

## Метод обработки фотоизображений водной среды для определения параметров минеральной взвеси

© 2016 Д.А. Антоненков

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

*E-mail: dmitry\_science@mail.ru*

Описан метод обработки фотоизображений водной среды для определения размерного состава и концентрации минеральной взвеси. Особенность метода заключается в применении созданного вычислительного алгоритма, одновременном использовании морфологических фильтров и гистограммных методов для обработки снимков и специальной методике калибровки, что в целом дает возможность рассчитывать размерный состав и концентрацию частиц на получаемых фотоизображениях. Приведено краткое описание разработанных технических средств, позволяющих получать фотоизображения среды необходимого качества. Излагается алгоритм работы созданного программного обеспечения. Приведены примеры определений числовых и массовых распределений частиц по их размерам, а также итоги сличения результатов, полученных с применением стандартных и разработанных методов.

**Ключевые слова:** фотоизображения, концентрация взвеси, размерный состав частиц, обработка изображений.

В настоящее время методы, основанные на обработке изображений, благодаря своей универсальности и возможности получения результатов в реальном времени, находят все большее применение в различных областях науки. Их использование, адаптация и разработка на их основе новых методов для исследований водной среды, в частности характеристик взвешенного в воде вещества, являются перспективными и актуальными задачами.

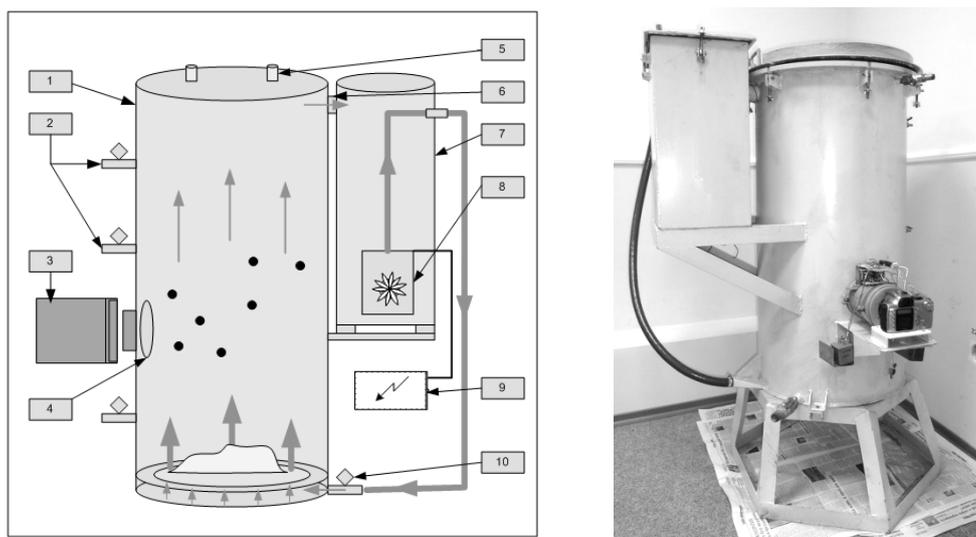
Для оценки текущего состояния проблемы был выполнен анализ применяемых в настоящее время методов и приборов измерения концентрации и размерного состава взвеси [1], который показал, что многие из них либо предназначены для работы в лабораторных условиях, либо не обеспечивают необходимую работоспособность в прибрежной зоне, в области значительной динамической активности водных масс с высокими значениями концентрации взвеси, ее сложным размерным составом и большой временной изменчивостью этих параметров. Кроме того, были рассмотрены приборы, предназначенные для работы в смежной области исследований – для определения численности и видового состава фито- и зоопланктона (цитометры). Среди них можно выделить прибор *Video Plankton recorder (VPR)* [2, 3], фиксирующий на цифровую видеокамеру изображения частиц и позволяющий с помощью программной обработки данных определять состав планктона. Однако специфика технических решений, направленная на реализацию задач измерения параметров биологических частиц – фито- и зоопланктона, не позволяет использовать большинство из них для измерений параметров взвеси терригенного происхождения в прибрежной зоне из-за конструктивных особенностей.

