

УДК 528.831.2:528.7

DOI: 10.33764/2411-1759-2022-27-1-61-70

## ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЦИФРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В РАЗЛИЧНЫХ ДИАПАЗОНАХ СПЕКТРА

*Дмитрий Викторович Филиппов*

Научный геоинформационный центр Российской академии наук (НГИЦ РАН), 119019, Россия, г. Москва, ул. Новый Арбат, 11, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, тел. (963)716-04-32, e-mail: Gislab@ngic.ru

*Даниил Дмитриевич Рулёв*

Научный геоинформационный центр Российской академии наук (НГИЦ РАН), 119019, Россия, г. Москва, ул. Новый Арбат, 11, младший научный сотрудник, тел. (985)780-12-31, e-mail: mirmidonez720@yandex.ru

*Иван Николаевич Чурсин*

Научный геоинформационный центр Российской академии наук (НГИЦ РАН), 119019, Россия, г. Москва, ул. Новый Арбат, 11, младший научный сотрудник, тел. (919)778-96-58, e-mail: chursin.ivan93@gmail.com

В статье представлены результаты исследований изменения разрешающей способности изображения в зависимости от длины волны излучения. В качестве тестового объекта для фотографирования использовались изображения радиальных мир. Съемка выполнена двумя цифровыми фотоаппаратами с принципиально разными матрицами, которые используются на беспилотных летательных аппаратах (БПЛА). Фотосъемка проведена с заданными значениями выдержек, что позволило определить изменение спектральной разрешающей способности от количества падающего на матрицы света. В результате выполненного исследования осуществлена оценка влияния спектрального состава падающего на матрицу света на величину разрешающей способности изображения. Изменение разрешающей способности получаемого изображения от спектрального состава света, падающего на матрицу при экспозиции, представляет практический научный интерес при выполнении цифровой съемки БПЛА в целях расчета вегетационных индексов природных и техногенных ландшафтов.

**Ключевые слова:** цифровая аэросъемка, цифровая фотокамера, разрешающая способность, цифровой снимок, освещенность, радиальные миры, спектральные диапазон, цветные оптические стекла

### *Введение*

Для мониторинга природно-техногенных ландшафтов в настоящее время широко используется цифровая аэрофотосъемка с применением беспилотных летательных аппаратов. Качество изображений, получаемых цифровыми фотографическими системами, во многом зависит от их разрешающей способности. Разрешающая способность – это величина, определяющая минимальный размер объекта, фиксируемого на изображении [1]. Фотографическое изображение ландшафта получается, как известно, в результате регистрации отраженного светового потока от ландшафта при его освещении естественным излучением, т. е. освещением от Солнца. Освещенность Солнца

представляет собой сложное электромагнитные колебание, состоящее из многочисленных длин волн, которые визуальное в силу свойств нашего зрения воспринимаются как цветные и увеличивают количество воспринимаемой информации. В этой связи изучение влияния освещенности на величину разрешающей способности светочувствительного элемента фотоаппарата, установленного на БПЛА, представляет актуальную задачу.

### *Постановка задачи*

Изображения земной поверхности с помощью цифровых фотографических средств получаются в результате воздействия определенного количества света на светочувстви-

тельный элемент матрицы. В статье рассмотрены вопрос влияния освещенности на разрешающую способность цифровой фотографической системы при выполнении съемки в различных диапазонах спектра. Расчет раз-

решающей способности  $R_{из}$  изображения при съемке в различных спектральных диапазонах выполнялся с использованием цветных (RGB) изображений радиальных мир на тестовом объекте (рис. 1, б).

