



Овчинников А.М., Ролдугин Д.С.,  
Овчинников М.Ю.

Аппаратно-программный  
комплекс для обработки  
спектральной информации

**Рекомендуемая форма библиографической ссылки:** Овчинников А.М., Ролдугин Д.С., Овчинников М.Ю. Аппаратно-программный комплекс для обработки спектральной информации // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2008. № 71. 26 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2008-71>



**Ордена Ленина**  
**ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ**  
**имени М.В. Келдыша**  
**Российской академии наук**

**А.М.Овчинников,**  
**Д.С.Ролдугин,**  
**М.Ю.Овчинников**

**Аппаратно-программный**  
**комплекс для обработки**  
**спектральной информации**

**Препринт №**

**Москва**

ОРДЕНА ЛЕНИНА  
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ им.М.В.КЕЛДЫША  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

А.М.Овчинников, Д.С.Ролдугин, М.Ю.Овчинников

**Аппаратно-программный комплекс для обработки  
спектральной информации**

Москва  
2008

**Аппаратно-программный комплекс для обработки спектральной информации.** А.М.Овчинников, Д.С.Ролдугин, М.Ю.Овчинников. Препринт ИПМ им.М.В.Келдыша РАН, Москва, 26 страниц, 17 рисунков, 2 таблицы, библиография: 11 наименований

Рассматриваются принципы гиперспектрального анализа для распознавания состава материала наблюдаемых объектов в задачах дистанционного зондирования. Приводится описание функциональной схемы работы гиперспектрометра и созданного на основе этой схемы макета мобильного прибора. Описываются алгоритмы и программное обеспечение, разработанные для работы с макетом. Особое внимание уделено корреляционному и субпиксельному методам обработки спектральных данных. Кратко рассматриваются их достоинства и недостатки в зависимости от решаемых задач. Рассматривается общая структура спектральных библиотек, описание библиотек, существующих на данный момент, и создаваемых при помощи представленных алгоритмов для описываемого макета. Приводятся результаты распознавания и обработки изображений с использованием разработанного программного обеспечения.

**Ключевые слова:** гиперспектральный анализ, гиперкуб, гиперспектрометр, спектральная библиотека

**Hardware-Software Unit for Spectral Data Processing,** A.M.Ovchinnikov, D.S.Roldugin, M.Yu.Ovchinnikov, Preprint of KIAM RAS, Moscow, 26 Pages, 17 Figures, 2 Tables, 11 References

Principles of the hyperspectral analysis for identification of the material composition are described. The principles are considered with concern to remote sensing for different underlying surfaces. The description of the functional layout of a conversional spectrometer is given. Mobil mock-up of the spectrometer designed on the base of this functional layout is described. Correlated and sub-pixel processing methods of spectral data processing are especially depicted. Merits and demerits are briefly ranged against the tasks to be solved. General structure of the present and developed spectral libraries for the designed spectrometer and its software are presented. The results of hyperspectral data processing and recognition are described.

**Key words:** hyperspectral analysis, hypercube, hyperspectrometer, spectral library

## 1. Введение

Спектральный анализ основывается на способности материалов поглощать и отражать свет. Принципиальной основой спектрального анализа данных является предположение об однозначном соответствии отраженного сигнала (в общем случае – интенсивность и поляризация) и состава отражающей поверхности. Для достаточно большого числа спектральных каналов, на которых производится измерение интенсивности отраженного сигнала, будут наблюдаться различные результаты для различных отражающих материалов. Гиперспектральным анализом называется спектральный анализ, проводимый для числа спектральных каналов (числа длин волн, для которых измеряется интенсивность) от нескольких сотен до тысяч, а гиперспектрометром – прибор, проводящий одновременное измерение интенсивности излучения сигнала для длин волн, регистрируемых приемником (матрицей) гиперспектрометра и пространственной координаты исследуемой поверхности. Интенсивность отраженного сигнала зависит, разумеется, и от интенсивности сигнала подсветки, в качестве которой могут быть использованы как естественные источники света – Солнце, Луна и даже звезды, так и искусственное освещение. С естественным освещением удобно работать при проведении натурных измерений, тогда как использование искусственного освещения удобно для создания спектральной библиотеки образцов и проведения лабораторных исследований. Поскольку сложно произвести натурные измерения при одинаковых условиях, то необходима калибровка получаемых данных с учетом интенсивности и спектра падающего света. Основными величинами, подлежащими изменению при спектральном анализе, являются длина волны, интенсивность отраженного сигнала и пространственная координата исследуемой поверхности. Поэтому центральным объектом гиперспектрального анализа является *гиперкуб* – массив данных, образуемых значениями интенсивности отраженного сигнала от двумерной поверхности, разбитой на пиксели. Каждому пикселю соответствует спектральная координата – интенсивность и дискретная поляризуемость. Последняя ниже не рассматривается и не реализуется в разрабатываемых алгоритмах, потому в массив данных включаться не будет.

Основная особенность гиперспектрального анализа, отличающая его от многозонального или мультиспектрального (с использованием лишь нескольких спектральных каналов), заключается в возможности привлечения для идентификации изображения его дифференциальных характеристик в отличие многозонального изображения, в котором фактически происходит их усреднение по длине волны. Это приводит к принципиальному улучшению информативности данных, так как используются не нескольких (как правило, не более 10) наиболее информативных или простых для регистрации участков спектра, а весь спектр регистрируемых длин волн.

Одним из перспективных направлений приложения гиперспектрального анализа является дистанционное зондирование Земли. Съемка производится с

борта самолета, вертолета или спутника, а в качестве источника освещения выступает Солнце. При дистанционном зондировании необходимо учитывать искажение принятого сигнала атмосферой, разное для различных погодных условий, различные углы падения света от источника освещения при проведении работы и при создании базы эталонов. Поэтому пристальное внимание обычно уделяется способам и реализующим их алгоритмам, позволяющим учесть эти эффекты (описание одного из них приведено в [1]). Перейдем к описанию устройства типового гиперспектрметра.

## 2. Устройство гиперспектрметра

Гиперспектрметр состоит из нескольких базовых элементов (рис.1), представленных в каждом приборе и различающихся лишь способом работы, техническими возможностями, а также вспомогательными элементами, не меняющими суть работы системы.