Основная цель данной работы – показать возможности разработанного метода определения характеристик минеральной взвеси путем обработки фото-

тоизображений водной среды, который позволяет одновременно получать экспресс-данные о концентрации и размерном составе взвешенных в воде частиц при больших скоростях их перемещения и высокой концентрации.

Сущность метода заключается в получении «мгновенных» фотоизображений (время экспозиции кадра составляет порядка 4 мкс, что позволяет получать четкие контуры частиц (без треков)) тонкого слоя воды с частицами взвеси, непосредственно примыкающего к иллюминатору. Далее посредством обработки полученных снимков при помощи разработанного программного обеспечения определяются концентрация и размерный состав взвеси.

Для апробации метода был сконструирован испытательный стенд со специализированным фоторегистратором, позволяющим создать поле взвеси с неким вертикальным распределением ее концентрации и получить серии экспериментальных фотоизображений среды. Конструктивная схема и фотография стенда представлены на рис. 1.



**Рис. 1.** Конструктивная схема и фотография созданного испытательного стенда: 1 – стальной бак; 2 – вентиля для отбора проб; 3 – фоторегистратор; 4 – иллюминатор; 5 – герметичная крышка; 6 – патрубок для возврата воды в бак; 7 – насосная емкость; 8 – насос

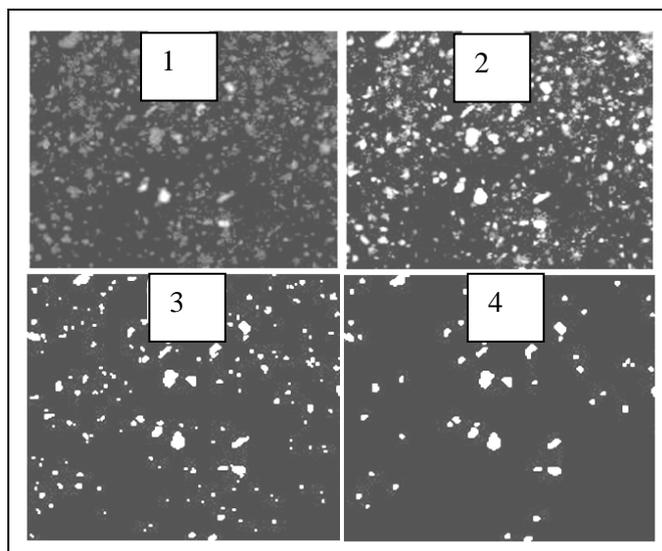
Для обработки полученных изображений среды и последующего определения параметров взвеси разработано программное обеспечение, алгоритм работы которого заключается в последовательном выполнении ряда подпрограмм.

Первоначально формируется рабочая среда: вводятся исходные, калибровочные и специально сгенерированные масочные изображения, определяются переменные среды. Далее на обрабатываемом изображении выделяется информационная часть, соответствующая регистрируемой области среды, исходя из формы и размера иллюминатора. Затем выполняется предварительная обработка изображения, основанная на построении гистограмм распределения яркости пикселей и их анализе. В итоге данного анализа определяются граничные значения яркости пикселей фона и пикселей объектов.

лее с помощью стандартной процедуры *Matlab – imadjust* с использованием степенной гамма-функции [4] производится преобразование контрастности, результатом которого является изображение с оптимальным контрастом.

Для сегментации изображений применяется метод, основанный на анализе перепадов яркости между пикселями фона и объектов. Данный метод заключается в определении априорного порога яркости между пикселями фона и частиц и дальнейшей сегментации пороговым методом [5]. Для определения порога используется калибровочное изображение 1, на котором отсутствуют различные артефакты, с частицами взвеси той же природы и того же размерного состава, что и в эксперименте.

После сегментации с изображения удаляются частицы радиусом менее 50 мкм, размер которых не включен в исследуемый диапазон вследствие недостаточной разрешающей способности используемой фототехники. Итоговое изображение формируется при помощи морфологического фильтра замыкания, выполненного по полученному после предварительной обработки изображению. Данный фильтр основан на операции эрозии [4] с использованием структурообразующего элемента в форме круга радиусом 50 мкм и последующей дилатации. Радиус структурообразующего элемента в пикселях рассчитывается исходя из вычисленного размера пикселя по технологии, описанной ниже. Этапы обработки полученных снимков иллюстрирует рис. 2.



