

## Общая методика и результаты спектрорадиометрического исследования отражательных свойств борщевика Сосновского в диапазоне 320–1100 нм в интересах дистанционного зондирования Земли

А. Н. Григорьев, Д. М. Рыжиков

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, 190000, Россия

E-mail: ryzhikov89@yandex.ru

В статье представлены результаты исследования, выполненного для решения задачи по обнаружению территорий произрастания борщевика Сосновского методами дистанционного зондирования, основанными на использовании многоспектральных оптико-электронных средств. На данной стадии проработки указанной задачи предложена общая методика полевых спектрорадиометрических исследований борщевика Сосновского, включающая основные этапы по выбору тестового полигона и оцениванию его свойств, проведению калибровочных и спектрорадиометрических измерений с последующей обработкой и анализом полученных данных. Сформулированы частные рекомендации по выполнению полевых работ со спектрорадиометром. Представлено описание реализации предложенной методики с использованием спектрорадиометра PSR-1100, обеспечивающего получение зависимостей спектральной плотности энергетической яркости и коэффициента спектральной яркости от длины волны излучения в диапазоне 320–1100 нм. Дано описание выбранного тестового полигона в Ленинградской области, а также получены оценки площадей проективного покрытия различных типов подстилающей поверхности на территории полигона. Приведены результаты спектрорадиометрических измерений элементов борщевика Сосновского, находящегося в фенологической фазе цветения, и окружающей травяной растительности. По полученным сведениям выполнен анализ, в результате которого выявлены особенности отражательной способности для отдельных элементов борщевика Сосновского по сравнению с окружающей травяной растительностью. В ходе анализа учтены типовые спектральные параметры современных многоспектральных оптико-электронных средств дистанционного зондирования.

**Ключевые слова:** коэффициент спектральной яркости, спектрорадиометр, борщевик Сосновского, дистанционное зондирование Земли

Одобрена к печати: 15.01.2018

DOI:10.21046/2070-7401-2018-15-1-183-192

### Введение

Исследование отражательных свойств объектов оптико-электронной съёмки является неотъемлемой частью решения задач их обнаружения дистанционными методами. Результаты полевых измерений отражательных свойств объектов применяются для дешифрирования данных съёмки, выполненной средствами дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) (Кондратьев и др., 2016).

Вид растений «борщевик Сосновского» (БС, *лат.* *Heracleum Sosnowskyi*), в 1970-х гг. выращиваемый в качестве кормовой культуры, а в настоящее время признанный инвазивным и вредоносным сорным, занимает значительные площади в ряде регионов Российской Федерации. Неконтролируемое распространение БС приводит к сокращению площади сельскохозяйственных земель, повышает степень опасности получения ожогов и обострения аллергических заболеваний у людей (Жиглова, 2012; Симонов и др., 2011).

Мониторинг распространения БС является важной практической задачей, которая может эффективно решаться с применением методов и средств ДЗЗ. При этом возникает необходимость в исследовании отражательных свойств данного вида растений для выявления его информативных признаков в условиях ДЗЗ, что обуславливает актуальность темы данного исследования.

## Методика исследования отражательных свойств борщевика Сосновского в полевых условиях

Предлагаемая методика исследования отражательных свойств БС предполагает проведение спектрорадиометрических измерений в полевых условиях при естественном солнечном освещении. Это связано с тем, что при транспортировке образцов растений для проведения измерений характеристик отражения этих образцов в лабораторных условиях происходит увядание, осыпание лепестков, что оказывает негативное влияние на результат. Кроме того, результаты измерений характеристик отражения в естественных полевых условиях при соответствующей интерпретации могут сравниваться с данными, полученными многоспектральными и гиперспектральными средствами ДЗЗ (Григорьев, 2014; Grigoriev, Shilin, 2013).

Методика исследования отражательных свойств БС с использованием средств полевой спектрорадиометрии включает в себя следующие этапы:

- 1) выбор тестового полигона, в пределах которого произрастает БС;
- 2) оценивание соотношений площадей различных объектов на территории выбранного полигона;
- 3) проведение спектрорадиометром калибровочных измерений, необходимых для учёта и компенсации вариаций естественной освещённости от Солнца;
- 4) проведение спектрорадиометрических измерений БС и окружающей растительности;
- 5) обработка и анализ результатов измерений, формирование выводов о наличии информативных признаков отражательных свойств БС.

В качестве тестового полигона для проведения спектрометрических измерений может быть выбран участок местности, про который известно, что БС на нём не подвергался химической или механической обработке, т.е. произрастает в естественных природных условиях. Поверхность БС, формирующая отражённый поток излучения, неоднородна по структуре и включает в себя различные элементы растения: листья и соцветия. В связи с этим при использовании спектрорадиометра целесообразно проводить измерения всех имеющихся элементов БС как отдельных объектов. Следует отметить, что в естественных условиях в силу неодновременности смены фенологических фаз элементы разных растений данного вида имеют различное состояние и, как следствие, различные характеристики отражения. Тестовый полигон должен репрезентативно представлять текущее состояние БС для определённого региона.

