

УДК 629.7.02

Б.З. Цыдыпов

ФГОУ ВПО «Бурятская ГСХА им. В.Р. Филиппова», Улан-Удэ

СОЗДАНИЕ NDVI-ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИСТАНЦИОННО УПРАВЛЯЕМОГО САМОЛЕТА СО ВСТРОЕННОЙ СИСТЕМОЙ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОЙ СЪЕМКИ

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, дистанционное зондирование, вегетационный индекс, цифровая камера, мультиспектральная съемка, ближняя инфракрасная зона.

В статье рассматривается практическое применение беспилотного носителя в качестве платформы для дистанционного зондирования. Получена количественная оценка характеристик растительности со сверхвысоким пространственным разрешением.

B.Z. Cydyrov

FSEI NPT «Buryat State Academy of Agriculture named after V. Philippov», Ulan-Ude

CREATION NDVI-SCENES With USE REMOTE OPERATED PLANE WITH BUILT-IN SYSTEM MULTISPEKTRALINOY REMOVALS

In given paper practical utilization of the unmanned aerial vehicle as a platform for remote sensing is considered. The quantitative estimation of vegetation characteristics with ultrahigh spatial resolution is received.

Введение. В прошлом беспилотные летательные аппараты (БПЛА) нечасто использовались для количественных приложений гражданского дистанционного зондирования и большей частью БПЛА имели военное назначение. Однако широкое распространение систем *GPS* и развитие методов фотограмметрии, дистанционного зондирования и геодезии позволили рассматривать БПЛА в качестве платформы для целей дистанционного зондирования.

В настоящее время парк аэросъемочных носителей неуклонно сокращается, высокие экономические затраты на обслуживание и заправку тяжелых летательных аппаратов приводят к повышению стоимости конечной продукции и делают нецелесообразным их использование в ряде работ, таких как съемка небольших по площади населенных пунктов и линейных объектов (лесополос, сельскохозяйственных полей, газопроводов, автомобильных и железных дорог). В связи с этим весьма актуальным явля-

ется использование комплекса дистанционного зондирования на базе БПЛА, обеспечивающего проведение работ на сверхмалых высотах и существенно более экономичного по сравнению с традиционными носителями.

Летом 2008 г. сотрудниками и студентами трех институтов (Институт самолетостроения, Институт космических систем, Институт управления полетами) факультета аэрокосмических технологий и геодезии Университета Штутгарт (Германия) были проведены полевые измерения с целью изучения возможности использования беспилотного носителя в качестве платформы для дистанционного зондирования. В качестве летательного аппарата был использован дистанционно управляемый самолет с установленной на его борту мультиспектральной съемочной аппаратурой [1]. Был проведен мониторинг сельскохозяйственных земель с целью количественной оценки характеристик растительности со сверхвысоким пространственным разрешением.

ем (15 см). Автор статьи принимал участие в программировании системы автопилотирования и при этом также участвовал во всех работах, связанных с осуществлением данного проекта; им получен сертификат от Института самолетостроения о прохождении обучения на степень магистра по аэрокосмическим технологиям.

Нормализованный разностный вегетационный индекс. Для съемки и обработки спектральных данных дистанци-

онного зондирования Земли (ДЗЗ) существенно то, что графики спектрального отражения различных подстилающих покровов имеют свои особенности в определенном интервале длин волн как в положении пика спектра, так и в конфигурации кривой спектрального отражения (рис. 1). Эти характерные особенности спектрального отражения позволяют проводить дешифрирование разных видов растительности и почв [2].