**Рис. 2.** Этапы обработки полученных снимков: 1 – исходный снимок; 2 – результат предварительной обработки изображения; 3, 4 – изображение после операций сегментации и фильтрации

Далее определяются размер пикселя и объем регистрируемого слоя, для которого проводятся вычисления. Для этого используется калибровочное изображение 2 (с границами иллюминатора), на котором строится ограничивающий информационную область прямоугольник и вычисляется длина дан-

ного прямоугольника в пикселях. Зная точный размер иллюминатора, через который происходит регистрация снимков, можно вычислить размер пикселя. Определение исследуемого объема складывается из вычисления двух параметров: радиуса фильтрующей маски и толщины регистрируемого слоя.

Радиус фильтрующей маски определяется с помощью поиска ограничивающего прямоугольника и дальнейшего вычисления его длины аналогично обработке калибровочного изображения.

Толщина регистрируемого слоя соответствует значению глубины резко изображаемого пространства (ГРИП) фоторегистратора.

Расчет ГРИП выполняется в соответствии с соотношениями, описанными В.А. Яштольд-Говорко [6]:

$$R_p = \frac{R_n \cdot f^2}{f^2 + K(R_n - f)z},$$

$$R_z = \frac{R_n \cdot f^2}{f^2 - K(R_n - f)z},$$

$$R = R_z - R_p,$$

где  $R_p$  – передняя граница резко изображаемого пространства;  $R_n$  – расстояние, на которое производится наводка на резкость;  $R_z$  – задняя граница резко изображаемого пространства;  $f$  – главное фокусное расстояние объектива;  $K$  – знаменатель относительного отверстия (число диафрагмы);  $z$  – диаметр диска нерезкости (размытости);  $R$  – глубина резко изображаемого пространства.

Исходя из технических характеристик фотоаппарата *Canon EOS 300D* расстояние наводки на резкость (от передней линзы объектива до снимаемого объекта)  $R_n$  равно 16,5 см. Регистрация изображений осуществляется в длиннофокусном режиме, соответствующем фокусному расстоянию  $f = 55$  мм. Число диафрагмы  $K$  составляет 5,6. Допустимый диаметр кружка нерезкости  $z$  составляет 0,0037 см. Для фоторегистратора диаметр кружка нерезкости принимается равным 5 пикселям матрицы, что соответствует 37 мкм (размер пикселя по техническим характеристикам фотоаппарата равен 7,4 мкм). В результате вычислений толщина регистрируемого слоя будет составлять 2,5 мм. Этот параметр можно корректировать путем сличения со стандартными методами для уменьшения погрешности расчета концентрации.

Таким образом, зная радиус фильтрующей маски и толщину регистрируемого слоя, можно определить объем исследуемого слоя среды:

$$V = \pi \left( \frac{Width2 \cdot PS \cdot 10^{-5}}{2} \right)^2 \cdot 2,5 \cdot 10^{-2},$$

где  $V$  – объем регистрируемого слоя в  $дм^3$ ;  $Width2$  – диаметр регистрируемой круговой области слоя в пкс;  $PS$  – размер пикселя в мкм.

При определении концентрации и размерного состава частиц на изображении принимается, что в информационной области изображения отсутствуют перекрытия частиц. Данное допущение справедливо и для экспериментов,

проводимых в прибрежной зоне моря на расстоянии от дна  $\sim 10$  см, где концентрация взвеси может составлять единицы г/л.

