
УДК 681.785.55

В.В. Донец¹, С.М. Кочубей², В.А. Яценко³, Т.А. Казанцев², В.В. Бровченко¹

¹ Корпорация «Научно-производственное объединение «Арсенал», Киев

² Институт физиологии растений и генетики НАНУ, Киев

³ Институт космических исследований НАНУ-ГКАУ, Киев

СОЗДАНИЕ ПОЛЕВОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АППАРАТУРНО-ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ПОДСПУТНИКОВОЙ ВАЛИДАЦИИ ДИСТАНЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

Рассмотрены особенности конструкции созданного полевого спектрального аппаратурно-программного комплекса для подспутниковой валидации дистанционного исследования растительности

Ключевые слова: *спектрометрический комплекс, дистанционное зондирование, подспутниковая валидация.*

Введение

В настоящее время широкое применение получили системы дистанционного мониторинга поверхности Земли, в частности, для исследования состояния растительности, определения ее стрессового состояния, прогноза урожайности и др. Измерения спектров отражения, используя оптические приборы, является быстрой и эффективной процедурой анализа по сравнению с лабораторными

биохимическими методами и позволяет проводить тестирование больших площадей за короткое время [4 – 6, 14, 15, 23].

В этом направлении традиционным подходом является использование спектральных коэффициентов яркости растительного покрова, на основе которых ранее были предложены разнообразные вегетационные индексы [2]. При этом большое внимание было уделено определению концентрации хлорофилла – важного физиологического показателя, при-

существование которого обеспечивает основной вклад в формировании спектра отражения в листьях растений в видимом диапазоне.

Известно более 40 вегетационных индексов, чувствительных к содержанию этого пигмента. Все они базируются на измерении коэффициентов яркости (на разных длинах волн), которые проявляют высокую степень их корреляции с соответствующими растительными показателями в лабораторных условиях. Однако, при применении их в полевых условиях корреляция снижается или разрушается вообще, что обусловлено как различиями оптических свойств единичного листа и фитоценоза, так и определенными техническими сложностями [4].

В отделе биохимии фотосинтеза Института физиологии растений и генетики НАН Украины разработан и предложен к использованию альтернативный подход к оценке содержания хлорофилла по спектрам отражения [9-14]. Он основан на получении информации по количественным показателям форм (сигнатур) спектров отражения, что исключает необходимость определения численных значений коэффициентов яркости. Был разработан метод определения концентрации хлорофилла в листьях озимой пшеницы за счет использования соотношения интенсивности максимумов в графике первой производной спектра отражения в области «красного края» спектра,

$$\Delta\lambda = 680 - 750 \text{ нм.}$$

Для получения сплошных массивов спектральных данных о земной поверхности в реальном режиме времени нужна соответствующая бортовая аппаратура – гиперспектральные системы (ГСС) или гиперспектрометры.

Перечень таких приборов авиационного и космического базирования приведен в [7, 18]. Как видно из этой литературы, такой современной техникой авиационного базирования владеют многие развитые страны (США, Канада, Финляндия, Австралия и др.) В настоящее время только США и Европейское космическое агентство (ЕКА) имеют действующие на орбитах космические аппараты (КА) с ГСС. Однако в ближайшие два-три года планируют вывести на орбиту КА с ГСС на борту такие страны, как США, Япония, Италия, Великобритания, Германия, Канада, Австралия, Российская Федерация (РФ), а также ЕКА [18].

В России имеются несколько образцов гиперспектрометров авиационного базирования [7]. В Республике Казахстан впервые в странах СНГ АО «КазГеоКосмос» недавно приобрело уникальную летающую лабораторию [1] на базе легкого многоцелевого самолета King Air C90A, в состав которой входит канадский гиперспектрометр CASI-1500.

К большому сожалению об украинской гиперспектральной аппаратуре авторам неизвестно, хотя

еще в 2009-2010 годах украинскими учеными были обоснованы требования к отечественному образцу космического гиперспектрального сенсора и формирования его вида [18, 19]. Будем надеяться, что это может быть реализовано, в частности, в рамках Общегосударственной целевой научно-технической космической программы Украины на 2013-2017 года [18] и создаст благоприятные условия для дальнейших научно-исследовательских работ по гиперспектральному зондированию Земли, в частности, Украины.