Размер тестового полигона должен не только превышать величину пространственного разрешения материалов ДЗЗ, которые предполагается использовать для дальнейших исследований, но и обеспечивать достоверное распознавание его на изображениях. В свою очередь, при полевых работах целесообразно определить границу тестового полигона и опорные точки на местности в общепринятых системах координат, например с применением средств глобальных навигационных спутниковых систем, что позволит эффективно использовать полученные пространственные данные в геоинформационных проектах.

Для определения интегральных характеристик отражения БС в целом на естественном фоне его произрастания требуется оценить соотношения площадей различных элементов растения БС, типов поверхности грунта и фоновой растительности в границах выбранного тестового полигона. Наличие таких оценок наряду со сведениями о спектральных и пространственных параметрах оптико-электронной съёмки обеспечивает оценивание яркостных признаков заданных объектов применительно к конкретной аппаратуре и задачам ДЗЗ.

В рамках выполненной реализации рассматриваемой методики исследования отражательных свойств борщевика Сосновского использовался полевой портативный спектрорадиометр PSR-1100. Данный прибор представляет собой оптико-электронное устройство для спектрорадиометрических измерений в диапазоне длин волн электромагнитного излучения 320–1100 нм. Угловое поле зрения прибора составляет 4°. Спектрорадиометр PSR-1100 оснащён многоэлементным приёмником излучения, сформированным из 512 элементов.

Согласно документации, спектрорадиометр PSR-1100 обеспечивает измерения со спектральным разрешением 3,2 нм.

Каждое измерение PSR-1100 сохраняется в памяти устройства в виде файла с расширением \*.sed, который используется в программном обеспечении (ПО) DARWin SP в качестве входных данных. Измеряемая устройством величина Radiance — спектральная плотность энергетической яркости (СПЭЯ); единица измерения — Вт/(см<sup>2</sup>·ср·нм).

Значение СПЭЯ, регистрируемое спектрорадиометром, зависит от положения Солнца и метеорологических условий (Гнусарев и др., 2008). Для обеспечения возможности непосредственного сравнения результатов полевых измерений требуется минимизировать вариации освещённости, которые обуславливаются динамикой Солнца и фактором облачности. В силу этого рекомендуется выполнение отдельных измерений в ясную погоду и с минимально возможными промежутками по времени. В рамках работы анализ измерений PSR-1100 проводится при допущении о стационарности во времени условий освещённости в течение периода измерений. Кроме того, проведение отдельных измерений основывается на принципе многократного измерения (не менее трёх) характеристики для одного объекта, имеющего целью исключить фактор ошибки оператора и уменьшить вероятность получения недостоверного результата. При этом рекомендуется проведение спектрометрических и калибровочных измерений в идентичных условиях с выдерживанием расстояния от прибора до объекта и с ориентацией прибора в надирном направлении.

Необходимым опорным измерением является калибровочная характеристика, определяемая в результате измерения СПЭЯ, отражённого от белой калибровочной панели излучения. Белая калибровочная панель обладает свойствами идеально диффузно рассеивающей поверхности в рабочем диапазоне длин волн спектрорадиометра. Калибровочные измерения производятся в начале полевых работ со спектрорадиометром, а также в течение периода времени выполнения работ при изменении условий освещённости.

Обработка результатов измерений заключается в получении спектральных характеристик отражения различных объектов в виде зависимостей СПЭЯ и коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) от длины волны. Для расчета КСЯ применяется формула (Кондратьев, Федченко, 1982):

$$p(\lambda) = \frac{B(\lambda)}{B_0(\lambda)},$$

где  $p(\lambda)$  — КСЯ,  $B(\lambda)$  — СПЭЯ исследуемой поверхности в заданном направлении;  $B_0(\lambda)$  — СПЭЯ идеально рассеивающей поверхности с единичным коэффициентом отражения и освещённой так же, как и исследуемая поверхность. В качестве оценки величины  $B_0(\lambda)$  используется калибровочная характеристика, полученная в результате измерения СПЭЯ калибровочной панели в условиях эксперимента.

### Экспедиционные исследования в июле 2016 года

В соответствии с рассмотренной методикой в 2016 г. проведена экспедиция, временной период которой соответствовал фенологической фазе цветения БС на территории Ленинградской области. Тестовый полигон, который использовался для проведения полевых измерений отражательных свойств борщевика Сосновского, находится в границах кольцевой автодороги Санкт-Петербурга и улицы Шоссейной Бугровского сельского поселения (рис. 1, см. с. 186). Выбор данного участка местности обусловлен высокой плотностью покрытия территории БС и транспортной доступностью.

На рис. 2 (см. с. 186) приведена фотография внешнего вида участка тестового полигона. Временной промежуток проведения измерений: 12:05–12:15 по местному времени.

