым частицам, а также для возможности ориентации кристаллов путем воздействия электрического поля отбирались модельные кристаллы, обладающие диэлектрическими свойствами.

Из исследованных кристаллических порошков наибольшее соответствие вышеперечисленным критериям было обнаружено у кристаллов гидрохинона. Микрочастицы гидрохинона имеют кристаллическую форму в виде столбиков (рис. 1, а), полупрозрачны в видимом диапазоне. Распределение частиц по размерам определялось при помощи оптического микроскопа. Погрешность измерения размеров составила 5 мкм. Гистограммы распределения кристаллов гидрохинона по наибольшему и наименьшему размерам (по длине и толщине) представлены на рис. 1, б, в.

Кристаллы гидрохинона инжестрировались в объектную камеру с помощью устройства, показанного на рис. 2. Порошок гидрохинона помещался в коническую подающую камеру 3 объемом около 0,3 л, имеющую два отверстия диаметром 3 мм. В одно из этих отверстий с помощью компрессора 1 нагнетался воздух. За счет циркуляции струи воздуха в камере частицы гидрохинона взвешивались в воздухе и выбрасывались в выходное отверстие (в центре дна подающей камеры), попадая таким образом в объектную камеру 4.

На двух противоположных (горизонтальных или вертикальных в зависимости от исследуемой ситуации) внешних стенках объектной камеры располагались металлические пластины-электроды 6 размером 35×35 см, предназначенные для создания внутри камеры однородного постоянного электрического поля.

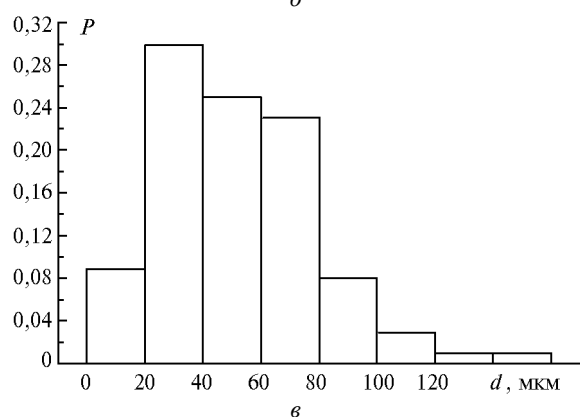
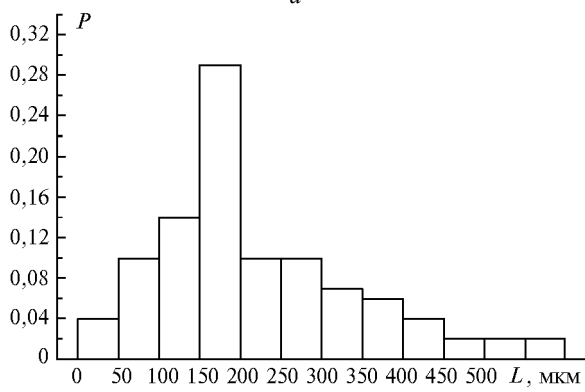
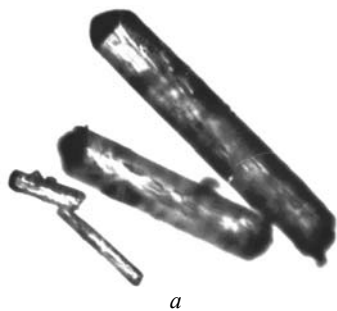


Рис. 1. Фотография (а) и гистограммы распределения модельных микрочастиц по размерам – наибольшему (б) и наименьшему (е).  $P$  – доля микрочастиц с размерами в соответствующем диапазоне

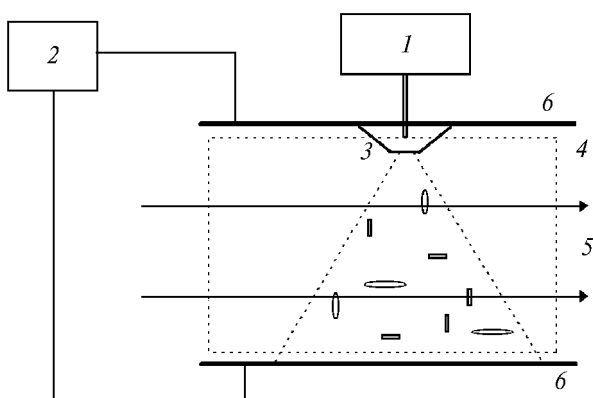


Рис. 2. Моделирование кристаллического аэрозоля, находящегося под воздействием электрического поля: 1 – компрессор; 2 – источник питания; 3 – подающая камера с микрокристаллами; 4 – объектная камера; 5 – освещающий лазерный пучок; 6 – пластины-электроды

Таким образом, в объектной камере создавался оседающий ансамбль модельных микрокристаллов, на которые воздействовали гравитационные, аэродинамические и, при необходимости, электрические силы, что позволяло моделировать разнообразное поведение аэрозольных кристаллов в атмосфере.

