

Д.А. Антоненков

Морской гидрофизический институт НАН Украины, г. Севастополь

**ПРОГРАММНАЯ ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ СРЕДЫ
С ЦЕЛЬЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗМЕРНОГО СОСТАВА
И КОНЦЕНТРАЦИИ ЧАСТИЦ ВЗВЕСИ**

В статье рассматриваются особенности разработанной методики обработки изображений взвешенного в воде вещества донных осадков с целью определения его некоторых гранулометрических характеристик и концентрации. На основании тестовых снимков, сделанных с помощью специализированного фоторегистратора, построены количественное и массовое распределения частиц по размерам, получены данные о концентрации взвеси, произведено сличение с результатами стандартного гранулометрического анализа.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *концентрация взвеси, размерный состав частиц, программная обработка изображений.*

Основная цель данной работы заключается в том, чтобы показать разработанную методику программной обработки изображений, которая позволяет получить данные о концентрации и размерном составе частиц на изображении, полученном специализированным фоторегистратором, конструктивная схема которого представлена на рис. 1.

Фоторегистратор является элементом гидродинамического стенда, воспроизводящего процесс взмучивания донных осадков. Работа фоторегистратора основана на методе кратковременной засветки исследуемого объема, который позволяет получить время экспозиции кадра порядка 4 мкс, необходимое для регистрации процесса взмучивания вещества донных осадков, обладающего высокой временной изменчивостью.

После выполнения визуального анализа полученных фоторегистратором снимков, пример которых представлен на рис. 2, были поставлены задачи, которые необходимо решить в ходе программной обработки изображений.

Основными задачами программной обработки были определены следующие:

1. Выполнить предварительную обработку изображений с целью увеличения контраста снимков и устранения различных артефактов и помех, присутствующих на изображении.

2. Программно разделить информационную часть изображения и часть изображения, на которой присутствуют посторонние предметы, а именно корпус фоторегистратора.

3. Определить соотношение размеров объектов на изображении с их реальными размерами, используя калибровочный снимок.

4. Выполнить фильтрацию изображений для удаления наиболее мелких частиц радиусом до 50 мкм, которые не входят в исследуемый диапазон.

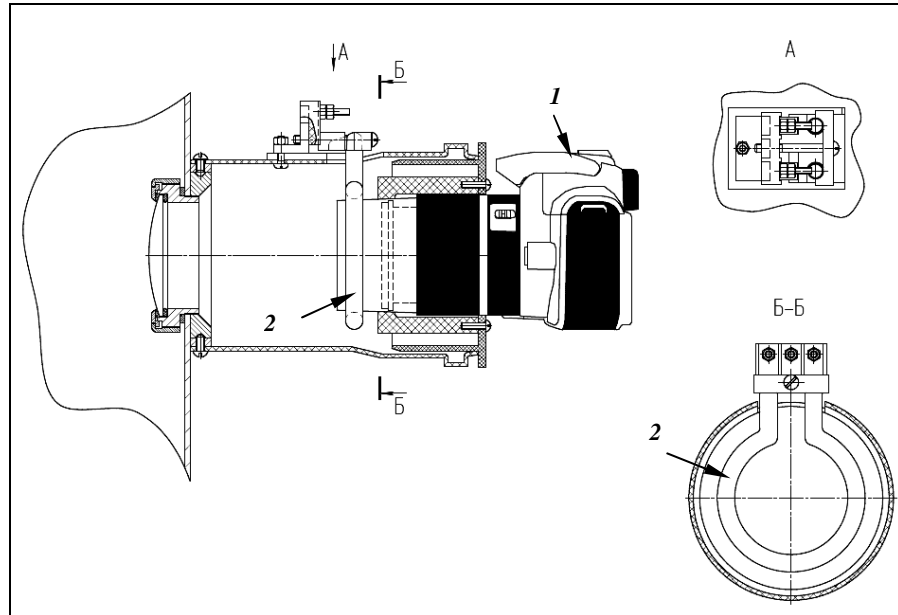


Рис. 1. Конструктивная схема фоторегистратора:
1 – фотоапарат; 2 – импульсная лампа (осветитель).