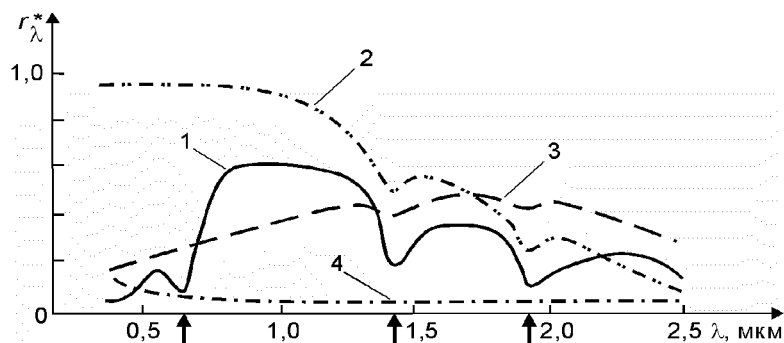


Рисунок 1 – Кривые спектральной яркости природных объектов:

1 – растительный покров; 2 – снежные поверхности; 3 – горные породы и почвы; 4 – водные поверхности. Стрелками показано поглощение хлорофиллом на длине волн 0,66 мкм, водой – на длинах волн 1,43 и 1,93 мкм.

При изучении объектов по многозональным снимкам важны не абсолютные значения, а характерные соотношения между значениями яркости объекта в различных спектральных зонах оптического диапазона электромагнитного спектра. На таких изображениях более ярко и контрастно выделяются искомые объекты по сравнению с исходным снимком. Одними из широко используемых вторичных изображений являются различные вегетационные индексы (ВИ), которые вычисляются как линейная комбинация значений яркости в спектральных зонах, наиболее информативных для характеристики растительности. С помощью ВИ можно получить численные значения для оценки пространственной вариации биофизических параметров растительного покрова. Вегетационные индексы характеризуют плотность растительности, позволяют растениеводам оценить всхожесть и рост растений, продуктивность угодий. Их использование позволяет различать основные виды под-

стилающей поверхности: например, редкая чахлая растительность имеет значение ВИ меньше, чем густая сочная, а почвенные образования имеют более низкие значения индекса по сравнению с растительностью.

Расчет вегетационных индексов базируется на двух наиболее стабильных, не зависящих от прочих факторов, участках кривой отражения растений. Обычно используется характерный перепад между значениями яркости растительности в красной и ближней инфракрасной (БИК) зонах. Отражение определяется по существу листьями. Пигменты листа (хлорофилл) поглощают большую часть красной области спектра на длине волны 0,65 мкм, поэтому отражение имеет минимум в этой области и находится в диапазоне Канал 1 (0,56-0,68 мкм) (рис. 2, 3). В БИК-области – Канал 2 (0,73-1,10 мкм) – происходит полное отражение излучения от клеточных структур листа и в ней находится максимум отражения (рис. 2, 3).

