

УДК 528.855+681.7

Ю. В. Беляев, Ю. А. Крот, Л. В. Катковский, А. В. Роговец, С. В. Хвалей

Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченка
Білоруського державного університету, Мінськ, Білорусь

ОРГАНИЗАЦИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЕЛОРУССКОГО ПОДСПУТНИКОВОГО ПОЛИГОНА ДЛЯ ПОЛЕТНЫХ КАЛИБРОВОК ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Розглядаються питання, пов'язані з організацією та подальшим використанням на території Республіки Білорусь підспутникового полігону, організованого на базі учбової географічної станції «Західна Березіна» для забезпечення наземного обслуговування Білоруської космічної системи дистанційного зондування.

ПРИНЦИПЫ И ЗАДАЧИ ПОЛИГОННОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

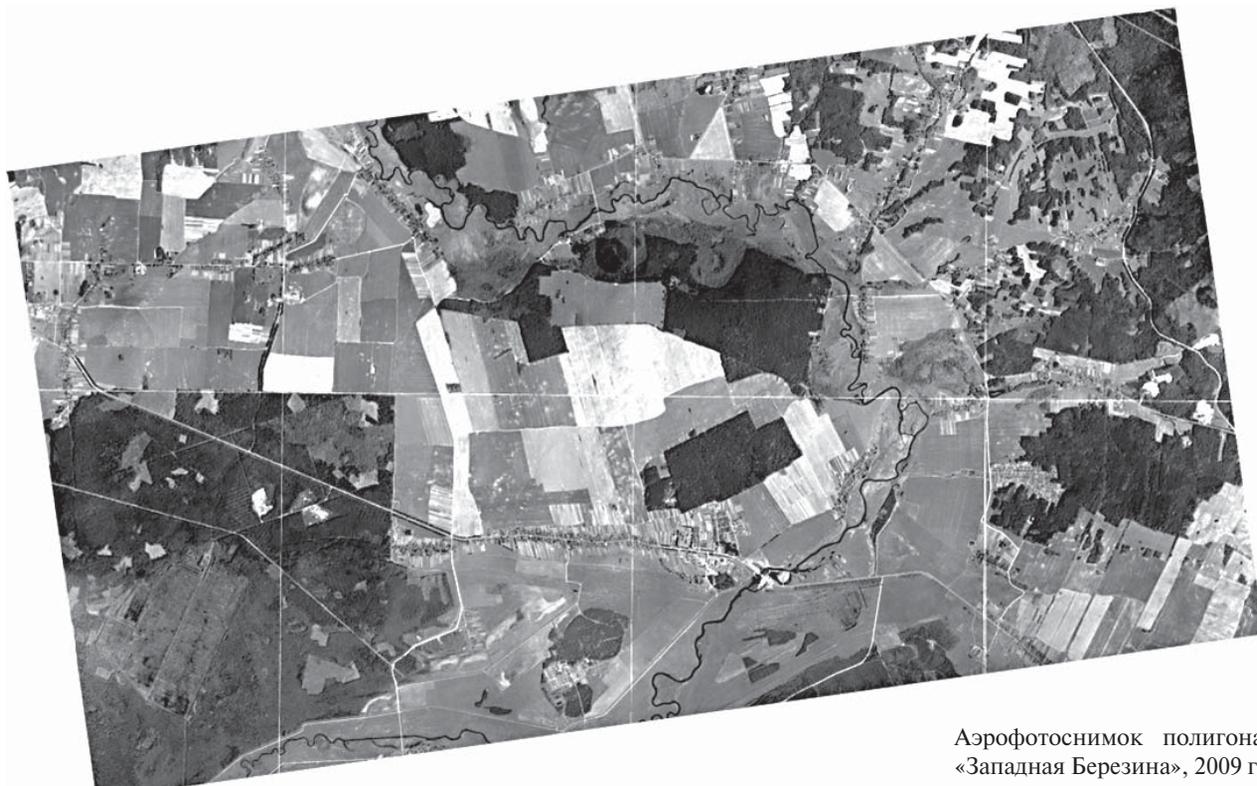
По мере разработки и создания оптоэлектронных систем, предназначенных для долговременного функционирования в условиях космического полета, встает важнейшая задача радиометрических калибровок указанных систем на борту космического носителя по абсолютным значениям яркости или потока регистрируемого излучения [8, 9]. Существенное место при этом отводится измерениям на подспутниковых полигонах.