На рис. 3 (см. с. 186) приведены фотоматериалы полевой экспедиции, на которых представлены типовые элементы БС, использованные в качестве объектов исследования.

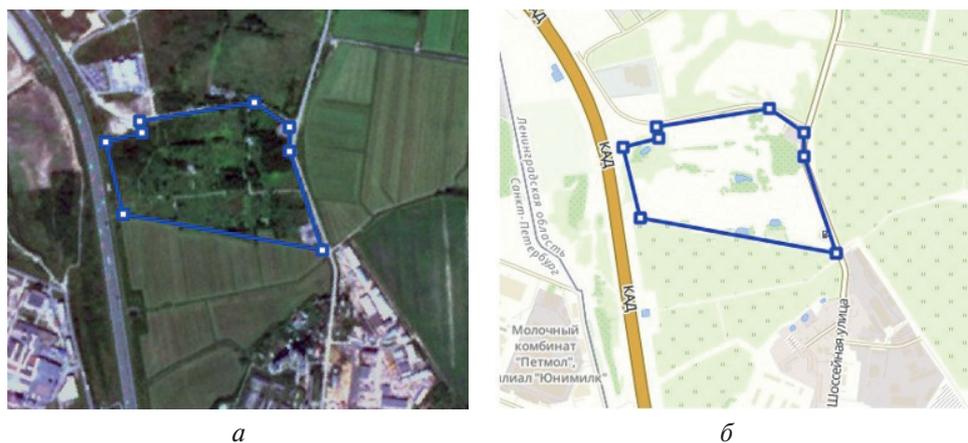


Рис. 1. Тестовый полигон: *а* — спутниковый снимок космического аппарата RapidEye, 2013 г.; *б* — карта OpenStreetMap



Рис. 2. Фотоматериалы экспедиции, участок тестового полигона

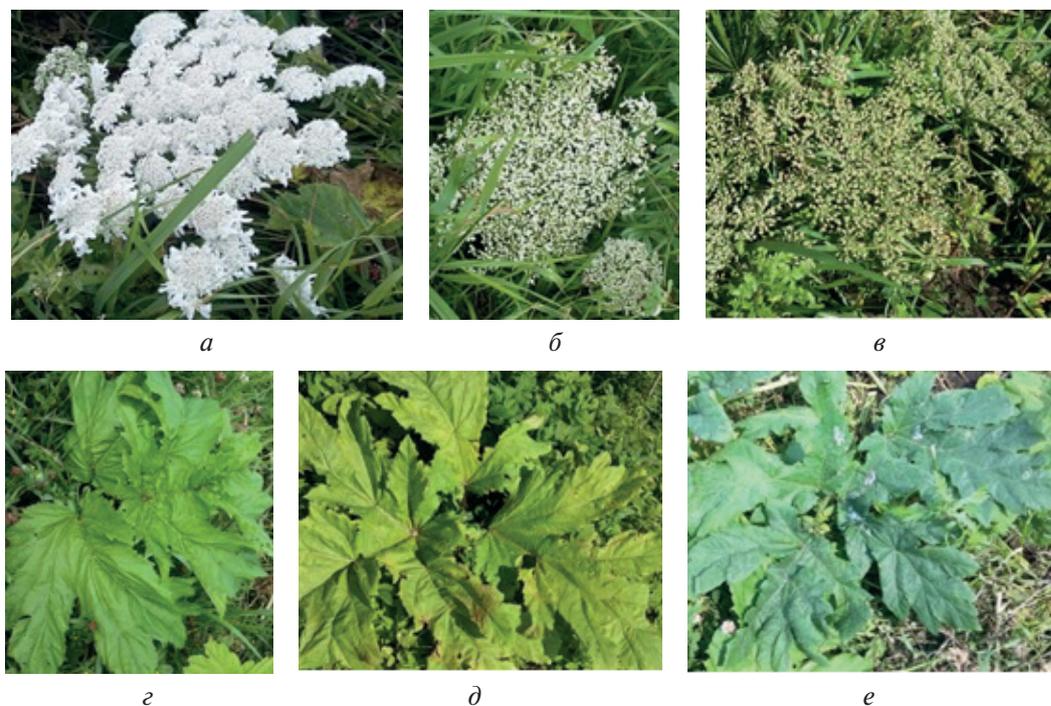


Рис. 3. Фотоматериалы экспедиции 12.07.2016: *а* — соцветие БС, стадия цветения; *б* — соцветие БС, стадия опадения лепестков; *в* — соцветие БС, стадия появления венчиков; *г* — ярко-зелёный лист БС; *д* — желтеющий лист БС; *е* — тёмно-зелёный лист БС

Оценивание площадей проективного покрытия различных типов подстилающей поверхности было проведено с использованием метода Браун-Бланке (Миркин, Наумова, 2009). На репрезентативном участке были оценены площади объектов, относящихся к БС, почве и фоновой растительности. Соотношение площадей типов поверхности в пределах тестового полигона приведено в табл. 1.