Так, объем регистрируемого слоя толщиной  $h = 2,5$  мм и диаметром  $D_{sl} = 60$  мм равен

$$V_{sl} = \frac{1}{4} \pi \cdot D_{sl}^2 \cdot h = \frac{1}{4} \pi (60 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3} = 7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3.$$

При средней концентрации частиц  $C$ , равной 3 г/л, с учетом равномерного распределения частиц в объеме масса частиц в регистрируемом слое равна

$$M_{ch} = C \cdot V_{sl} = 21 \cdot 10^{-3} \text{ кг}.$$

Принимая удельный вес песка  $\gamma$  равным  $2,2$  г/см<sup>3</sup> (взяв конкретно для песка, применяющегося в эксперименте), определим объем, занимаемый частицами в регистрируемом слое:

$$V_{ch} = \frac{M_{ch}}{\gamma} = 9,5 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3.$$

Из данных вычислений видно, что объем, занимаемый частицами в регистрируемом слое, почти на три порядка меньше анализируемого пространства, и поэтому, учитывая их равномерное распределение в объеме, можно утверждать, что вероятность их перекрытия мала. Это подтверждается К.С. Шифриным при рассмотрении сходной задачи для метода флуктуаций [7]. Используемая в этом методе статистическая модель движения взвешенных частиц имеет достаточно общий характер и может использоваться при описании других оптических методов измерения характеристик взвеси, в частности метода прямого счета частиц по фотоизображениям исследуемой среды.

Возникающая благодаря взаимному затенению частиц погрешность счета может быть оценена на основе соотношений [7]:

$$\varphi(\tau) = \tau^2 - 1,77\tau^3 + O(\tau^4).$$

Ограничивая квадратичный вклад оптической плотности  $\tau$  в значение функции  $K(\tau)$ , характеризующей зависимость дисперсии флуктуаций от  $\tau$ , десятью процентами, получим  $\tau_{0,1} = 0,057$ . Полагая, что прямому счету подлежат частицы в диапазоне диаметров 50 мкм – 1 мм, для среднего диаметра  $d_0$  при функции распределения  $f(d) \approx d^{-1}$  получим  $d_0 \approx 300$  мкм, радиус  $r_0 \approx 150$  мкм. Соответственно площадь  $s_0 = \pi r_0^2 \approx 7 \cdot 10^{-6}$  дм<sup>2</sup>. Поскольку диаметр фотоснимка равен 60 мм, среднее число частиц на снимке составит  $\bar{N} = \bar{n} \times (IS) \approx 1,6 \cdot 10^3$  шт. Можно ожидать, что такое количество частиц на снимке будет подсчитано с ошибкой  $\sim 10$  % за счет взаимного затенения. Как показали проведенные на стенде эксперименты, среднее количество частиц, регистрируемых на фотоизображениях, равно 700 – 800 шт. В соответствии с вышеизложенным можно считать, что погрешность подсчета количества частиц при концентрации 3 г/л будет  $\sim 5$  %. Естественно, что с ростом концентрации эта погрешность будет возрастать, но полного «отказа» метода опре-

деления параметров взвеси (как у большинства существующих методов) не произойдет благодаря использованию изображения переднего плана.

С учетом вышесказанного определение концентрации и размерного состава частиц на изображении выполняется в несколько этапов:

1. После сегментации рассчитывается общее число элементов и определяется количество пикселей, принадлежащих каждому из них. В результате получаем числовую концентрацию частиц в зарегистрированной области и площадь каждой частицы в пикселях.

2. Для каждой частицы рассчитывается радиус эквивалентной сферы, который принимается как радиус частицы с учетом допущения, что частица близка к форме шара.

3. Следующим этапом является вычисление объема каждой частицы.

4. После вычисления объема частицы и удельного веса песка определяется масса каждой частицы.

5. Определив общую массу частиц и рассчитав объем исследуемого слоя, можно вычислить массовую концентрацию частиц.

Результатом выполненных вычислений являются следующие данные: массив площадей, занимаемых частицами; массив, содержащий радиусы частиц; массив, содержащий массы частиц; количество частиц; массовая концентрация частиц в исследуемом объеме.

На финальной стадии обработки после анализа всей серии снимков рассчитывается средняя концентрация взвешенных в воде частиц.

