

Особенности процедуры распознавания планктонных частиц по изображениям, восстановленным с цифровых голограмм

В.В. Дёмин, Д.В. Каменев*

Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 16.07.2013 г.

Рассмотрены особенности обработки восстановленных голографических изображений планктонных частиц, необходимость исследования которых возникает в задачах гидробиологии, гидроакустики, оптики океана. Предложен метод распознавания планктонных частиц с точностью до вида на примере планктонных особей вида *Epischura Baicalensis* (эпишура байкальская). Представлены результаты апробации метода на видеопоследовательностях, скомпонованных из голографических данных и визуализирующих динамику движения планктонных частиц распознаваемого вида.

Ключевые слова: цифровая голография, голографическое изображение, распознавание, идентификация, планктонные частицы, эпишура байкальская; digital holography, holographic image, recognition, identification, plankton particles, *Epischura Baicalensis*.

Введение

В многочисленных применениях голографических методов исследования частиц в средах, включая цифровую голографию, наиболее распространенными объектами исследования являются аэрозоли [1–3] и планктонные частицы [4–8].

Задачи исследования планктонных частиц актуальны в современной океанологии, гидробиологии и других науках об океане при биоиндикации экологического состояния акватории, изучении планктона как звена пищевой цепи, исследовании звукорассеивающих слоев планктонной природы, исследовании оптических свойств океана и т.п.

Голографические методы применимы в лабораторных и натуральных условиях при исследовании частиц размерами от десятков микрометров до единиц сантиметров, что соответствует всему диапазону размеров микро-, мезопланктона и мелкой фракции макропланктона. Для планктонных частиц размером 100–200 мкм и более методы цифровой голографии позволяют определить форму, размер, положение и скорость перемещения в пространстве. При этом наиболее интересной является задача определения формы частицы для последующей ее идентификации по восстановленному голографическому изображению. Эта задача нетривиальна, поскольку планктонные частицы имеют сложную форму, являются объемными, расположены на этапе регистрации голограммы в воде, в которой при этом могут присутствовать взвеси, турбулентность и другие

мешающие факторы. В результате в восстановленных изображениях наблюдаются шумы, амплитуда которых в некоторых частях кадра может превышать амплитуду полезного сигнала, восстановленные изображения являются слабоконтрастными, что затрудняет процесс их идентификации. Кроме того, задача сложно формализуема, поскольку популяция планктона насчитывает множество видов, и не имеет абсолютного решения.

Описание основных принципов и параметров предлагаемого метода распознавания

В настоящей статье распознавание частиц предлагается производить по их бинаризованным голографическим изображениям, поскольку при идентификации частиц по их форме полутоновые изображения являются избыточными. В процессе бинаризации теряется часть информации и может происходить искажение изображения. Тем не менее у таких изображений проще выделить границу (например, методом жука [9]), обнаружить информативные признаки и гарантировать максимальную точность их расчета. Для эффективной бинаризации мы выполняем предварительную обработку голографического изображения, включающую операцию линейного контрастирования, гамма-коррекции и медианную фильтрацию [9]. Кроме того, используем специально разработанный [10, 11] метод оптимизации порога бинаризации по максимальному значению граничного перепада [10], при котором минимизируются искажения формы в голографическом изображении частицы.

* Виктор Валентинович Дёмин (dyomin@mail.tsu.ru);
Денис Вадимович Каменев (kamennev87@mail.ru).

Обычно для распознавания изображений выделяют информативные признаки распознаваемого объекта, инвариантные к аффинным преобразованиям, после чего строят решающее правило, согласно которому распознаваемый объект относится к одному из классов.

Для успешного распознавания частиц чаще всего необходима априорная информация о каждом распознаваемом виде. В качестве примера распознаваемого вида планктонных частиц нами выбрана эпишура байкальская (лат. *Epischura Baicalensis*) (рис. 1 и 3, а), популяция которой в оз. Байкал составляет более 80% от всего количества планктона [12]. Эпишура байкальская – это вид планктонных ракообразных из подкласса веслоногих (*Copepoda*). Эпишура, как и все веслоногие рачки, в процессе своего развития проходит два периода – науплиальный (личиночный) (рис. 1, а) и копепоditный (рис. 1, б) [12].