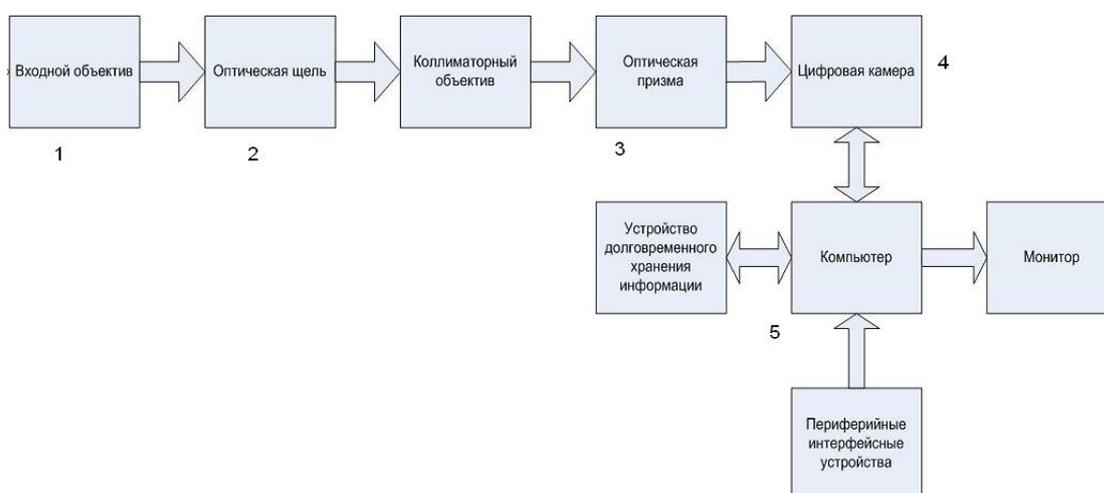


Рис.1. Схема гиперспектрметра (обозначения: 1 – входной объектив, 2 – щель, 3 – диспергирующий элемент, 4 – оптическая система, 5 – приемник)

Прибор работает по следующей схеме. Отраженный от объекта исследуемый сигнал попадает на входной объектив 1, фокусирующий его на щель 2. Щель, установленная перпендикулярно направлению движения носителя с гиперспектрметром, “вырезает” узкую полосу снимаемой поверхности. По направлению движения носителя введем ось координат, вдоль которой будем отсчитывать пространственную координату получаемого спектрального изображения. Далее, вырезанная полоса попадает на диспергирующий элемент 3 (например, призму), расположенный так, чтобы плоскость разложения света была перпендикулярна щели. Таким образом, полоса света раскладывается по длинам волн, образуя спектральную координату изображения. Разложенный сигнал попадает на оптическую систему 4 (выходной объектив), проектирующий его на приемник цифровой камеры, где изображение фиксируется и сохраняется в виде непрерывной последовательности видеок кадров или одного или нескольких кадров

видеозаписи в задаваемый программой или же оператором, производящим работу момент времени. Далее уже оцифрованный сигнал записывается управляющим компьютером на жесткий диск, флэшкарту или другое устройство для долговременного хранения и последующего воспроизведения или обработки или же для выдачи на монитор для просмотра оператором. Для каждого пикселя полученного изображения, таким образом, определена яркость, являющаяся третьей “координатой” точки в гиперкубе. По мере движения аппарата (например, пролета над исследуемой поверхностью) снимается новая полоса поверхности, создавая последовательность кадров, позднее объединяемых в цельное изображение снятой поверхности – спектральное изображение.

В качестве диспергирующего элемента обычно применяется призма или дифракционная решетка. Наиболее распространенные усовершенствования этого элемента – система фильтров и усилитель. Система фильтров, расположенная за входным объективом, выделяет в падающем свете один или несколько спектральных диапазонов, в соответствии с поставленными перед прибором задачами, а также позволяет пропускать каждый спектральный диапазон через отдельную оптическую систему, повышая точность измерений. За системой фильтров располагается система линз, соединяющая прилежащие области изображений для каждого фильтра и создающая единое изображение [2]. Электронно-оптический усилитель, располагающийся перед приемником, позволяет усилить сигнал. Это часто оказывается необходимым, так как съемка может происходить в полевых условиях при недостаточности солнечного освещения или в лабораторных условиях, где освещение заведомо слабее солнечного [3]. В случае, если гиперспектрометр рассчитан на работу в лабораторных условиях, он может комплектоваться и источником освещения [4]. Кроме того, как оптические системы (входная и выходная), так и диспергирующий элемент (точнее, совокупность элементов, обеспечивающих спектральное разложение света) могут содержать или полностью состоять из зеркал. В случае использования дифракционной решетки в качестве диспергирующего элемента это практически выполняется повсеместно.

### **3.Методы спектрального анализа**

Рассмотрим два наиболее распространенных метода анализа спектральных данных - субпиксельный и корреляционный. Приведем описание общих принципов и алгоритмов их работы, а также описание их преимуществ и недостатков.

#### **3.1.Субпиксельный метод**

Начнем изложение с *субпиксельного* метода, являющегося более общим, нежели корреляционный метод, который, по сути, - его частный случай. Этот метод рассчитан на применение в тех случаях, когда необходимо определить состав изучаемой поверхности. Он требует больших временных затрат, хотя

общая схема реализации метода довольно проста и основывается на методе наименьших квадратов. Спектральные данные для отдельного пикселя изображения представляются  $N$ -мерным вектором, где  $N$  – число спектральных каналов. Поскольку поверхность, представленная в этом пикселе, является суперпозицией каких-то материалов, этот вектор является комбинацией векторов, соответствующих представленным материалам. Здесь, следуя [8], зависимость полагается линейной (в [8] приведен обзор работ, обосновывающих достоверность применимости линейной модели). Проверка линейности может быть проделана точно лишь для каждого конкретного измерения с помощью известной статистики  $T = S_1 / \sigma^2$ , где  $S_1 = (Y - \hat{Y})^t (Y - \hat{Y})$ ,  $Y$  - измеренное значение интенсивностей,  $\hat{Y} = X (X^t X)^{-1} X^t Y$ ,  $X$  - вектор спектральных каналов. Эта статистика, как известно, сходится по распределению к случайной величине, имеющей распределение  $\chi^2(n-k)$ , где  $n$  - размерность  $Y$ ,  $k$  - число измерений. В нашем случае  $k=1$ . Таким образом, гипотеза о линейной зависимости может быть легко проверена для каждого измерения, и по нескольким результатам сделан вывод о верности принятой гипотезы.

Весовые коэффициенты в разложении вектора должны изменяться в пределе от нуля до единицы и их сумма должна быть равна единице в предположении об отсутствии шумов и других веществ, не учтенных в разложении. Число элементов разложения (базисных векторов) определяется по величине отношения сигнал/шум и выбранного спектрального диапазона и может достигать сотни. Разумеется, увеличение числа базисных векторов приводит к увеличению времени работы и не может улучшить точность выше предела, определяемого точностью полученных данных. Пусть вектор  $r$  спектральных данных определяется линейной комбинацией базисных векторов  $x_i$  и вектором ошибки измерений  $\Sigma$ , включающей упомянутые шумы и неизвестные материалы,  $r = \sum_i c_i x_i + \Sigma$ , где  $i = \overline{1, M}$ ,  $\sum_i c_i = 1$ ,  $0 \leq c_i \leq 1$ ,  $M$  - число базисных векторов.

Далее, следуя линейному регрессионному анализу, представляем данное выражение в матричной форме  $r = XC + \Sigma$ , где  $X = [x_i]$ ,  $C = [c_i]$ ,  $i = \overline{1, M}$ . Затем, действуя по методу наименьших квадратов, определяем матрицу  $C$  по формуле  $C = (X^t X)^{-1} X^t r$ , где  $X^t X$  - информационная матрица.