В ходе лабораторной апробации разработанного метода получены массивы изображений водной среды. Эксперименты проводились с использованием созданного испытательного стенда. Для максимального приближения условий лабораторного эксперимента к натурному в качестве материала для работы стенда использовался морской песок из проб, взятых при проведении экспедиционных исследований на Бакальской косе (Западный Крым). В результате выполненных с помощью программного обеспечения необходимых вычислений получены данные о средней концентрации взвеси, которая составила 2,05 г/л. Кроме того, получены количественное и массовое распределения частиц по фракциям, включающим в себя частицы размерами 100 мкм – 800 мкм с шагом 100 мкм. Результаты представлены на рис. 3 и 4.

С целью определения работоспособности метода выполнены определения значений концентрации и размерного состава взвеси с помощью стандартных методов ситового просеивания и взвешивания [7 – 10]. Для анализа были взяты пробы с помощью вентиляей, предусмотренных в испытательном стенде. Момент отбора проб был синхронизирован с моментом регистрации фотоизображений.

В табл. 1 приведены результаты анализа весовым методом проб, взятых на горизонте 49 см от дна экспериментальной емкости с интервалом 1 мин, а именно: массовая концентрация для каждой из проб и средняя концентрация взвеси.

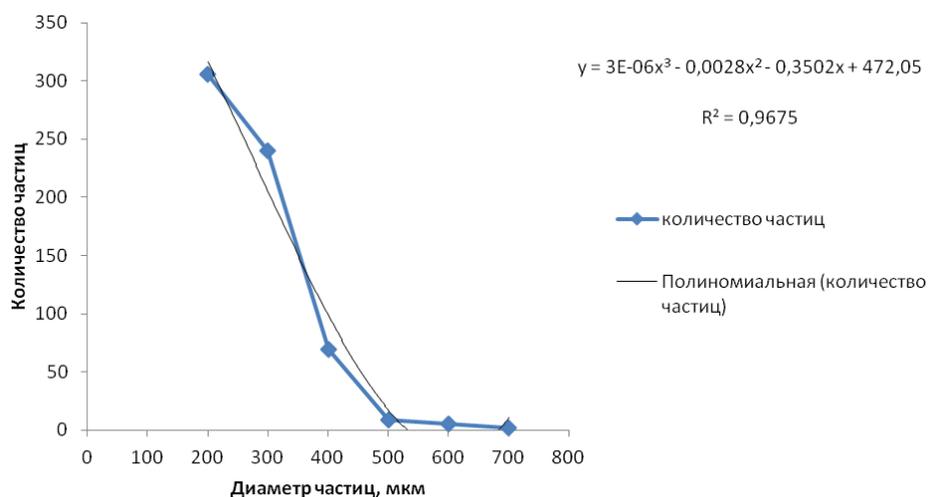


Рис. 3. Количественное распределение частиц по размерам

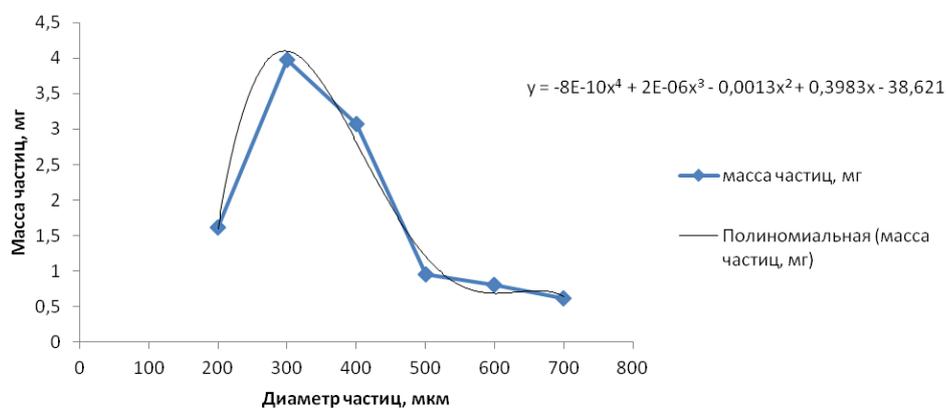


Рис. 4. Массовое распределение частиц для каждой фракции

Т а б л и ц а 1

**Результаты анализа проб взвешенного в воде вещества**

Номер пробы	Масса взвеси с фильтром, г	Масса фильтра, г	Масса взвеси, г	Масса воды, г	Объем воды, л	Концентрация взвеси, г/л
1	1,94	0,98	0,96	378	0,38	2,54
2	1,79	0,99	0,8	343	0,34	2,33
3	1,53	1,03	0,4	340	0,34	1,47
4	1,68	1,01	0,47	348	0,35	1,93
Осредненная концентрация взвеси, г/л						2,07