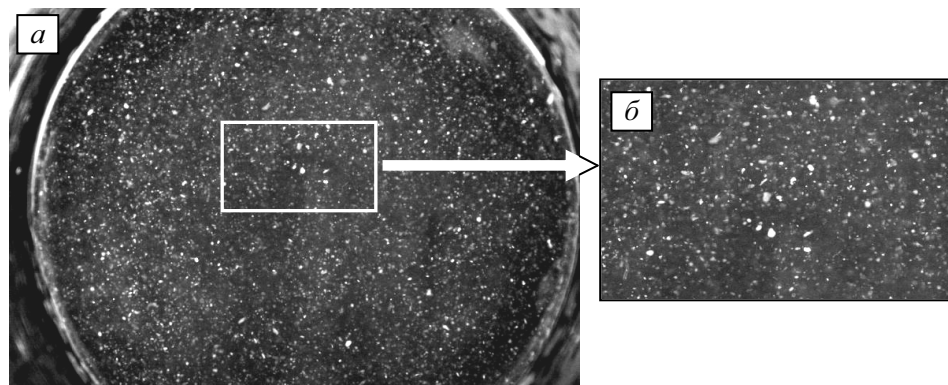


Рис. 2. Изображение, полученное фоторегистратором (а)
и его увеличенный фрагмент (б).

5. Вычислить массовую и числовую концентрацию частиц взвеси в исследуемом объеме.

6. Определить размерный состав частиц взвеси. Получить массивы данных с радиусами и массами частиц, зарегистрированных на изображении.

7. Построить графики количественного и массового распределения частиц по размерам.

Для решения поставленных задач было разработано программное обеспечение в среде *Matlab 6.5 MathWorks Inc.* с применением пакета *Image Processing Toolbox*.

Блок-схема алгоритма программной обработки изображений представлена на рис. 3.

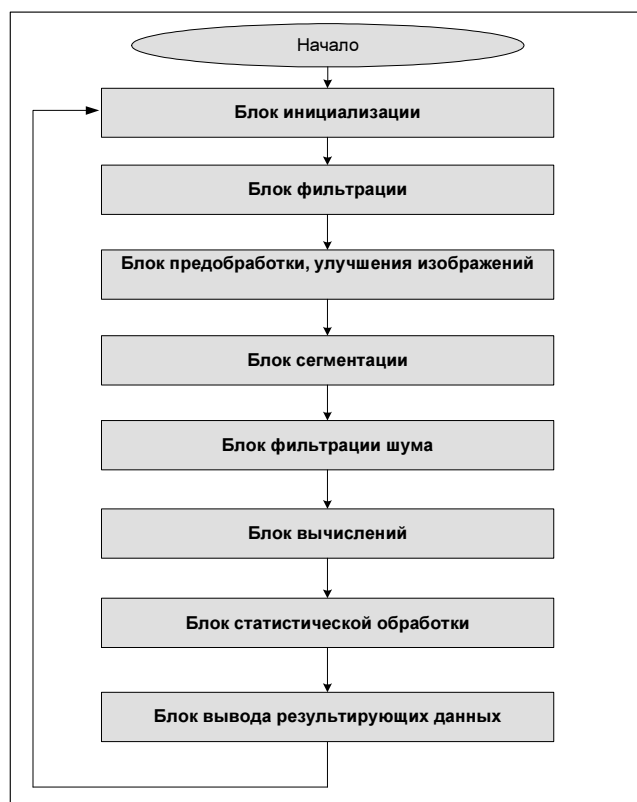


Рис. 3. Блок-схема алгоритма обработки изображений.

Методика работы программного обеспечения в соответствии данной блок-схемой состоит из ряда этапов.

В блоке инициализации изображения, полученные с помощью фоторегистратора, сохраняются на жестком диске и далее вводятся в программу в виде матрицы, содержащей информацию о цвете каждого пикселя и его яркости. Далее изображение переводится в черно-белый формат, так как информация о цвете не используется в разработанном алгоритме.

В блоке фильтрации на полученном черно-белом изображении выделяется информационная часть, представляющая регистрируемую область сре-

ды, при этом из изображения удаляются элементы корпуса фоторегистратора. Этот процесс выполняется с использованием фильтрующей маски определенных размеров, которая предварительно генерируется исходя из известных размеров иллюминатора гидродинамического стенда.

Блок предварительной обработки и улучшения изображения включает в себя построение и анализ гистограммы изображения. В результате определяются значения яркости пикселей фона и пикселей объектов. Далее, используя эти данные, выполняется преобразование контрастности, результатом которого является изображение с выровненной яркостью и усиленным контрастом.

На рис. 4. представлена гистограмма полученного фоторегистратором изображения.

