

Нечипас Ю. П., Загорский М. Ю.
Yu. P. Nechipas, M. Yu. Zagorsky

К ВОПРОСАМ ОБ ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА МАТЕРИАЛОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ЦИФРОВОЙ ФОРМЕ

ON ASSESSING THE QUALITY OF DIGITAL REMOTE SENSING MATERIALS

Нечипас Юрий Павлович – кандидат технических наук, доцент кафедры фототопографии и фотограмметрии Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского (Россия, Санкт-Петербург). E-mail: pas.yr@mail.ru.

Mr. Yurii P. Nechipas – PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Phototopography and Photogrammetry Department, Military Space Academy named after A. F. Mozhaysky (Russia, St. Petersburg). E-mail: pas.yr@mail.ru.

Загорский Михаил Юрьевич – кандидат технических наук, преподаватель кафедры фототопографии и фотограмметрии Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского (Россия, Санкт-Петербург).

Mr. Mikhail Yu. Zagorsky – PhD in Technical Sciences, Lecturer, Phototopography and Photogrammetry Department, Military Space Academy named after A. F. Mozhaysky (Russia, St. Petersburg).

Аннотация. Данная статья носит обзорно-аналитический характер. В ней рассматриваются ретроспективно существовавшие методологические подходы в вопросах анализа качества аэро- и космических фотоматериалов дистанционного зондирования как в аналоговой, так и в цифровой формах. Приводятся атрибуты цифрового изображения и возникающие в связи с их особенностями возможные направления исследований.

Summary. This article has a review and analytical character. It examines retrospectively existing methodological approaches to the analysis of the quality of aerial and space remote sensing photographic materials, both in analog and digital forms. Attributes of a digital image and possible research directions arising in connection with their features are given.

Ключевые слова: аналоговое изображение; цифровое изображение; материалы аэрокосмических съемок; фотометрические характеристики изображений; программный комплекс «АРМ-Технолог»; гистограмма изображения.

Key words: analog image; digital image; aerospace survey materials; photometric characteristics of images; software complex «ARM-Technologist»; image histogram.

УДК 528.8

Более полутора веков, начиная с изобретения фотографии (1839 г. – французы Л. Дагер и Н. Ньепс), основным способом получения информации о земной поверхности являлся фотографический, или, как пишут в последнее время, аналоговый. За эти годы менялись способы фиксации изображения объектов местности (камера обскура, чувствительные фотопластинки, целлулоидные фотоплёнки (1871 г. – англ. врач Р. Меддокс)).

В XX и начале XXI вв. производилось регулярное фотографирование земной поверхности, причём в различных диапазонах спектра, с различных летательных аппаратов и спутников (последние серии «Ресурс-Ф», «Комета», «Ресурс ДК», «Ресурс-П»).

Таким образом, методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), т.е. аэросъёмка, а позднее и космическая съёмка, фактически до настоящего времени являлись основным видом аэрокосмической информации о местности.

Естественно, специалисты при рассмотрении полученной информации обращают внимание в первую очередь на её качество, уясняют, какие параметры изображений нуждаются в коррекции. Потребовалась разработка в этом плане методик исследования качества изображений. К оценке качества изображений применимы в основном два критерия: субъективный – на основе

экспертных оценок и количественная оценка, связанная с нахождением абсолютных и сравнительных характеристик фотоизображений [18].

В частности, на первых порах получил широкое распространение на практике сенситометрический метод исследования аэросъёмочных материалов [8; 9; 13], который заключался в определении зависимости оптической плотности D от десятичного логарифма экспозиции $\lg H$, сообщаемой фотографическому слою. Тем самым была впервые установлена количественная связь между оптическим и фотографическим изображением объектов местности. Производным от этой связи являлось семейство характеристических кривых, с помощью которых получали следующие сенситометрические (фотометрические) величины [1; 13] аналогового фотоизображения:

- оптическую плотность (D_i, D_{\max}, D_{\min});
- среднее значение оптической плотности (D_{cp});
- плотность вуали (D_o);
- диапазон оптических плотностей (ΔD);
- фотографическую широту (L);
- коэффициент контрастности (γ);
- общую и спектральную светочувствительность (S и S_λ).

Сенситометрические исследования выполнялись не только для светочувствительных аэроплёнок, но и для аэроснимков, изготовленных на фотобумаге, и диапозитивов на стекле.