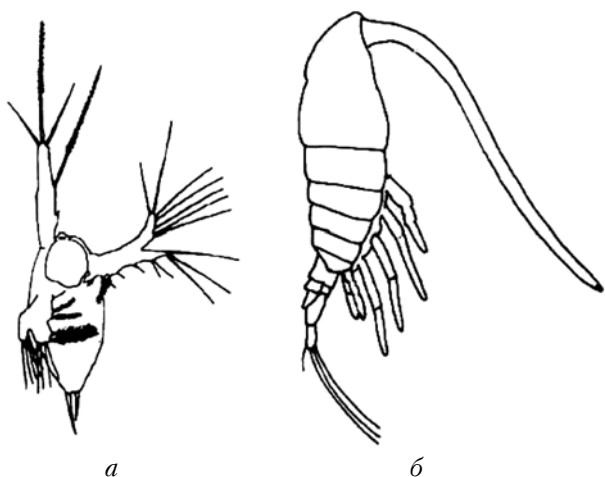


Рис. 1. Изображения планктонных частиц вида *Epischura Baicalensis* науплиального (а) и копепоditного (б) периодов развития [12]

Каждый из них состоит из 6 стадий. Одним из основных отличий эпишуры науплиального и копепоditного периодов развития являются характерные размеры тела особи (без учета мелких деталей – усиков, лапок и т.п.). По этой причине до начала процесса идентификации необходимо подготовить распознаваемое изображение, исключив из рассмотрения мелкие детали частицы. Устранение таких деталей в работе выполнено с помощью морфологического метода «размыкание» [9], который представляет собой последовательное использование операции эрозии и дилатации.

Следует отметить: процедура распознавания существенно осложняется тем, что из-за поступательного и вращательного движений частиц их ракурс, а значит, размер их проекций, может существенно меняться от голограммы к голограмме и отличаться от истинных размеров. В связи с этим для повышения устойчивости и достоверности идентификации тело особи целесообразно представлять в виде эллипсоида, проекцией которого на любую

из координатных плоскостей в общем случае является эллипс (рис. 2 и 3, б).

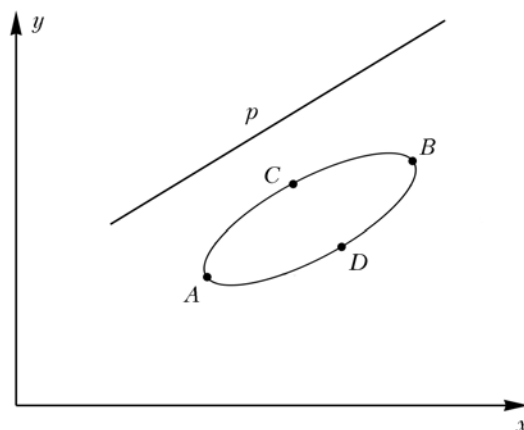


Рис. 2. Изображение эллиптической проекции частицы, поясняющее принцип выделения признаков частицы

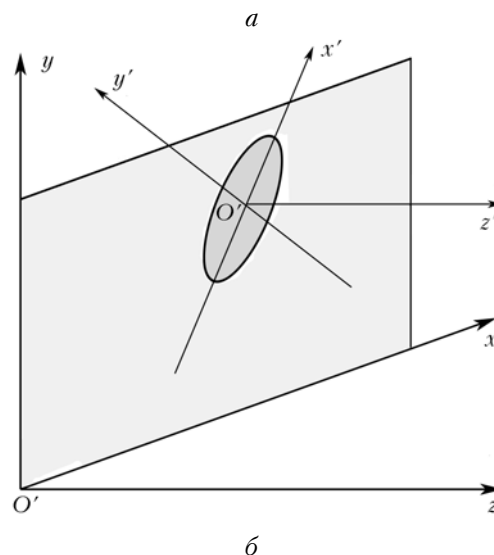


Рис. 3. Голографическое изображение планктонной частицы вида *Epischura Baicalensis* (а) и пример проекции эквивалентного эллипсоида (б)

Отметим, что после вышеописанной процедуры устранения мелких деталей в общем случае именно

эллипсом будет выглядеть голографическое изображение частицы в плоскости наилучшей фокусировки (ПНФ [10, 11]) при его восстановлении с цифровой голограммы. Наиболее вероятным размером тела особи будем считать такой размер проекции частицы, при котором большая ось эллипсоида ориентирована параллельно плоскости восстановления голографического изображения. Размером проекции тела особи будем считать размер R большей оси эллипса, который рассчитывается как наибольшее расстояние между точками с координатами (x_m, y_m) и (x_n, y_n) , лежащими на границе голографического изображения тела особи в ПНФ:

$$R = \max\left(\sqrt{(x_m - x_n)^2 + (y_m - y_n)^2}\right).$$

В качестве поясняющего примера приведен рис. 2, где максимальным (и наиболее вероятным) размером является расстояние AB .