В задачи полигонного обслуживания входят: верификация (проверка) географической привязки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), валидация (подтверждение заданных значений) параметров сенсоров, верификация методик ДЗЗ и результатов интерпретации данных; обеспечение наземными данными разработки новых средств ДЗЗ и дешифрирования его результатов, математическое планирование эксперимента; проведение синхронных и многоуровневых экспериментов [3]. С этой целью на полигонах закладываются репера, тестовые и эталонные участки [2, 3].

На полигоне-стационаре, обеспечивающем решение задач полигонов всех типов (калибровочно-реперных, эталонных, тематических) в непрерывном (круглосуточно-круглогодичном) режиме [4], должны быть представлены эталонные объекты различной природы и назначения: точечные объекты для субпиксельной привязки данных дистанционных измерений; объекты для валидации разрешающей способности орбитальных средств, геометрической коррекции и калибровки (миры, бетонные реперы известной формы и размеров); сосредоточенные и распределенные активные и пассивные калибровочные средства и реперы оптического диапазона (отражательные, цветные и поляризационные реперы, основные типы почв, асфальтовые покрытия, водные реперы); эталонные участки монокультур древостоев и сельскохозяйственной растительности.

Также должны быть организованы непрерывные фенологические и метеонаблюдения, мониторинг состава воздуха, измерение и анализ состава осадков, отбор и анализ почв и другие общие наблюдения.

Общее описание полигона включает в себя ГИС на следующей картографической основе: топографическая, геологическая карты, карты земле- и лесоустройства, рельефа, сельскохозяйственных угодий и др. Специальное описание по-



Аэрофотоснимок полигона «Западная Березина», 2009 г.

лигона включает описание на основе авторских методик, адекватных задачам ДЗЗ, территории стационара и тестовых площадок в теле полигона различной природной этимологии [2, 3].

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОДСПУТНИКОВОГО ПОЛИГОНА «ЗАПАДНАЯ БЕРЕЗИНА»

Полигон-стационар «Западная Березина» создается в рамках программы Союзного государства «Космос-НТ» с целью обеспечения наземного обслуживания Белорусской космической системы дистанционного зондирования в интересах решения хозяйственных и прикладных задач

Таблица 1. Координаты углов полигона «Западная Березина»

Углы	Широта	Долгота
Верхний левый	54° 08' 51.45" N	26° 15' 48.28" E
Верхний правый	54° 09' 57.02" N	26° 28' 14.64" E
Нижний левый	54° 04' 57.72" N	26° 16' 48.37" E
Нижний правый	54° 06' 03.01" N	26° 29' 13.23" E

Беларуси. Данный полигон войдет в международную систему полигонов-стационаров, создаваемую в настоящее время на территории стран СНГ.

В первую очередь подспутниковый полигон необходим для проведения калибровки Белорусского космического аппарата (БКА). Основной задачей полигона является получение данных для проведения калибровки оптической аппаратуры БКА в видимом и ближнем ИК-диапазоне длин волн. На полигоне планируется проводить синхронные измерения как минимум на двух уровнях — наземном и авиационном. В создании подспутникового полигона участвует несколько белорусских организаций, выполняющих различные задачи. Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко Белгосуниверситета разрабатывает методики и аппаратуру для проведения полетных калибровок космических аппаратов [1].

Полигон находится на территории учебной географической станции «Западная Березина»

географического факультета Белорусского государственного университета и представляет собой прямоугольник площадью 100 км², ориентированный на 98° к экватору согласно наклону орбиты БКА (см. табл. 1). Выбор участка для размещения полигона основывается на том, что учебная станция имеет соответствующую инфраструктуру для обеспечения работ и возможности для ежегодного обновления информации.

В геологическом отношении участок приурочен приподнятой части по поверхности кристаллического фундамента Белорусской антеклизы. Почвенный покров характеризуется развитием подзолистых почв разного генезиса. Рельеф представлен моренными, водно-ледниковыми, пойменными и другими образованиями. Растительный покров представлен геоботанической подзоной дубово-темнохвойных лесов, лесной покров — сосново-еловыми средневозрастными и приспевающими насаждениями, луговая растительность — мелкозлаковыми и мелкотравными травостоями.

Из водных объектов необходимо отметить Соковичское водохранилище и долину реки Западная Березина. Здесь представлены самые разные формы и виды рельефа, пойма реки, сама река со старицами, водохранилище, холмисто-моренный рельеф, лес, луг, сельскохозяйственные земли.

Для дешифрирования видов земель полигона Белорусским предприятием сельскохозяйственных и аэрофотогеодезических изысканий была проведена аэрофотосъемка с пространственным разрешением не хуже 30 см (рисунок). После обработки аэрофотоснимка установлено, что на территории полигона представлено более 20 подвидов различных подстилающих поверхностей. Лесные массивы, пахотные земли и луга представлены в равных долях (около 25 % от общей площади каждая).