Наши заявки на получение гиперспектральных снимков площадей посевов пшеницы в Киевской области с гиперспектрометра HYPERION [24] (США) на согласованное с нами время для проведения синхронной наземной съемки с помощью нашего полевого прибора, к большому сожалению, не были удовлетворены. Однако сейчас появляется возможность сотрудничества с российскими коллегами относительно получения гиперспектральных снимков со спутника «Ресурс-П» [7, 8].

Следует отметить, что на момент написания этой статьи на космодроме Байконур на предстартовой подготовке уже находится первый российский спутник «Ресурс-П» [16] с двумя бортовыми гиперспектрометрами на 96 спектральных каналов [7, 8] каждый, которые установлены в оба вида бортовой съемочной аппаратуры: высокодетального и широкозахватного наблюдения.

Данные, получаемые при помощи бортовых гиперспектральных сканеров, требуют валидации (заверки) с помощью наземных полевых измерений [4, 6, 28].

В связи с этим возникла необходимость создания специализированного аппаратурно-программного комплекса (АПК) подспутникового обеспечения для дистанционного спектрометрического зондирования растительности в полевых условиях и проведения обработки полученной информации, в частности, расчета содержания хлорофилла в биомассе по специальным алгоритмам.

Корпорацией «НПО «Арсенал» совместно с ГП «Завод «Арсенал», Институтом физиологии растений и генетики НАНУ и Институтом космических исследований НАНУ и НКАУ в 2008 году был создан полевой спектрофотометр для тестирования состояния растительности, в том числе и посевов сельскохозяйственных культур. Первая короткая информация о нем приведена на стр. 16-17 Годового Отчета Национального космического агентства Украины за 2008 год [20]. Полевой спектрометр запатентован в Украине [17]. На базе этого прибора и был создан полевой спектральный АПК для дистанционного исследования растительности, концепция построения которого была изложена еще в 2005 г. [28].

1. Полевой спектральный аппаратурно-программный комплекс для дистанционного исследования растительности

Основными характеристиками спектрального АПК, влияющими на качество измерений, есть значение соотношения «сигнал/шум» и спектральное разрешение $\delta\lambda$ [4, 6, 12, 23] в необходимом диапазоне длин волн. Оба эти параметра является противоречащими друг другу, поскольку первое из них требует сужения спектральной ширины входной щели классического спектрального прибора, что снижает интенсивность светового потока и, следовательно, способствует повышению относительной величины шумового сигнала. Кроме того, указанные условия должны выполняться при большой величине динамического диапазона, поскольку при измерениях биологических объектов растительного происхождения в полевых условиях существует значительный перепад значений коэффициента отражения в области «красного края» (от величины $\sim 3\%$ до величины $\sim 60\%$ в диапазоне 680-800 нм). Следует учесть, что естественная освещенность может меняться от 10.000 лк в пасмурную погоду до 120.000 лк в солнечную. При этом, цветовая температура источника освещения может варьироваться от 2200°K до 15000°K [4]. В наземных измерениях возникает также специфическое требование к форме поля зрения прибора, что связано с его апертурой. При традиционной конструкции входного тракта, полем зрения спектрального датчика есть узкая длинная полоса, пропорциональная размеру входной щели спектрального прибора.

В ходе создания полевого спектрального АПК было предложено решение проблемы выбора оптимальных значений основных технических параметров [4, 25, 28], как решение задачи многокритериальной оптимизации выходных технических характеристик прибора с учетом ограничений [6, 21]. В результате были определены и оптимизированы взаимосвязанные между собой основные технические параметры этой гиперспектральной измерительной аппаратуры, влияющие на достоверность результатов дистанционного спектрометрического зондирования растительности, а также на результаты определения содержания в ней хлорофилла [4, 6].

С помощью специализированной программы ZEMAX-EE [29] проводилась разработка оптической схемы, на основе скрещенной структуры спектрографа Черни-Тернера, модернизированного в гиперспектрометр [4, 6]. Как показали расчеты этой оптической схемы, спектрограф с острыми углами падения и отражения может обеспечить более плоскую зону в рабочей спектральной области и хорошую коррекцию аберрации.