## Описание эксперимента

В эксперименте исследовался модельный кристаллический аэрозоль при различных режимах воздействия (при различных давлениях в подающей камере, различных ориентациях и напряженностях электрического поля в объектной камере). Используемый источник питания позволял изменять напряженность электрического поля внутри объектной камеры от 0 до 8 кВ/м.

Схема экспериментального стенда изображена на рис. 3. Для записи голограммы использовался рубиновый лазер установки УИГ-12, работающий в режиме пассивной модуляции добротности ( $\lambda = 0,69$  мкм; длительность импульса излучения  $\tau_{0,5} = 50$  нс; энергия излучения в импульсе не менее 150 мДж). Использовалась внеосевая схема с переносом изображения [7]. Диаметр пучка после коллиматора 3 составлял 25 мм. Соотношение интенсивностей опорного и предметного пучков, с целью обеспечения линейного режима регистрации голограммы, регулировалось нейтральными светофильтрами 6. После прохождения объектной камеры, содержащей кристаллический аэрозоль, предметный пучок попадал на объектив 10 («Юпитер-37А» с фокусным расстоянием 135 мм) с установленной в его фокусе непрозрачной маской 11. Тем самым осуществлялся перенос объемного изображения в пространство за регистрирующей фотопластиной 12, а также реализовывался метод темного поля с целью повышения контраста голографических изображений микрочастиц. Запись голограмм производилась на галоидо-серебряные фотопластины Agfa Gevaert 10E75 с разрешением не менее  $3000 \text{ мм}^{-1}$ .

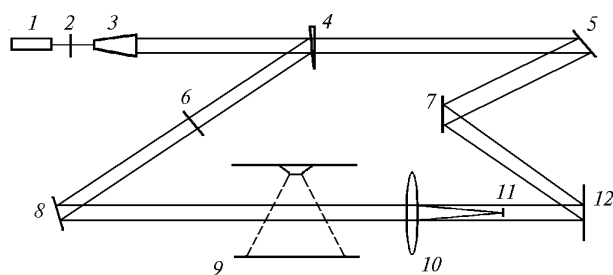


Рис. 3. Схема регистрации голограмм: 1 – лазер; 2, 6 – нейтральные светофильтры; 3 – коллиматор; 4 – светоделитель; 5, 7, 8 – зеркала; 9 – объектная камера; 10 – объектив; 11 – непрозрачная маска; 12 – фотопластина

Восстановление голографических изображений осуществлялось при помощи He-Ne-лазера Spectra Physics с мощностью излучения 15 мВт. Восстановленное изображение наблюдалось при помощи горизонтального микроскопа МГ-1. Окуляр был снабжен отсчетными рисками, позволяющими измерять угол  $\Theta$  между осью проекции кристалла на плоскость сечения предметного пучка и горизонтальной плоскостью (зенитный угол) с точностью до  $0,5^\circ$ .

Предварительно экспериментальный стенд был откалиброван по разрешению и увеличению при помощи пло-

ских тестовых микрообъектов, изготовленных методом фотолитографии, а также апробирован путем голографической регистрации капель водного аэрозоля по различным

схемам. Получено разрешение экспериментального стенда не менее 5 мкм в осевой схеме и не менее 10 мкм в схеме с переносом изображения.