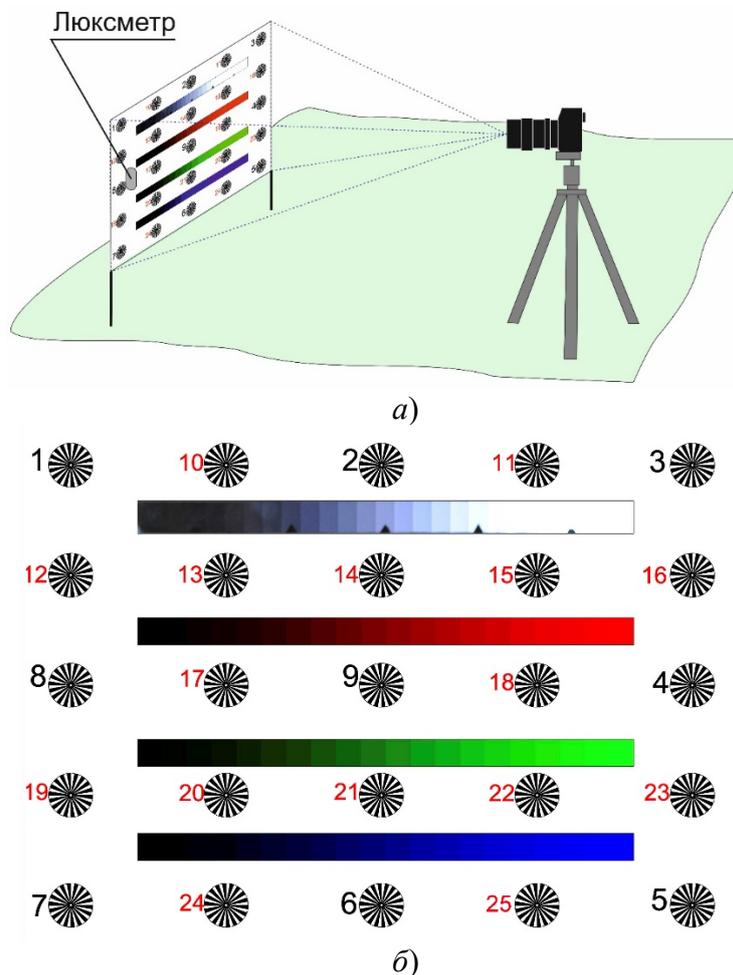


Рис. 1. Схема фотографирования тестового объекта и изображение тестового объекта [12]:  
 а) схема фотографирования тестовой миры; б) тестовая мира

Разрешающая способность определялась по формуле [2]

$$R = \frac{k}{\pi \cdot d}, \quad (1)$$

где  $k = 36$  – число секторов радиальной миры,  $d$  – диаметр кружка размытия.

Разрешающая способность измеряется числом линий на 1 мм [1, 3, 4–6]. Величину разрешающей способности камеры в разных диапазонах длин волн необходимо знать для выполнения автоматизированной обработки цифровых изображений земной поверхности.

Исходя из этого, была поставлена задача исследовать изменение величины разрешающей способности изображений, получаемых цифровыми фотоаппаратами в различных спектральных диапазонах, с целью получения качественного изображения, при их использовании на БПЛА.

### Выбор цифровых камер

В исследовании рассмотрено влияние спектрального состава действующего света на цифровую матрицу съемочной фотографической системы. Для получения светового по-

тока различного спектрального состава, в качестве светофильтров в эксперименте использовались цветные стекла с заданными спектральными характеристиками. Состав стекол выбирался свободно с учетом различных участков их спектральных характеристик, представленных в таблице. В шестой графе таблицы указана максимальная длина волны светового потока, пропускаемая цветным стеклом. В графе 5 таблицы приведен цвет, пропускаемый цветным стеклом (маркировка фильтра). Для выполнения исследования использовался специальный тест, состоящий из отдельных радиальных мир. При выполнении съемки с помощью БПЛА, часто для получения более качественных изображений, используют зеркальные камеры. Однако, что-

бы получать качественные материалы, нужно не только иметь хорошую аппаратуру, но и знать также влияние различных факторов и условий съемки на разрешающую способность в различных спектральных диапазонах. Для данного исследования использовались два цифровых фотоаппарат фирмы Nikon. Фотографирование тестового объекта выполнялось с разными выдержками и при разных условиях освещенности (до полудня и после полудня) [7]. Стоит заметить, что марка фотоаппарата для данного исследования значения не имеет, значение имеет, какой тип и модель светочувствительного элемента в нем установлены. Используемые цифровые зеркальные камеры имеют принципиально разные светочувствительные матрицы.

Спектральная разрешающая способность цифровых камер

Выдержка	№ мира	Разрешающая способность $R$ (лин/мм)		Фильтр	Длина волны, на которой фильтр имеет максимум пропускания [23] (нм)
		Sony IMX-038-BQL	Sony ICX-413-AQ		
1/3	9	28,02547771	38,21656051	сс-8	410
	9	33,18806571	38,21656051	сс-5	420
	9	35,03184713	56,05095541	зс-6	520
	9	29,3289883	66,37613141	жзс-9	540
	9	24,02183803	63,05732484	жс-3	560
	9	57,32484076	68,17008091	пс-7	650
	9	46,70912951	60,05459509	жс-20	660
	9	24,02183803	43,48781024	кс-14	690
	9	57,32484076	68,17008091	пс-7	710
1/4	9	27,71750542	35,03184713	сс-8	410
	9	32,33708966	41,34906547	сс-5	420
	9	37,09254402	50,44585987	зс-6	520
	9	27,71750542	66,37613141	жзс-9	540
	9	28,34037071	63,05732484	жс-3	560
	9	58,6579766	68,17008091	пс-7	650
	9	45,04094631	60,05459509	жс-20	660
	9	20,34107253	37,09254402	кс-14	690
	9	58,6579766	68,17008091	пс-7	710
1/15	9	25,47770701	28,02547771	сс-8	410
	9	20,67453273	33,18806571	сс-5	420
	9	31,13941967	38,80450759	зс-6	520
	9	27,71750542	68,17008091	жзс-9	540
	9	30,02729754	56,05095541	жс-3	560
	9	38,21656051	53,66580838	пс-7	650
	9	34,55195882	68,17008091	жс-20	660
	9	11,51731961	41,34906547	кс-14	690
	9	38,21656051	53,66580838	пс-7	710