Таблица 1. Соотношение площадей типов поверхности в пределах тестового полигона

Тип поверхности	Доля от площади полигона, %
1. Соцветия БС	30
2. Листья БС	60
3. Травяная растительность	8
4. Почва	2

Спектрометрические измерения проводились для элементов БС, приведённых на рис. 3, а также для окружающей травяной растительности. Доля площади полигона, соответствующая обнажённой почве, незначительна и не учитывалась в настоящем исследовании.

### Результаты

Результаты измерений СПЭЯ объектов исследования были обработаны в ПО DARWin SP, что позволило построить зависимости величины СПЭЯ  $V(\lambda)$  от длины волны. Примеры полученных графиков представлены на рис. 4. Основная задача проведения анализа представленных графиков — это обнаружение особенностей отражательной способности БС в диапазонах длин волн, регистрируемых съёмочной аппаратурой большинства спутников ДЗЗ среднего и высокого пространственного разрешения (синий, зелёный и красный диапазоны видимого излучения, а также ближний инфракрасный диапазон) (<https://sovzond.ru/products/spatial-data/satellites/#optic>). В качестве примера на рис. 4 приведены границы спектральных каналов целевой аппаратуры космического аппарата RapidEye, соответствующие указанным спектральным диапазонам. На рис. 5 для исследуемых объектов (см. рис. 3) представлены интервалы значений СПЭЯ  $V(\lambda)$ , построенные по рассчитанным в результате статистической обработки данных эксперимента среднеквадратическим отклонениям (СКО)  $\sigma[V(\lambda)]$ .