Кроме сенситометрических характеристик специалисты в данной области всегда обращали внимание ещё на оценку резкости фотоизображений. Данная характеристика является важнейшим показателем, во многом определяющим пригодность изображения к дальнейшей обработке. Оценка резкости изображения определяется резольвометрическими характеристиками. Они определяют способность фотоматериалов отдельно воспроизводить мелкие, близко расположенные детали объекта фотографирования. В результате резольвометрических испытаний определяются параметры, обуславливающие резкость фотоизображения. К ним относятся:

- максимальная разрешающая способность (R_{\max});
- резольвометрическая широта (L_R) как разность логарифмов экспозиций, в пределах которой изменение разрешающей способности не превышает $0,8R_{\max}$;
- резольвометрическая плотность (D_R) – оптическая плотность, соответствующая максимальному значению разрешающей способности R_{\max} .

Наряду с разрешающей способностью R используют и другой критерий, определяющий способность фотослоя воспроизводить контрасты объектов местности – пространственно-частотную характеристику (ПЧХ). Для описания ПЧХ широкое применение нашли преобразования Фурье, которые удобно применять для пространственно-частотного описания фотографируемых объектов.

Определение перечисленных выше характеристик потребовало многочисленного парка исследовательской аппаратуры, вспомогательного оборудования и принадлежностей. Для изучения и просмотра первичных фотосъёмочных материалов были созданы специальные лаборатории с монтажно-просветными столами (СМП), простейшими приборами: дешифрирования негативов (ПДН-5), приборами камерального дешифрирования фильмов (ПКДФ), интерпретоскопами, оптическими пантографами монокулярными (ОПМ-2), моно- и бинокулярными микроскопами, универсальными измерительными микроскопами (УИМ) и др.

В качестве аппаратуры для исследования характеристик и свойств фотографических материалов использовались сенситометры, денситометры, спектрографы, микроденситометры, оптические скамьи, гониометры, коллиматоры, резольвометры, фотометры, микрофотометры и др. Безусловно, нужны были специально подготовленные специалисты в данной области. Были изданы учебники, методические пособия, руководства, в которых давались обстоятельные и детальные методики оценки качественных характеристик фотографических изображений местности, полученных в результате аэрокосмических съёмок [1; 5; 8; 9; 10].

В то же время в связи с бурным внедрением с середины 1980-х гг. компьютерной техники, средств телекоммуникации, считывающих устройств свершилась, по сути, миниреволуция в

области аналоговой фотографии, просуществовавшей более полутора веков. Появились принципиально новые приёмники излучения, позволяющие записывать излучение от объектов местности в кодированной цифровой форме. Под термином «цифровые изображения» понимают растровое изображение, полученное в результате оцифровки черно-белых полутоновых аэрофотоматериалов на сканирующих приборах (сканерах типа ФС-30, Delta-Scan и др.), либо цифровое изображение, полученное сразу с помощью специализированных [6; 14; 15; 20] цифровых фотограмметрических камер (см. рис. 1).

