

УДК 535:778.38

*В.В. ДЕМИН, И.Г. ПОЛОВЦЕВ, А.Ю. ДАВЫДОВА***ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК И РАСПОЗНАВАНИЯ ЧАСТИЦ В ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИИ***

Рассмотрены физические основы метода определения геометрических характеристик и распознавания частиц с применением принципов цифровой голографии и последующей обработки восстановленных из цифровой голограммы изображений частиц с использованием морфологического параметра. Приведен пример применения предложенного метода для оперативного распознавания планктонных частиц.

Ключевые слова: цифровая голография, геометрические характеристики частицы, распознавание.

Методы определения геометрических размеров и концентрации частиц основаны на различных физических принципах. Например, средний размер частиц ансамбля можно определять по дифракционной картине [1] или путем корреляционного анализа [2]. Отметим, что дифракционный (в аналоговом представлении) и корреляционный (в цифровом варианте) методы могут применяться не только к ансамблю частиц, но и к его голограмме [3]. В этом случае в фокальной плоскости линзы наблюдаются две вложенные аналоговые картины: картина дифракции Фраунгофера, связанная с размером частиц, и кольцевая картина, связанная с расстоянием до частиц. В корреляционном анализе они соответствуют первой и второй корреляционным функциям [3]. Известно [1], что для корректного решения подобных обратных задач необходимо наличие априорной информации об объекте или наличие устойчивой в математическом смысле модели взаимодействия излучения с объектом, что не выполняется, например, при исследовании планктона в среде обитания, так как размер и форма планктонных частиц весьма разнообразны.

В данной работе рассматриваются физические основы метода определения геометрических характеристик и распознавания частиц с использованием принципов цифровой голографии и обработки восстановленных из цифровой голограммы изображений частиц. Для цифрового голографирования объем с частицами освещаем когерентным излучением. Рассеянное на частицах излучение интерферируем с излучением, прошедшим через объем без изменений. Формируемая таким образом интерференционная картина регистрируется на ПЗС-камеру в виде двумерного массива интенсивностей, который и является цифровой голограммой исследуемого объема с частицами. Данная цифровая голограмма содержит в себе информацию обо всем зарегистрированном объеме с частицами и позволяет исследовать каждую частицу в отдельности, определить ее размер, форму, ориентацию и расположение относительно ПЗС-камеры. Ограничимся рассмотрением задачи определения размеров частиц и их распознаванием.

На этапе восстановления изображений частиц из цифровой голограммы, который заключается в численном расчете амплитуды поля в плоскости изображения каждой частицы с помощью дифракционного интеграла, необходимо найти сфокусированные изображения всех частиц (определить плоскости их наилучшей фокусировки [4–6]). После этого изображения частиц располагаем в одной плоскости и получаем двумерное представление голографического изображения исследуемого объема [5]. Далее, с использованием процедуры пороговой бинаризации с автоматическим определением глобального порога бинаризации и процедуры оконтуривания, в этом двумерном представлении выделяем изображение каждой частицы, после чего рассчитываем описанные около них прямоугольники.

Представленный метод обеспечивает оперативную оценку размеров частицы как длину и ширину описанного прямоугольника, в том числе с возможностью реализации в реальном времени *in situ*. Метод наиболее эффективен при исследовании частиц с различными размерами и формами, например, при исследовании планктонных частиц в среде обитания в задачах гидробиологии и

* Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 гг.» № 14.578.21.0205 от 03.10.2016 г. (уникальный идентификатор соглашения: RFMEFI157816X0205).

экологического мониторинга [7] с оперативным определением не только размерных характеристик планктона, но и его классификацией (распознаванием) в рамках основных таксономических групп [8, 9]. Для сокращения времени расчетов предлагается использовать в качестве параметра для распознавания соотношение ширины и длины прямоугольника, описанного вокруг изображения частицы – морфологический параметр частицы. Предлагаемый в данной работе морфологический параметр частицы позволяет разделить планктон по отрядам. Для классификации по низшим рангам (семейство, род или вид) необходимо использовать дополнительные признаки, такие, как размер частицы, наличие антенн, граничный контраст и другие, что увеличит время обработки, поэтому имеет смысл делать это посредством последующей лабораторной обработки файлов (как правило, с участием оператора), собранных в экспедиционных условиях. Для целей оперативных исследований ограничимся одним признаком – вышеописанным морфологическим параметром.