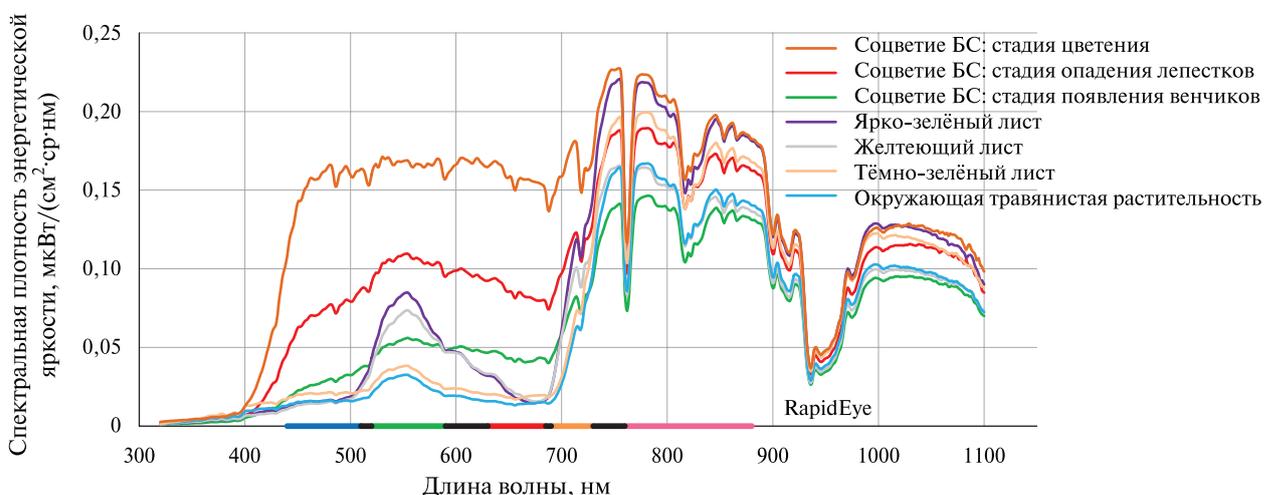


Рис. 4. Графики зависимостей СПЭЯ  $V(\lambda)$  от длины волны

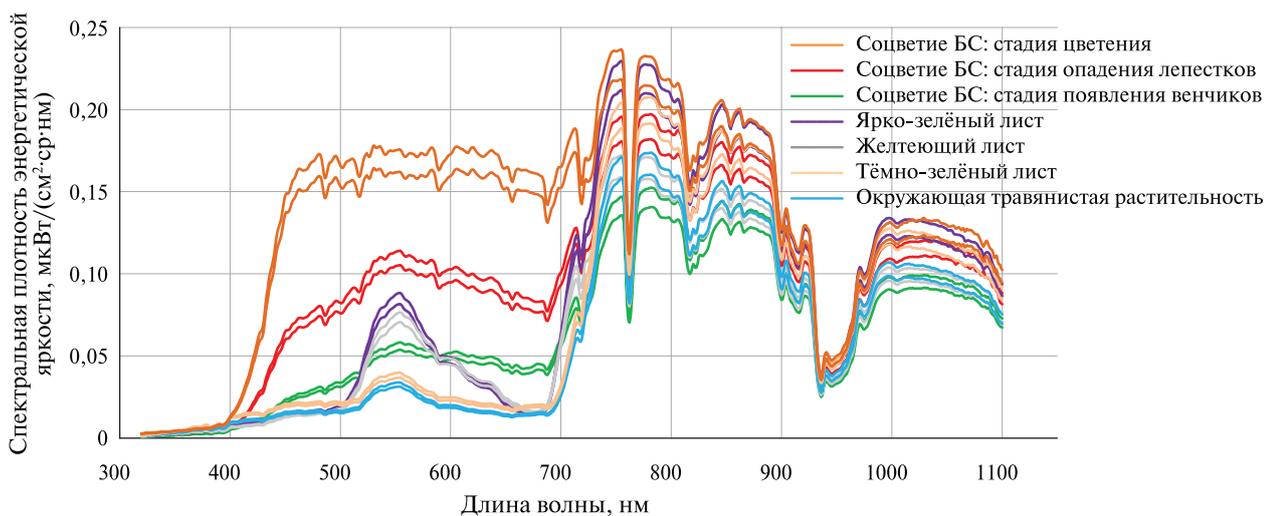


Рис. 5. Графики зависимостей интервалов значений СПЭЯ  $B(\lambda) \pm \sigma[B(\lambda)]$  от длины волны

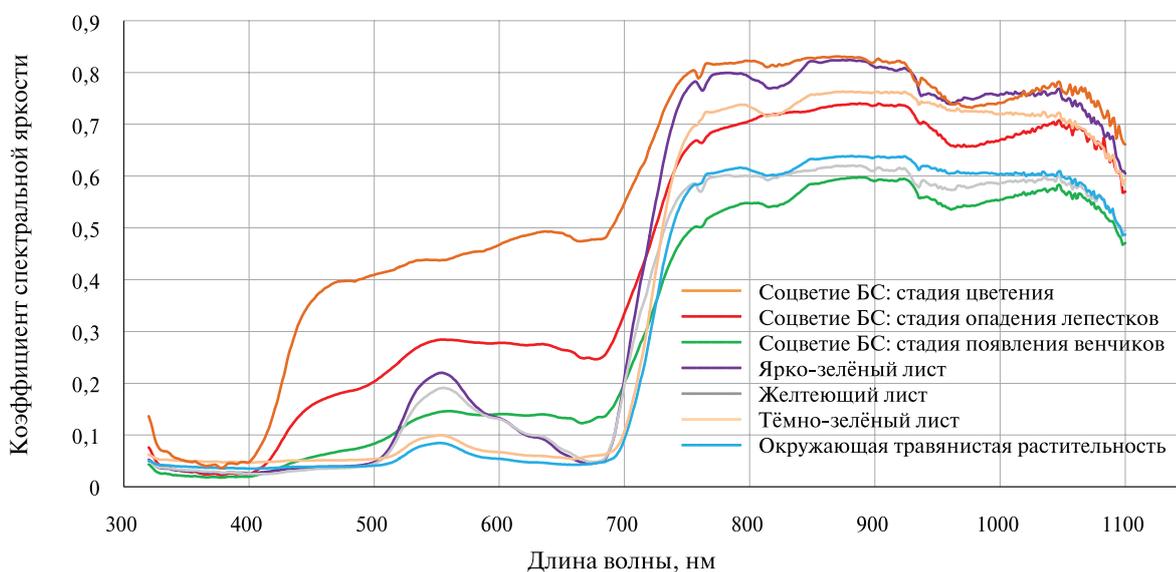


Рис. 6. Графики зависимостей КСЯ  $p(\lambda)$  от длины волны

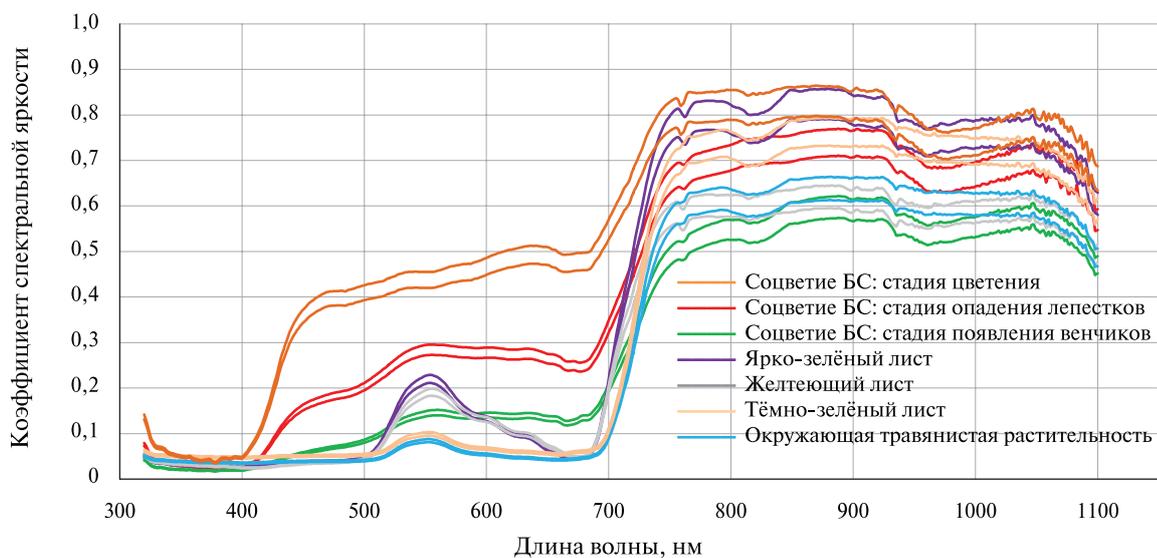


Рис. 7. Графики зависимостей интервалов значений КСЯ  $p(\lambda) \pm \sigma[p(\lambda)]$  от длины волны