Таким образом, получили оценку для коэффициентов разложения, которая, согласно теореме Гаусса-Маркова, является линейной, несмещенной и обладает

минимальной дисперсией по каждой компоненте. Получим несмещенную оценку вектора ошибки  $\Sigma$

$$S = \Sigma' \Sigma = (r - XC)' (r - XC) = (r - \hat{r} + \hat{r} - XC)' (r - \hat{r} + \hat{r} - XC) = \\ = (r - \hat{r})' (r - \hat{r}) + (\hat{r} - XC)' (\hat{r} - XC) = S_1 + S_2,$$

$$MS = Mtr \Sigma \Sigma' = n\sigma^2$$

$$MS_2 = M (\hat{r} - XC)' (\hat{r} - XC) = Mtr \sigma^2 (X' X)^{-1} (X' X) = k\sigma^2.$$

Тогда  $MS_1 = (n-k)\sigma^2$  и  $\sigma^2 = \frac{S_1}{(n-k)} = \frac{(r - \hat{r})' (r - \hat{r})}{(n-k)}$  - искомая статистика, по которой можно определить, насколько правомерно использование выбранного набора базисных векторов.

### 3.2. Корреляционный метод

Корреляционный метод применяется в предположении, что материал снимаемой поверхности однороден, то есть представляет собой конкретный материал, а не смесь. Этот метод был реализован для обработки полученных данных в силу его простоты. Для каждой точки спектрального изображения производится сравнение гистограммы с гистограммами файлов библиотеки, выбранных для анализа, то есть подключенных файлов библиотеки. В ходе анализа выбирается то вещество, которое дает наилучшее совпадение, отвечающее, кроме того, заданному порогу точности, определяющему границу, в которой может быть вынесено решение о совпадении. В общем случае степень совпадения двух материалов является интеграл произведения спектральных функций образца  $S_0$  и функции файла библиотеки  $S_i$  [3]. При этом квадрат каждой из функций необходимо нормировать на единицу, а саму функцию – на ноль в общем диапазоне длин волн  $[\lambda_1, \lambda_2]$ :

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_i d\lambda = 0 \quad \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_i^2 d\lambda = 1 \quad \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_i S_0 d\lambda = C$$

Здесь  $C$  - мера совпадения спектральных функций, изменяющаяся от -1 до 1.

Корреляционный метод является частным случаем субпиксельного метода. Субпиксельный метод даст точно такие же результаты в случае, если рассматривать лишь один базисный вектор, при этом его вклад является степенью совпадения в корреляционном методе. Достоинствами корреляционного метода являются его простота, устойчивость к ошибкам измерений, недостатком же является меньшая информативность данных.

Последний недостаток имеет принципиальный характер в случае, когда необходимо определить состав изучаемой поверхности на уровне простейших материалов и веществ (например, состав руды). Вместе с тем это не имеет значения при определении поверхности в общем (например, определении травяного покрова на снятом изображении).

#### 4.Спектральные библиотеки

Спектральный анализ основан на сравнении гистограмм, полученных в ходе съемки, с гистограммами уже известных материалов. Необходимым инструментом анализа являются спектральные библиотеки – базы данных, содержащие, информацию об отражательной способности материалов на различных длинах волн. Крупнейшие общедоступные библиотеки - Johns Hopkins University spectral library [5], JPL spectral library [6], USGS Spectroscopy Lab's splib06 [7]. Рассмотрим организацию последней библиотеки, которая состоит из одного файла и нескольких программ, обрабатывающих данные. Программы могут быть включены в другие программные продукты. Кроме того, спектральные данные также доступны в HTML-файлах. Файлы разделены на шесть частей по типу материалов (минералы; почвы и камни, их смеси; грунт; жидкости; искусственные материалы; растительность). Такое разделение можно использовать в целях ускорения обработки данных, подключая лишь те части библиотеки, которые заведомо могут быть представлены на изображении, либо обнаружение которых только и представляет интерес. Большая часть файлов содержит описание материала и файла библиотеки. За ним следуют три столбца данных – длина волны, интенсивность отраженного сигнала и среднеквадратичное отклонение (табл. 1).

Acmite NMNH133746 Pyroxene	W1R1Ba	AREF
copy of splib04a r 16		
0.205100*****		0.019138
0.213100	0.026845	0.003411
0.221100	0.028269	0.001497
0.229100	0.026145	0.001277
0.236100	0.025933	0.001158
0.242100	0.025593	0.001035
0.248100	0.025733	0.000792
0.253600	0.026030	0.000758
0.258600	0.026661	0.000507
0.263600	0.027376	0.000523

Табл.1. Пример части файла библиотеки USGS Spectroscopy Lab's splib06

Также файл содержит информацию о диапазоне излучения, разрешении прибора, на котором были проведены измерения, и спектральной чистоте

материала. Последний параметр связан с отсутствием лучшего образца или необходимостью измерений в другом, недоступном пока, диапазоне. Для создания библиотеки использовались четыре различных гиперспектрометра, что позволило собрать данные в диапазоне 0.2-150мкм, хотя текущая библиотека включает данные лишь до 5.2мкм. Из-за использования различных приборов при создании базы данных и при работе с ней данные должны быть откалиброваны. Для получения эталонной библиотеки необходимо использовать максимально чистые образцы.

При создании JPL spectral library [6], содержащей спектральную информацию о минералах, образец распылялся, после чего при помощи магнита удалялись металлические примеси, появившиеся в ходе распыления в стальной камере. Далее, при помощи дифракции на рентгеновских лучах определялось содержание примесей в образце. Этот способ, однако, имеет недостаток. Большинство кристаллических веществ можно заметить при концентрации в 1-2% по дифракционным пикам, тогда как некоторые другие вещества преломляют рентгеновские лучи значительно слабее. Кроме того, о наличии примесей можно судить и по виду распределения интенсивности. Ожидая какие-либо примеси в образце и зная их распределение, можно определить их наличие по пикам интенсивности, характерным именно для них. Этот способ, однако, не может претендовать на высокую точность и быстроту обработки. Вместе с тем, определение наличия примесей и их количества необходимо и библиотека должна содержать информацию о чистоте каждого материала. Это необходимо для дальнейшего определения пригодности данных для их использования в конкретных задачах. Но библиотека также должна включать и данные по образцам, являющимся на самом деле смесями многих материалов. Такие смеси исследуются, когда получить лучший образец невозможно или для дальнейшего исследования требуется определить не конкретный минерал, а всю смесь. Химический состав вещества может быть определен с помощью электронного микроскопа. Распыленный образец помещался в алюминиевый держатель, представляющий собой небольшое блюдце. Поверхность образца выравнивалась металлической ложечкой, хотя даже это может привести к нежелательной закономерности во взаимной ориентации частиц, не наблюдаемой в свободном соединении их. Образец освещался одновременно с эталоном – веществом Halon, представляющим собой любое углеводородное соединение, в котором один или несколько атомов водорода замещены бромом, а также другими галогенами. После измерений по известным данным для Halon'a производится калибровка. Процесс получения данных также сопровождается несколькими этапами коррекции, вызванными различными эффектами. Первый – искажение данных около трех микрометров из-за поглощения сигнала водой. Этот эффект заметен даже у безводных материалов. Причина его заключается в оседающих на поверхности материала частицах воды.

По данным Johns Hopkins University spectral library [5] поглощение заметно даже при проведении измерений в специально очищенной сухой азотной атмосфере и в условиях высокого вакуума. Нагревание же образца с целью испарения может привести к изменениям в отражательной способности и потому неприемлемо. Вместе с тем, в случае проведения измерений одновременно с исследуемым образцом и эталоном, помещенными в одну камеру, эффект поглощения оказывается в среднем одинаковым для обоих материалов. Но, тем не менее, иногда не удается избежать искажений, связанных с линиями поглощения воды. Следующая проблема, избежать которую также не удастся – искажения инфракрасного сигнала в диапазоне 1,3-2 мкм для некоторых приборов.