Во многих случаях, когда граница частицы не такая идеальная, как на рис. 2, частицу удобнее характеризовать прямоугольником, описанным вокруг ее проекции (голографического изображения в ПНФ). В случае, изображенном на рис. 2, размер сторон описанного прямоугольника численно совпадает с размерами осей эллипса. Описанный прямоугольник строится таким образом, чтобы большие его стороны были параллельны максимальному размеру частицы. Поэтому максимальный размер частицы R совпадает с длиной большей стороны прямоугольника. Длину меньшей стороны прямоугольника, совпадающей на рис. 2 с малой осью эллипса CD , обозначим через r . В дальнейшем величины R и r будем использовать как основные признаки для распознавания частицы.

Можно предложить несколько способов определения величины r . В связи с дискретным представлением голографического изображения частицы и возможностью произвольной ориентации относительно строк и столбцов эллипса (или описанного прямоугольника), характеризующего проекцию частицы, кадра в ПНФ, различные алгоритмы обеспечивают различную точность определения r . Предварительные оценки показали, что в рассматриваемом классе задач, когда частицу можно описывать эллипсоидом, а ее проекцию (цифровое голографическое изображение в ПНФ) эллипсом или прямоугольником, наименьшая погрешность реализуется, когда величина r определяется как разность $r = |d_C - d_D|$. Здесь d_D и d_C рассчитываются методами аналитической геометрии как кратчайшие расстояния от вспомогательной прямой p (рис. 2), параллельной AB , до точек границы изображения частицы D (наиболее удаленной от прямой p) и C (ближайшей к прямой p) соответственно. Для того чтобы исключить пересечение прямой p с границей частицы, эту прямую выбирают так, чтобы она отстояла от AB на расстоянии, большем максимального размера частицы R .

Вытянутость частицы будем характеризовать эксцентриситетом эллипса E , определяемым как отношение размеров большой R и малой r его осей (или отношением сторон описанного прямоугольника).

Помимо того что распознаваемые частицы имеют сложную форму, они могут осуществлять вращения, повороты, наклоны и т.п., т.е. могут быть ориентированы произвольным образом в момент регистрации голограммы. Чтобы проанализировать влияние ориентации частицы (рис. 3, *a*), введем новую систему отсчета. Для этого разместим в центре тяжести голографического изображения частицы в ПНФ начало координат дополнительной системы отсчета (рис. 3, *б*). Выберем ось x' таким образом, чтобы она была направлена вдоль отрезка, который соответствует максимальному размеру тела частицы. Ось y' ориентируем перпендикулярно оси x' таким образом, чтобы плоскости xOy и $x'O'y'$ совпадали. Ось z' выберем параллельно оси z (рис. 3, *б*).

Из рис. 3, *б* видно, что форма проекции частицы в плоскости $y'O'z'$ не искажается при ее повороте вокруг оси x' , поскольку в предлагаемой модели частица в плоскости $y'O'z'$ имеет круглое сечение. Не изменяется при этом и проекция частицы на плоскость $x'O'y'$ (совпадающую с ПНФ голографического изображения частицы). Поэтому при таких поворотах (вращениях) частицы величины R и r не изменяются, а значит, такие повороты не будут оказывать влияние на процедуру распознавания и при идентификации планктонных частиц ими можно пренебречь.

При повороте частицы вокруг оси z' в плоскости $x'O'y'$ (или, что то же самое, в плоскости восстановления голографического изображения xOy) характерные размеры проекции тела частицы R и r в плоскости $x'O'y'$ также изменяться не будут, будет меняться лишь ориентация эллипса (или описанного прямоугольника).

Наиболее сложным случаем является поворот (вращение) частицы вокруг оси y' в плоскости $x'O'z'$. При таком повороте размер R существенно изменится. В то же время размер r остается неизменным, поскольку вращение происходит вокруг оси, которой этот отрезок принадлежит.