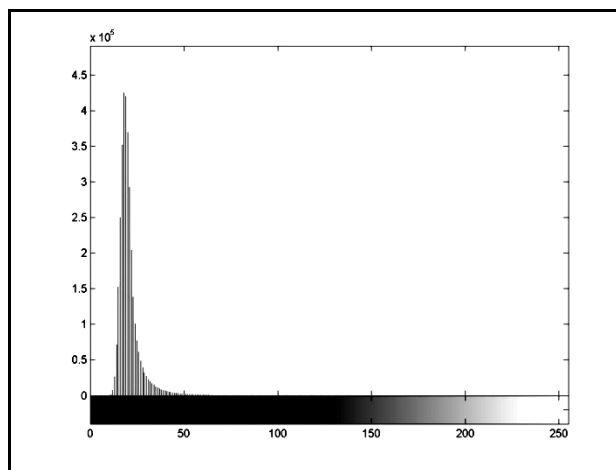


Рис. 4. Гистограмма полученного фоторегистратором изображения.

Построенная гистограмма является унимодальной и располагается в стороне темных тонов, что свидетельствует о низком контрасте и яркости изображения. Унимодальность гистограммы является следствием того, что пиксели частиц занимают много меньшую площадь, чем пиксели фона. Поэтому максимальное значение гистограммы будет соответствовать пикселям фона, и как следствие этого, пиксели, значение яркости которых располагаются левее максимума гистограммы, также будут принадлежать области фоновых пикселей. В свою очередь, пиксели, яркость которых является максимальной на гистограмме, будут принадлежать пикселям переднего плана. Далее выполняется преобразование контрастности, заключающееся в следующем: всем пикселям, яркость которых меньше яркости фонового порога (максимум гистограммы), присваивается значение нуля, а остальной диапазон растягивается на всю шкалу яркости, причем яркость светлых пикселей увеличивается, а яркость темных уменьшается, тем самым делая изображение максимально контрастным.

В блоке сегментации происходит поиск и разделение пикселей объектов и пикселей фона. Результатом работы данного блока является бинаризованное изображение, пикселям фона которого соответствует значение ноль, а пикселям объектов значение единицы.

Так как гистограмма полученных снимков является унимодальной, то применение пороговых методов обработки, основанных на поиске глобальных или локальных порогов, на гистограмме исходного изображения невозможно. Поэтому для сегментации будет применен метод, основанный на анализе перепадов яркости между пикселями фона и объектами. Данный метод заключается в следующем: так как отражательная способность частиц взвеси постоянна и при наличии искусственной засветки много выше, чем средняя яркость фона, то постоянно существует перепад яркости на границе частица-фон. Задача состоит в определении априорного порога яркости между пикселями фона и пикселями частиц. Для этого используется тестовое изображение. Порог яркости, определенный на контрастном тестовом изображении (на котором отсутствуют различные артефакты) при условии, что для регистрации применяются частицы взвеси той же природы, что и в эксперименте, можно использовать и на экспериментальных изображениях при соответствии их динамического диапазона яркостей динамическому диапазону тестового изображения.

Таким образом, далее в блоке сегментации выполняется бинаризация экспериментальных снимков с использованием найденного с помощью тестового изображения порога.

Блок фильтрации шума предназначен для удаления с бинаризованного изображения частиц, размер которых не входит в исследуемый диапазон. Данные частицы радиусом менее 50 мкм удаляются с изображения при помощи морфологического фильтра, основанного на операциях эрозии и дилатации с использованием структурообразующего элемента в форме круга радиусом 50 мкм.

Результатом предварительной обработки снимков, описанной выше, является бинаризованное изображение, на котором присутствуют частицы только исследуемого диапазона. Данное изображение готово для дальнейшего анализа и выполнения вычислений.

Основной задачей блока вычислений является получение данных о концентрации взвеси и размерном составе частиц. Для решения этих задач необходимо выполнить ряд дополнительных вычислений – определить размер пикселя и объем регистрируемого слоя, для которого проводятся вычисления.

Для определения размера пикселя, как описывалось выше, перед регистрацией основных серий снимков делается калибровочное изображение.

Технология получения калибровочного изображения следующая: фото-регистратор выставляется на строго определенное место по базе прибора и по углу зрения. Далее производится регистрация изображения белого листа бумаги при открытой крышке испытательного бака и работающей вспышке для получения максимально контрастного изображения и четкого выделения границ информационной области. Пример полученного калибровочного изображения представлен на рис. 5.

Далее проводится предварительная обработка, сегментация и бинаризация изображения. После данных операций строится ограничивающий прямоугольник, в который вписывается вся информационная область и вычисляется длина данного прямоугольника в пикселях. Зная точный размер ил-

люминатора, через который происходит регистрация снимков, определяется размер (диаметр) пикселя.



Рис. 5. Калибровочное изображение для определения реального размера пикселя.