Далее, при измерении приборами, захватывающими небольшие поверхностные площади материала порядка нескольких миллиметров, возникает ослабление сигнала на тех длинах волн, где поглощение слабо и сигнал должен быть сильным. Значительную долю его интенсивности составляют многократно рассеянные фотоны. Некоторые из них в результате рассеяний покидают поверхность вне зоны фокусировки прибора, что и вызывает ослабление сигнала. Впрочем, последние две проблемы связаны с недостатком прибора и потому могут быть обойдены. При изучении некоторых материалов приходится их дробить на значительно меньшие образцы, чтобы достичь достаточной чистоты материала. Это приводит к ограничениям в диапазоне измеряемого излучения в пределах 0,3-2,7 мкм. Перед измерениями также следует определить точность определения длины волны спектрометра. Это можно сделать при помощи измерения отражательной способности материала, для которого данные хорошо известны и проверены, а также содержат множество узких полос поглощения.

Часть сложных процедур, применяемых при создании описанных библиотек, связана с необходимостью калибровки данных для использования их на любом приборе. Соответственно, для работы с этими библиотеками аналогичные процедуры калибровки необходимо провести и на используемом приборе. Кроме того, использование существующих библиотек связано с необходимостью применения программных комплексов, их сопровождающих, и встраивания их в программное обеспечение прибора. Также, далеко не весь спектр материалов и длин волн, представленный в библиотеках, может быть полезен и использован на конкретном приборе и при решении конкретных задач. Все это привело к решению создать собственную библиотеку спектральных данных. Каждому файлу библиотеки может быть присвоено название по желанию пользователя, например, по материалу - песок, вода, в том числе при его занесении в библиотеку во время работы комплекса. Файл хранится в текстовом виде и содержит два столбца данных - длина волны и интенсивность отраженного сигнала. При этом в значении интенсивности, измеряемом от 0 до 1, сохраняются лишь 4 значащие цифры. Это позволяет практически без потери точности при анализе уменьшить объем хранимых

данных в 2.5 раза. Работа с такой библиотекой проста как для программы, так и для пользователя при непосредственном анализе данных.

### 5. Устройство макета

Мобильный Спектральный Комплекс (МоСК) для исследования подстилающей поверхности состоит из оптической части, неподвижно закрепленной на жесткой платформе из композитного материала, компьютера для управления работой МоСКа, набора записывающих устройств для долгосрочного хранения записанного материала (жесткие диски), жидкокристаллического дисплея, периферийных устройств (клавиатура и «мышь»), а также аккумулятора для автономной работы Комплекса. Все вышеперечисленные составные части МоСКа крепятся к специальной раме в пластиковом кейсе. Общий вид МоСКа представлен на рис. 2.



Рис.2. Общий вид МоСКа в сборе

Рассмотрим подробнее основные части Комплекса. На рис.2 видно, что в данной модификации МоСКа присутствует ноутбук. Его использование вызвано требованием наглядности представления в лабораторном варианте. Ввиду того, что основные части ноутбука точно повторяют все описанные выше компоненты (вычислительная часть, жидкокристаллический дисплей, клавиатура, мышь, жесткий диск и аккумуляторная батарея), то использование ноутбука или всех этих компонентов в отдельности по функциональности идентично.

Для крепления, транспортировки и эксплуатации оптической части, компьютера, жесткого диска для записи и аккумуляторной батареи используется промышленный транспортный кейс. Прочный пластиковый контейнер надежно защищает оптическую и электронную часть от внешних воздействий в виде пыли, грязи, атмосферных осадков, механических воздействий, а также закрывает оптическую часть от внешних световых источников искусственного и естественного происхождения. Наличие рамки для монтажа позволяет стационарно закрепить панель, к которой крепятся оптические и электронные части Комплекса.

Для хранения и воспроизведения записанных материалов используется жесткий диск с интерфейсом IDE формата 2,5 дюйма для ноутбука (рис.3) емкостью 40 Гб, что позволяет вести непрерывную съемку около часа и сохранять данные в несжатом формате *avi*, а также в последовательном наборе изображений в формате *bmp*. Жесткий диск посредством шлейфа IDE подключается к промышленному компьютеру. При использовании внешнего жесткого диска с интерфейсом USB 2.0 его подключение происходит через стандартный кабель к соответствующему разъему на плате компьютера. Увеличение емкости диска позволяет пропорционально увеличить объем записанной информации для последующей обработки. Использование широко применяемых в самых обычных компьютерах жестких дисков не только увеличивает надежность системы и снижает ее стоимость, но и позволяет весьма оперативно заменить использованный жесткий диск на новый для дальнейшего проведения экспериментальной работы.



Рис.3. Жесткий диск для записи и хранения полученных экспериментальных данных

В качестве компьютера был выбран промышленный одноплатный компьютер (рис.4) J-Rex PM (производство компании «Kontron»). Краткая спецификация компьютера приведена в табл.2.

<b>Процессор</b>	Intel® Pentium® M 745 1.8GHz,
<b>Чипсет</b>	Intel® 855GM/GME Chipset graphics memory controller hub
<b>Память</b>	184-pin DIMM 2.5V безбуферная DDR SDRAM 512 Mb
<b>Последовательный порт</b>	RS232
<b>Universal Serial Bus (USB)</b>	2 USB 2.0 ports; Поддержка USB floppy, CDROM, USB флэш-носителей
<b>Ethernet</b>	integrated Intel® 82562 10/100BASE-T LAN
<b>VGA</b>	Intel® 855GM Chipset graphics memory controller hub with Intel® Extreme Graphics 2 technology
<b>Габаритные размеры</b>	101,6мм x 147,3мм x 27,3мм

Табл.2. Краткие характеристики промышленного компьютера

Как видно из представленных характеристик компьютер сравним по своей производительности и набору портов ввода-вывода с самым обычным ноутбуком, что и позволило для наглядности продемонстрировать его на рис.2. Полное сходство по конфигурации и архитектуре позволяет использовать на нем операционную систему Microsoft Windows - как версию Embedded, так и обыкновенную Windows XP.