Пример определения геометрических параметров частиц представлен на рис. 1, где на изображениях планктонных частиц отмечены описанные около них прямоугольники, по соотноше-

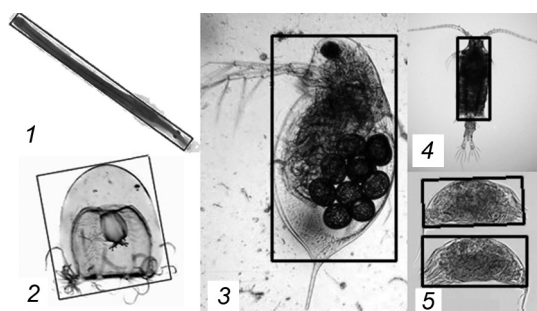


Рис. 1. Построение описанных прямоугольников на примере изображений планктонных частиц: 1 – *Parasagitta euneritica*; 2 – *Rathkea octopunctata*; 3 – *Daphnia* sp.; 4 – *Centropages typicus*; 5 – *Trichocerca rousseleti*

нию сторон которых произведена классификация. Предварительная оценка распределения планктонных частиц по морфологическим параметрам представлена на рис. 2. Правильность классификации (отношение правильно классифицированных частиц к общему числу частиц) для данной выборки составляет 69.57%. Низкая правильность вызвана тем, что представители Rotifera равно-

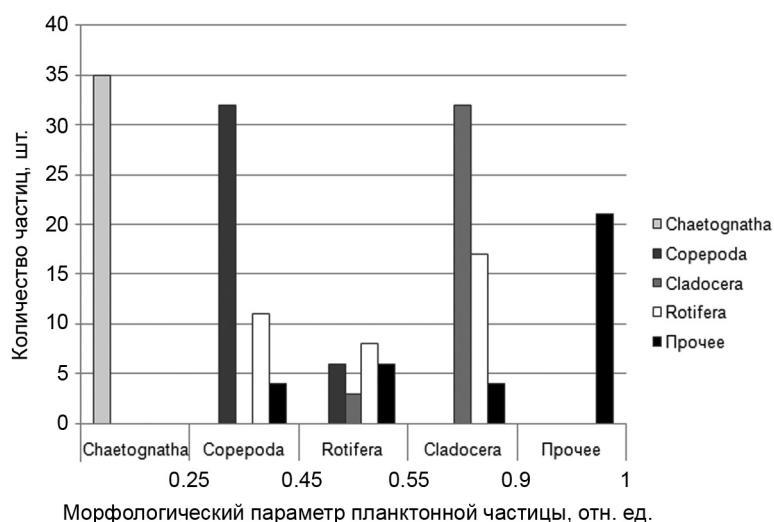


Рис. 2. Гистограмма распределения планктонных частиц по морфологическим параметрам при распознавании по таксономическим группам: Chaetognatha, Copepoda, Cladocera, Rotifera и «Прочее» (медузы, моллюски, меропланктон, фитопланктон)

мерно распределены в трех интервалах морфологических параметров от 0.27 до 0.87. Для повышения правильности в этом случае необходимо ввести дополнительный таксономический признак – размер планктонной частицы (размеры представителей Rotifera в данной выборке не превышали

250 мкм, размер представителей остальных таксонов больше 250 мкм), тогда правильность классификации повышается до 83.69 %. Время, затраченное на обработку данной выборки, составило 3.5 с.

Приведенный пример дает основание полагать, что метод цифрового голографирования объема с частицами с последующей обработкой изображений частиц и предложенный в данной работе алгоритм распознавания частиц по морфологическому параметру, определяемому по геометрическим характеристикам частицы, позволяют достаточно достоверно произвести распределение планктонных частиц по отрядам в реальном времени *in situ*.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демин В.В., Половцев И.Г., Симонова Г.В. Оптические измерения / под ред. И.В. Самохвалова. – Томск: Издательский Дом ТГУ, 2014. – Т. 1. – С. 232.
2. Vovk T. A. and Petrov N. V. // Sci. Rep. – 2017. – V. 7. – P. 43840.
3. Vorovoi A.G., Dyomin V.V., Vagin N.I., and Donchenko V.A. // Appl. Opt. – 1995. – V. 34. – No. 20. – P. 4073–4078.
4. Демин В.В., Каменев Д.В. // Изв. вузов. Физика. – 2015. – Т. 58. – № 10. – С. 95–101.
5. Демин В.В., Каменев Д.В. // Оптический журн. – 2013. – Т. 80. – № 7. – С. 58–65.
6. Демин В.В., Каменев Д.В. // Изв. вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. – № 7. – С. 90–97.
7. Демин В.В., Ольшук А.С., Дзюба Е.В. // Изв. вузов. Физика. – 2010. – Т. 53. – № 8. – С. 81–89.
8. Булгаков Н.Г. // Успехи соврем. биол. – 2002. – Т. 122. – № 2. – С. 115–135.
9. Левашов Д.Е., Буланова Н.П. // Системы контроля окружающей среды. – 2016. – № 6 (26). – С. 14–22.

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
г. Томск, Россия

Поступила в редакцию 14.07.17.