

Общая методика и результаты наземных гиперспектральных исследований сезонного изменения отражательных свойств посевов сельскохозяйственных культур и отдельных видов сорных растений

Р. Ю. Данилов¹, О. Ю. Кремнева¹, В. Я. Исмаилов¹, В. А. Третьяков²,
А. А. Ризванов², В. В. Кривошеин², А. А. Пачкин¹

¹ *Всероссийский научно-исследовательский институт
биологической защиты растений, Краснодар, 350039, Россия
E-mail: daniloff.roman2011@yandex.ru*

² *Центральный научно-исследовательский институт машиностроения
Королёв, 141070, Россия
E-mail: sportinz@mail.ru*

В статье изложены результаты экспериментальных исследований, направленных на оценку возможности таксономической идентификации и определения морфофизиологических изменений разных видов культурных и сорных растений в полевых агроценозах на основе анализа данных наземных гиперспектральных измерений разных типов растительности. Для реализации поставленных задач была разработана методика полевых валидационных измерений спектров отражения исследуемых объектов с помощью автоматизированного спектрометра Ocean Optics Maya 2000-Pro, позволяющего в режиме онлайн провести измерения спектральной плотности яркости объектов в области спектра от 350 до 1200 нм с высоким спектральным разрешением ~1 нм отражённого солнечного излучения. С целью организации гиперспектральных съёмок на опытных полях научного севооборота Всероссийского научно-исследовательского института биологической защиты растений были выполнены работы по созданию тестовых участков с различным видовым составом культурных и сорных растений. В результате измерений, проведённых на тестовых участках, были получены спектры отражения отдельных видов культурных и сорных растений. На основе их обработки проведена работа по формированию базы данных спектральных характеристик сельскохозяйственных культур и сорных растений. Анализ полученных данных выявил особенности изменения отражательной способности культурных посевов и сорных растений по отдельным сезонам периода вегетации. Полученные данные имеют большое значение для валидации дистанционных космических наблюдений с использованием многоспектральной и гиперспектральной аппаратуры.

Ключевые слова: спектрометр, наземные гиперспектральные измерения, культурные и сорные растения, спектральная плотность энергетической яркости, спектральные характеристики растений

Одобрена к печати: 27.11.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-113-127

Введение

Основной задачей аэрокосмического мониторинга посевов сельскохозяйственных культур является идентификация видового состава и морфофизиологических изменений разных типов растительности в агроценозах (Барталев и др., 2005; Пьянков и др., 2009).

Важным элементом развития современных аэрокосмических систем мониторинга представляется наличие наземной спектральной информации о сезонном изменении состояния растительности, позволяющей проводить точную верификацию результатов аэрокосмических съёмок (Розенберг и др., 2012; Сидько и др., 2009).

Знания о связи структуры и состояния растительности с её спектральными отражательными способностями лежат в основе решения тематических задач сельского хозяйства (Воронина, Мамаш, 2014; Терехин, 2012). Решение таких задач достигается путём систематических повторных съёмок, которые обеспечивают наблюдение за динамикой развития сельскохозяйственных культур в течение периода вегетации (Абросимов, 2009; Hatfield et al.,

2008). Использование различий в спектральных яркостях разных типов растительности даёт возможность выявлять степень их поражения патогенами, прогнозировать урожайность и другие параметры (Антонов, Сладких, 2009; Данилов и др., 2018; Исмаилов и др., 2012; Кочубей и др., 1990).

Первые работы по изучению спектров отражения отдельных типов растительности проводились со второй половины 1940-х гг. (Кринов, 1947; Colwell, 1956).

Начало активному изучению отражательной способности природных объектов, в том числе растительности, было положено в 1970-х гг., с момента появления мультиспектральных съёмочных систем (Альбедро..., 1981; Выгодская, Горшкова, 1987; Campbell, 1996; Lillesand et al., 2003).

В последние годы в мировой практике аэрокосмического мониторинга земной поверхности наблюдается всё более активное внедрение методов и средств гиперспектральной съёмки (Деркачева и др., 2015; Чабан и др., 2012; Govender et al., 2007; Krezhova et al., 2014). В отличие от мультиспектральной съёмки, избирательно регистрирующей отдельные области спектра, гиперспектрометры регистрируют более полную, сплошную спектральную сигнатуру излучения, отражённого от снимаемой местности, в виде совокупности достаточно узких спектральных каналов, перекрывающую весь регистрируемый сенсором спектральный диапазон.

Высокое спектральное и пространственное разрешение данных открывает новые перспективы получения объективной информации о характерных особенностях спектрального и пространственного распределения объектов аэрокосмического мониторинга (Макаренков, 2015; Третьяков и др., 2017).

С другой стороны, обработка гиперспектральных снимков является достаточно сложной задачей для специалистов, так как использование данных высокого разрешения и развитие технических средств дистанционного зондирования Земли требует создания соответствующих технологий, методик и программных средств их анализа (Аншаков и др., 2013; Чабан и др., 2009).

Ряд исследователей, занимающихся вопросами оценки засорённости посевов сельскохозяйственных культур и разработкой методов обнаружения сорных растений по данным дистанционного зондирования Земли (Архипова и др., 2014; Качалина и др., 2016; Михайленко, Воронков, 2016), указывают на отсутствие достаточного объёма гиперспектральных данных посевов сельскохозяйственных культур с основными видами сорных растений и отмечают необходимость сочетания дистанционных методов с проведением наземных измерений адекватного уровня точности.