Продолжение таблицы

Выдержка	№ миры	Разрешающая способность $R$ (лин/мм)		Фильтр	Длина волны, на которой фильтр имеет максимум пропускания [23] (Нм)
1/20	9	15,19453611	25,22292994	сс-8	410
	9	19,86057475	28,99187349	сс-5	420
	9	27,41622819	38,80450759	зс-6	520
	9	25,22292994	58,6579766	жзс-9	540
	9	29,67403522	57,32484076	жс-3	560
	9	39,41082803	44,25075427	пс-7	650
	9	35,03184713	68,17008091	жс-20	660
		–	29,3289883	кс-14	690
	9	39,41082803	44,25075427	пс-7	710
1/30	9	13,48819783	–	сс-8	410
	9	14,41310282	–	сс-5	420
	9	25,47770701	–	зс-6	520
	9	22,7233603	–	жзс-9	540
	9	26,55045256	–	жс-3	560
	9	37,64616408	–	пс-7	650
	9	35,03184713	–	жс-20	660
		–	–	кс-14	690
	9	37,64616408	–	пс-7	710
1/45		–	–	сс-8	410
	9	19,86057475	–	сс-5	420
	9	26,55045256	–	зс-6	520
	9	24,02183803	–	жзс-9	540
	9	24,72836268	–	жс-3	560
	9	37,64616408	–	пс-7	650
	9	31,92775941	–	жз-20	660
		–	–	кс-14	690
	9	37,64616408	–	пс-7	710

В эксперименте использовалась ПЗС-матрица Sony ICX-413-AQ, а также КМОП-датчик Sony IMX-038-BQL. ПЗС-матрица Sony ICX-413-AQ имеет размер  $23,7 \times 15,5$  мм [8–11] и ее разрешение составляет 6 мегапикселей, максимальный размер снимка при этом составляет  $3\,008 \times 2\,000$  пикселей. Светочувствительность матрицы находится в пределах от 200 до 6 400 единиц ISO. 12 мегапиксельный КМОП-датчик Sony IMX-038-BQL, размер которого составляет  $23,6 \times 15,8$  мм, [8–11] имеет светочувствительность матрицы в пределах от 100 до 6 400 единиц ISO, а максимальный размер снимка составляет  $4\,288 \times 2\,848$  пикселей.

ПЗС-матрица представляет собой прибор зарядовой связи, который сначала формирует

изображение в аналоговом виде, а потом оцифровывает его (рис. 2). Такой алгоритм получения изображения имел ряд преимуществ: более широкий динамический диапазон (фотографическую широту), большую светочувствительность. Благодаря большей эффективной площади поверхности, датчики подобного типа формируют изображения с меньшим количеством шумов, что повышает качество изображения. Однако ПЗС-матрицы обладают рядом недостатков, к которым можно отнести: высокое энергопотребление, низкую производительность, поэтому этот тип матриц практически не применяется в видеосъемке, а также они более дорогие в производстве.

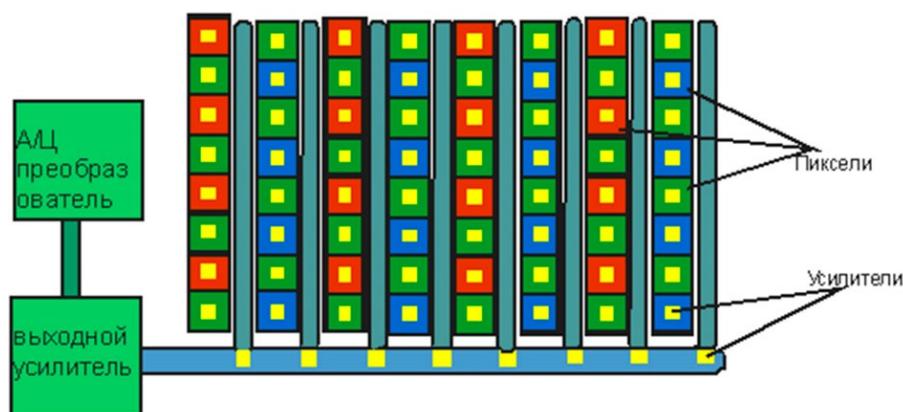


Рис. 2. Схема работы ПЗС (CCD) матрицы [11]

Основа КМОП-матрицы – металл-оксидный полупроводник. Такой тип датчика не преобразовывает все изображение сразу, как это делает ПЗС-матрица, а оцифровывает каждый пиксель (рис. 3). Однако такой тип светочувствительных датчиков имеет ряд недостатков, главным из которых является меньшая

эффективная площадь поверхности, равная примерно 75 %. Остальную площадь занимают транзисторы и преобразователи. Из-за такой особенности строения матрицы она обладает более высоким уровнем шума, который структурированный и намного сложнее поддается калибровке, чем шум с ПЗС-матрицы.