В табл. 1 приведены технические характеристики полевого спектрометра полевого АПК. На рис. 1 представлена блок-схема АПК, а общий вид (А) и разрез общего вида (Б) полевого спектрометра представлен на рис.2. Рабочее положение полевого спектрального АПК при измерении спектров отражения посевов озимой пшеницы приведено в [6].

Таблица 1
Технические характеристики полевого спектрометра АПК [6]

Спектральный диапазон	520-800 нм
Спектральное разрешение $\delta\lambda$	1,8-3 нм
Угол обзора	16x160
Диапазон освещенностей	10.000-120.000 лк
Время измерения	0,1-1 с
Величина собственных шумов	не более 0,1 %
Диапазон определения хлорофилла	1,5-8,0 мг/дм ²
Напряжение питания	6 В
Мощность потребления (пиковая нагрузка при отработке шторки)	4,5 Вт
Размеры	310x23x 200 мм
Вес (без штатива и ЭВМ)	до 9 кг

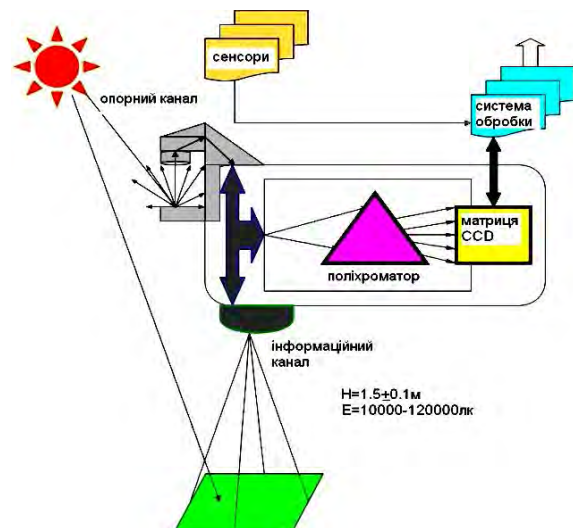
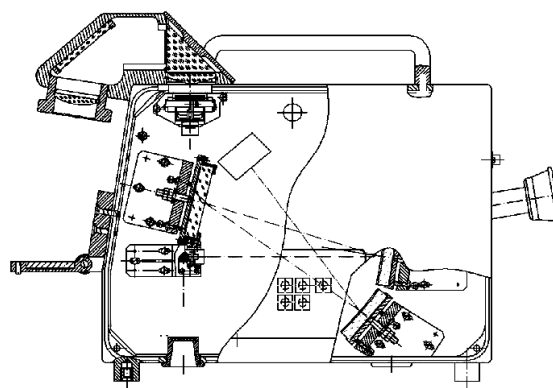


Рис. 1. Блок-схема АПК

Поскольку полевой спектрометрический комплекс построен на основе спектрометра, имеющего спектральное разрешение $\delta\lambda$ не хуже 1,8-3 нм в интервале длин волн 520-800 нм ($\Delta\lambda = 280$ нм), то можно утверждать, что он является гиперспектральным [22], с числом спектральных каналов не менее 90 ($280 \text{ нм} / 3 \text{ нм} \geq 93$). В гиперспектрометре КА «Ресурс-П» число спектральных каналов – 96 [8]. Полевой спектрометр [17] имеет информационный и опорный каналы, спектрограф Черни-Тернера с входной спектральной щелью, входным и выходным коллиматорами, в фокусах которых соответственно расположены входная щель и матричное фотоприемное устройство. Между коллиматорами на изломанной оптической оси расположен диспергирующий элемент.