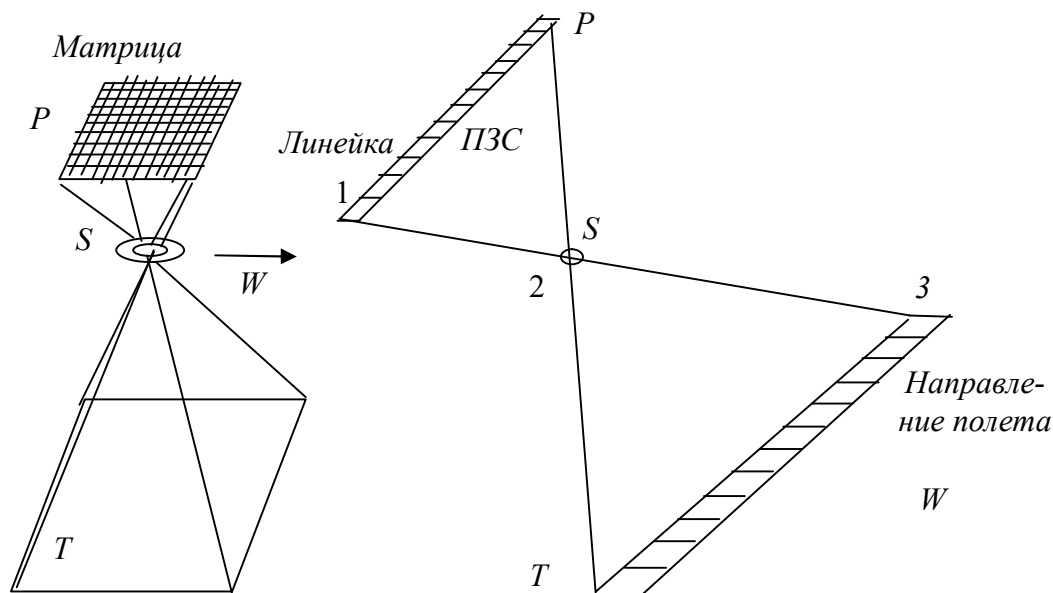


Рис. 1. Принцип формирования кадрового изображения местности на ПЗС-матрицу и сканерного изображения линейкой ПЗС

В первом случае изображение строится, как и в кадровой аналоговой аэросъёмке в центральной проекции. Однако размер кадра, т.е. площадь и форма, будут отличаться от традиционных форматов (18×18, 23×23, 30×30 см). Во втором случае с применением ПЗС-линейки реализуется принцип сканерной съёмки, заключающийся в последовательном проектировании на поверхность электронной чувствительной линейки изображений узких полос местности, перпендикулярных движению носителя. Следовательно, изображение в плоскости линейки будет представляться в центральной проекции. В направлении полёта изображение уже будет не в центральной проекции. Для получения цельного изображения местности требуется соответствующая программная обработка.

Таким образом, вместо плёночного светочувствительного материала в качестве приёмника излучения стали использовать оптоэлектронные сенсорные микроэлементы, названными приборами с зарядовой связью – ПЗС-матрицы или ПЗС-линейки. Итогом работы этих устройств явилось записанное на каком-либо носителе цифровое изображение, которое без труда воспроизводится на экране монитора компьютера.

Новая форма представления информации об объектах местности носит специфический характер. Она обусловлена особенностями цифровых фотокамер [3; 6; 15]. Прежде всего, необходимо обратить внимание на одну из главных её характеристик, а именно *разрешение матриц*, т.е. количество светочувствительных элементов (сенсоров). Например, для аэросъёмочной камеры ДМС оно составляет 13 824×7680, а «UltraCam-D» – 11 500×7500 элементов, что после перемножения равно соответственно 106 млн и 86 млн элементов (или 106 и 86 Мп).

Но эта характеристика будет ещё недостаточной для оценки разрешения матриц. Необходимо знать ещё размер самого электронного элемента (Δ), который принято называть пикселем. Чем большее количество пикселей на площади матрицы и чем меньше размер самого пикселя, тем

выше будет разрешение самого изображения. Как видим, в данном случае под разрешением изображения понимается несколько иное понятие, нежели в аналоговой фотосъёмке. Там для плёночных фотокамер использовали другую характеристику – некую результирующую разрешающую способность системы «оптическая система – плёнка».

Применительно к цифровым камерам качество снимков принято характеризовать *пространственным разрешением* или *разрешением на местности*. То есть, проще говоря, под этой характеристикой необходимо понимать проекцию размера одного пикселя на местности. Однако такой подход не корректен. В соответствии с теоремой Котельникова [15], чтобы не утратить объект на цифровом изображении, разрешение на местности должно быть равно удвоенной площади пикселя. Например, разрешение камеры 4 м означает, что на цифровом снимке объект можно различить размером не меньше 4 м, но при этом размер пикселя на местности должен в проекции составлять не более 2 м!

Представленные рассуждения о разрешении цифрового изображения будут не полными, т.к. не только количество и размер пикселя надо учитывать, но и реальные *размеры самой матрицы*, которые существенно могут отличаться друг от друга. Для неметрических цифровых камер обычно размер матрицы указывают по её диагонали в дюймах (1/3,2"; 1/2,7"; 1/2,5"; 1/1,8"). Такое обозначение не позволяет точно вычислять реальный размер матрицы, зато даёт возможность сравнивать между собой матрицы различных типов.