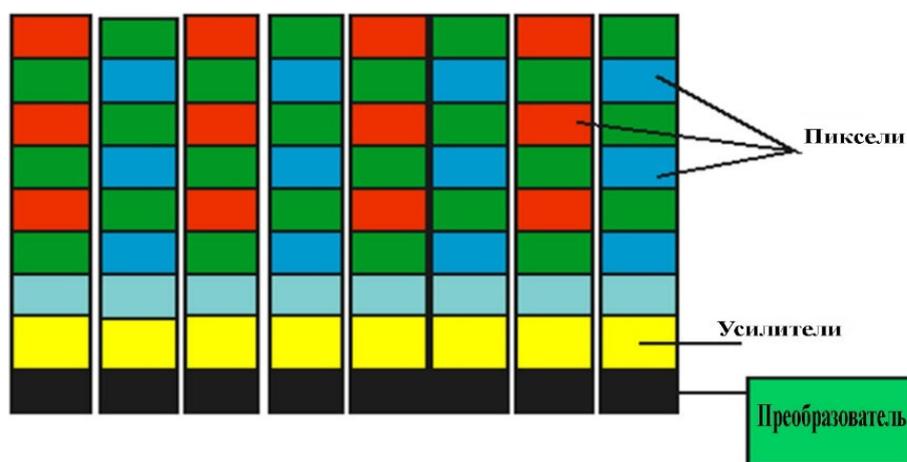


Рис. 3. Схема работы КМОП (CMOS) матрицы [11]

Так как исследование напрямую связано со спектром видимого излучения, то были рассмотрены спектральные характеристики используемых светочувствительных матриц Sony IMX-038-BQL и Sony ICX-413-AQ [8–11]. Как показано на рис. 4, ПЗС-матрица D100 более чувствительна к красному спектру, а также может работать и с ближним инфракрасным излучением, в отличие от КМОП-матрицы. С другой стороны, Sony IMX-038-BQL наиболее чувствительна к си-

нему спектру и слабее всего к красному спектру. Как видно из графика (см. рис. 4), чувствительность красного канала для Nikon D90 после 690 нм падает почти до нуля, что говорит о невозможности данного фотоаппарата работать в ближнем ИК-диапазоне. То же самое касается ближнего УФ-диапазона. КМОП-матрица Sony IMX-038-BQL не чувствительна к нему, в отличие от ПЗС Sony ICX-413-AQ, график которой уже в районе 400 нм имеет ненулевые значения.

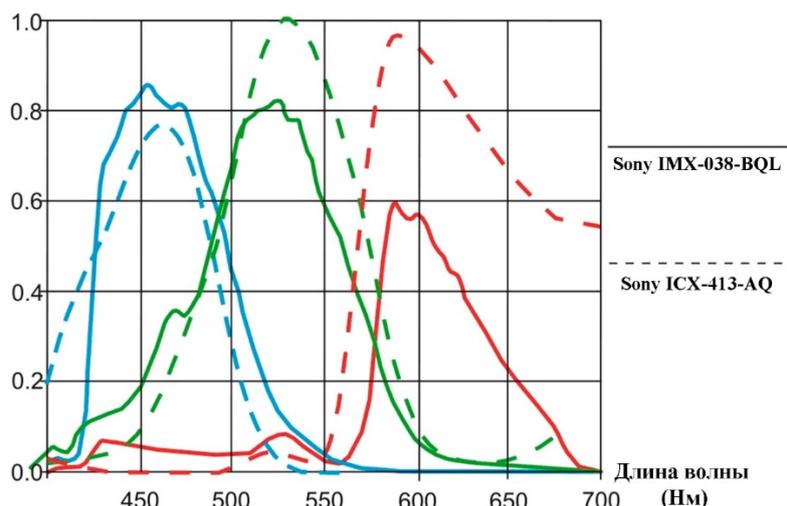


Рис. 4. Спектральная характеристика матриц Sony IMX-038-BQL и Sony ICX-413-AQ [7]

### *Расчет спектральной разрешающей способности*

В эксперименте использовались разные выдержки для оценки влияния экспозиции при экспонировании на величину разрешающей способности. Фотографирование тестового объекта с различными выдержками выполнялось для определения влияния экспозиции на конечную разрешающую способность цифрового изображения (см. рис. 1) [12].

Тестовый объект представляет собой белый лист бумаги с нанесенными на него радиальными тестами (см. рис. 1, б). Для расчета разрешающей способности использовались девять радиальных тестов [13–15], расположенных пропорционально в кадре изображения и отмеченных черными номерами.

По полученным цифровым изображениям с помощью аналитических способов [1, 2, 16–22] была определена разрешающая способность. Результаты измерения разрешающей способности представлены в таблице.