В табл. 2 приведены результаты программной обработки полученных серий изображений, а именно: среднее значение концентрации частиц взвеси

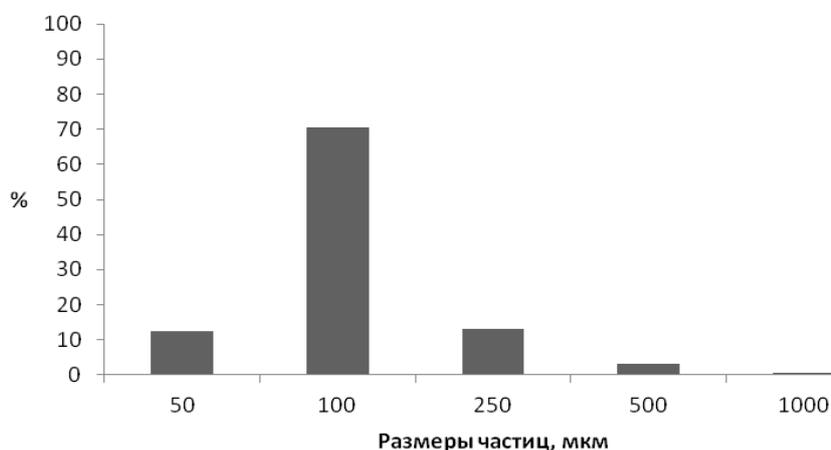
для каждой серии отдельно и осредненное значение концентрации для всех серий.

Т а б л и ц а 2

**Осредненные значения концентрации взвеси, полученные после программной обработки экспериментальных изображений**

Номер серии	Осредненная концентрация частиц взвеси, г/л
1	3,25
2	2,94
3	1,54
4	2,01
Осредненная концентрация для четырех серий, г/л	2,44

Результаты гранулометрического анализа, выполненного ситовым методом, представлены на рис. 5.



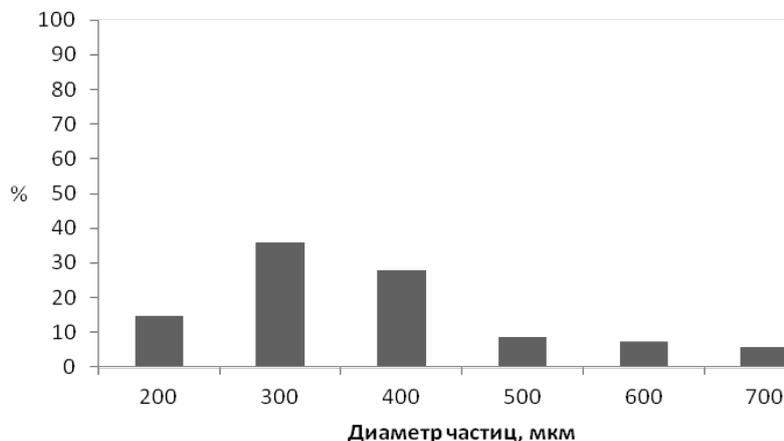
**Рис. 5.** Диаграмма процентного содержания фракций донного осадка по результатам, полученным стандартным методом просеивания

Данные о размерном составе, которые были получены с помощью разработанного метода, представлены на диаграмме рис. 6.

Проведя анализ результатов, можно сделать вывод, что расхождения в итоговых средних значениях концентрации, определенных обоими методами, не превышает 12 %, что является хорошим результатом для косвенного метода определения параметров взвеси при их высокой временной изменчивости.