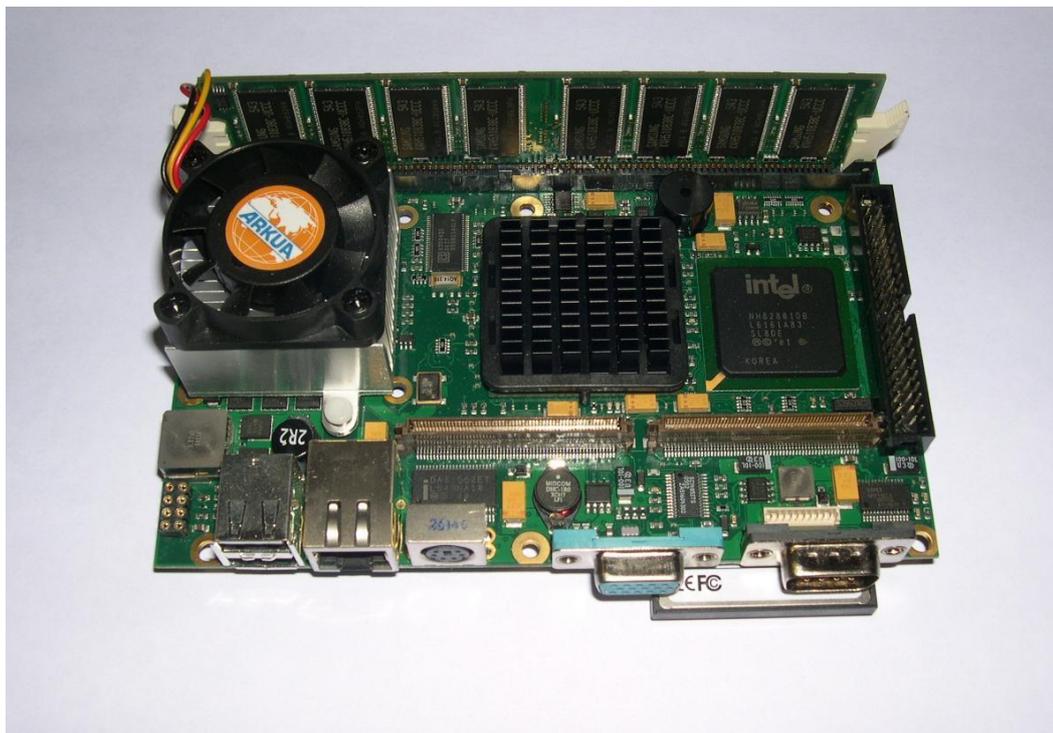


Рис.4. Промышленный компьютер J-Rex PM

В основе оптической части Комплекса лежит широко распространенная схема, используемая многими исследователями и коммерческими организациями. Оптическая часть представляет собой два объектива, повернутые друг к другу выходными отверстиями, между ними крепится щель. При этом один из объективов направлен на объект исследования и является «входным», а повернутый к нему – «выходным», после него световой поток попадает на дифракционную решетку или призму, раскладывается по длине волны и полученная двумерная картинка попадает на фиксирующий элемент камеры – ПЗС-матрицу. В нашем случае используется цифровая камера с выводом через интерфейс USB 2.0, подключенная к компьютеру, и получаемые данные напрямую записываются на жесткий диск.

Функциональная схема МоСКа совпадает со схемой, представленной на рис.1. Как описано выше, после прохождения через оптическую подсистему происходит регистрация светового потока матрицей цифровой камеры. Далее оцифрованный сигнал передается на компьютер, где может предварительно обрабатываться и затем записываться на жесткий диск, либо без предварительной обработки сохраняться на носителе. Во втором случае скорость съемки информации с камеры значительно выше ввиду того, что ресурсы процессора не используются на обработку огромного потока данных (приблизительно 10 Мб/с).

Физически на матрицу камеры попадает световой поток. Он представляет собой набор узких световых полос расположенных непрерывно. Ширина каждой такой полосы приблизительно равна ширине оптической щели. Количество этих полос определяется характеристиками оптической призмы. Тем самым, изображение на матрице камеры представляет собой световой поток, прошедший через призму и разложенный на призме.

## **6. Программное обеспечение МоСКа**

В процессе работы по созданию макета был проведен анализ имеющегося в настоящее время программного обеспечения для обработки спектральной информации. Даже поверхностного анализа хватило, чтобы понять, что имеющиеся на рынке программных средств экземпляры предназначены либо под вполне конкретные приборы, задачи и цели, либо являются весьма объемными и труднодоступными ввиду финансовой составляющей – попросту дорогими. Было принято решение о разработке собственного набора программных продуктов для создаваемого спектрального комплекса.

В программном комплексе был использован корреляционный метод обработки данных. Такой выбор был обусловлен поставленной задачей: подтвердить работоспособность прибора на простом алгоритме. В силу дискретности получаемых данных интегралы, приведенные в описании алгоритма, переходят в суммы. Также опускается нормировка спектральных функций, вместо этого лишь усредняется интегральная разность спектральных функций. В качестве меры совпадения спектральных функций используется их

разность. Одной из проблем, связанных с использованием Microsoft Visual Studio при разработке ПО, является наличие порога распознаваемой интенсивности - начиная с некоторого значения интенсивности, она воспринимается как максимальная. Поэтому, в ходе анализа длины волн, на которых в одной из гистограмм исследуемого материала или файла библиотеки наблюдается 1 (то есть максимум интенсивности), исключаются из анализа. С учетом всего вышесказанного, степень совпадения спектральных функций  $S_0$  исследуемого образца и  $S_j$   $j$ -го файла библиотеки определяется следующим образом:

$$C_j = \frac{\sum_i (S_j(\lambda_i) - S_0(\lambda_i))}{mes(I)}.$$

Здесь  $i \in I = \{k : k = \overline{1, N} \mid (S_0(\lambda_k) \neq 0) \vee (S_j(\lambda_k) \neq 0)\}$ , то есть  $I$  - множество индексов длин волн, на которых хотя бы одна из спектральных функций не обращается в 0,  $mes(I)$  - мощность  $I$ , то есть число компонент длин волн (спектральных каналов), на которых обе спектральные функции отличны от нуля. Далее выбирается файл библиотеки с номером  $J$ , дающий наилучшее совпадение:  $J = \arg \min_{j \in J_0} C_j$ , где  $J_0 = \{j : C_j \leq C_j^{\max}\}$  - множество

всех индексов файлов библиотек таких, что значение  $C_j$  для них не выходит за пределы, при которых сразу делается заключение об отсутствии совпадения. При этом комплекс позволяет устанавливать пороговое значение  $C_j^{\max}$  для каждого файла библиотеки. Это дает возможность распознавать каждый из анализируемых для данного пикселя материалов с разной точностью. Например, порог совпадения материала поверхности, соответствующей данному пикселю, с елью может быть установлен 0,05, тогда как с пихтой или сосной - 0,1, если важно выяснить, является ли лес хвойным, и желательно дополнительно определить, ельник ли это. Кроме того, если в ходе анализа для какого-либо файла разница оказывается меньше 0,001, то для него сразу делается заключение о совпадении и дальнейшее сравнение с другими эталонами не выполняется. Это может значительно сократить время анализа в случае, если исследуемый лес почти полностью состоит из одного типа дерева и лишь изредка попадаются другие деревья. В этом случае, если в числе подключенных файлов библиотек присутствует доминирующий тип, то на нем сравнение будет прерываться. Результаты работы алгоритма представлены на рис. 5-9, где каждому из подключенных файлов библиотеки присваивается свой условный цвет, задаваемый при его подключении. Файлы библиотеки набраны из тех же данных, что и спектральные изображения. Для второго набора

эталонов (подключенные для анализа файлы помечены галочками) представлены результаты анализа для двух значений точности.



Рис.5. Спектральное изображение – свертка для набора материалов: картон, каменная стена, резиновый круг, скотч

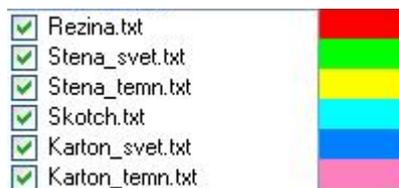


Рис. 6. Файлы библиотеки, подключенные для анализа

## 7. Начальная обработка видеоизображения

В большинстве случаев изображение, получаемое видеокамерой, не может быть использовано полностью. Это происходит из-за особенностей оптической системы прибора. Зону, по этой причине не являющуюся информативной, можно легко определить и не производить ее запись, что позволит уменьшить объем занимаемого дискового пространства и избавит от необходимости ее вычислять и относить к необрабатываемой программой в дальнейшем. На рис. 10 видно, что область изображения, содержащая полезную информацию, мала. Это происходит из-за того, что матрица видеокамеры ввиду своей природы неспособна зафиксировать сигнал в ультрафиолетовом и инфракрасном диапазонах, которые граничат с видимым диапазоном сигнала, зафиксированным на рис.10.