По полученным результатам исследований были построены графики изменения разрешающей способности при различных длинах волн спектра. Графики представлены на рисунках (рис. 5, 6). Из графиков видно, что величина разрешающей способности в синеволновой и оранжево-красной зонах спектра ниже, чем в зелено-желтой. Это различие достигает 25–30 %. Эти выявленные зависимости необходимо учитывать при выборе фо-

токамеры для выполнения цифровой аэрофотосъемки с БПЛА. Различие в разрешающей способности в различных диапазонах спектра может привести к изменению формы объектов, что важно для выполнения автоматизированного дешифрирования изображений.

По результатам фотографирования радиальных тестов были получены значения разрешающей способности двух камер при фотографировании с использованием разных фильтров и разных значений выдержки. Как известно, максимальная разрешающая способность достигается в центре изображения [24]. Поэтому на рис. 5 и 6 приведены графики зависимости изменения разрешающей способности для радиального теста номер 9, расположенного в центре кадра рис 1, б.

Из рис. 5 видно, что разрешающая способность матрицы Sony IMX-038-BQL в фотоаппарате Nikon D100 имеет максимальную разрешающую способность при использовании фильтров ЖЗС-9, ЖС-20, ПС-7 при выдержках 1/10с, 1/15с и 1/20с. При этом минимальные значения разрешающей способности отмечаются при использовании фильтров СС-8 и КС-14. Некоторым исключением стала съемка с выдержкой 1/3с и 1/4с, при которой максимумы разрешающей способности для матрицы Sony IMX-038-BQL отмечались при использовании фильтров ЖЗС-9, ПС-7. Стоит отметить, что у пурпурного фильтра ПС-7 две длины волн, на которых фильтр имеет максимальную пропускающую способность (650 и 71 Мкм).