Для приведённых на *рис. 3* объектов на основе результатов калибровки спектрорадиометра PSR-1100, согласованной с этапами эксперимента, с использованием ПО DARWin SP рассчитаны зависимости КСЯ  $p(\lambda)$  (в процентах) от длины волны (*рис. 6*).

Значимость данной характеристики заключается в её абсолютных значениях, которые могут быть применены в процессе обработки мультиспектральных спутниковых снимков (Рыжиков, 2015). В свою очередь, на *рис. 7* для исследуемых объектов приведены интервалы значений КСЯ  $p(\lambda)$ , рассчитанные по результатам оценивания СКО  $\sigma[p(\lambda)]$ .

Все особенности отражательных свойств БС, определяемые по характеристикам СПЭЯ и КСЯ, соответствуют друг другу. Обработка полученных результатов позволяет получать данные, представляющие прикладной интерес при решении задачи обнаружения БС с использованием многоспектральной съёмки. Например, в *табл. 2* представлены частные результаты оценивания значений КСЯ и соответствующих СКО для типовых спектральных каналов. В качестве спектральных диапазонов выбраны интервалы длин волн спектральных каналов съёмочной аппаратуры KA RapidEye: BLUE (440–510 нм), GREEN (520–590 нм), RED (630–685 нм), RE (690–730 нм) и NIR (760–880 нм).

Таблица 2. Оценки значений КСЯ и СКО КСЯ, соответствующие спектральным каналам съёмочной аппаратуры KA RapidEye

Объект исследования	Параметр	Спектральные каналы				
		BLUE	GREEN	RED	RE	NIR
Соцветие БС: стадия цветения	КСЯ	0,39	0,44	0,48	0,60	0,82
	СКО	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03
Соцветие БС: стадия опадения лепестков	КСЯ	0,18	0,27	0,26	0,40	0,71
	СКО	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03
Соцветие БС: стадия появления венчиков	КСЯ	0,07	0,14	0,13	0,26	0,56
	СКО	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
Ярко-зелёный лист БС	КСЯ	0,04	0,18	0,06	0,35	0,80
	СКО	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03
Желтеющий лист БС	КСЯ	0,04	0,16	0,07	0,30	0,63
	СКО	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02
Тёмно-зелёный лист БС	КСЯ	0,05	0,09	0,06	0,22	0,74
	СКО	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03
Окружающая травянистая растительность	КСЯ	0,04	0,07	0,04	0,20	0,62
	СКО	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02

Анализ результатов, полученных в ходе полевых спектрорадиометрических работ, позволил выявить следующие особенности отражательной способности БС в зависимости от длины волны зондирующего излучения:

1. Соцветие БС в стадии цветения имеет ровную линию тренда характеристики КСЯ отражённого электромагнитного излучения в видимой области спектра; при этом его значения превышают значения КСЯ других объектов на всех рассматриваемых длинах волн, например значения КСЯ травянистой растительности: на 35 % — в синем и зелёном диапазонах, на 37 % — в красном и на 20 % — в ближнем инфракрасном диапазоне.
2. Соцветие БС в стадии опадения лепестков имеет локальный максимум отражения в зелёной области спектра на графике КСЯ. В видимой области спектра данный объект имеет высокие значения КСЯ, но ниже, чем у соцветия, находящегося в стадии цветения. Интересная особенность отражения выявлена в ближней инфракрасной области спектра: значения КСЯ ниже, чем у соцветий БС в стадии цветения (на 11 %), ярко-зелёного (на 9 %) и тёмно-зелёного (на 3 %) листьев БС, и выше, чем у других экспериментальных образцов (на 9–15 %).