Рис. 7. Результат анализа, заданный порог совпадения – 0.05

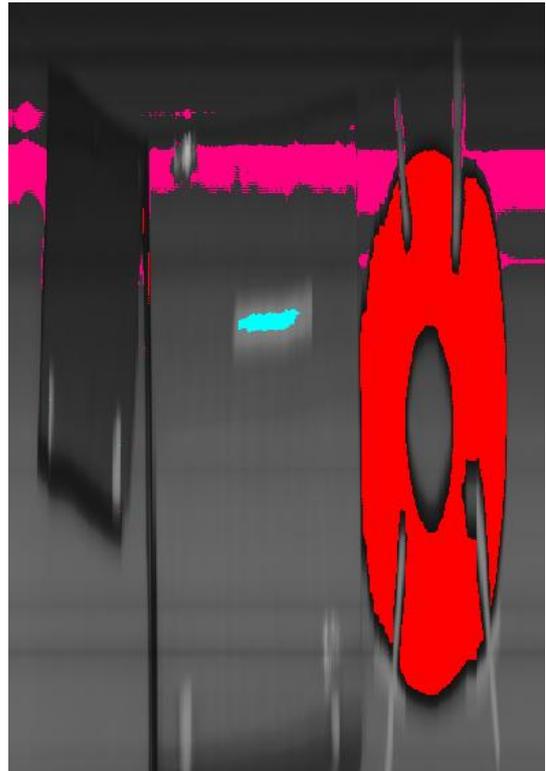


Рис. 8. Результат анализа, заданный порог совпадения – 0.02



Рис.9. Набор эталонов

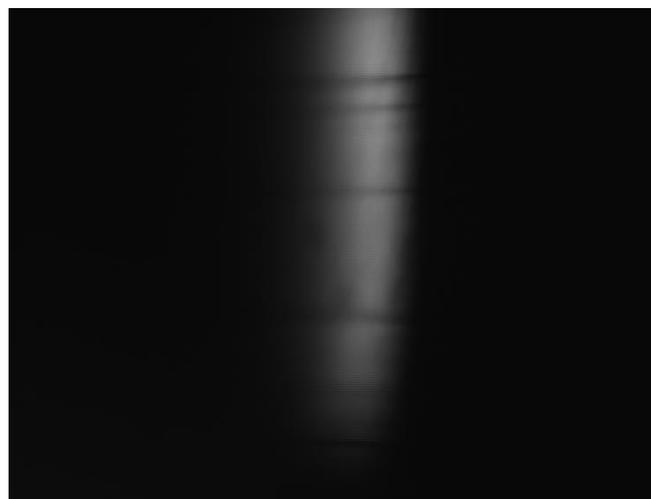


Рис. 10. Пример изображения, получаемого с камеры

По оси абсцисс отложена длина волны, изменяющаяся при полном кадре изображения от 0.4нм до 0.9нм. Такой выбор спектрального диапазона обусловлен свойствами матрицы видеокамеры - приемника (рис. 11).

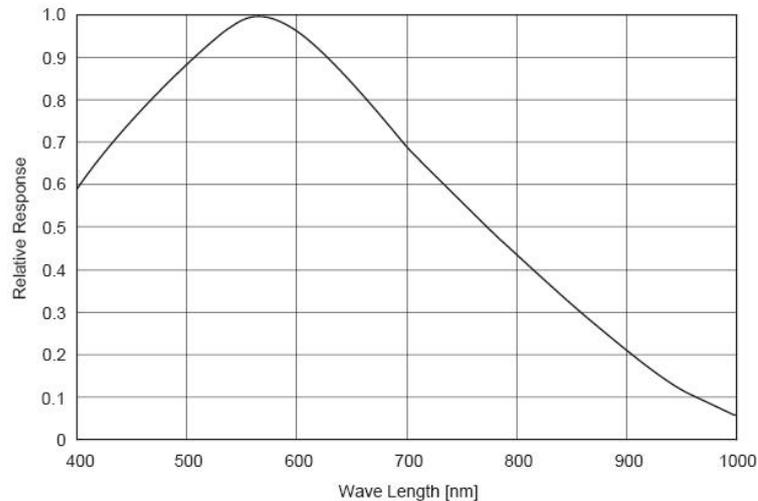


Рис. 11. Спектральная восприимчивость матрицы

По оси ординат отложена относительная интенсивность – координата вдоль щели. Таким образом, при съемке определенных поверхностей, лишь некоторая часть спектра дает интенсивность, заметно отличающуюся от нуля. Понятно, что область с интенсивностью, близкой к нулю почти всюду, не будет давать ощутимого вклада при анализе, и пренебрежение этим вкладом не сильно повлияет на точность анализа, но вместе с тем позволит значительно сократить объем хранимой информации. Поэтому программный комплекс предоставляет возможность выделения *зоны интереса* (той части кадра, которая будет сохранена на жесткий диск) на изображении, получаемом с матрицы видеокамеры во время съемки (рис. 12).

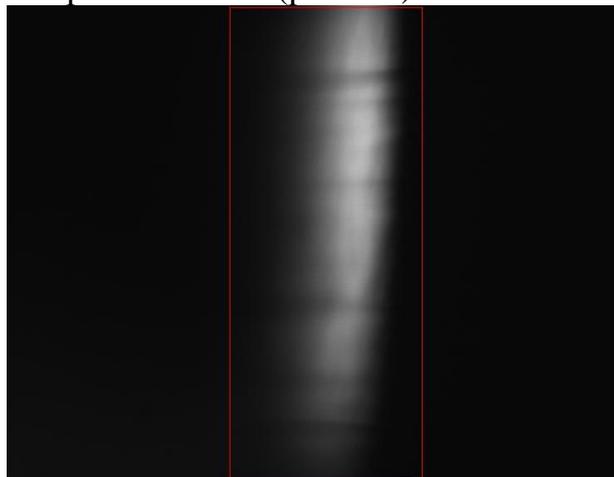


Рис. 12. Выделение зоны интереса

Программный комплекс также позволяет во время съемки отображать гистограмму (зависимость интенсивности от длины волны) для выбранной

пространственной координаты (рис. 13), а также в режиме реального времени рисовать *свертку* - изображение, состоящее из столбцов одной и той же спектральной координаты шириной в один или несколько пикселей скопированных из последовательных кадров или кадров с заданной периодичностью. В итоге мы получаем подстилающую поверхность, снятую гиперспектрометром в одном из спектральных каналов. Задавать такой канал можно на усмотрение пользователя перед началом работы (рис.14). Создание свертки возможно как в реальном времени, так и при работе с записанным видео.