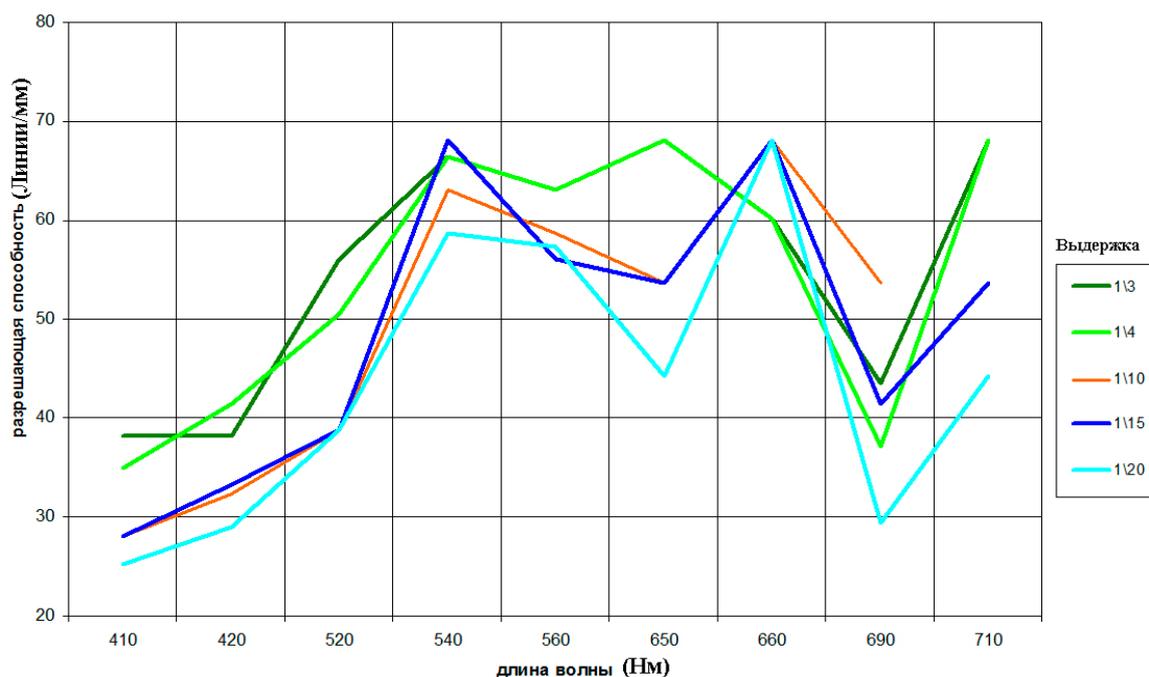


Рис. 5. Изменение спектральной разрешающей способности для Sony IMX-038-BQL

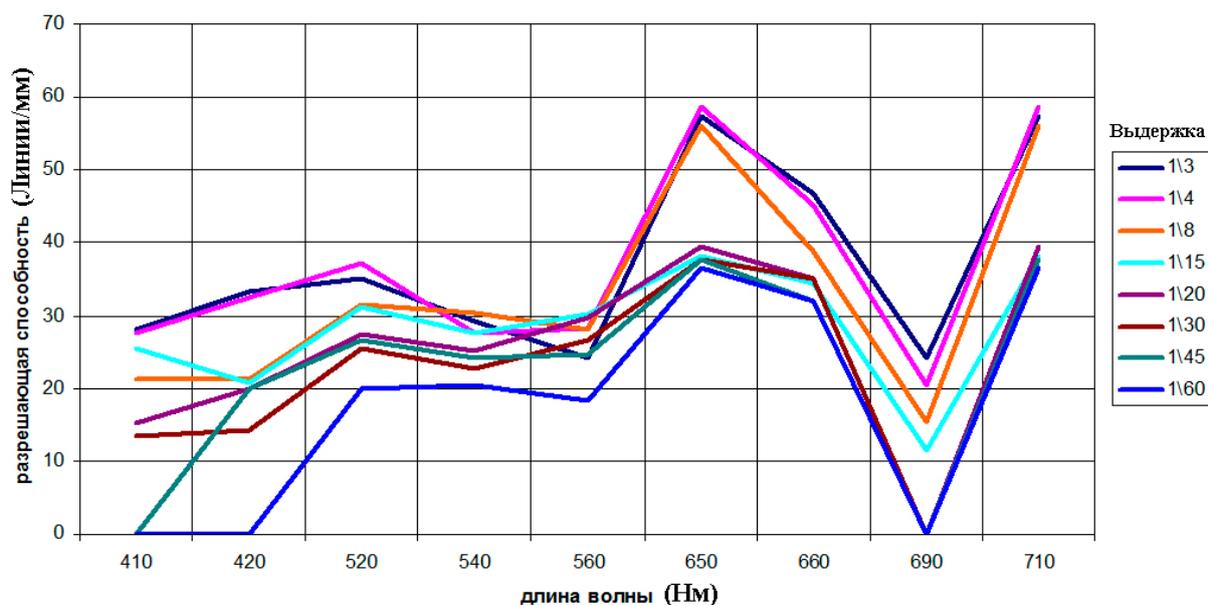


Рис. 6. Изменение спектральной разрешающей способности для Sony ICX-413-AQ

Для камеры с матрицей Sony ICX-413-AQ графики изменения разрешающей способности для всех используемых выдержек имеют одинаковую тенденцию. Минимальные значения разрешающей способности приходятся на длину волны 690 Мкм, что соответствует красному фильтру КС-14, а максимальные ее значения приходятся на длины волн 650 и 710 Мкм, что соответствует пурпурному фильтру ПС-7.

Из рис. 5 и 6 видно, что обе камеры будут иметь достаточно низкую разрешающую способность при использовании фильтров СС-8, СС-5, КС-14 [25]. Чуть выше разрешающая способность этих камер будет с фильтрами ЗС-6, ЖЗС-9, ЖС-3, ЖС-20. Максимальную разрешающую способность камеры будут иметь при использовании пурпурного фильтра ПС-7 [25].

### Выводы по результатам исследований

В статье выполнены исследования изменения разрешающей способности цифрового изображения, получаемого цифровыми камерами в зависимости от длины волны, освещенности и используемой выдержки. Полученные результаты можно использовать при выборе