А



Б

Рис. 2. Общий вид (А) и разрез общего вида (Б) полевого спектрометра

Фотоприемное устройство выполнено в виде фоточувствительной матрицы Kodak Digital Science KAC-1310 CMOS [27] форматом 1280 x1024 пикселей, с размером пикселя $6 \times 6 \text{ мкм}^2$, с внутренним АЦП является общим для обоих каналов. Оно электрически связано с электронной системой управления и обработки информации с сохранением результатов измерений. Диспергирующий элемент выполнен в виде нестандартной отражающей дифракционной решетки [46, 6] с высокой дифракционной эффективностью в диапазоне длин волн $\Delta\lambda = 650\text{-}750 \text{ нм}$ ($\lambda_{\text{max}} = 725 \text{ нм}$).

Входная щель спектрального прибора выполнены путем прецизионной фотолитографии слоя черного хрома на поверхности кварцевой пластинки и имеет ширину $d = 20 \text{ мкм}$ ($0,02 \text{ мм}$). Непосредственно перед входной щелью расположен разделительный оптический элемент (поворотная призма), который разделяет входную щель на две части – верхнюю (*опорный канал*) и нижнюю (*информационный канал*).

В опорном канале содержится деталь, которая выполнена из оптического материала с высоким коэффициентом диффузного рассеяния [17]. Ее рабочая поверхность оптически связана как с источником освещения в натуральных условиях, так и с верхней частью фотоприемного устройства.

Общая зона матричного фотоприемного устройства KAC-1310 CMOS (1280 x1024 пикселей) программно разбита на верхнюю и нижнюю подзоны (1024 x 520-измерительный канал и 1024 x 334- опорный канал) [17]. Перед фотоприемным устройством установлена электромеханическая шторка, которая электрически соединена с электронной системой управления и обработки информации. Кроме этого, полевой спектрометр [17] имеет дополнительные датчики: для измерения освещенности, температуры и для определения географических координат местоположения спектрометра (GPS - приемник). А электронная система обработки информации имеет в себе RTC-часы (часы реального времени с календарем). Все они, параллельно, соединены с электронной системой обработки информации и сохранения результатов измерений.

Имеется также оптическая система визирного канала (видоискателя), которая предназначена для наведения на объект измерения и уточнения границ зоны исследования.

2. Работа полевого спектрометрического АПК

Полевой спектрометрический АПК работает следующим образом. Источник освещения одновременно одинаково освещает как объект измерения, так и сам полевой спектрометр [17]. Величину освещенности регистрирует датчик, электрический сигнал с которого поступает в систему обработки и используется как для документирования результатов измерений, так и для управления величиной экспозиции объекта измерения. Световой поток, отражающийся от объекта измерения, через оптическую систему входного информационного канала и солнечный свет (или свет от неба), поступающий через оптическую систему опорного сигнала с диффузно-отражающим компонентом, попадают соответственно на нижнюю и верхнюю части входной щели полевого спектрометра. После прохождения через входную щель и входной коллиматор два разделенных в пространстве световых пучка лучей параллельными потоками попадают на диспергирующий элемент (дифракционную решетку). Изображение разложенных в спектр этих двух световых потоков формируются выходным коллиматором в два цветных (спектральных) изображения двух частей (нижней и верхней) входной щели соответственно в плоскостях подзон матричного фотоприемного устройства.

Фотоприемное устройство в каждом своем пикселе трансформирует световой сигнал в электронный. Совокупность последних, после внутреннего аналого-цифрового преобразования вместе с данными, дополнительно поступающих от датчиков, (которые измеряют соответственно освещенность, температуру окружающей среды, а также фиксируют географические координаты места и время проведения измерения) проходят обработку по необходимым алгоритмами в электронной системой.

На выходе электронной системы обработки информации формируется пакет данных в виде регистраграммы и запоминается электронной памятью. Эта единая регистраграмма содержит в себе все необходимые параметры как об объекте исследований, так и о времени, географических координатах (местоположении) прибора и условиях исследований (внешней температуре и освещенности).

Электромеханическая шторка, которая установлена перед фотоприемным устройством, автоматически закрывает его на время регистрации темнового сигнала при каждом измерении, с последующим вычитанием усредненной зарегистрированной величины темнового сигнала в соответствии с алгоритмом работы полевого спектрометра.