Обобщив вышесказанное, можно сделать вывод о том, что значение r постоянно при поворотах (или вращении) частицы вокруг осей x' , y' и z' (см. рис. 3, *б*) и поэтому может быть использовано в качестве первичного признака частицы для расчета истинного размера ее тела и последующего распознавания.

Как сказано выше, для достоверного распознавания частиц зачастую необходима априорная информация о каждом распознаваемом виде. В настоящей статье в качестве примера такая информация получена при использовании данных работы [12]. При обработке данных [12] установлено, что частицы одного периода развития на разных стадиях имеют постоянное значение отношения $E = (R/r)$ (табл. 1). Для частиц науплиального периода развития $E_{эп} = 2,25 \pm 0,15$, а для частиц копепоидного периода $E_{эп} = 3,41 \pm 0,20$. В дальнейшем эти значения будут использованы в качестве априорной информации о распознаваемых частицах (табл. 1). Здесь буквами «м» и «ж» в копепоидном периоде развития обозначены мужская и женская особи.

Таблица 1

Априорные данные о планктонных частицах вида *Epischura Baicalensis*

Науплиальный период развития				Копеподитный период развития			
Стадия	R , мм	r , мм	$E_{эт}$	Стадия	R , мм	r , мм	$E_{эт}$
1	0,140–0,150	0,060	$2,25 \pm 0,15$	1	0,570	0,170	$3,41 \pm 0,20$
2	0,180–0,190	0,080		2	0,600	0,180	
3	0,210–0,220	0,100		3	0,760	0,220	
4	0,250–0,260	0,110		4 (м)	0,960	0,280	
5	0,310–0,320	0,140		4 (ж)	0,850	0,250	
6	0,370–0,380	0,170		5 (м)	1,210	0,350	
				5 (ж)	1,000	0,290	
				6 (м)	0,99–1,66	0,290–0,490	

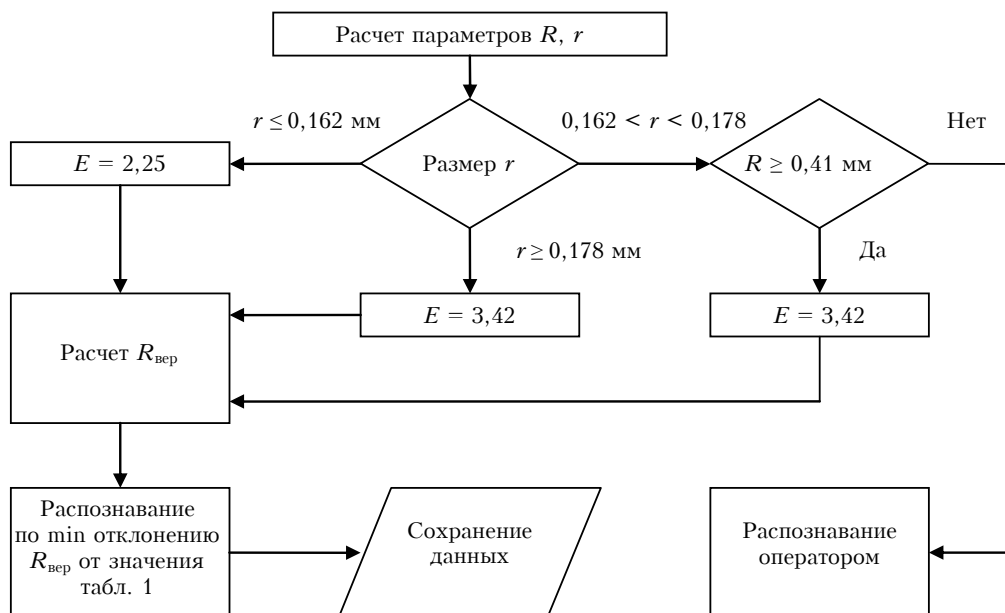
Алгоритм идентификации планктонных частиц с точностью до вида на примере планктонных особей вида *Epischura Baicalensis*

Процесс идентификации построен на основе дерева решений (рис. 4) и априорной информации о распознаваемых частицах (см. табл. 1).