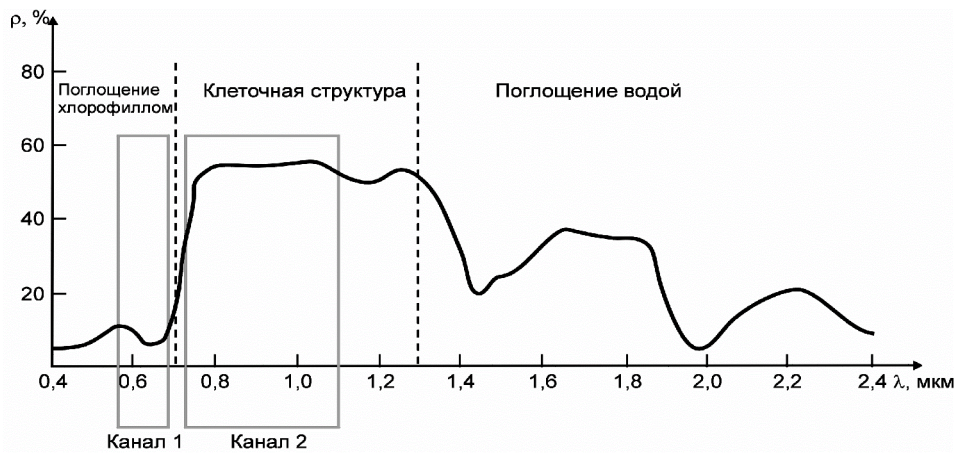


Рисунок 2 – Типичный ход коэффициента отражения здоровой растительности

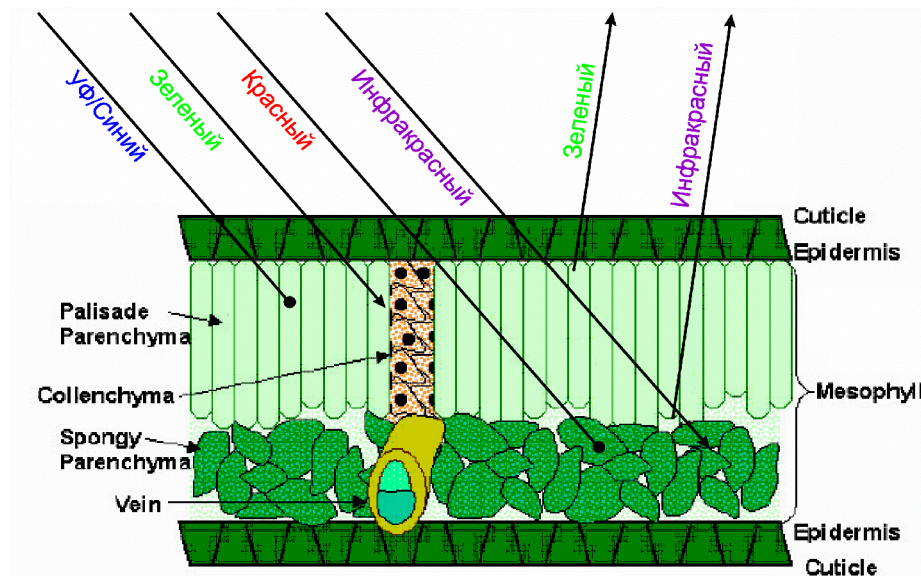


Рисунок 3 – Клеточная структура, эффекты поглощения и отражения здоровой растительности

Эти свойства отражения характерны только для здоровой активно вегетирующей растительности. Для особенно выраженных повреждений растительности эти свойства изменяются, и поглощение пигментами листа уменьшается, так как содержание хлорофилла падает. Дальнейшие повреждения могут вызывать изменения клеточной структуры, что ведет к уменьшению отражения в этом спектральном диапазоне [3]. Таким образом, высокая фотосинтетическая активность (связанная, как правило, с густой растительностью) ведет к меньшему отражению в красной области спектра и к большему отражению в ближней инфракрасной. Соотношение этих показателей друг к другу позволяет четко отделять и анализировать растительные объекты от

других природных объектов.

Для получения индексного *NDVI*-изображения значение яркости каждого пиксела вычисляется путем применения различных арифметических операций над значениями яркости этого пиксела из разных каналов снимка:

$$NDVI = \frac{G_2 - G_1}{G_2 + G_1},$$

при этом G_1 и G_2 – интенсивности каналов 1 и 2 в градациях серого соответственно.

NDVI может принимать значения в интервале от -1 до $+1$. Чем выше этот параметр, тем активнее растительность. *NDVI* прямо пропорционален фотосинтетически активному излучению и имеет почти линейную связь с продуктивностью нетто-биомассы. Таким образом, *NDVI* –

это мера биологической активности растений. *NDVI* относительно невосприимчив по отношению к атмосферным и геометрическим воздействиям, поэтому *NDVI* зависит только лишь от состояния и плотности растительности наблюдаемой территории.

Организация эксперимента. Для определения значений *NDVI* были задействованы две цифровые камеры: одна камера была оснащена инфракрасным фильтром и она охватывает БИК-область, вторая – полный спектр видимого света. Чтобы добиться изображений с одинаковыми параметрами и разрешающей способностью были использованы камеры одинакового типа *Olympus C2020*. Для исключения поперечного смещения они были установлены вдоль корпуса самолета на одной линии.