Следующим шагом является определение объема исследуемого слоя. Так как в блоке фильтрации для удаления артефактов, связанных с наличием на изображении элементов корпуса, применяется фильтрующая маска, то информационная область уже искусственно ограничена данной маской. И так как маска имеет форму круга, то исследуемый объем будет иметь форму цилиндра. На рис. 6 представлено изображение с наложенной фильтрующей маской.

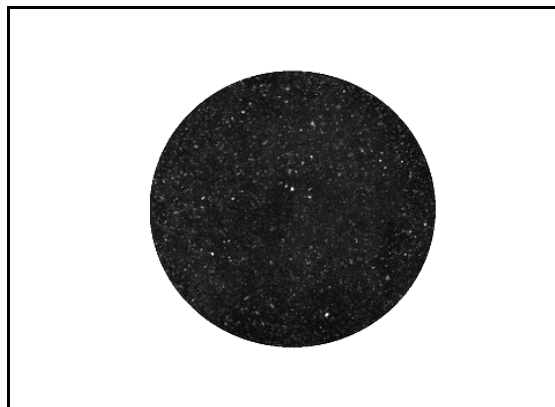


Рис. 6. Изображение с наложенной на него фильтрующей маской.

Таким образом, для определения исследуемого объема необходимо вычислить два параметра: радиус фильтрующей маски и толщину регистрируемого слоя.

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

Толщина исследуемого слоя соответствует значению глубины резко изображаемого пространства (ГРИП) фоторегистратора. Для подтверждения

данного вывода проведем вычисление ГРИП и продемонстрируем, как будут выглядеть изображения частиц, располагающихся на границах резко изображаемого пространства.

Расчет ГРИП выполним в соответствии с соотношениями для определения ГРИП, описанными В.А. Яштольд-Говорко [1]:

$$R_p = \frac{R_n \cdot f^2}{f^2 + K(R_n - f) \cdot z}, \quad (1)$$

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

$$R = R_z - R_p, \quad (3)$$

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.

Для расчета определим начальные данные, соответствующие разработанному фоторегистратору.

Расстояние наводки на резкость R_n составляет 16,5 см. Исходя из технических характеристик фотоаппарата *Canon EOS 300D*, минимальная дистанция фокусировки от плоскости светочувствительной матрицы составляет 28 см, расстояние от плоскости матрицы до передней линзы объектива составляет 11,5 см. Таким образом, расстояние наводки на резкость (от передней линзы объектива до снимаемого объекта) составляет $R_n = 28 - 11,5 = 16,5$ см.

Главное фокусное расстояние объектива f равно 5,5 см. В соответствии с техническими характеристиками объектива фотокамеры, его фокусное расстояние может изменяться в пределах от 18 до 55 мм. Регистрация изображений осуществлялась нами в длиннофокусном режиме, соответствующем фокусному расстоянию в 55 мм.

Число диафрагмы K составляет 5,6. Данное число диафрагмы соответствует наибольшему размеру диафрагмы для фокусного расстояния объектива 55 мм. Наибольший размер диафрагмы выбран с целью получения наименьшей глубины резкости.

Допустимый диаметр кружка нерезкости z составляет 0,0037 см. Для фоторегистратора принимается диаметр кружка нерезкости, равный 5 пикселям матрицы, что соответствует 37 мкм (так как размер пикселя по техническим характеристикам фотоаппарата равен 7,4 мкм). В соответствии с технической схемой реализации фоторегистратора и полученными изображениями установлено, что одному пикселю матрицы соответствует регистрируемый объект диаметром 20 мкм. Исходя из этого, частица, имеющая диаметр 100 мкм, займет на матрице круг диаметром 5 пкс. Принимая диаметр кружка нерезкости равным 5 пкс – 37 мкм (на матрице), мы допускаем,

что объект диаметром 20 мкм, находящийся на границе резко изображаемого пространства, будет иметь диаметр 5 пкс на матрице. Таким образом, при итоговом расчете диаметр объекта размером 20 мкм будет соответствовать диаметру объекта 100 мкм. В соответствии с вышеизложенным, все частицы, имеющие размер менее 20 мкм, при кружке нерезкости 37 мкм будут иметь итоговый диаметр при расчетах меньше 100 мкм и входить в нижний диапазон размеров, либо подвергаться фильтрации, так как минимальный диаметр подлежащих регистрации частиц составляет 100 мкм (в соответствии с техническими условиями).