цифровых съемочных систем БПЛА для съемки ландшафта, особенно в весенний, осенний и летний периоды. Особенный практический интерес результаты могут представлять для выполнения цифровой съемки БПЛА в целях расчета вегетационных индексов и автоматизированного дешифрирования для мониторинга природно-техногенных ландшафтов.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 2819–84. Материалы фотографические. Метод определения разрешающей способности [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
2. ГОСТ 25502–82. Государственный стандарт СССР. Объективы. Метод определения фотографической разрешающей способности [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
3. Тюкленкова Е. П. Фотограмметрия и дистанционное зондирование : учеб.-метод пособие к лабораторным работам по направлению подготовки 21.03.02 «Землеустройство и кадастры». – Пенза : ПГУАС, 2016. – 76 с.
4. ГКИНП(ОНТА)-12-274–03. Руководство по оценке качества исходных материалов аэрокосмических съемок и производной продукции в цифровой и аналоговой форме [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
5. ОСТ 3-4804–80. Миры для определения разрешающей способности оптико-фотографических систем [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
6. Анисеева И. А. Обоснование допустимых размеров пикселя на местности и параметров сжатия аэро- и космических изображений, получаемых для целей картографирования // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 2. – С. 109–130.
7. Стадник В. В., Шанина И. Н. Оценка естественной освещенности земной поверхности по актинометрическим данным // Труды главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. – 2016. – № 580. – С. 110–124.
8. Петропавловский Ю. Параметры и особенности применения современных ПЗС-матриц с прогрессивным сканированием фирмы Sony // Компоненты и технологии. – 2010. – № 8. – С. 77–84.
9. Горбачёв А. А., Коротаев В. В., Ярышев С. Н. Твердотельные матричные фотопреобразователи и камеры на их основе. – СПб. : НИУ ИТМО, 2013. – 98 с.
10. Интервью Nikon – «Производительность матриц камер Nikon Z6 и Sony A7III идентична» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://memblog.ru/osnovy/matrixy-nikon.html>.
11. Сравнение матриц в видеокамерах и фотоаппаратах (CMOS, CCD). Матрицы камер видеонаблюдения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://amdcatalyst-driver.ru/sravnienie-matric-v-videokamerah-i-fotoapparatah-cmos-ccd-matrixy-kamer.html>.
12. Филиппов Д. В., Чурсин И. Н. Оценка качества цифровых аэрофотоснимков // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2018. – № 1 (163). – С. 34–39.
13. Притуляк С. А. Влияние разрешающей способности цифровых фотокамер на разрешающую способность конечного цифрового изображения (о применимости формул мороза и катца в современной фотографии) // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2020. – Т. 64, № 4. – С. 476–486.
14. ОСТ 3-4400–80. Миры штриховые для испытания фотографических материалов [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
15. ОСТ 3-6509–89. Миры для контроля разрешающей способности оптических систем [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
16. Бояров П. И. Новая мира для измерения разрешающей способности // Знание. – 2016. – № 10-2(39). – С. 47–53.
17. Михеева А. А., Ялтыхов В. В. Расчет разрешающей способности снимка // Вестник полоцкого государственного университета. Геодезия и фотограмметрия. – 2015. – № 16. – С. 146–152.
18. Лаврова Н. П., Стеценко А. Ф. Аэрофотосъемка. Аэрофотосъемочное оборудование. – М. : Недра, 1981. – 296 с.
19. Кучко А. С. Аэрофотография. – М. : Недра, 1974. – 272 с.

20. Стеценко А. Ф. Проектирование аэрофотосъемочных работ : учебное пособие по курсу «Аэрофотосъемка». – М. : МИИГАиК, 1995. – 48 с.
21. Михайлов В. Я. Фотография и аэрофотография. – М. : Геодиздат, 1952. – 372 с.
22. Воробель Р. А. Цифровая обработка изображений на основе теории контрастности : дис. ... докт. техн. наук. – Львов, 1999. – 369 с.
23. Савиных В. П., Кучко А. С., Стеценко А. Ф. Аэрокосмическая фотосъемка. – М. : Геодиздат, 1997. – 320 с.
24. Шашкин С. Б., Ревякин М. Ю., Ефименко А. В. Метод определения разрешающей способности цифровых электрофотографических печатающих устройств на основе измерения частотно-контрастной характеристики получаемых изображений // Информационная безопасность регионов. – 2009. – № 2 (5). – С.70–76.
25. ГОСТ 9411–91 Стекло оптическое цветное. Технические условия [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».

Получено 02.11.2021

© Д. В. Филиппов, Д. Д. Рулёв, И. Н. Чурсин, 2022

## INVESTIGATION OF DIGITAL IMAGES RESOLUTION IN VARIOUS SPECTRAL RANGES

***Dmitry V. Filippov***

Geoinformation Research Centre Russian Academy of Sciences (NGIC RAS), 11, Novy Arbat St., Moscow, 119019, Russia, Ph. D., Senior Researcher, phone: (963)716-04-32, e-mail: Gislab@ngic.ru

***Daniil D. Rulev***

Geoinformation Research Centre Russian Academy of Sciences (NGIC RAS), 11, Novy Arbat St., Moscow, 119019, Russia, Junior Researcher, phone: (985)780-12-31, e-mail: mirmidonez720@yandex.ru

***Ivan N. Chursin***

Geoinformation Research Centre Russian Academy of Sciences (NGIC RAS), 11, Novy Arbat St., Moscow, 119019, Russia, Junior Researcher, phone: (919)778-96-58, e-mail: chursin.ivan93@gmail.com

This paper presents the results of the study of image resolution changes depending on the radiation wavelength. As a test object for photographing, images of radial mires were used. The shooting was carried out with two digital cameras with fundamentally different matrices, which are used on unmanned aerial vehicles (UAVs). The photography was carried out with preset shutter speeds, which allowed us to determine the change in spectral resolution from the amount of light which is incident on the matrices. As a result of the performed study, the influence of the spectral composition of the light incident on the matrix on the image resolution of was evaluated. The resolution change in the resulting image, from the spectral composition of the light incident on the matrix during exposure, is of practical scientific interest when performing digital UAV photography in order to calculate the vegetation indices of natural and man-made landscapes.