Так как управление самолета происходило через систему автопилотирования, то камеры посредством электронного сигнала должны были смочь спускать затвор. Для этого инфракрасные диоды были установлены в крепление камер, которые реагировали на сигналы системы автопилотирования. Также было обеспечено, чтобы обе камеры спускали затворы синхронно.

Заранее были изучены топографические условия около стартовой площадки. Важно было снять территорию с неоднородной растительностью. Была выбрана полоса на юго-востоке стартовой площадки, где имелись в наличии ручей, полевые дороги, заросшие и скошенные луга, кустарники и группы деревьев.

Исходя из массы самолета, была рассчитана оптимальная скорость полета: она равна $60 \text{ км/ч} = 16,67 \text{ м/с}$. В связи с тем, что во время срабатывания затвора камера движется со скоростью полета, то между моментами срабатывания затвора и закрытия апертурной диафрагмы возникает смещение, затушевание. Время экспозиции камеры равно $1/650 \text{ с} = 0,0015 \text{ с}$. Таким образом, размер затушевания равен $16,67 \text{ м/с} \times 0,0015 \text{ с} = 0,025 \text{ м}$.

В связи с требуемой скоростью само-

лета и требуемым перекрытием изображения – 40 % в продольном и поперечном направлениях – были получены 2 пути полета с координатами. Эти данные использовались для программирования системы автопилотирования.

Высота полета. Была рассчитана подходящая высота полета, которая позволила бы в полной мере использовать оптику камеры и максимально возможный объем носителя данных. Учитывались ограничения на максимальную дальность действия системы дистанционного управления и мощность аккумуляторов самолета. Высота полета ограничивалась условием максимум на 300 м. Чтобы всегда соблюдать видимую связь с самолетом и охватывать, тем не менее, возможно большую зону, была выбрана высота полета, равная 250 м. Второй полет на высоте 150 м должен был улучшить детальную глубину.

Предполагаемые размеры изображения. Характеристики микросхемы ПЗС камеры следующие: диагональ чипа $d = 8 \text{ мм}$, соотношение длин сторон равно $4/3$, фокусное расстояние камеры $f = 6,5 \text{ мм}$. Эти значения фиксированные. Так

как $a = \frac{3}{4}b$ и $d^2 = a^2 + b^2 = 64 \text{ мм}$, где a – ширина чипа, b – его длина, то размеры чипа следующие: $a = 4,8 \text{ мм}$, $b = 6,4 \text{ мм}$. Размеры изображения B и L получают из

комплекта лучей: $\frac{f}{a} = \frac{h}{B}$, $\frac{f}{b} = \frac{h}{L}$ [4]. Таким образом, ширина отснятой территории $B = 184 \text{ м}$, ее длина $L = 246 \text{ м}$.

Пространственное разрешение. Камера эксплуатируется с разрешающей способностью 1600×1200 пикселей. Длина стороны квадрата на Земле, точно покрывающая 1 пиксел, составляет

$$\text{длина стороны квадрата} = \frac{L}{\text{количество пикселей}} = \frac{246 \text{ м}}{1600} = 15 \text{ см}$$

Используемое программное обеспечение. В рамках фотограмметрической обработки снимков использовалось следующее программное обеспечение.

iWitness. Для обеспечения максимальной точности обязательно необхо-

димо откалибровать камеры перед съемкой. Самый большой источник погрешности, который встречается при съемке, – это геометрическое радиальное искажение при проекции вогнутой линзы на четырехугольный ровный чип. При помощи программы *iWitness* была произведена автоматическая коррекция линз фотографированием нескольких цветных точек. С помощью различных сочетаний этих точек были рассчитаны поправочные коэффициенты полиномов, которые послужили основой для матрицы поправок.

Auto SCENE Collage позволяет бесшовно соединять снимки друг с другом.

ENVI (Environment for Visualizing Images) – программная среда для профессиональной фотограмметрической обработки снимков. С ее помощью осуществлялись геопривязка снимков и программирование автопилотирования БПЛА, а также были получены изображения *NDVI*.