Исходя из начальных данных и имеющихся соотношений для расчета глубины резко изображаемого пространства, произведем расчет, результаты которого приведены ниже.

$$R_p = \frac{16,5 \cdot 5,5^2}{5,5^2 + 5,6(16,5 - 5,5) \cdot 0,0037}$$

$$R_p = \frac{499,125}{30,25 + 0,228} = 16,376 \text{ см}$$

$$R_p = \frac{499,125}{30,25 - 0,228} = 16,625 \text{ см}$$

$$R = R_z - R_p = 0,249 \text{ см} = 2,5 \text{ мм.}$$

Таким образом, толщина исследуемого слоя будет составлять 2,5 мм. Далее определим изменение яркости изображения частицы на плоскости матрицы в зависимости от ее положения относительно объектива в расчетной области резко изображаемого пространства. На рис. 7 показана оптическая схема получения изображения частицы на плоскости матрицы в зависимости от положения частицы в области резко изображаемого пространства.

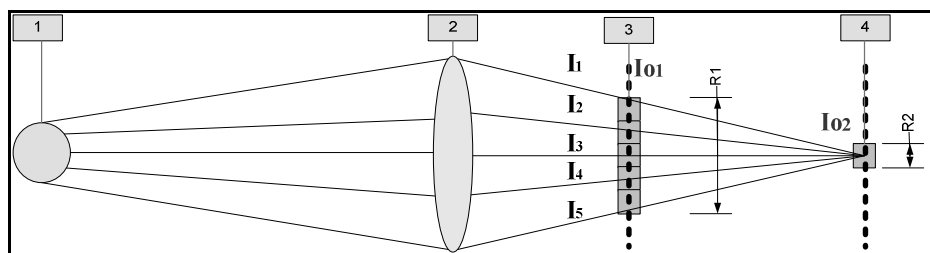


Рис. 7. Оптическая схема получения изображения частицы на плоскости матрицы.

На рис. 7 приняты следующие обозначения: 1 – условно показана частица диаметром 20 мкм (наименьший объект, который может быть различим фоторегистратором); 2 – объектив (линза); 3 – плоскость матрицы фотоаппарата, на которой отображается изображение частицы, соответствующее положению частицы за границей резко изображаемого пространства. Размер изображения частицы на матрице равен 5 пкс; 4 – плоскость матрицы.

цы фотоаппарата, на которой отображается изображение частицы, соответствующее положению частицы в области идеального фокуса. Размер изображения частицы на матрице равен 1 пкс; $I1, I2, I3, I4, I5$ – пучки света, схематически представляющие отраженный частицей свет; $Io1, Io2$ – средняя яркость изображения частицы на матрице; $R1, R2$ – размер изображения частицы на матрице.

Принимая во внимание тот факт, что, в соответствии с условиями эксперимента и особенностями технической реализации метода, регистрация изображения происходит в светоизолированном объеме при наличии равномерного однонаправленного освещения, можно принять что:

$$I1=I2=I3=I4=I5=Io1$$

$$I1+I2+I3+I4+I5=Io2= 5*Io1$$

Данные соотношения показывают, что изображение частицы, находящейся на границе резко изображаемого пространства, будет иметь яркость в 5 раз меньше, чем частицы, которые располагаются в области идеального фокуса при допустимом диаметре кружка нерезкости 37 мкм или 5 пкс.

Если принять максимальное значение яркости изображения частицы, располагающейся в области идеального фокуса – $Io2 = 256$ (для изображений с 256 градациями яркости), несложно определить, что яркость этой же частицы, располагающейся на границе резко изображаемого пространства, будет составлять $Io1 = 256/5 = 51$. Фон, получаемый на изображении, также имеет определенный уровень яркости, обусловленный наличием рассеянного света, и, в соответствии с полученными снимками, его яркость может отличаться от яркости самых ярких частиц в 6 раз. Выполнив расчет для $z = 6$, получим глубину резко изображаемого пространства $R = 3$ мм. Таким образом, можно сделать вывод, что изображения частиц, которые находятся за границей резко изображаемого пространства, будут сливаться с фоном и не будут визуализироваться на итоговом изображении.

Исходя из описанного выше, для расчета исследуемого объема в качестве толщины исследуемого слоя можно взять вычисленную глубину резко изображаемого пространства, которая составляет 2,5 мм.

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

Определение концентрации и размерного состава частиц выполняется в ряд этапов:

1. После пороговой сегментации строится размечающая матрица, в которой каждому элементу (частице) на изображении присваивается свой порядковый номер. Далее рассчитывается общее число элементов и определяется количество пикселей принадлежащих каждому из них. Таким образом, получив числовую концентрацию частиц в зарегистрированной области и площадь каждой частицы в пикселях.

2. Для каждой частицы рассчитывается радиус окружности, площадь которой соответствует площади частицы. Зная площадь окружности, занимаемой частицей, рассчитывается радиус эквивалентной сферы, который принимается как радиус частицы, допуская, что частица близка к форме шара. Данные объединяются в единый массив.