ТРЕБОВАНИЯ К КАЛИБРОВочНЫМ И ТЕСТОВЫМ УЧАСТКАМ ОПТИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА

Эталонные площадки для спектрально-энергетических калибровок орбитальных приборов должны обладать однородностью отражатель-

ных характеристик на всей площади, чтобы перекрывать мгновенное поле зрения съемочной системы.

На современных полигонах пассивные оптические репера представлены как однородными участками подстилающей поверхности (монокультур растительности, леса и т. п.) так и искусственными полотнищами (разноцветными лавсановыми покрытиями, устанавливаемыми под разными углами). Минимальный размер площадки выбирается как сумма величины элемента разрешения l и радиуса помехи бокового подсвета для заданной погрешности яркости объекта (желательно не менее $3l$).

Смысл выбора различных эталонных площадок состоит в том, что должны быть представлены поверхности, совокупность которых как можно подробнее и равномернее представляет весь диапазон значений коэффициента спектральной яркости (КСЯ) — от 0 до 1 — в каждом канале съемочной системы. Поэтому целесообразно включать в состав площадок следующие объекты: водный репер (искусственный или естественный); реперы различных типов подстилающей поверхности (почвенные ямы, асфальтовые покрытия и др.) с глубинными датчиками температуры и влажности; эталонные площадки сельскохозяйственных культур и монокультур древесной растительности.

Поскольку для естественных реперов практически невозможно поддерживать неизменными их оптические характеристики достаточно длительное время, поэтому их целесообразно использовать в синхронных многоуровневых измерениях.

Тестовые участки, выбираются таким образом, чтобы выборка была репрезентативная и охватывала все виды подстилающих поверхностей. При выборе естественных участков необходимо учитывать особенности спектральных характеристик отражения объектов. Кривые КСЯ в видимой области у растительных объектов в вегетативный период имеют примерно одни и те же закономерности, что обусловлено в основном хлорофиллом. Для растительности характерна форма кривых КСЯ с максимумом в зеленой зоне спектра 540—580 нм и минимумом в сине-

фиолетовой 400—470 нм и красной 680—690 нм зонах спектра.

Оптические характеристики различных растений не идентичны и определяются составом и состоянием пигментов, растительных и покровных тканей, морфологией растения в целом, возрастом, экологическими условиями. Неодинаковы и отражательные свойства различных частей растений, их совокупностей. Эти различия более четко выражены в узких зонах спектра. Растения, произрастающие в благоприятных условиях, характеризуются меньшими КСЯ, а их спектральные кривые имеют более четко выраженный характер в зеленой зоне спектра. С ухудшением условий коэффициенты яркости растений, как правило, возрастают. Более высокие КСЯ у растений, произрастающих в условиях меньшей освещенности.

В ИК-области спектра различия в спектральной яркости крон основных древесных пород более значительны. В связи с этим при съемке в инфракрасной области спектра тоновые различия между группами древесных пород более существенны. В частности, эти различия надежно позволяют различать хвойные породы от лиственных, здоровые деревья от поврежденных. При применении методов компьютерного анализа и классификации спектров и изображений возможно установление достаточно большого числа градаций состояния объекта [6].

АППАРАТУРА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ НАЗЕМНЫХ И АВИАЦИОННЫХ СЪЕМОК КАЛИБРОВОЧНЫХ УЧАСТКОВ ПОЛИГОНА

К спектральной аппаратуре, обеспечивающей полетные калибровки наземными данными, предъявляются повышенные требования по точ-

ности спектрально-угловых измерений отраженного излучения.

Для обеспечения наземных измерений на полигоне «Западная Березина» используются спектро-радиометры собственной разработки: портативный спектро-радиометр МС-12 на область спектра 0.35—1.05 мкм и полевой спектро-радиометр ПСР-02 на область 0.35—2.5 мкм (см. табл. 2).

Оба прибора предназначены для измерений спектрально-угловых и поляризационных характеристик излучения, отражения (рассеяния), пропускания и люминесценции разнообразных природных и искусственных объектов и сред [5, 6]. В сочетании с дополнительным набором оборудования (сменные объективы, световодные и поляризационные насадки) обеспечивают высокоточные абсолютные измерения и экспресс-анализ спектров, как в лабораторных, так и в полевых условиях при дистанционном зондировании со стационарных точек и подвижных (авиационных) носителей. Спектрометры откалиброваны по абсолютным значениям СПЭЯ в аттестованной лаборатории НИИПФП им. А. Н. Севченко БГУ на метрологическом комплексе «Камелия-М» [7].