3. Соцветие БС в стадии появления венчиков имеет более высокие значения КСЯ в синей и красной областях спектра, чем зелёная растительность (листья БС и травяная растительность) на 3 и 9% соответственно. В зелёной области спектра значения КСЯ данного образца превышают значения только травяной растительности и тёмно-зелёных листьев БС, а в ближней инфракрасной области спектра являются наименьшими среди всех объектов.
4. Для объектов, относящихся к зелёной растительности, синяя и красная области спектра не являются информативными — отличия значений КСЯ объектов находятся на уровне 1–3%. В зелёной области спектра наибольшие значения КСЯ имеют ярко-зелёный и желтеющий листья БС. Однако в ближнем инфракрасном диапазоне среди данных объектов наиболее высокие значения имеют ярко-зелёный и тёмно-зелёный листья БС (80 и 74% соответственно); желтеющий лист БС имеет более низкие значения КСЯ вследствие того, что подвержен процессам увядания, тогда как значения показателей отражения солнечного излучения в данном диапазоне являются свидетельством здоровья зелёной растительности. На характеристики окружающей травяной растительности оказывает влияние малая площадь листовой поверхности, что приводит к частичному затенению образца в целом и, как следствие, более низким значениям КСЯ, чем у других объектов зелёной растительности (на 2–11% в зелёном диапазоне и 1–18% в инфракрасном).

Анализ выявленных особенностей отражательной способности БС в совокупности с данными оценки площадей проективного покрытия (см. *табл. 1*) позволяет сделать следующие выводы о соотношении характеристик БС в целом и окружающей травяной растительности, что необходимо в качестве обобщения для последующего применения к анализу данных ДЗЗ, получаемых с воздушных и космических средств:

1. В синей и красной областях спектра БС имеет значения КСЯ, превышающие показатели травяной растительности за счёт наличия соцветий. Но с учётом 30%-й доли площади, занимаемой соцветиями, в настоящее время нельзя сделать обоснованный вывод об информативности синего и красного видимых диапазонов длин волн.
2. В зелёной области спектра каждый относящийся к БС объект имеет значения КСЯ, превышающие показатели травяной растительности, что позволяет сделать вывод о более высоких значениях (выше на 7–10%) в данном диапазоне длин волн для БС в целом по сравнению с травяной растительностью.
3. В ближней инфракрасной области спектра каждый объект, относящийся к БС (за исключением соцветия в стадии появления венчиков), имеет значения КСЯ, превышающие показатели травяной растительности (на 1–21%), что позволяет сделать вывод о более высоких значениях в данном диапазоне длин волн для БС в целом по сравнению с травяной растительностью.

## Заключение

Проведённые полевые исследования отражательных свойств БС с использованием спектрорадиометра PSR-1100 обеспечили измерения СПЭЯ и расчёт КСЯ для элементов данного вида растений в фазе цветения. В результате анализа полевых данных были выявлены характерные особенности показателей отражения БС, отличающие его от окружающей травяной растительности. Получение результатов, представленных в настоящем исследовании, является необходимым базовым условием для разработки метода обнаружения БС с использованием авиационных и космических средств, так как сформирована база эталонных характеристик отражения для интерпретации данных ДЗЗ. Разработанная методика исследования отражательных свойств с использованием средств полевой спектрорадиометрии также может быть применена для измерения отражательных свойств других природных объектов в различных фенологических фазах или состояниях.

## Литература

1. Гнусарев Н. В., Шабиков Е. И., Григорьев А. Н. Метод определения спектральных характеристик объектов при решении задачи космического гиперспектрального наблюдения // *Информация и космос*. 2008. № 4. С. 77–82.
2. Григорьев А. Н. Методика формирования спектральных характеристик объектов на основе мультитременных данных космической гиперспектральной съёмки // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2014. Т. 11. № 2. С. 175–184.
3. Жиглова О. В. Использование геоинформационных технологий при выявлении очагов борщевика Сосновского // *Защита и карантин растений*. 2012. № 5. С. 8–9.
4. Кондратьев С. А., Рыжиков Д. М., Тимофеев А. С., Чичкова Е. Ф. Идентификация типов подстилающей поверхности для оценивания территорий по данным спутниковой съёмки LANDSAT-8 на примере водосбора реки Нарвы // *Труды Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского*. СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2016. № 653. С. 121–125.
5. Кондратьев К. Я., Федченко П. П. Спектральная отражательная способность и распознавание растительности. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 216 с.
6. Миркин Б. М., Наумова Л. Г. Метод классификации растительности по Браун-Бланке в России // *Журнал общей биологии*. 2009. Т. 70. № 1. С. 66–77.
7. Рыжиков Д. М. Автоматизация дешифрирования космических снимков по эталонному спектральному образу лиственного леса // *Научная сессия ГУАП: сб. докл. Ч. 2. Технические науки*. СПб.: ГУАП, 2015. С. 292–297.
8. Симонов Г. А., Никульников В. А., Замеев В. С. Борщевик Сосновского — злостный засоритель полей // *Ученые записки Орловского государственного университета. Серия: естественные, технические и медицинские науки*. 2011. № 3. С. 324–326.
9. Grigoriev A. N., Shilin B. V. Analysis of seasonal variations of the spectral characteristics of landscape components, using the data of Hyperion space video spectrometer // *J. Optical Technology*. 2013. V. 80. No. 6. pp. 360–362.