Размер матрицы влияет на глубину резко изображаемого пространства (ГРИП) – чем больше матрица, тем меньше глубина резкости при равном угле зрения и одинаковом количестве пикселей. Кроме того, у больших матриц естественнее и натуральнее цвета.

Необходимо для практических целей помнить, что от отношения фокусного расстояния объектива к размеру матрицы зависит угол поля зрения. Так, например, для матрицы 15×22 мм объектив с фокусным расстоянием 30 мм считается нормальным, для плёнки 24×36 мм – широкоугольным, а для матрицы 5×7 мм – длиннофокусным.

Однако использование отношения фокусного расстояния объектива к диагонали матрицы не всегда удобно, для классификации систем «объектив-матрица» используется понятие эквивалентного фокусного расстояния (ЭФР). ЭФР данной связки «объектив-матрица» – это такое значение фокусного расстояния объектива, при котором на 35-миллиметровой плёнке получается изображение с тем же углом поля зрения, что и при использовании данной связки.

Обратим внимание на ещё одно обстоятельство, связанное с такой характеристикой, как *светочувствительность*. Так, при выборе типа фотоплёнки указывают *светочувствительность* (в единицах государственного стандарта 32, 60, 120, 250 единиц), а для цифровых камер также существует типичный диапазон светочувствительности – 50...1600 единиц ISO (International Standards Organization – Международная организация стандартов). Причём отличительной особенностью цифровых камер в сравнении с плёночными является возможность менять светочувствительность во время съёмки, которая достигается «усилением» сигнала матрицы. Но при этом, по мнению специалистов [15], надо считаться с побочным эффектом, называемым шумами. Светочувствительность и шум матрицы зависят от её размера. Чем больше размер матрицы, тем более высокая требуется светочувствительность (и, следовательно, короче выдержка).

Использование цифровых камер связано с ещё одной характеристикой, которая ранее фотографами называлась фотографической широтой – *динамическим диапазоном и разрядностью*. Динамический диапазон – это способность сенсоров матрицы различать количество тонов серого (уровней яркости) между абсолютно белыми и абсолютно чёрными цветами объектов местности. Чем выше динамический диапазон, тем выше достоверность изображения, а с ней и возможность дешифрирования. Самый высокий динамический диапазон пока у негативных плёнок. Не случайно в некоторых кинотеатрах до сих пор пользуются плёночными аппаратами.

Под разрядностью цифровой матрицы следует понимать количество уровней, использующихся для передачи всего цветового канала объекта.

Образование цифрового изображения происходит (см. рис. 1) за счёт регистрации на чувствительный элемент (пиксель) приёмника излучения световых лучей от объектов местности.

Причём на один пиксель поступает электрический заряд, пропорциональный интегральной яркости объектов в пределах проекции его на местность.

Чувствительный элемент (ячейка) ПЗС-матрицы или ПЗС-линейки представляет собой металлическую пластину I , называемую затвором, отделённую от полупроводника 3 слоем окисла 2 (см. рис. 2, 3).

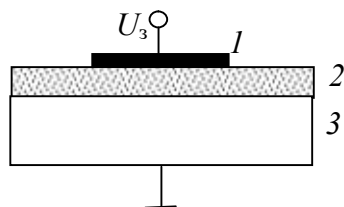


Рис. 2. Принцип строения приёмника излучения на базе ПЗС

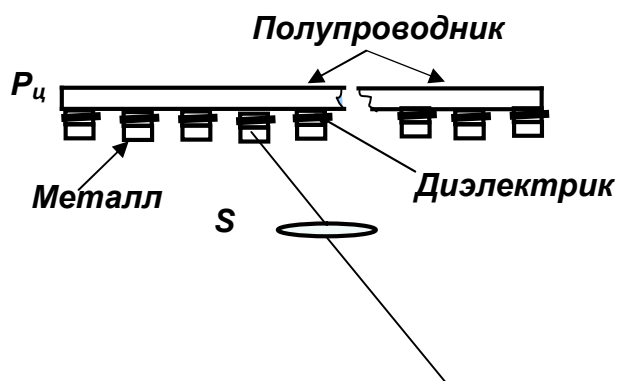


Рис. 3. Структурная схема устройства ОЭС на базе ПЗС: S – объектив; $P_{ц}$ – цифровой фотоснимок

Полупроводник играет роль подложки, он может быть n - или p -типа, а к затвору прикладывается напряжение той или иной полярности по отношению к подложке. Полупроводник должен иметь высокую чувствительность к различным диапазонам оптического излучения. Данному требованию удовлетворяет кремний, используемый в 96 % приборов микроэлектроники, но ещё перспективнее использовать германий и арсенид галлия.