3. Все предыдущие вычисления выполнялись в пикселях, и далее, зная размер пикселя, производится расчет диаметров каждой частицы в микрометрах. В итоге получаем распределение частиц по радиусам.

4. Следующим этапом является вычисления объема каждой частицы. Принимая, что частица имеет форму шара, и зная радиус каждой из них, определяется объем частицы. Данные также объединяются в единый массив.

5. Зная объем частицы и принимая удельный вес песка равным $2,2 \text{ г/см}^3$ (удельный вес песка взят конкретно для песка, применяющегося в эксперименте), можно определить массу каждой частицы. Таким образом, получим распределение частиц по массе.

6. Определив общую массу частиц и рассчитав объем исследуемого слоя, вычисляется массовая концентрация частиц в $[\text{г/дм}^3]$.

Таким образом, в итоге вычислений формируется ряд результирующих массивов и данных:

- массив площадей, занимаемых частицами;
- массив, содержащий радиусы частиц;
- массив, содержащий массы частиц;
- количество частиц, массовая концентрация частиц в исследуемом объеме.

Полученные данные в дальнейшем используются для построения графиков и диаграмм количественного и массового распределения частиц по фракциям.

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

Результаты работы программы иллюстрирует следующий пример обработки полученного фоторегистратором изображения, показанного на рис. 8.

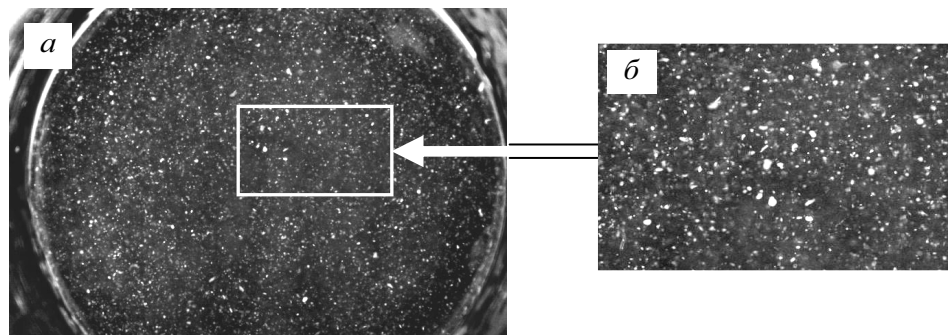


Рис. 8. Полученное фоторегистратором изображение (а) и его увеличенный фрагмент (б).

На рис. 9 показано данное изображение, переведенное в черно-белый формат, и наложенная на него фильтрующая маска. Также приведена гистограмма начального изображения.

Далее, после выполнения операций увеличения контрастности с использованием определенных в ходе обработки граничных значений, получаем изображение, готовое для сегментации. Ход предварительной обработки иллюстрирует рис. 10.

Выполнив сегментацию с найденным с помощью тестового изображения порогом яркости и удалив присутствующий на изображении шум при

помощи морфологического фильтра, получим изображение, готовое для проведения вычислений. Результат сегментации и фильтрации представлен на рис. 11.

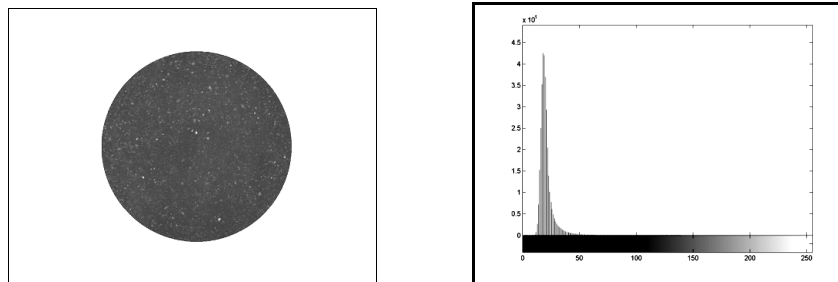


Рис. 9. Изображение с наложенной фильтрующей маской и его гистограмма.