Радиометрические погрешности наземной аппаратуры должны быть меньше соответствующих погрешностей космических съемочных систем: Погрешности измерения КСЯ подстилающих поверхностей спектро-радиометров МС-12 и ПСР-02 составляют 5—10 %, погрешность измерения угловых характеристик $\pm 2^\circ$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На текущем этапе работ по организации подспутникового полигона «Западная Березина» проведено его полное обследование, выбраны участки, потенциально пригодные в качестве ка-

Таблица 2. Характеристики спектро-радиометров для проведения измерений на полигоне «Западная Березина»

Спектро-радиометр	Рабочий диапазон, мкм	Спектральное разрешение, нм	Разрядность АЦП, бит	Питание
МС-12	0.35—1.05	2	12	от портативного компьютера через USB-порт
ПСР-02	0.35—2.5:			от аккумулятора 12 В
	0.35—1.1	2.5	12	
	1.1—2.5	10	16	

либровочных, и проведены измерения оптических характеристик этих участков. Осуществлена обработка результатов измерений, на основании которой получены спектральные коэффициенты яркости исследуемых объектов. Установлено, что наиболее подходящими в качестве калибровочных площадок могут быть участки песчаных карьеров, торфяников, река Березина, отдельные участки леса и луга, асфальтовые площадки, крыши зданий на территории географической станции, обладающие стабильными спектральными характеристиками.

1. *Атрошенко Л. М., Беляев Ю. В., Катковский Л. В. и др.* Организация подспутникового полигона «Западная Березина» для полетных калибровок съемочных систем космических аппаратов // Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки: матеріали доповідей: (м. Київ, 2010 р.). — К.: Освіта України, 2010. — С. 35.
2. *Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., Катковский Л. В.* Состав реперов и калибровочных средств оптического и радиодиапазонов подспутниковых полигонов // Четвертый Белорусский космический конгресс: материалы конгресса, Минск, 27—29 окт. 2009 г.: в 2 т. / ОИПИ НАН Беларуси; редкол.: А. В. Тузиков [и др.]. — Минск, 2009. — Т. 2. — С. 20—24.
3. *Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., Костяшкин С. И. и др.* Подспутниковые полигоны Украины // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Сб. науч. ст. — М.: Ин-т космич. исслед. РАН, 2008. — Том II. — С. 265—271.
4. *Атрошенко Л. М., Горобец Н. Н., Костяшкин С. И. и др.* Подспутниковые полигоны обеспечения надежности результатов ДЗЗ [Электронный ресурс] // ДНВЦ «Природа»: [сайт]. — 2004—2009. — Режим доступа: <http://www.pryroda.gov.ua/ua/index.php?newsid=1208>.
5. *Беляев Б. И., Беляев Ю. В., Катковский Л. В. и др.* Оценка и анализ параметров полевого спектрорадиометра на область спектра 350—2500 нм // Журн. прикладной спектроскопии. — 2009. — **76**, № 5. — С. 607—614.
6. *Беляев Б. И., Катковский Л. В.* Оптическое дистанционное зондирование. — Минск: БГУ, 2006. — 455 с.
7. *Беляев Ю. В., Катковский Л. В., Роговец А. В. и др.* Методические аспекты спектрально-энергетических калибровок оптической аппаратуры // Информационные технологии, электронные приборы и системы (ITEDS'2010): Матер. Междунар. научно-практ. конф., 6—7 апреля 2010 г., Минск. — Минск: Нац. биб-ка Беларуси, 2010. — С. 227—232.
8. *Slater P. N., Biggar S. F., Holm R. G., et al.* Reflectance- and radiance-based methods for the in-flight absolute calibration of multispectral sensors // Remote Sens. Environ. — 1987. — **22**. — P. 11—37.
9. *Teillet P. M., Slater P. N., Ding Y., et al.* Three methods for the absolute calibration of the NOAA AVHRR sensors in-flight // Remote Sens. Environ. — 1990. — **31**. — P. 105—120.

Надійшла до редакції 17.12.10

*Yu. V. Belyaev, Yu. A. Krot, L. V. Katkovsky,
A. V. Rogovets, S. V. Khvalei*

INITIATION AND APPLICATION OF BELARUSIAN SUBSATELLITE TEST SITE FOR IN-FLIGHT CALIBRATION OF SPACE OPTICAL SYSTEMS

We describe some questions involving the initiation and future application of the subsatellite test site within the territory of the Republic of Belarus. The subsatellite test site is organized on the basis of the educational geographic station «Zapadnaia Berezina» with the aim of ground service of the Belarusian remote sensing space system.