Поскольку диспергирующий элемент, изготовленный в виде нестандартной отражающей дифракционной решетки с максимальной дифракционной эффективностью на длине волны $\lambda_{max} = 725$ нм, то регистрация коэффициента отражения растительности, имеющего минимум в спектральной области так называемого «красного края», на участке длин волн $\Delta\lambda = 650-725$ нм, выполняется с максимально возможной достоверностью, что очень важно для реализации алгоритма расчета содержания хлорофилла в растениях с применением деривативных вегетационных индексов $D725/D702$, требующих вычисление первых производных [4].

Входной канал, выполненный путем совмещения входного коллиматора и оптической системы входного канала спектрометра позволяет сформировать поле зрения информационного канала прибора в плоскости объекта измерения в виде, удобном для измерения, в том числе, обеспечивает получение поля зрения в форме квадрата размером $\sim 40 \times 40$ см при размещении устройства на высоте 1,5 м над поверхностью земли.

Оптическая схема устройства позволяет одновременное принятие полезного и опорного сигналов в двухканальной оптической системе спектрального прибора и обеспечивает получение спектра отражения как функцию спектрального распределения коэффициентов отражения.

Единая диспергирующая система двухканального спектрального устройства обладает достаточно высокой спектральной разрешающей способностью $\delta\lambda \leq 1,8$ нм в рабочем спектральном диапазоне $\Delta\lambda = 520-820$ нм (и $\delta\lambda \leq 2-3$ нм на краях этого диапазона), необходимой для реализации в АПК алгоритма расчета содержания хлорофилла в растениях с применением деривативного вегетационного индекса. Она характеризуется широким динамическим диапазоном, благодаря применению специальных способов организации приема и накопления сигналов с учетом величины вариации освещенности. Полевой спектрометр в составе АПК обеспечивает возможность регистрации спектров отражения растительности в формате коэффициентов отражения при изменениях освещенности в натуральных условиях измерений в диапазоне 10-100 тыс. люкс. Он снабжен оригинальным программным обеспечением, позволяющим в реальном масштабе времени получать ряд наиболее важных характеристик состояния растительности, например, содержание хлорофилла. Последний параметр можно измерять и для объектов, где отсутствует сплошное покрытие почвы растениями. Такого рода измерения представляют существенное затруднение в практике мировых исследований и осуществляются нашей аппаратурой, благодаря разработанному специальному методу обработки спектральных данных.

Сравнительные технические характеристики трех гиперспектральных приборов (двух бортовых и одного наземного, полевого, предназначенного для под спутниковой валидации) приведены в табл. 2.

Таблица 2
Сравнительные технические характеристики бортовых и наземного гиперспектральных приборов

Авиа/космическая платформа	Гиперспектральная аппаратура (изготовитель)	Спектрометр	Конфигурация сенсора	Спектральный диапазон, нм	Количество спектральных каналов	Спектральное разрешение, нм	Частота кадров (время интеграции)	Тип фотоприемника, розрядность АЦП	Дополнительные данные
КА (Россия)	Ресурс-П (Красногорский ОМЗ, Россия) [3, 7]	Спектрометры на дисперсионной призме	Pushbroom	400 – 650 630 – 1000	96	5-7	Частота строк при считывании 14,8 КГц. [3]	Матричные ФПЗС ВЗН-типа «Кадр-РП» общего формата 216x1024, [3]	Высокоскоростные охлаждаемые на 40°C матрицы ФПЗС ВЗН матрицы «Кадр-РП» созданы в ЗАО НПП «ЭЛАР» специально для Ресурс-П [3]
КА EO-1 (США)	HYPERION (NASA, США) [7, 24]	Один спектрометр на выпуклой двухзональной дифракционной решетке	Pushbroom	400 – 2500	220	10	н/д	HgCdTe 12 (16)*	С охлаждением
Наземный полевой аппаратно-программный спектрометрический комплекс (Украина)	Полевой АСК (Корпорация НПО «Арсенал», Украина) [4, 5, 20, 21, 28]	Спектрометр на плоской нестандартной дифракционной решетке	Pushbroom (с одного кадра, с суммированием по столбцу)	520 – 820	≥ 150	1,8-3	Единичный пуск	Kodak Digital Science KAC-1310 CMOS [27] 10 бит	Матрица с внутренним АЦП, без охлаждения 1280 x 1024 пикселей (используется: 1024 x 520- измерительный канал; и 1024 x 334- опорный канал) Размер пикселя 6 x 6 мкм.