Вначале по предварительно обработанному, бинаризованному и лишённому деталей голографическому изображению частицы определяются размеры R и r . Далее, с использованием величины r принимается решение о принадлежности к науплиальному или копеподитному периоду развития. Это делается следующим образом. По данным, приведенным в табл. 1, видно, что если размер r распознаваемой частицы меньше 0,170 мм, то частица относится к науплиальному периодам развития, в противном случае – к копеподитному. Поскольку

точность измерения размера r равна размеру пикселя (обозначим его δ), то при $r < (0,170 - \delta)$ можно утверждать, что распознаваемая частица относится к науплиальному периоду развития, а при $r > (0,170 + \delta)$ – к копеподитному. (Для определенности размер пикселя принят равным 8 мкм, что близко к параметрам камер семейства «Видеоскан». Исходя из этого размера пикселя, приведены значения на рис. 4.)

Если рассчитанное значение $(0,170 - \delta) < r < (0,170 + \delta)$, то возникает неопределенность в установлении периода развития эпишур по табл. 1. В этом случае необходимо обратиться к величине R . Если $R > (2,25 + 0,15) \cdot 0,170$ (или $R > 0,408$ мм), то распознаваемая частица относится к копеподитному периоду развития, в противном случае в условиях рассматриваемой неопределенности распознавание может быть выполнено только оператором. Здесь для расчета оценки R взято предельное значение эксцентриситета $E = 2,25 + 0,15$, соответствующего науплиальному периоду развития.

Рис. 4. Блок-схема разработанного алгоритма идентификации планктонных частиц вида *Epischura Baicalensis*

Результаты тестирования программного обеспечения, выполняющего идентификацию планктонных частиц по голографическим изображениям

Таким образом, разработанное программное обеспечение позволяет рассчитывать параметры R , r и вышеописанным способом определять период развития планктонной особи (науплиальный или копепоидитный). Затем значение эксцентриситета E для соответствующего периода развития (см. табл. 1) используется (см. рис. 4) для расчета наиболее вероятного размера тела особи $R_{\text{вер}} = E_{\text{этр}}$.

Далее вычисляется отклонение рассчитанного наиболее вероятного размера тела особи от значений табл. 1. Распознаваемая частица относится к тому классу (периоду развития и стадии), для которого величина отклонения является минимальной.

В случае если частица на этапе регистрации голограммы ориентирована большой осью перпендикулярно плоскости регистратора, форма ее проекции (голографического изображения в ПНФ) становится близка к кругу и ее идентификация затруднительна. Однако, поскольку при регистрации планктонных особей обычно регистрируется поток голограмм с последующим формированием так называемого голографического видео [6–8, 11], возможные неопределенности распознавания можно устранить за счет использования других изображений (ракурсов) этой же частицы, восстановленных с других голограмм видеопоследовательности. Кроме того, разработанные критерии качества [10] помогают заранее устранить из рассмотрения частицы неудовлетворительного качества.

Как уже показано выше, при распознавании могут возникать неоднозначности, требующие принятия решения оператором. Приведем еще один пример. Из табл. 1 видно, что копепоидитные частицы мужского и женского полов на стадиях 4, 5, 6 имеют близкие размеры. Это приводит к осложнению процедуры распознавания, которая может быть решена только оператором.

Важной характеристикой частицы является ее ориентация, определить которую можно в процессе распознавания. Для однозначного описания ориентации достаточно определить углы наклона частицы в плоскостях $x'O'y'$ и $x'O'z'$ (см. рис. 3, б). Для определенности обозначим угол наклона частицы в плоскости $x'O'y'$ через φ (угол между большой осью эллипса и осью x), который находится с помощью следующего соотношения:

$$\varphi = \arctg\left(\frac{y_B - y_A}{x_B - x_A}\right),$$

где (x_A, x_B) и (y_A, y_B) – координаты точек A и B соответственно (см. рис. 2).

Обозначим через θ угол наклона частицы в плоскости $x'O'z'$ (угол между большой осью эллипсоида и осью z) (см. рис. 3, б). В этом случае, используя рассчитанный по распознаваемому изображению размер R (размер проекции частицы) и априорную информацию о размере тела частицы $R_{\text{вер}}$, можно определить угол θ , описывающий наклон частицы по отношению к плоскости восстановления, используя соотношение

$$\theta = \arccos\frac{R_{\text{вер}}}{R}.$$

Приведем результаты тестирования разработанного алгоритма на трех видеопоследовательностях восстановленных голографических изображений (табл. 2). Из видеопоследовательностей предварительно исключались изображения частиц, качество которых было ниже порогового значения [10].