Наиболее тонким (примерно 0,1 мкм), а поэтому наиболее уязвимым слоем в МОП-конденсаторе является диэлектрик 2 , который обладает малой проводимостью и высоким напряжением пробоя. Этим требованиям удовлетворяет система «кремний-двуокись кремния» – основа МОП-структур.

Металлическая пластина I в последнее время изготавливается из поликристаллического кремния. В оптико-электронной системе (ОЭС) инфракрасного диапазона затворы (электроды) изготавливают из титана и нихрома.

Преимуществом технологии, основанной на использовании приборов с зарядовой связью, является высокая геометрическая точность изображения, которая достигается за счёт того, что положение каждого элемента в матрице (линейке) ПЗС точно известно (за счёт юстировки и калибровки). К другим преимуществам ОЭС на базе ПЗС как формирователей изображения относятся следующие свойства:

- работа при малых электрических напряжениях;
- незначительные размеры;
- высокая надёжность и чувствительность.

Сигнал (информация о местности) считывается с каждого элемента приёмника излучения, в результате чего получается изображение местности с разрешением, определяемым размерами самого чувствительного элемента.

И всё же главным достоинством ОЭС ДЗЗ, кроме перечисленных выше, является то, что они позволяют получать данные в цифровой форме непосредственно на борту искусственного спутника Земли (ИСЗ) и передавать их на наземные пункты, т.е. обеспечивают высокую оперативность получения информации о местности.

В США ОЭС ДЗЗ нашли своё применение с 1972 г. в плане исследования природных ресурсов Земли при запусках ИСЗ серии Landsat. Затем получаемая ими информация стала широко использоваться Картографической службой министерства обороны США для дешифрирования почвенно-растительного покрова при создании и обновлении топографических и специальных карт, а

также при создании баз цифровых данных о рельефе местности. В серии последних спутников Landsat информация о местности подобными системами получалась с разрешением в несколько метров.

Значительный прогресс в развитии средств ДЗЗ на матрицах ПЗС достигнут Францией (космическая система СПОТ). Получаемая с её помощью информация о местности предназначается и для решения задач картографирования. Главным достоинством системы СПОТ является то, что она позволяет в автоматизированном режиме создавать цифровые модели рельефа местности.

Как уже приведено выше, сложилось два способа образования цифрового изображения:

1. перевод фотометрических плотностей аналогового снимка путем сканирования в цифровую форму;
2. фиксация в реальном режиме времени оптического изображения объектов местности на приёмники излучения в виде ПЗС-матриц или ПЗС-линеек.

Полученное тем и иным способом цифровое изображение в сравнении с обычной съёмкой местности обусловлено целым рядом особенностей, связанных с принципами формирования, записи данных, их накопления, воспроизведения, копирования, обработки и хранения.

Фотограмметрическая обработка материалов ДЗЗ, полученных с помощью ОЭС и выданных на наземном пункте в виде фотоснимков, не отличается от традиционных технологий работы с аэрофотоснимками или космическими фотоснимками. Важнейшие преимущества цифровых изображений – известные координаты пикселей, которые реализуются обработкой их на современных цифровых фотограмметрических станциях (ЦФС), а также возможность электронной оценки и коррекции самого изображения при визуальном рассматривании его на экране монитора. В рамках нашей статьи остановимся именно на втором преимуществе.

Как только появилась необходимость работы с цифровым изображением, специалисты заметили, что получаемые с помощью ОЭС цифровые фотоснимки, визуализированные на экране монитора, получаются, как и в аналоговой фотосъёмке, с различной степенью тональности, яркости, контраста и т.п. Поэтому возникла потребность создания программного обеспечения, дающего возможность определения характеристик и коррекции цифровых изображений.