Проведение эксперимента. 1 июля 2008 г. были проведены полеты после неоднократных переносов дня полетов, обусловленных плохой погодой. Было запланировано 2 полета на 2 разных высотах в момент наивысшего солнцестояния. Солнечное излучение в значительной степени необходимо для качества изображений, поэтому облачность должна быть менее 1/8. Облачность в этот день была небольшой, тем не менее, к полудню чуть возросла.

Опытный пилот инженер Роберт Шмольдт запускал самолет вручную с земли. По достижении требуемой высоты была задействована система автопилотирования. Так как после пролета первой петли еще достаточной была мощность батарей, был произведен возобновленный вылет того же авиамаршрута. При этом были получены 8 изображений каждой камерой, причем 4 изображения дали в итоге связанное изображение. Во втором запланированном полете процедура была подобной – самолет был приведен вручную на требуемую высоту, а затем был активизирован автопилот.

Так как запоминающее устройство камеры вмещает лишь 16 изображений при разрешении 1600x1200 пикселей, они считывались после каждого полета и накопитель очищался. При этом проводился короткий анализ пригодности изображений.

Обработка данных. Для определения *NDVI* необходима пара изображений (рис. 4, 5). На первом шаге эти изображения были скорректированы с рассчитанными ранее матрицами коррекции. При этом некогда прямые линии, которые были согнуты проекцией на изображениях, снова были выпрямлены (рис. 6). Затем для скорректированных изображений была назначена координатная система, т.е. была проведена их географическая привязка.