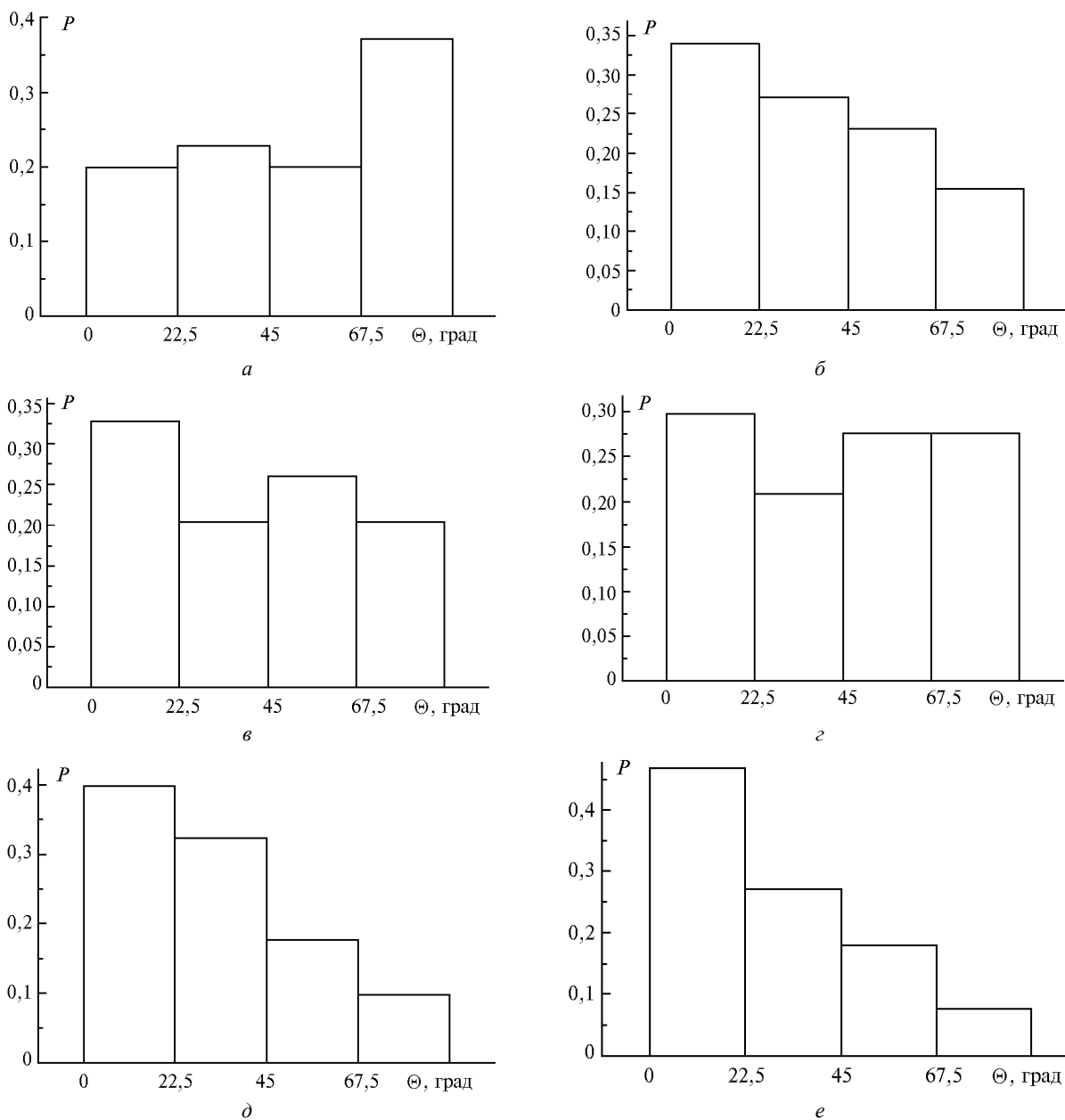


Рис. 4. Примеры гистограмм распределения аэрозольных кристаллов по ориентациям.  $P$  – доля микрочастиц, оси которых ориентированы в пределах соответствующего диапазона углов  $\Theta$ ;  $a, б$  – в отсутствие действующего электрического поля ( $a$  – при действии воздушной струи,  $б$  – случай свободного падения);  $в, г$  – при вертикальной ориентации силовых линий электрического поля ( $в$  – напряженность поля 2,57 кВ/м;  $г$  – 4,29 кВ/м);  $д, е$  – при горизонтальной ориентации силовых линий электрического поля ( $д$  – напряженность поля 5,14 кВ/м;  $е$  – 7,14 кВ/м)

### Анализ полученных результатов

Известно, что в случае свободного падения столбчатые кристаллы ориентируются преимущественно горизонтально. Для реализации данного аэродинамического режима в эксперименте подбиралось такое давление в подающей камере, при котором доля кристаллов, ориентированных вдоль струи воздуха, была минималь-

ной. Примеры гистограмм распределения аэрозольных кристаллов по ориентациям в отсутствие действующего напряжения приведены на рис. 4,  $a, б$ . На рис. 4,  $a$  наблюдается некоторая ориентация кристаллов вдоль оси струи воздуха (заметно влияние струи), рис. 4,  $б$  соответствует случаю свободного падения. После достижения режима свободного падения исследовалась ориентация кристаллов под воздействием электрического поля.