* - данные с разных источников

По сравнению с известным современным полевым спектрорадиометром **FieldSpec 4 FR** [26] производства фирмы ASD (США), созданный образец специализированного АПК имеет следующие преимущества:

- АПК не требует повторной перекалибровки при даже незначительном изменении освещенности, цветовой температуры источника освещения или угла солнцестояния;

- АПК имеет возможность дистанционного определения содержания хлорофилла в растительности в полевых условиях.

Проверка экспериментального образца полевого АПК для дистанционного определения содержания хлорофилла в растительности в натуральных условиях осуществлялась на опытных участках Института физиологии НАН Украины и на опытных полях института в Васильковском районе Киевской области. Натурные и полевые испытания этого образца в натуральных условиях проводились на разных фазах вегетации в период весна-осень течение нескольких лет. Часть измерений проводили в условиях переменной облачности, что позволило получить спектры одного участка при разной интенсивности освещения.

По мере подъема над горизонтом солнце из красного становится в зените бело-желтым, а его цветовая температура повышается с 2200°K до 5700°K. Цвет неба зависит от многих факторов и изменяется от голубого до синего. При этом, цветовая температура неба – более 15000 °K.

Результаты испытания в полевых условиях созданного образца спектрометрического АПК:

- показали полное соответствие поставленным техническим требованиям в широком диапазоне освещенности 10.000-120.000 лк, цветовой температуры источника освещения от 2200°K до 15000°K и зенитных углах Солнца до 170°. Изменение D_{725}/D_{702} составляло менее 1% и не зависило ни от уровня освещенности, ни от изменения угла солнцестояния [4];

- подтвердили возможность измерения с помощью АПК содержания хлорофилла в условиях низких значений проективного покрытия почвы растительностью (до 25% включительно, даже на таком высоком фоне, как песок) [4, 13].

Выводы

Данные, получаемые при помощи бортовых мульти- и гиперспектральных сканеров, требуют валидации с помощью наземных спектрометрических полевых измерений. В связи с этим возникла необходимость создания специализированного спектрального АПК подспутникового обеспечения для дистанционного спектрометрического зондирования растительности в полевых условиях и прове-

дения обработки полученной информации, в частности, расчета содержания хлорофилла в биомассе по специальным алгоритмам.

В данной работе рассмотрены как краткий поход к проблеме подспутниковой валидации, так и особенности конструкции созданного и испытанного авторами на протяжении нескольких лет экспериментального образца специализированного наземного полевого спектрального АПК для дистанционного исследования растительности. Эти испытания не только выявили преимущества прибора по сравнению с зарубежными аналогами, но и позволили получить ценную информацию, которая может быть положена в основу новых технологий в области валидации космических и авиационных мульти- и гиперспектральных измерений.

Работа поддержана и ведется в рамках проекта УНТЦ № 5240.