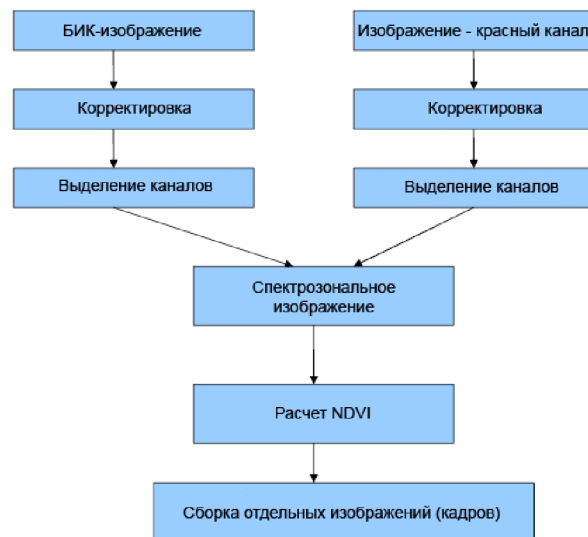


Рисунок 4 – Блок-схема обработки данных

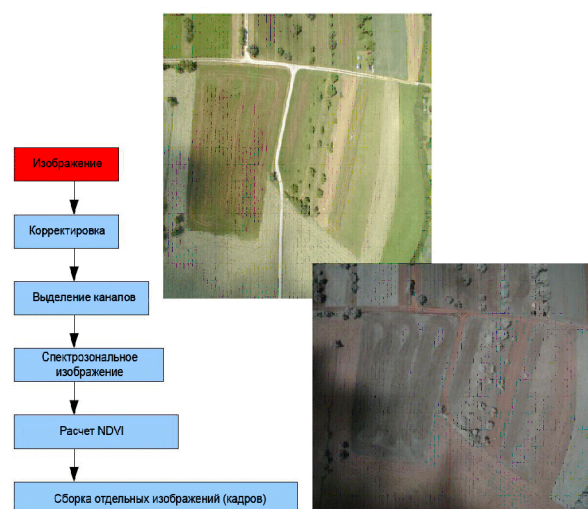


Рисунок 5 – Изображения в разных каналах

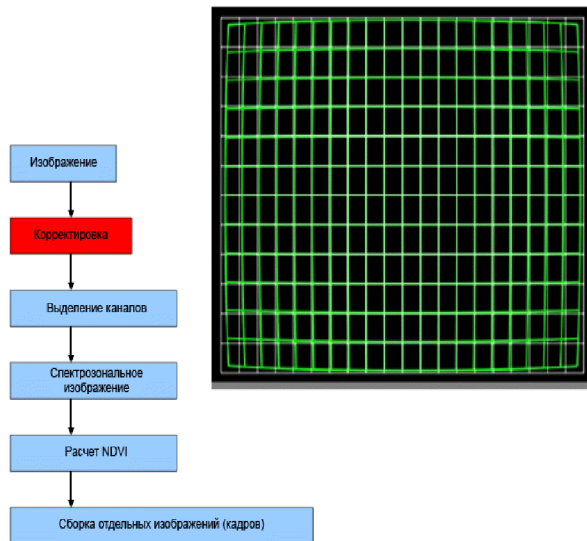


Рисунок 6 – Геометрическая коррекция

Так как *NDVI* рассчитывается из красного и ближнего инфракрасного каналов светового спектра, должно быть произведено разделение каналов спектра при наложении изображений. Красный канал изображения был выделен из полного видимого спектра, зеленый канал – из БИК-изображения. Зеленый канал БИК-изображения берется по причине того, что, возможно, неотфильтрованный красный свет мог остаться в оставшихся каналах. Этот источник ошибки возникает из-за недостаточной селективности фильтра.

Далее было сделано наложение изолированных каналов для получения преднамеренно ложной цветопередачи (рис. 7). Затем было получено *NDVI*-изображение заготовленным решением программного обеспечения *ENVI* (рис. 8). Полученные изображения были объединены в мозаику (рис. 9).