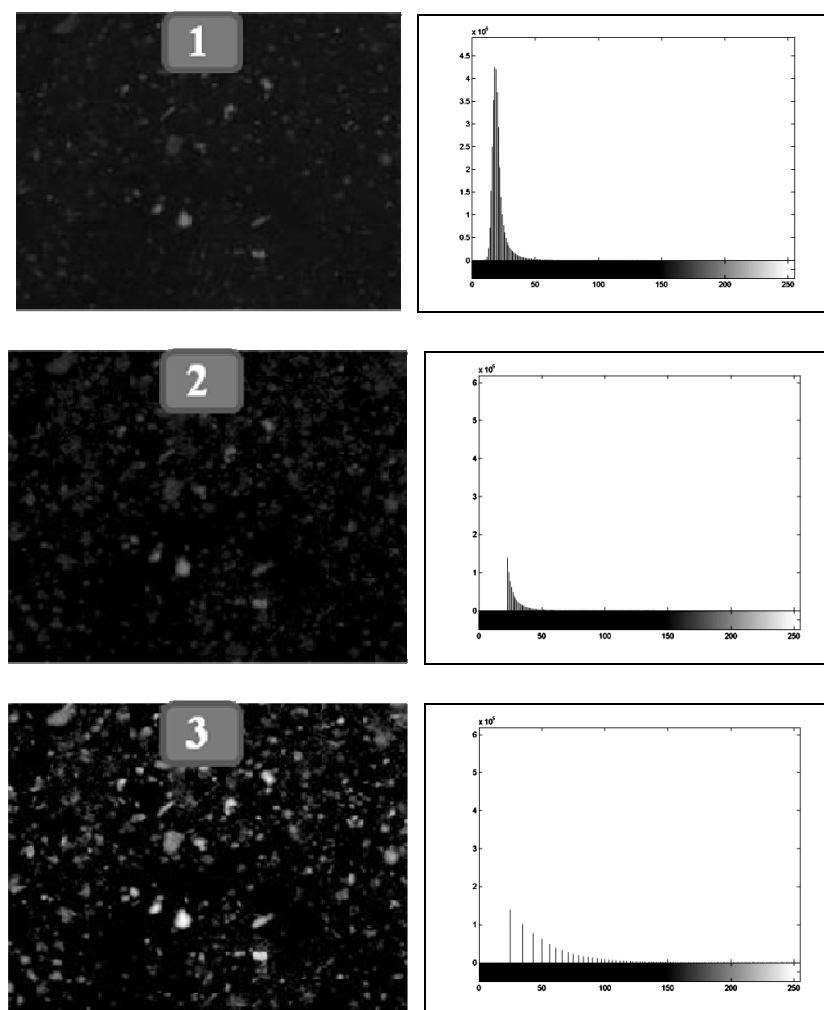


Рис. 10. Процесс предварительной обработки изображений.

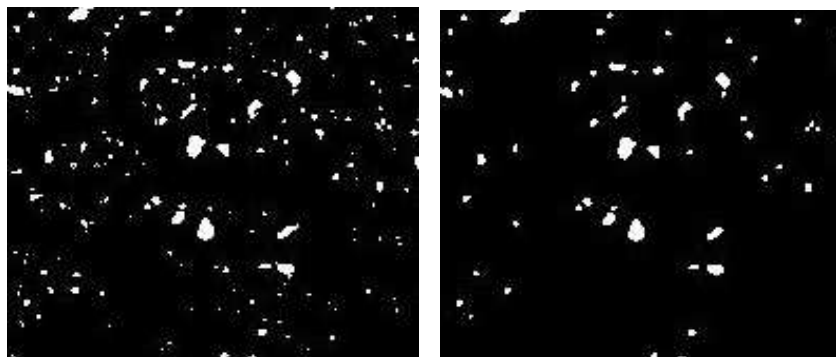


Рис. 11. Изображение после операций сегментации и фильтрации.

Далее, в результате проведенных с помощью программного обеспечения необходимых вычислений, были получены данные о концентрации взвеси, которая составила 2,05 г/л.

Также были получены количественное и массовое распределения частиц по фракциям, включающим в себя размеры частиц диаметром от 100 мкм до 800 мкм с шагом в 100 мкм, которые представлены на рис. 12 и рис. 13. Числовые данные этих распределений представлены в таблице.

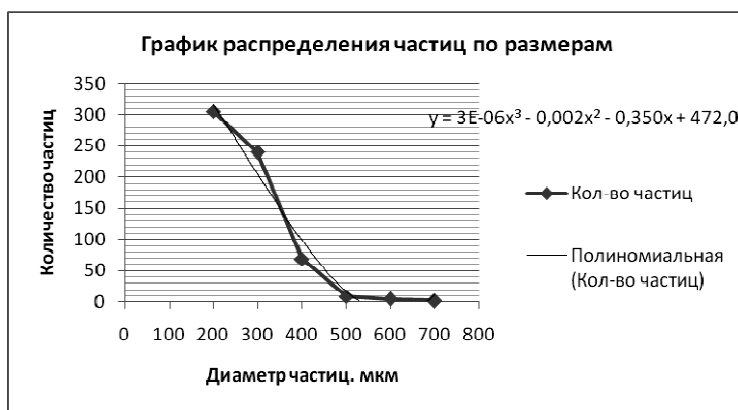


Рис. 12. График количественного распределения частиц по размерам.