В первой видеопоследовательности (35 изображений) зарегистрирована частица копепоидитного периода развития ориентировочно 2–3-й стадии, во второй видеопоследовательности (62 изображения) – частица копепоидитного периода 4-й стадии или выше. Тестирование программного обеспечения на первой видеопоследовательности показало, что 27 из 35 изображений классифицировано как эпишура копепоидитного периода развития 3-й стадии, 7 изображений – 2-й стадии, а по одному изображению невозможно распознать частицу. Частица второй видеопоследовательности идентифицирована как частица копепоидитного периода развития 4-й стадии или выше в 62 случаях из 62, при этом в одном случае форма проекции частицы была близка к кругу, тем не менее классификатор выдвинул правильную гипотезу [13].

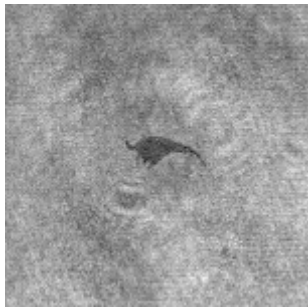
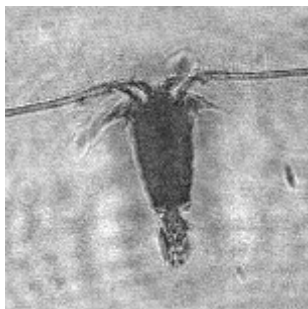
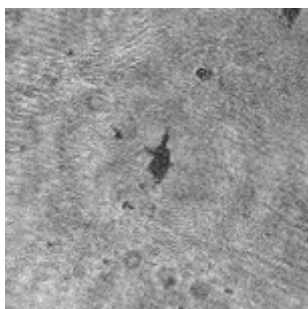
Сложности возникают при распознавании частиц науплиального периода развития. При различных ориентациях частицы возникают сложности в определении ее формы, поскольку частицы науплиального периода развития менее вытянуты по сравнению с частицами копепоидитного периода. В связи с этим даже при небольшом повороте частицы в плоскости $x'O'z'$ (см. рис. 3, б) форма проекции частицы может быть близка к кругу, что затрудняет ее распознавание. По этой причине в проведенной процедуре распознавания для третьей видеопоследовательности 5 изображений из 27 не могут быть распознаны, 14 изображений частицы классифицированы как эпишура науплиального периода развития 5-й стадии, 3 изображения – как эпишура науплиального периода развития 6-й стадии, 5 из 27 изображений классифицированы как эпишура копепоидитного периода 2-й стадии. Очевидно, что это еще один пример ситуации, когда необходимо вмешательство оператора.

С целью повышения скорости обработки данных в дальнейшем для распознавания предлагается использовать двумерное отображение объема с частицами, представляющее собой изображение, в котором все частицы заданной части объема сфокусированы и имеют резкую границу [14].

Заключение

В настоящей статье предложен метод распознавания с точностью до вида планктонных частиц по их изображениям, восстановленным с цифровой

Результаты распознавания изображений планктонных частиц, восстановленных с видеопоследовательностей голограмм

№ п/п	Пример распознаваемого объекта	Варианты полученных результатов распознавания			Невозможно распознать
1		27 изображений из 35 (77%) классифицированы как копепоditный период развития, 3-я стадия	7 изображений из 35 (20%) классифицированы как копепоditный период развития, 2-я стадия	1 изображение из 35 (3%) не идентифицировано	
2		62 изображения из 62 (100%) классифицированы как копепоditный период развития, 4-я стадия или выше			0 изображений из 62 (0%)
3		14 изображений из 27 (52%) классифицированы как науплиальный период развития, 5-я стадия	3 изображения из 27 (11%) классифицированы как науплиальный период развития, 6-я стадия	5 изображений из 27 (19%) классифицированы как копепоditный период развития, 2-я стадия	5 изображений из 27 (19%) не идентифицированы

голограммы, обоснованы основные подходы и параметры (признаки) распознавания. Метод программно реализован и апробирован на примере планктонных особей вида *Epischura Baicalensis* (эпишура байкальская). В методе в качестве информативных признаков используются характерные размеры прямоугольника, описанного около проекции идентифицируемой частицы (ее голографического изображения в плоскости наилучшей фокусировки). Распознавание происходит с помощью дерева решений, с использованием априорной биологической информации о распознаваемом виде. Предложенный метод позволяет с высокой достоверностью идентифицировать частицу выбранного класса по серии восстановленных голографических изображений или по видеопоследовательности, скомпонованной на их основе.

Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки РФ, проект 2.4305.2011 при частичной

поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы», Соглашение № 14.В37.21.0612.

1. Дёмин В.В., Степанов С.Г. Исследование ориентационных характеристик модельных кристаллических аэрозолей голографическим методом // Оптика атмосф. и океана. 2000. Т. 13, № 9. С. 833–836.
2. Fugal J.P., Shaw R.A. Cloud particle size distributions measured with an airborne digital in-line holographic instrument // Atmos. Meas. Technol. 2009. V. 2, N 1. P. 259–271.
3. Дёмин В.В., Донченко В.А., Чистякова Л.К. Голографические исследования микроструктуры аэрозоля при воздействии наносекундных импульсов излучения // Оптика атмосф. 1988. Т. 1, № 4. С. 57–63.
4. Дёмин В.В., Половцев И.Г., Макаров А.В., Мазур В.А., Тарасенко А.А., Ковбасюк Н.Н., Мельник Н.Г. Погружаемая голографическая камера для исследования

- микрочастиц: проблемы и решения // Оптика атмосф. и океана. 2003. Т. 16, № 9. С. 846–855.
5. Дёмин В.В., Макаров А.В., Половцев И.Г. Регистрация планктона с помощью имитатора погружаемой голографической камеры // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19, № 4. С. 312–318.
 6. Дёмин В.В., Ольшук А.С. Цифровое голографическое видео для исследования биологических частиц // Оптич. ж. 2012. Т. 79, № 6. С. 42–46.
 7. Дёмин В.В., Ольшук А.С., Наумова Е.Ю., Мельник Н.Г. Цифровая голография планктона // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, № 12. С. 1089–1095.
 8. Дёмин В.В., Ольшук А.С., Дзюба Е.В. Цифровое голографическое видео для исследования динамики планктона // Изв. вузов. Физ. 2010. Т. 53, № 8. С. 81–89.
 9. Соيفер В.А. Методы компьютерной обработки изображений. М.: Мир, 2003. 780 с.
 10. Дёмин В.В., Каменев Д.В. Критерии качества изображений в цифровой голографии частиц // Оптич. ж. 2012. Т. 79, № 4. С. 17–21.
 11. Dyomin V.V., Olshukov A.S., Kamenev D.V. Evaluation of the plankton species coordinates from digital holographic video // Proc. Conf. «Oceans'11». Santander, Spain, 06–09 June 2011. Paper No. 110131-015 (2011). IEEE Catalog Number: CFP11OCF-CDR; ISBN: 978-1-4577-0087-3; ISBN of Paper: 978-1-61284-4577-0088-0/11 ©2011 IEEE.
 12. Тимошкин О.А., Мазепова Г.Ф., Мельник Н.Г., Оболкина Л.А., Таничев А.И., Бондаренко Н.А., Земская Т.И., Кутикова Л.А., Помазкова Г.И., Сиделева В.Г., Аров И.В., Шевелева Н.Г., Афанасьева Э.Л., Механикова И.В., Шубенков С.Г., Русинек О.Т., Бекман М.Ю., Логачева Н.Ф., Александров В.Н., Подтяжкина М.М., Питулько С.И. Атлас и определитель пелагиобонтов Байкала (с краткими очерками по их экологии). Новосибирск: Наука, Сиб. изд. фирма РАН, 1995. 694 с.
 13. Дёмин В.В., Каменев Д.В. Особенности задачи распознавания планктонных частиц по их голографическим изображениям // Сб. трудов VII Междунар. конф. «Фундаментальные проблемы оптики-2012». 2012. Т. 79. С. 508–510.
 14. Дёмин В.В., Каменев Д.В. Двумерное представление цифрового голографического изображения объема среды с частицами как способ отображения и обработки информации о частицах // Оптич. ж. 2013. Т. 80, № 7. С. 58–65.

V.V. Dyomin, D.V. Kamenev. Peculiarities of the procedure of plankton particles recognition in images reconstructed from digital holograms.

The peculiarities of processing of the reconstructed holographic images of plankton particles are considered in the paper. The necessity of investigation of the particles appears in the challenges of hydrobiology, hydroacoustics, and oceanic optics. Method of plankton particles recognition with the accuracy up to species on example of the plankton species *Epischura Baicalensis* is suggested. The results of approbation of the method are presented, based on video sequences configured from holographic data and visualizing the particles movement dynamics.