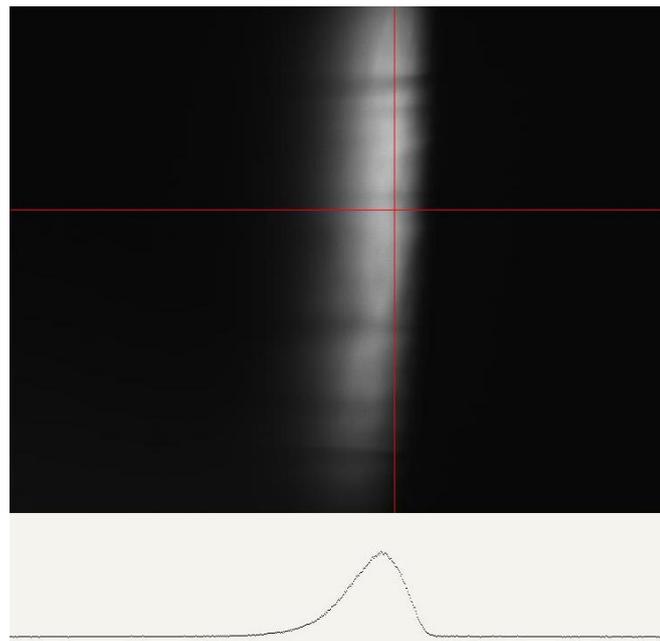


Рис. 13. Гистограмма для указанной мышью строки. Горизонтальная линия в гистограмме соответствует нулевой интенсивности оптического сигнала, попадающего на матрицу

К начальному этапу обработки изображения также можно отнести другие стадии, не представленные в программном комплексе в настоящее время, но планируемые по мере усовершенствования как программного обеспечения, так и самого прибора. Введение этих стадий связано с рядом проблем, возникающих при записи спектральной информации. Первой проблемой является искажение изображения вследствие прохождения через оптические системы прибора, вносящей свои погрешности [3]. В результате изображение получается несколько повернутым. Для исправления этого эффекта достаточно получить изображение какого-либо хорошо известного материала (например, получить линии поглощения атмосферы, как предложено в [3]) и по их положению и положению, которое они должны занимать, определить необходимое преобразование точек изображения. Предполагается, что преобразование можно с хорошей точностью аппроксимировать поворотом спектрального изображения относительно центра. Также необходима точная

калибровка прибора по спектральному разрешению для уточнения спектрального диапазона, в котором работает гиперспектрометр. Хотя для сравнения гистограмм это не является необходимым и позволяет тестировать прибор и алгоритмы. Точная калибровка необходима для анализа изображения по длинам волн, что будет описано ниже, и определения задач, которые может решать Комплекс.



Рис. 14. Полученная свертка

### **8. Анализ изображения по длинам волн**

В программный комплекс был включен созданный в процессе разработки МоСКа алгоритм анализа изображения *по длинам волн*. Цель такого анализа – представление спектрального изображения некоторой поверхности, воспринимаемого человеком как черно-белая фотография, в цветах, примерно соответствующим тем, что воспринял бы человеческий глаз при взгляде на эту поверхность. Суть метода состоит в определении в гистограмме для каждого пикселя доминирующей длины волны и окраске этого в пикселя в условный цвет, ей соответствующий. Таблица соответствия длин волн и цветов представлена на рис.15.

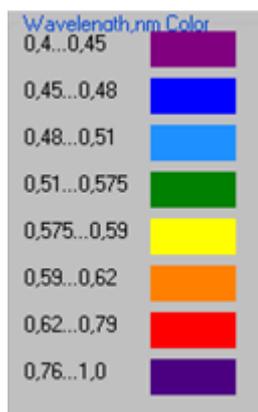


Рис.15. Соответствие длин волн и цветов

В результате спектральное изображение может быть раскрашено в условные цвета, которые заранее присваиваются реальным спектральным диапазонам. Особенность гистограмм, представленных в спектральном изображении, заключается в содержании в большинстве случаев одного четко выделенного пика интенсивности и заметно менее слабых побочных пиков. Это объясняет алгоритм выделения доминирующей длины волны, придающий наибольшее значение основному пику и слабо смещающий эту начальную доминирующую длину волны в зависимости от интенсивностей слева и справа от него. На первой итерации доминирующей длине волны присваивается значение, соответствующее максимальной интенсивности для данного пикселя:  $\lambda_0^D = \arg \max_{\lambda} S_0(\lambda)$ . Далее, для всех длин волн, расположенных

справа от нее, значение сдвигается  $\lambda_{i+1}^D = \lambda_i^D + \frac{S_0(\lambda_i)}{2 * S_0(\lambda_0^D)}$ , а начальное значение в итерационной процедуре принимается  $\lambda_0^D$ .

Аналогичная процедура проводится для длин волн, расположенных слева от  $\lambda_0^D$  (начальное положение для итерационной процедуры - значение длины волны, полученное в предыдущей процедуре):  $\lambda_{i-1}^D = \lambda_i^D - \frac{S_0(\lambda_i)}{2 * S_0(\lambda_0^D)}$ .

Полученная длина волны  $\lambda_f^D$  используется для определения цвета пикселя. Результат анализа по длинам волн представлен на рис. 16.

Изложенный метод обработки полученных данных позволяет провести быстрый предварительный анализ и выбрать те участки полученных изображений, которые в дальнейшем будут подвергнуты дополнительному анализу.

Использование метода анализа по длинам волн несет в себе довольно большую погрешность и не позволяет при дальнейшей работе с выбранными участками учитывать малые изменения в гистограммах на участках, которые не

прошли предварительный анализ. Поэтому необходимо аккуратно использовать данный метод, чтобы не потерять информативность полученного в результате эксперимента материала.



Рис. 16. Результат анализа по длинам волн

Преимущества использования предложенного метода обработки изображений весьма очевидны. Применение анализа по длинам волн позволяет быстро выделить интересующие участки подстилающей поверхности по заданным спектральным параметрам, отделить этот массив полученных данных от общего набора экспериментальных материалов и, тем самым, существенно сократить время дальнейшей обработки. Уменьшение затрат на предварительный анализ экспериментальных данных дает заметное преимущество по времени для принятия решений при требуемой оперативности в решении определенных задач и даже позволяет продлить

время работы МоСКа при использовании в качестве источника питания аккумуляторной батареи.

### **9. Дальнейшие усовершенствования прибора и программного обеспечения**

Важным дополнением, необходимым для полноценной работы гиперспектрометра, является его калибровка.

Четкое определение спектрального диапазона всего Комплекса позволит более точно определить круг задач, для решения которых можно использовать макет гиперспектрометра. Использование имеющейся информации о спектральных и прочих характеристиках составных частей макета не дает полной гарантии, что параметры всего макета совпадут с имеющимися данными для его составных частей. Хотя заметим, что на предварительном этапе работы по тестированию МоСКа и апробации работы разработанного программного обеспечения, использование технических и оптических характеристик компонентов прибора вполне допустимо.

Калибровка прибора по освещенности необходима для усовершенствования работы программного обеспечения, а также для более точного определения требований к регистрирующим устройствам (в частности, к цифровым камерам, ПЗС и активно-пиксельным матрицам [9]) при выборе составных частей МоСКа. В настоящее время разработаны различные способы калибровки (например, [10]).