Сопоставив данные, полученные в результате гранулометрического анализа отобранных проб, с данными после программной обработки изображений, можно сделать следующий вывод: оба метода показали, что в данных образцах песка основную массу частиц составляют фракции диаметром 100 –

500 мкм. В частности, ситовый метод показал, что самую большую долю (70 %) занимают частицы диаметром 100 – 500 мкм, а разработанный метод – что долю 64 % общей массы занимают частицы 200 – 500 мкм. Незначительное отличие во фракционном составе вызвано тем, что в разработанном методе фракция до 200 мкм представлена более узким диапазоном частиц диаметром 160 – 200 мкм.



**Рис. 6.** Диаграмма процентного содержания фракций донного осадка по результатам, полученным разработанным методом

Общие массовые распределения частиц по размерам, определенные с помощью обоих методов, в достаточной мере идентичны, из чего можно заключить, что результаты, полученные с использованием разработанного метода, являются достоверными и данный метод можно применять для определения размерного состава взвеси.

Суммарная погрешность разработанного метода складывается из погрешностей, связанных с эффектами смазывания и затенения одних частиц другими. Поскольку эти погрешности статистически независимы, то суммарная погрешность будет равна

$$\Delta_{\text{sum}} = \sqrt{\Delta_{\text{смaz}}^2 + \Delta_{\text{затен}}^2} \approx 12\% .$$

Таким образом, разработанный метод позволяет получить данные о размерном составе частиц в диапазоне 50 – 1000 мкм, а также определить концентрацию взвеси с погрешностью ~12 %. Данный метод может быть технически реализован для приборов, предназначенных для проведения измерений *in situ* при использовании специализированных технических средств, позволяющих получать короткие значения времени экспозиции, например использующих электронно-оптический преобразователь, действующий как усилитель яркости (*image intensifier*), и быстродействующий электронный затвор. Выполненная апробация метода в лабораторных условиях позволяет надеяться на получение сходных по точности результатов при проведении измерений *in situ*.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Антоненков Д.А.* Технические средства для натурных исследований размерного состава и концентрации взвешенного в воде вещества // Системы контроля окружающей среды. Средства, информационные технологии и мониторинг. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2008. – С. 83 – 87.
2. *Davis C.S.* A three-axis fast-tow digital video plankton recorder for rapid surveys of plankton taxa and hydrography // *Limnol. Oceanogr.*: Methods. – 2005. – № 3. – P. 59 – 74.
3. *Video plankton recorder (VPR)* [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа: <http://www.whoi.edu/instruments/viewInstrument.do?id=1007#1034>.
4. *Гонсалес Р., Вудс Р., Эддингс С.* Цифровая обработка изображений в среде Matlab. – М.: Техносфера, 2006. – 616 с.
5. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
6. *Яшгород-Говорко В.А.* Фотосъемка и обработка. Съемка, формулы, термины, рецепты. – М.: Искусство, 1977. – 343 с.
7. *Шифрин К.С.* Введение в оптику океана. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 280 с.
8. *ДСТУ ISO 11277:2005.* Качество грунта. Определение гранулометрического состава и минерального материала грунта Метод просеивания и седиментации. (ISO 11277:1998, ИДТ). – К.: Держспоживстандарт Украины, 2006. – 29 с.
9. *ГОСТ 12536-79.* Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 22 с.
10. *Петелин В.П.* Гранулометрический анализ морских донных осадков. – М.: Наука, 1967. – 128 с.

## **Method of the aquatic environment image processing for determining the mineral suspension parameters**

**D.A. Antonenkov**

*Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia  
e-mail: dmitry\_science@mail.ru*

The method of processing the aquatic environment images for determining the mineral suspension size and concentration is described. The method feature consists in application of the developed computing algorithm, simultaneous use of morphological filters and histogram methods for image processing, and in a special calibration technique. As a whole it provides a possibility to calculate the particles' size and concentration on the obtained images. The developed technical means permitting to get the environment images of the required quality are briefly described. The algorithm of the developed software operation is represented. The examples of the particles' numerical and weight distribution according to their sizes, and the totals of comparing the results obtained by the standard and developed methods are represented.

**Keywords:** image, suspension concentration, particle size, image processing.