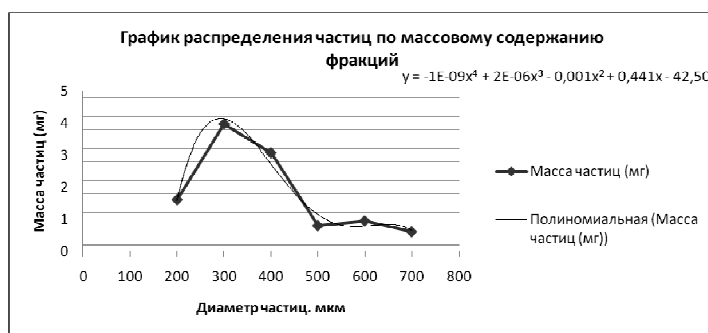


Рис. 13. График массового распределения частиц для каждой фракции.

Таблица. Результаты программной обработки изображений. Распределение частиц по массе, количеству и процентному содержанию для каждой фракции размеров.

Вид распределения	Суммарный показатель	Распределение по фракциям					
		Диаметр частиц, мкм					
		до 200	200-300	300-400	400-500	500-600	более 600
Масса частиц, (мг)	11,05	1,61	3,97	3,08	0,96	0,8	0,62
Процентное соотношение, (%)	100	14,6	35,9	27,9	8,7	7,2	5,6
Количество частиц, (шт)	631	306	240	69	9	5	2

Таким образом, разработка и программная реализация описанного выше алгоритма обработки изображений позволяет решить все поставленные задачи и реализовать основную цель, а именно, получить данные о размерном составе частиц на изображении, а также определить концентрацию взвеси в исследуемом объеме. Для подтверждения и проверки результатов вычислений одновременно с регистрацией снимков проводился отбор проб. Дальнейший анализ данных проб с помощью стандартных аттестованных методик путем взвешивания и седиментации показал, что разработанный метод является работоспособным. Расхождения в итоговых средних значениях концентрации и построенных распределениях по размерам не превышает 10%, что является хорошим результатом для процесса с высокой временной изменчивостью. Данная методика может быть технически реализована как для приборов, предназначенных для проведения измерений *in situ*, с использованием электронно-оптического преобразователя, так и для проведения лабораторных экспериментов. В натуральных условиях, в отличие от условий гидродинамического стенда, учитывая большую временную изменчивость характеристик взвешенного вещества, получаемых в результате обработки изображений, необходимо выполнять процедуру осреднения для получения объективных оценок потоков взвешенного вещества донных осадков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Яитолд-Говорко В.А.* Фотосъемка и обработка. Съемка, формулы, термины, рецепты. – М.: Искусство, 1977. – 343 с.
2. *ГРИП* и ее природа. Сайт Новикова М.Г. [Электронный ресурс]. <http://novikovmaxim.narod.ru/> (Последнее обращение 19.11.2011).
3. Глубина резко изображаемого пространства. Сайт Википедия. [Электронный ресурс]. http://ru.wikipedia.org/wiki/Глубина_резко_изображаемого_пространства. (Последнее обращение 19.11.2011).
4. *Depth of field and diffraction.* Сайт Norman Koren photography page. [Электронный ресурс]. <http://www.normankoren.com>. (Последнее обращение 19.11.2011).
5. *Гонсалес Р., Вудс Р., Эддингс С.* Цифровая обработка изображений в среде *Matlab*. – М.: Техносфера, 2006. – 616 с.
6. *Гонсалес Р., Вудс Р.* Цифровая обработка изображений. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.

Материал поступил в редакцию 19.12.2011 г.

АНОТАЦІЯ В статті розглядаються особливості розробленої методики обробки зображень суспензії донних осадків з метою визначення деяких її гранулометричних характеристик та концентрації. На підставі тестових знімків, зроблених за допомогою спеціалізованого фотореєстратора, побудовані кількісні та масові розподіли часток за розміром, отримані дані про концентрацію суспензії, здійснено зіставлення з результатами стандартного гранулометричного аналізу.

ABSTRACT The article considers the peculiarities of the developed image processing method of the bottom sediment suspension to determine some of its particle size composition characteristics and concentration. On the basis of the test pictures made by the specialized camera the quantitative and mass distribution of particle sizes is built, the suspension concentration data are obtained, the standard particle size analysis results verification is carried out.