Список литературы

1. АТ «КазГеоКосмос» - [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://www.kgc.kz/tehnolog5.htm>.
2. Вегетационные индексы. Перечень индексов и формул их определения [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.gis-lab.info/qa/vi.html>.
3. ФПЗС «Кадр-ПП» для гиперспектральной аппаратуры [Электронный ресурс] / Г.И. Вишневский, М.В. Четвергов, А.С. Красовский, М.Г. Выдревич, О.П. Курова // Сборник тезисов докладов научно-технической конференции «ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И ТЕХНОЛОГИИ». - Красногорск, 17-18 января 2013 г. - С. 54-57 - Режим доступа: http://zenit-foto.ru/images/phocagallery/knz/akademiya_kontenant/konferencii/sbornik.pdf
4. Донець В.В. Обґрунтування структури апаратурно-програмного комплексу для дистанційного зондування рослинності в польових умовах: Автореф. дис. канд. техн. наук. — Київ, 2010. — 19 с.
5. Донець В.В. Двоканальний авіаційний гіперспектрометр для безпілотних носіїв. / В.В. Донець, С.О. Пономаренко, В.О. Яценко // Ювілейна науково-практична конференція «Актуальні проблеми авіаційної техніки», 7-8 квітня 2011 року. м Київ. – Тези доповідей та виступів. – С. 39.
6. Донець В.В. Оптимізація основних параметрів гіперспектрального комплексу для дослідження растительности / В.В. Донець, В.А. Яценко, О.В. Семенов // Системи управління, навігації та зв'язку. – 2011. – Вип. 4(20). – С. 44-49.
7. Донець В.В. Особенности применения приемников излучения в бортовых гиперспектрометрах / В.В. Донець, Л.И. Муравский // Космічна наука і технологія. – 2012. – Т. 18. № 3. – С. 20–37.
8. Космический аппарат «Ресурс-П» [Электронный ресурс] - Режим доступа: http://geomatiga.ru/pdf/2010_04/2010_04_004.pdf.
9. Связь отражательных характеристик листьев озимой пшеницы с содержанием в них азота и хлорофилла в течение вегетации / С.М. Кочубей, Т.М. Шадчина, Н.И. Кобец, В.В. Дмитриева // Физиология и биохимия культурных растений. - 1988. -Т. 20., № 6. - С. 530 - 534.
10. Кочубей С.М. Количественный анализ формы спектральных кривых отражения листьев растений как способ тестирования их состояния / С.М. Кочубей,

Т.М. Шадчина, Н.И. Кобець // Физиология и биохимия культурных растений. – 1988. – Т. 20, № 6. – С. 535-539.

11. Кочубей С.М. Спектральные свойства листьев растений как основа методов дистанционной диагностики / С.М. Кочубей, Т.М. Шадчина, Н.И. Кобець – К.: Наукова думка, 1990. – 136с.

12. Кочубей С.М. Аппаратура и методы дистанционного зондирования растительности в оптическом диапазоне / С.М. Кочубей // Космическая наука и технология. – 2002, Т. 8, № 2/3. – С. 271-275.

13. Кочубей С.М. Анализ влияния характеристик спектрометра на параметры спектра отражения растительности для оценки содержания хлорофилла / С.М. Кочубей, Донец В.В. // International Conference "Dynamical system modeling and stability investigation DSMSI-2007", May 22-25, 2007, Kyiv, Thesis of conference reports. – P. 202.

14. Кочубей С.М. Использование деривативных вегетационных индексов для устранения помех, создаваемых отражением почвы при дистанционном зондировании растительности / С.М. Кочубей, Т.А. Казанцев, В.В. Донец // Космична наука і технологія. – 2008, Т. 14. № 1. – С. 69-74.

15. Лялько В.І. Багатоспектральні методи дистанційного зондування землі в задачах природокористування / В.І. Лялько, М.О. Попов. – Київ: Наукова думка, 2006. – 360 с.

16. На Байконур доставили КА дистанционного зондирования «Ресурс-П» [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://www.gisa.ru/90272.html>.

17. Патент України на корисну модель № UA 70505 U від 11.06.2012, М.кл. G01T 7/00. ПОЛЬОВИЙ СПЕКТРОМЕТР ДЛЯ ТЕСТУВАННЯ СТАНУ РОСЛИННОСТІ / Кочубей С.М., Донец В.В., Казанцев Т.А.; заявник та власник Інститут фізіології рослин та генетики НАН України.- № заявки **и 2011 15271** від 23.12.2011, опубл. 11.06.2012, Бюл. № 11.

18. Попов М.О. Стан і перспективи розвитку гіперспектральних систем аерокосмічної розвідки / М. О. Попов, П. М. Пionтківський, С. В. Гринюк // Наука і оборона. -2012, №2. - С.39-47 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nio.mil.gov.ua/pdf/2012-2.pdf>.

19. Попов М.А. Обоснование технического облика бортового оптико-электронного комплекса среднего пространственного разрешения перспективного спутника дистанционного зондирования Земли / М.А. Попов, Н.И. Лихолит, С.А. Станкевич, С.П. Ковальчук, В.В. Полежаев, В.М. Тягура // [Электронный ресурс]. – Режим доступа к статье: http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2010t2/293-299.pdf.