**Keywords:** digital aerial photography, digital camera, resolution capacity, digital photo, luminous density, radial mires, spectral range, coloured optical glass

## REFERENCES

1. GOST 2819-84. Photographic materials. Resolution determination method. Retrieved from Consultant-Plus online database [in Russian].
2. GOST 25502-82. State standard USSR Objective lenses. Method for determining the photographic resolving power. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
3. Tyuklenkova, E. P. (2016). *Fotogrammetriya i distantsionnoe zondirovanie [Photogrammetry and remote sensing]*. Penza: PGUAS Publ., 76 p. [in Russian].
4. GKINP (ONTA)-12-274-03. Guidelines for assessing the quality of initial materials for aerospace surveys and derived products in digital and analog form. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].

5. OST 3-4804-80. Worlds for determining the resolution of optical-photographic systems. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
6. Anikeeva, I. A. (2019). Substantiation of permissible pixel sizes on the ground and compression parameters of aerial and space images obtained for mapping purposes. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 24(2) [in Russian].
7. Stadnik, V.V., & Shanina, I.N. (2016). Estimation of natural illumination of the earth's surface according to actinometric data. In *Trudy glavnoy geofizicheskoy observatorii im. A. I. Voeykova: no. 580 [Proceedings of the main geophysical observatory named after A. I. Voeikova: No. 580]* (pp. 110–124) [in Russian].
8. Petropavlovskiy, Yu. (2010). Parameters and peculiarities of using modern CCD-matrices with progressive scanning of Sony firm. *Komponenty i tekhnologii [Components and Technologies]*, 8, 77–84 [in Russian].
9. Gorbachev, A. A., Korotaev, V. V., & Yaryshev, S. N. (2013). *Tverdotel'nye matrichnye fotopreobrazovateli i kamery na ikh osnove [Solid-state matrix photoconverters and cameras based on them]*. St. Petersburg, NRU ITMO, 98 p. [in Russian].
10. Nikon Interview. The performance of the sensors of Nikon Z6 and Sony A7III cameras is identical. Retrieved from <https://memblog.ru/osnovy/matricy-nikon.html>.
11. Comparison of matrices in video cameras and cameras (CMOS, CCD). CCTV camera matrices. Retrieved from <https://amdcatalyst-driver.ru/sravnenie-matric-v-videokamerah-i-fotoapparatah-cmos-ccd-matricy-kamer.html>.
12. Filippov, D. V., & Chursin, I. N. (2018). Assessment of the quality of digital aerial photographs. *Vestnik kompyuternykh i informatsionnykh tekhnologiy [Bulletin of Computer and Information Technologies]*, 1(163), 34-39 [in Russian].
13. Pritulyak, S. A. (2020). Influence of the resolution of digital cameras on the resolution of the final digital image (on the applicability of the frost and katz formulas in modern photography. *Izvestiya vuzov. Geodeziya i aerofotos"emka [Izvestiya vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying]*, 64(4), 476-486 [in Russian].
14. OST 3-4400-80. Dash worlds for testing photographic materials Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
15. OST 3-6509-89. Worlds for controlling the resolution of optical systems Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
16. Boyarov, P. I. (2016). New world for measuring the resolution. *Znanie [Knowledge]*, 10-2 (39), 47–53 [in Russian].
17. Mikheeva, A. A., & Yaltyhov, V. V. (2015). Calculation of the image resolution. *Vestnik polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Geodeziya i fotogrammetriya [Bulletin of the Polotsk State University. Geodesy and Photogrammetry]*, 16, 146–152 [in Russian].
18. Lavrova, N. P., & Stetsenko, A. F. (1981). *Aerofotos"emka. Aerofotos"emochnoe oborudovanie [Aerial photography. Aerial photography equipment]*. Moscow: Nedra Publ., 296 p. [in Russian].
19. Kuchko, A. S. (1974). *Aerofotografiya [Aerial photography]*. Moscow : Nedra Publ., 272 p. [in Russian].
20. Stetsenko, A. F. (1995). *Proektirovanie aerofotos"emochnykh rabot [Designing aerial photography]*. Moscow: MII GAIK Publ., 48 p. [in Russian].
21. Mikhailov, V. Ya. (1952). *Fotografiya i aerofotografiya [Photography and aerial photography]*. Moscow: Geodezizdat Publ., 372 p. [in Russian].
22. Vorobel, R. A. (1999). Digital image processing based on the theory of contrast. *Doctor's thesis*. Lviv. 369 p. [in Russian].
23. Savinykh, V. P., Kuchko, A. S., & Stetsenko, A. F. (1997). *Aerokosmicheskaya fotos"emka [Aerospace photography]*. Moscow: Geodezizdat Publ., 320 p. [in Russian].
24. Shashkin, S. B., Revyakin, M. Yu., & Efimenko, A. V. (2009). Method for determining the resolution of digital electrophotographic printing devices based on measuring the frequency-contrast characteristics of the resulting images. *Informatsionnaya bezopasnost' regionov [Information Security of Regions]*, 2(5), 70–76 [in Russian].
25. GOST 9411-91 Colored optical glass. Technical conditions Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].

Received 02.11.2021

© D. V. Filippov, D. D. Rulev, I. N. Chursin, 2022