На рис. 4, в, г изображены гистограммы, характеризующие ориентацию кристаллов, когда силовые линии электрического поля ориентированы вертикально (напряженности 2,57 и 4,29 кВ/м соответственно). Полученные результаты позволяют отметить, что приложенное электрическое поле изменяет ориентацию кристаллов и это изменение с приемлемой точностью обнаруживается голографическим методом.

Кроме того, рис. 4, в, г иллюстрируют возможность реализации равновероятной ориентации кристаллических частиц. Заметим, что физическое моделирование подобной ситуации является сложной задачей и представляет самостоятельный интерес в исследованиях по распространению излучения.

При горизонтальном расположении силовых линий электрического поля наблюдается существенная ориентация микрокристаллов вдоль линий поля (рис. 4, д, е). Здесь реализованы напряженности поля 5,14 и 7,14 кВ/м соответственно. На рисунках легко заметить возрастание доли ориентированных кристаллов при увеличении напряженности поля.

Таким образом, одинаковое изменение напряженности электрического поля при горизонтальной ориентации силовых линий приводит к большему количеству ориентированных по полю кристаллов по сравнению с вертикальной ориентацией силовых линий. Это объясняется аэродинамической тенденцией кристаллов к горизонтальной ориентации.

### Заключение

В статье показано, что используемый голографический метод позволяет бесконтактно исследовать ориентационные характеристики кристаллических атмосферных аэрозолей. Разрешение метода достаточно для изучения микрокристаллов в диапазоне размеров, соответствующих кристаллическим облакам.

Предложен метод моделирования кристаллического аэрозоля с контролируемой ориентацией кристаллов. Показано,

что, варьируя давление в объектной камере, напряженность электрического поля и ориентацию его силовых линий, можно установить требуемую степень ориентации частиц.

Для одновременного определения зенитного и азимутального углов ориентации осей кристаллов в пространстве необходимо использовать двухканальную схему голографирования.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № P98-02-03031.

1. Волковицкий О.А., Павлова Л.Н., Петрушин А.Г. Оптические свойства кристаллических облаков. Л.: Гидрометеониздат, 1984. 198 с.
2. Кауль Б.В., Краснов О.А., Кузнецов А.Л., Половцева Е.Р., Самохвалов И.В., Стыков А.П. Лидарные исследования ориентации частиц в кристаллических облаках // Оптика атмосферы и океана. 1997. Т. 10. № 2. С. 191–201.
3. Kenneth Sassen. Depolarization of Laser Light Backscattered by Artificial Clouds // J. Appl. Meteorolog. 1974. V. 8. N 2. P. 923–933.
4. Шефер О.В. Теоретическое исследование ослабления оптического излучения кристаллическим аэрозолем // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. № 10. С. 1435–1440.
5. Попов А.А., Шефер О.В. Theoretical and Numerical Investigation of the Polarization Properties by a Set of Oriented Ice Plates // Applied Optics. 1995. V. 34. P. 1488–1492.
6. Демин В.В., Донченко В.А., Синуцына С.В. Особенности голографической регистрации микрочастиц различной формы // Изв. вузов. Физика. Томск, 1987. Деп. в ВИНТИ, № 4673–В87.
7. Демин В.В., Донченко В.А., Чистякова Л.К. Голографические исследования микроструктуры аэрозоля при воздействии наносекундных импульсов излучения // Оптика атмосферы. 1988. Т. 1. № 4. С. 57–63.
8. Dyomin V.V. Methods of Obtaining of Meaningful Information from Disperse Media Holograms // SPIE Proceedings. 1997. V. 2981. P. 200–207.
9. Демин В.В. Голографический способ определения показателя преломления частиц дисперсных сред // Пат. RU № 2124194, G01N21/45.
10. Демин В.В., Степанов С.Г. Голографические исследования прозрачных микрочастиц // Оптика атмосферы и океана. 1998. Т. 11. № 7. С. 671–676.

*V.V. Dyomin, S.G. Stepanov. Study of orientation features of model crystal aerosols by holographic method.*

Peculiarities and possibilities of holographic investigations of crystal aerosols orientation are considered. The laboratory set-up is created, the experimental holographic registrations of model aerosol are carried out. Data on orientation of aerosol microparticles in the electrical field are obtained. The resolution of the chosen holographic scheme allows us to study the microparticles which sizes are corresponding to those of the crystal clouds.