### General methodology and results of spectroradiometric research of reflective properties of the *Heracleum Sosnowskyi* in the range 320–1100 nm for Earth remote sensing

A. N. Grigoriev, D. M. Ryzhikov

*Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation  
St. Petersburg 190000, Russia  
E-mail: ryzhikov89@yandex.ru*

The article presents the results of research implemented for solving the case of detecting the *Heracleum Sosnowskyi* areas by multispectral optoelectronic means of Earth remote sensing. Current stage of conducting the above mentioned study is the proposed general methodology of field spectroradiometric research of the *Heracleum Sosnowskyi*. It includes main steps to choose testing range, evaluate the *Heracleum Sosnowskyi* properties and to perform calibration and spectroradiometric measurements with the following data processing and analysis. Several recommendations on performing field research with spectroradiometer are formulated. The description of proposed methodology realization with using PSR-1100 spectroradiometer is presented. Its provides the obtaining of values of radiance and coefficient of reflectance depending on the radiation wavelength in the range 320–1100 nm. The description of selected testing range in Leningrad region is provided. The projective coverage areas values of different underlying surface types of the testing range is evaluated. The results for spectroradiometric measurements of the *Heracleum Sosnowskyi* on the flowering phenological phase and of the grass vegetation are presented. The analysis of the *Heracleum Sosnowskyi* spectral reflectivity is performed on the basis of received data. The result is the features of reflective properties of the *Heracleum Sosnowskyi* separate elements in comparison with reflective properties of grass vegetation. The analysis also considers typical parameters of modern multispectral optoelectronic means of Earth remote sensing from space.

**Keywords:** spectral brightness coefficient, spectroradiometer, Heracleum Sosnowskyi, Earth remote sensing

Accepted: 15.01.2018

DOI:10.21046/2070-7401-2018-15-1-183-192

## References

1. Gnusarev N. V., Shabakov E. I., Grigoriev A. N., Metod opredeleniya spektral'nykh kharakteristik ob'ektov pri reshenii zadachi kosmicheskogo giperspektral'nogo nablyudeniya (Method for determining the spectral characteristics of objects in the solution of the problem of hyperspectral space observation), *Informatsiya i kosmos*, 2008, No. 4, pp. 77–82.
2. Grigoriev A. N., Metodika formirovaniya spektral'nykh kharakteristik ob'ektov na osnove mul'tivremennykh dannykh kosmicheskoy giperspektral'noy s'emki (The method of formation of objects spectral characteristics on the basis of multitemporal data of space hyperspectral remote sensing), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 2, pp. 175–184.
3. Zhiglova O. V., Ispol'zovanie geoinformatsionnykh tekhnologii pri vyavlenii ochagov borshchevika Sosnovskogo (The use of geoinformation technologies in the detection of Heracleum Sosnowskyi outbreaks), *Zashchita i karantin rastenii*, 2012, No. 5, pp. 8–9.
4. Kondratyev S. A., Ryzhikov D. M., Timofeev A. S., Chichkova E. F., Identifikatsiya tipov podstilayushchey poverkhnosti dlya otsenivaniya territorii po dannym sputnikovoy s'emki LANDSAT-8 na primere vodosbora reki Narvy (Identification of the underlying surface types for the estimation of territories from the satellite LANDSAT-8 imagery using the example of the Narva River catchment zone), *Trudy Voenno-kosmicheskoy akademii imeni A. F. Mozhaiskogo*, 2016, No. 653, pp. 121–125.
5. Kondratyev K. Y., Fedchenko P. P., *Spektral'naya otrazhatel'naya sposobnost' i raspoznavanie rastitel'nosti* (Spectral reflectance and vegetation recognition), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1982, 216 p.
6. Mirkin B. M., Naumova L. G., Metod klassifikatsii rastitel'nosti po Braun-Blanke v Rossii (The method of vegetation classification according to Brown-Blanke in Russia), *Zhurnal obshchey biologii*, 2010, Vol. 70, No. 1, pp. 66–77.
7. Ryzhikov D. M., Avtomatizatsiya deshifirovaniya kosmicheskikh snimkov po etalonnomu spektral'nomu obrazu listvennogo lesa (Automation of the space images interpretation by deciduous forest spectral signature), In: *Nauchnaya sessiya GUAP: sb. dokl. Ch. II. Tekhnicheskie nauki* (Scientific Session GUAP. Part 2. Engineering), St. Petersburg: GUAP 2015, pp. 292–297.
8. Simonov G. A., Nikulnikov V. A., Zateev V. S., Borshchevik Sosnovskogo — zlostnyi zasoritel' poley (Heracleum Sosnowskyi — malicious weed of fields), *Uchenye zapiski Orlovskogo Gosudarstvennogo universiteta. Seriya: estestvennye, tekhnicheskie i meditsinskie nauki*, 2011, No. 3, pp. 324–326.
9. Grigoriev A. N., Shilin B. V., Analysis of seasonal variations of the spectral characteristics of landscape components, using the data of Hyperion space video spectrometer, *J. Optical Technology*, 2013, Vol. 80, No. 6, pp. 360–362.