Рассматривается возможность применения более точного алгоритма анализа ввиду того, что реализованный в настоящее время является весьма простым и разрабатывался для проверки работоспособности ПО и всего прибора. Уже на этапе разработки алгоритма стало ясно, что можно увеличить скорость его работы. Для этого необходимо проанализировать разработанный алгоритм, определить круг параметров, которые необходимо, а самое главное, - возможно изменить или усовершенствовать каким-либо образом.

Планируется обеспечить возможность анализа изображения в строго определенном спектральном диапазоне, который можно будет выбрать в процессе обработки полученных результатов, либо задать на этапе съема оцифрованных данных, что несет в себе большой потенциал для оптимизации как программной части МоСКа, так и его массогабаритных характеристик. Очевидные преимущества применения подобной оптимизации рассмотрим на следующем примере.

Определение общих свойств анализируемой поверхности, например, определение, является ли заснятая часть водной поверхности прибрежной или нет по узкому спектральному интервалу, в котором находится ярко выраженный пик отражения (рис.17), возможно и без записи весьма значительного объема данных. Использование меньшего объема спектральной информации позволит сократить временные затраты на проведение обработки и анализа подстилающей поверхности, что в свою очередь повышает

производительность работы МоСКа. На рис.17 видно, что, анализируя область в диапазоне от 0,1 до 0,8 мкм, можно с определенной долей достоверности определить тип поверхности ввиду того, что область гистограммы от 0,8 мкм и до 4.0 мкм практически не отличаются и их учет при анализе даст одинаковые вклады в функцию – меру совпадения двух гистограмм.

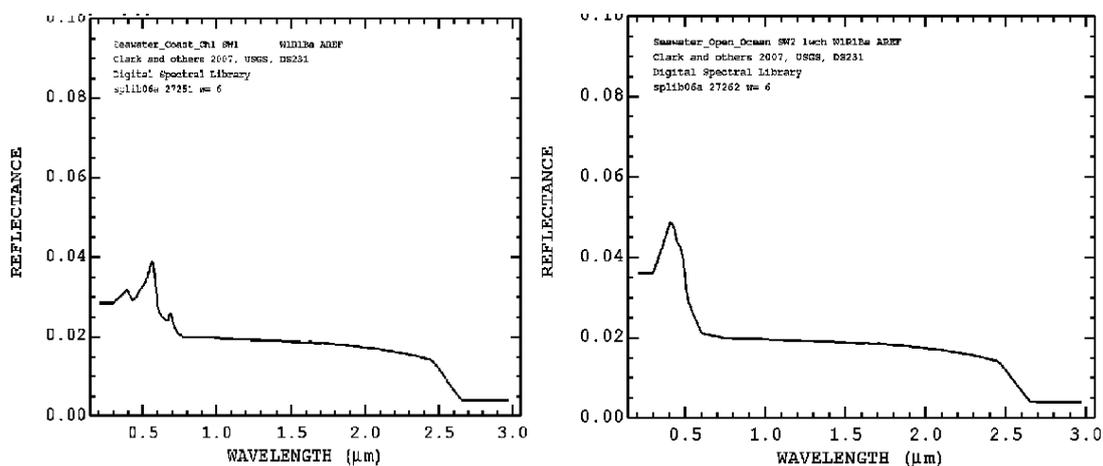


Рис.17. Спектральные функции морской поверхности на побережье (слева) и в открытом море (данные спектральной библиотеки USGS Spectroscopy Lab's splib06 [7])

В целях ускорения анализа полученной информации рассматривается возможность предобработки изображения для выделения на нем областей с похожими гистограммами. Такой подход описан в [11] и позволяет сократить время анализа без потери точности, а также выделить области изображения, являющиеся достаточно большими образованиями и потому представляющие интерес.

## 10. Заключение

В ходе работы на базе известных схем разработана структура спектрометра и изготовлен макет мобильного гиперспектрального Комплекса. Разработаны алгоритмы распознавания гиперспектральных изображений, программное обеспечение для макета, проведено успешное тестирование программ, проведены испытания, показавшие работоспособность алгоритмов и макета спектрометра.

Было показано, что возможно создание макета спектрометра на базе компонентов, не являющихся специализированными для подобного типа задач.

Определены пути дальнейшего усовершенствования мобильного Комплекса в части оптико-механической структуры и части, касающейся программного обеспечения и алгоритмов обработки изображений.

## 11. Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты NN 06-01-00389, 07-01-05004-б, 06-01-03004-б), FiLaS.

Авторы выражают искреннюю благодарность А.К.Платонову за полезные обсуждения и конструктивные замечания.

## Литература

1. M.W. Matthew, S.M. Adler-Golden, A. Berk, G. Felde, G.P. Anderson, D. Gorodetzky, S. Paswaters, M. Shippert, Atmospheric correction of spectral imagery: evaluation of the FLAASH algorithm with AVIRIS data, SPIE Proceedings, Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral and Ultraspectral Imagery IX, 2003.
2. M.F. Hopkins, Multi-spectral two dimensional imaging spectrometer, United States Patent № 5.926.283.
3. Д.В.Воронцов, А.Г.Орлов, А.П.Калинин, А.И.Родионов, И.Б.Шилов, И.Д.Родионов, В.Н.Любимов, А.Ф.Осипов, Использование гиперспектральных измерений для дистанционного зондирования Земли, препринт ИПМ РАН, 2003, № 702.
4. G.H. Poole, Multispectral imaging system for contaminant detection, United States patent № 6,639,665.
5. Johns Hopkins University spectral library, [http://speclib.jpl.nasa.gov/documents/jhu\\_desc.htm](http://speclib.jpl.nasa.gov/documents/jhu_desc.htm)
6. JPL spectral library, <http://speclib.jpl.nasa.gov/>
7. USGS Spectroscopy Lab's splib06, <http://speclab.cr.usgs.gov/spectral-lib.html>
8. Jose M.P. Nascimento, Jose M.B. Dias, Does independent component analysis play a role in unmixing hyperspectral data?, GeoRS(43), No. 1, January 2005, pp. 175-187.
9. А.М. Овчинников, А.А. Ильин, М.Ю. Овчинников. Принцип работы и устройство активно-пиксельных датчиков. Препринт ИПМ им.М.В. Келдыша РАН, 2003г. №85.
10. J.L. Dwyer, F.A. Kruse, A.B. Lefkoff, Effects of empirical versus model-based reflectance calibration on automated analysis of imaging spectrometer data: a case study from the Drum mountains, Utah, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 61, 1247-1254.
11. S.A. Robila, P.K. Varshney, A Fast Source Separation Algorithm for Hyperspectral Imagery, Processing, IEEE Geosci. and Rem. Sens. Symp. 2002. IGARSS'02. 2002. V. 6. 2002. P. 3516–3518.

## Содержание

1. Введение .....	- 3 -
2. Устройство гиперспектрометра .....	- 4 -
3. Методы спектрального анализа .....	- 5 -
3.1. Субпиксельный метод .....	- 5 -
3.2. Корреляционный метод .....	- 7 -
4. Спектральные библиотеки .....	- 8 -
5. Устройство макета .....	- 11 -
6. Программный обеспечение МоСКа .....	- 14 -
7. Начальная обработка видеоизображения .....	- 16 -
8. Анализ изображения по длинам волн .....	- 20 -
9. Дальнейшие усовершенствования .....	- 23 -
10. Заключение .....	- 24 -
11. Благодарности .....	- 25 -
Литература .....	- 25 -