Одной из первых появилась программа Photoshop, позволявшая на любительском уровне обрабатывать цифровые фотоснимки. Затем началось активное внедрение автоматизированных систем фотограмметрической обработки цифровых изображений – «Фотомод», «Панорама», «Фотоплан», «Сканекс», из зарубежных – «Интеграф», «Эрдас», «Энви» и др. В этих системах программное обеспечение позволяет на первом этапе, до фотограмметрической обработки, произвести оценку качества исходных изображений, выполнить их коррекцию, а на этапе сформированных цифровых документов осуществить их окончательное приведение к нормальному восприятию глазами человека.

Возьмём, к примеру, обработку матрицы исходного изображения (МИИ) в комплексе «Фотоплан». После сканирования в стандартном графическом формате TIFF, BMP или PCX требуется выполнить комплекс работ, связанный с обеспечением максимальных удобств оператору для наблюдения и измерения необходимых точек на цифровом изображении. Для выполнения этих работ в комплексе «Фотоплан» предусмотрены следующие пункты меню: «конвентирование» – преобразование МИИ из формата TIFF (PCX, BMP) во внутренний формат; «визуализация» МИИ на экране монитора; «сервис» – обзорное изображение, гистограммы всего изображения, оконного фрагмента, района креста (100×100), инвентирование и разворот изображения; «настройки» – исходный масштаб изображения, увеличить или уменьшить масштаб изображения, измерить увеличение и др.

Наиболее успешные исследования, регламентирующие процесс автоматизированного определения основных характеристик показателей качества аэрокосмической информации в цифровом виде, были выполнены сотрудниками Госцентра «Природа» под общим руководством генерального директора Ю. П. Киенко. Результатом их исследований явилось «Руководство по оценке качества исходных материалов аэрокосмических съёмок и производной продукции в цифровой и аналоговой форме» [9]. Исследования были выполнены на аппаратном программном

комплексе «АРМ-Технолог», на котором реализованы специализированные технологические программы под общим названием «Анализ-2002». С их использованием возможно определение следующих характеристик цифрового изображения (см. табл. 1).

Таблица 1

Характеристики цифровых изображений

Наименование характеристик	Обозначение
Изображение может получаться в 2-х проекциях: - центральной (матрицы ПЗС) - нецентральной (линейки ПЗС)	$L \times M$, мкм L , мкм
Физические размеры матрицы или длина линейки	мм
Разрешение, размер электронного сенсора, пикселя	Δ , мкм
Количество электронных чувствительных элементов, пикселей	N , пикс
Диапазон используемых кодов яркости, количество тонов	ΔB
Характеристики цифрового изображения: - по денситометрическому профилю - по частотно-тоновой характеристике	ДП ЧТХ
Количество уровней квантования	0...256
Разрядность, радиометрическое разрешение, сколькими тонами передаётся изображение	n , бит\пикс
Разрешение на местности, проекция пикселя	R_m , м
Объём памяти для хранения полутонового сканированного изображения или матрицы, линейки ПЗС	V , МБ или ГБ
Светочувствительность матрицы	Единицы ISO
Формат записи цифрового изображения	JPEG, TIFF, RAW

При запуске данной программы производится загрузка исследуемого изображения, вводится рассчитанное в соответствии с масштабом значение апертуры сканирования. Далее по намеченным трассам сканирования определяется разрешающая способность, по методам выполнения гистограммных преобразований (см. рис. 4) улучшается визуальное качество выводимого на экран изображения. Однако при этом исходный файл цифрового изображения не изменяется. К тому же гистограмма даёт оценку изображения только в локальной области, в районе креста, в остальной части окна оно будет сильно искажено, что, безусловно, является недостатком.

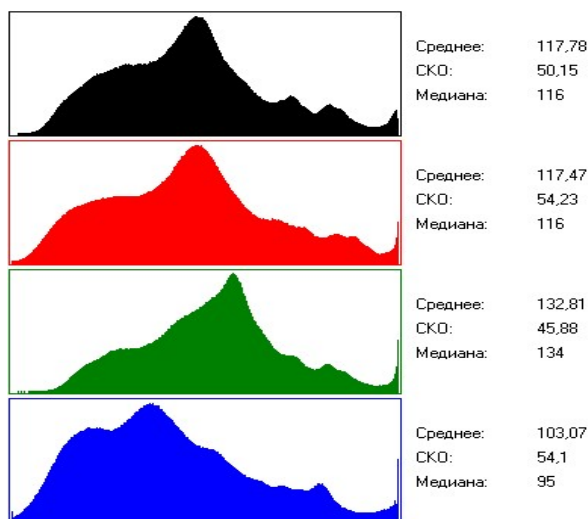


Рис. 4. Типичное представление визуализированных гистограмм на экране монитора компьютера

Анализируя в целом возможности данной программы, можно признать её вполне работоспособной и готовой к применению, достаточно лишь приобрести программное обеспечение.