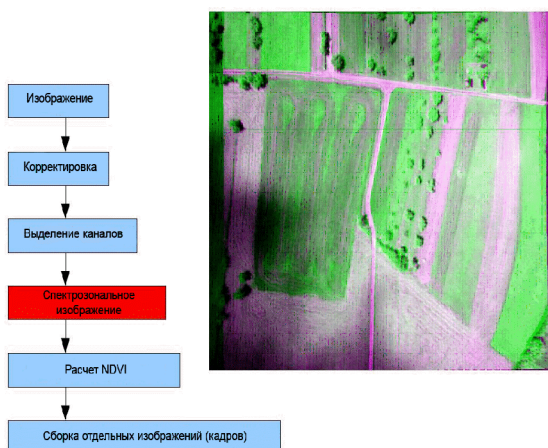


Рисунок 7 – Мультиспектральное изображение с ложной цветопередачей

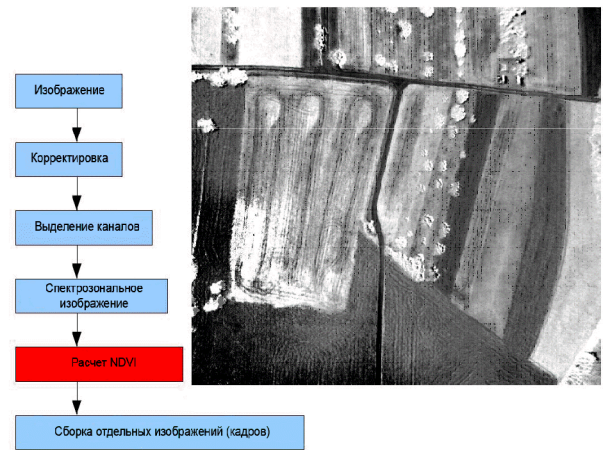


Рисунок 8 – Изображение *NDVI*

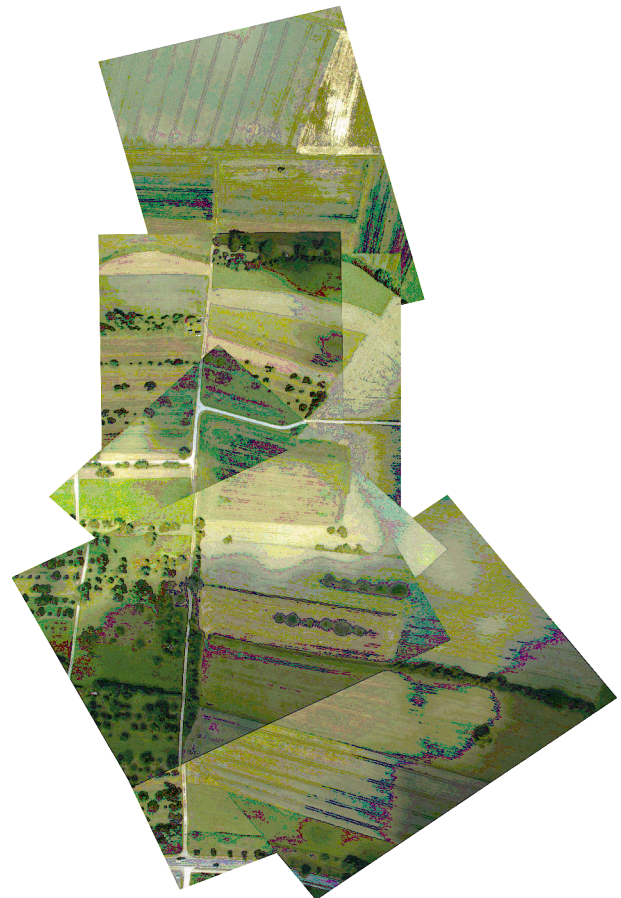


Рисунок 9 – Построенная мозаика изображений

Выводы. Как показали проведенные измерения, применение мультиспектральных комплексов на базе БПЛА сокращает время сбора, анализа и интерпретации тематической информации и является искомым компромиссом между ценностью данных и стоимостью их получения.

Полученные *NDVI*-изображения были получены со сверхвысоким пространственным разрешением. На них можно

отчетливо различить градации между темными и светлыми оттенками серого. Светлые места указывают на зеленую растительность, большое количество хлорофилла в листве и, таким образом, получается высокий коэффициент отражения в БИК-области и незначительный коэффициент отражения в красной зоне. Разумеется, тени, образованные облаками или объектами на Земле, вызывают неестественно светлые места на изображении *NDVI*, которые позволяют сделать вывод о не обычно вегетирующей растительности, а их нужно рассматривать скорее в качестве погрешности измерения. Для последующих миссий обязательно необходимо проводить измерения в полностью безоблачные дни.

Из 16 полученных изображений было соединено только 7. Однако, вегетационные индексы были определены только из 2 изображений, так как у остальных пяти были слишком велики погрешности, вызванные тенями. Полно рассмотрено только 3 изображения из всех принятых изображений, которые охватывали заданную зону. Из этих изображений можно было

автоматически соединить только 2.

Несмотря на это, результаты исследований наглядно продемонстрировали целесообразность использования беспилотного носителя в качестве платформы для дистанционного зондирования.

Библиографический список

1. Demircan, A. Use of a wide angle CCD line camera for BRDF measurements / A. Demircan, R. Schuster, M. Radke, M. Schoenermark, H.P. Roeser // *Infrared Physics & Technology*. – 2000. – N 6. – P. 11-19.

2. Дагуров, П.Н. Методы дистанционного зондирования земной поверхности: учебно-методическое пособие / П.Н. Дагуров, Т.Н. Чимитдоржиев. – Улан-Удэ: изд-во ФГОУ ВПО «Бурятская государственная сельскохозяйственная академия им. В.Р. Филиппова», 2005. – 88 с.

3. Цыдыпов, Б.З. Обработка данных дистанционного зондирования земной поверхности с помощью программного продукта ScanMagic: учебно-методическое пособие / Б.З. Цыдыпов. – Улан-Удэ: изд-во БГСХА им. В.Р. Филиппова, 2008. – 43 с.

4. Обиралов, А.И. Фотограмметрия / А.И. Обиралов, А.Н. Лимонов, Л.А. Гаврилова. – М.: КолосС, 2002. – 240 с.