20. Річний звіт Національного космічного агентства України за 2008 рік. – Київ: Нац. косміч. агентство України, 2008. – С. 16-17. – Режим доступу до звіту: http://www.nkau.gov.ua/pdf/NSAU_report_2008.pdf.

21. Семенів О.В. Багатокритеріальна оптимізація технічних характеристик спектрофотометра для оцінювання стану рослинності / О.В. Семенів, В.В. Донець, П.О. Хандрига, В.О. Яценко // Друга Всеукраїнська конференція з запрошенням закордонних учасників «Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки GEO-UA 2010 14-17 червня 2010, м Київ, Матеріали доповідей. – С. 137.

22. Шухостанов В.К. Гиперспектральная диагностика современной техносферы / В.К. Шухостанов, Л.А. Ведешин, А. Г. Цыбанов// – С. 243-248. – Режим доступу: <http://elibrary.ru/item.asp?id=15610802>.

23. Яценко В.А. Новый метод дистанционного оценивания содержания хлорофилла в растительности и его программно-аппаратная реализация / В.А.Яценко, С.М.Кочубей, П.А.Хандрига, В.В.Донец, О.В.Семенов // Космічна наука і технологія. - 2007. Т 13. No 3. С. 35-44.

24. Barry P.S. The EO-1 Mission: Hyperion data [Электронный ресурс] / P. S. Barry, J. Pearlman // August 14, 2001 – Режим доступа: www.fas.org/irp/imint/hyperion.pdf.

25. Donets V.V. Optimal spectrometer synthesis for remote sensing of vegetation / V.V. Donets, O.V. Semeniv, V.A. Yatsenko // Tenth International Young Scientists Conference "Optics and high technology SPO 2009", October 22-25, 2009, Kyiv, Ukraine, Scientific works. - P. 157.

26. FieldSpec 4 Standard-Res Spectroradiometer [Электронный ресурс] - Режим доступа: <http://www.asdi.com/products/fieldspec-spectroradiometers/fieldspec-4-standard-res>.

27. Kodak Digital Science KAC – 1310 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://ljr.bagn.obs-mip.fr/observing/docu/KAC1310_datasheet.pdf.

28. Yatsenko V. Hardware-software Complex for Chlorophyll Estimation in Phytocenoses Under Field Conditions/ V. Yatsenko, S. Kochubey, V. Donets, T. Kazantsev // SPIE Europe International Symposium «Optical Systems Design», 12-16 September 2005, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Proc. of SPIE, 2005, Vol. 5964. – P. 6.

29. ZEMAX: Software for Optical System Design [Электронный ресурс] — Режим доступа к материалам: <http://www.zemax.com>.

Надійшла до редколегії 5.08.2013

Рецензент: д-р техн. наук, ст. наук співр. Я.І. Зелик, Інститут космічних досліджень НАНУ-НКАУ, Київ.

СТВОРЕННЯ ПОЛЬОВОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АПАРАТУРНО-ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ ДЛЯ ПІДСУПУТНИКОВОЇ ВАЛІДАЦІЇ ДИСТАНЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ РОСЛИННОСТІ

В.В. Донець, С.М. Кочубей, В.А. Яценко, Т.А. Казанцев, В.В. Бровченко

Розглянуті особливості конструкції створеного польового спектрального апаратурно-програмного комплексу для підсупутникової валідації дистанційного дослідження рослинності.

Ключові слова: спектрометричний комплекс, дистанційне зондування, підсупутникова валідація.

CREATION OF THE FIELD SPECTRAL HARDWARE-SOFTWARE COMPLEX FOR SUBSATELLITE VALIDATION OF THE CONTROLLED FROM DISTANCE RESEARCH OF VEGETATION

V.V. Donets, S.M. Kochubey, V.A. Yatsenko, T.A. Kazantsev, V.V. Brovchenko

The features of construction of the created field spectral apparatus-programmatic complex are considered for subsatellite validation of the controlled from distance research of vegetation.

Keywords: spectrometry complex, remote sensing, subsatellite validation.