С другой стороны, для оценки качества цифровых изображений специалисты используют встроенные в специализированные программные фотограмметрические комплексы частные программы с набором различных опций, позволяющих влиять на качество используемых изображений. Вместе с тем применение на практике этих опций носит субъективный характер. Необходимы нормативная база, поясняющие методики правил применения и последовательности использования опций.

Таким образом, с переходом на обработку первичной информации о местности в цифровую форму необходимо выработать, упорядочить и принять к практическому использованию принципиально иные оценочные критерии по сравнению с аналоговой фотосъёмкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аэрофотосъёмка. Метрология и оценка качества аэрофотосъёмки / О. И. Ануфриев и др. – СПб.: Изд-во филиала ВИУ, 1999. – 207 с.
2. Цифровая обработка изображений в информационных системах: учеб. пособие / И. С. Грузман и др. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. – 168 с.
3. Кашкин, В. Б. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений: учеб. пособие / В. Б. Кашкин, А. И. Сухинин. – М.: Логос, 2004. – 264 с.
4. Кадничанский, С. А. Сравнительный анализ материалов цифровой АФС и космической съёмки для создания и обновления карт / С. А. Кадничанский // Геопрофи. – 2009. – № 4. – С. 4-8.
5. Книжников, Ю. Ф. Аэрокосмические методы географических исследований: учеб. для вузов / Ю. Ф. Книжников, В. И. Кравцова, О. В. Тутубалина. – М.: Академия, 2004. – 336 с.
6. Олейник, С. В. Цифровые камеры для аэрофотосъёмки / С. В. Олейник, В. Б. Гайда // Геопрофи. – 2006. – № 4. – С. 45-51.
7. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
8. Руководство по аэрофотосъёмке в картографических целях (РАФ-89) / отв. ред. А. И. Лосев. – М.: РИО, 1989. – 104 с.
9. Руководство по оценке качества исходных материалов аэрокосмических съёмок и производной продукции в цифровой и аналоговой форме. М.: ЦНИИГАиК, 2003. – 36 с.
10. Савиных, В. П. Аэрокосмическая фотосъёмка: учеб. для вузов / В. П. Савиных, А. С. Кучко, А. Ф. Стеценко. – М.: Картгеоцентр-Геодиздат, 1997. – 378 с.
11. Прэтт, У. Цифровая обработка изображений / У. Прэтт. – М.: Мир, 1982. – Т. 1-2.
12. Тропченко, А. Ю. Методы сжатия изображений: учеб. пособие / А. Ю. Тропченко, А. А. Тропченко. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2009. – 108 с.
13. Фотографические работы в фотограмметрическом производстве: пособие. – М.: РИО, 1989. – 152 с.
14. Хрущ, Р. М. Сканирование фотоснимков: учеб. пособие / Р. М. Хрущ. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 2007. – 108 с.
15. Хрущ, Р. М. Фотограмметрия: учеб. / Р. М. Хрущ. – СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2011. – 541 с.
16. Ядлонский, А. Н. Цифровое фото. Полный курс / А. Н. Ядлонский. – М.: АСТ; Минск: ХАРВЕСТ, 2005. – 302 с.
17. Шлихт, Г. Ю. Цифровая обработка цветных изображений / Г. Ю. Шлихт. – М.: Изд-во ЭКОМ, 1997. – 336 с.
18. Монич, Ю. И. Оценки качества для анализа цифровых изображений / Ю. И. Монич, В. В. Старовойтов // Искусственный интеллект. – 2008. – № 4. – С. 378-386.
19. Сименеев А.А. Оценка качества материалов аэрофотосъёмки и цифровых изображений: методические указания / А. А. Сименеев. – СПб.: Изд-во СПбГУ, 1999. – 20 с.
20. Ракурс: программные решения в области геоинформатики, цифровой фотограмметрии и дистанционного зондирования: официальный сайт [Электронный ресурс]. URL: <http://www.racurs.ru>.