В современной литературе имеются публикации, посвящённые вопросам разработки методики наземного спектрометрирования с помощью гиперспектральной аппаратуры для создания наземных спектральных библиотек (Григорьев, Рыжиков, 2018; Зимин и др., 2014). По результатам исследований установлена возможность идентификации видовых особенностей и изменения состояния разных типов растительности, вызванных влиянием факторов окружающей среды.

Цель работы — изучение особенностей сезонного изменения отражательной способности культурных и сорных растений на основе создаваемой базы гиперспектральных данных посевов основных сельскохозяйственных культур Краснодарского края, полученных в результате наземного спектрометрирования агроценозов. В соответствии с целью были поставлены следующие задачи: 1) изучение отражательной способности культурных и сорных растений по отдельным периодам вегетации; 2) оценка возможности идентификации видовых особенностей разных типов растительности на основе анализа их спектральных характеристик.

Материалы и методы

С целью организации гиперспектральных съёмок на опытных полях научного севооборота Всероссийского научно-исследовательского института биологической защиты растений были выполнены работы по созданию тестовых участков с различным видовым составом культурных и сорных растений.

Исследования проводились в вегетационный период 2017 г. Полигон исследований расположен на территории Азово-Кубанской низменности в пределах степной природно-климатической зоны.

Согласно схеме агроклиматического районирования Краснодарского края (Нагалеvский, Чистяков, 2003), район исследований расположен в III агроклиматической зоне, которая характеризуется умеренным увлажнением (коэффициент увлажнения составляет 0,3–0,4) с годовым количеством осадков 600–700 мм. Сумма активных температур свыше 10 °С за период активной вегетации растений составляет 3000–3200 °С.

В рельефе местности преобладают лесовые эрозионно-аккумулятивные равнины на основе среднеплиоценовых и верхнеплиоценовых пресноводных отложений. Почвенный покров территории представлен предкавказским и выщелоченным чернозёмом.

В качестве объектов исследований были подобраны посевы культурных растений, составляющих основу агроценозов Краснодарского края: озимая пшеница (*Triticum aestivum* L.) сорта Батько, озимый ячмень (*Hordeum vulgare* L.) сорта Михайло, яровая пшеница (*T. aestivum* L.) сорта Николаша, яровой ячмень (*H. vulgare* L.) сорта Виконт, кукуруза (*Zea mays* L.) (гибрид Краснодарский 194 М), подсолнечник (*Helianthus annuus* L.) сорта Флагман, люцерна (*Medicago sativa* L.) сорта Багира, соя (*Glycine max* (L.) Merrill) сорта Бара.

Оптимальным сроком посева озимых зерновых культур пшеницы и ячменя является первая декада октября. Начало вегетации озимых зерновых наблюдается с конца октября и прерывается с наступлением зимы при переходе средней температуры через +5 °С в сторону понижения. Возобновление вегетации происходит в конце марта – начале апреля с повышением среднесуточной температуры воздуха до +5 °С. Сезон вегетации озимых пшеницы и ячменя продолжается до конца июня. Посев технических культур осуществляется в начале апреля. Их сезон вегетации продолжается до конца сентября.

Сорные растения были представлены следующими видами: ясколка лесная (*Cerastium arvense* L.), яснотка пурпурная (*Lamium purpureum* L.), лисохвост мышехвостиковидный (*Alopecurus myosuroides* Huds.), амброзия полыннолистная (*Ambrosia artemisiifolia* L.), дурнишник калифорнийский (*Xanthium strumarium* L.), щирица запрокинутая (*Amaranthus retroflexus* L.), марь белая (*Chenopodium album* L.), канатник Теофраста (*Abutilon theophrastii* Medik.), осот полевой (*Sonchus arvensis* L.) и дикий овёс (*Avena fatua* L.).

В ходе исследований осуществлялся регулярный фитосанитарный мониторинг за развитием культурных и сорных растений. Учёт проводили общепринятыми методами (Лунева, 2002; Марков, 1970).

Для обеспечения сопоставимости полученных данных измерения проводили в ясную солнечную погоду с минимальным количеством облаков при высотах Солнца более 35°. В таких условиях значительно меньше изменяется освещение, что уменьшает ошибку, связанную с влиянием этого фактора. Измерения отдельных растительных объектов осуществляли в перпендикулярном направлении к поверхности земли на высоте ~1 м, так как в этом случае обеспечивается наименьшая степень зеркального отражения для большинства поверхностей. При этом для съёмки подбирались участки растительности с проективным покрытием не ниже 60 %, что позволило минимизировать влияние почвы на отражательные спектральные характеристики растительного фона. Для полного учёта почвенного влияния рядом с исследуемым участком получали спектр почвы, свободной от растений (Акопов и др., 2015).

В качестве эталонной поверхности применялось абсолютно белое тело (мишень) Spectralon (SRM-990) со своим коэффициентом отражения 0,95–0,99 и спутниковый GPS-навигатор (Global Positioning System, система глобального позиционирования) для определения координатных точек, по которым можно узнать местоположение определённого вида растения.

В процессе измерений контролировали метеорологические параметры: температуру воздуха и почвы, влажность, состояние атмосферы (облачность, аэрозоли и др.).

С целью набора необходимого количества измерений для последующей статистической обработки проводили большое количество замеров: 1000 спектральных измерений на одном участке.

Для решения поставленных задач в ходе исследований использовали прокалиброванный по абсолютной интенсивности излучения автоматизированный спектрометр Ocean Optics Maya 2000-Pro, позволяющий в режиме онлайн провести измерения спектральной плотности яркости объектов в области спектра от 350 до 1000 нм с высоким спектральным разрешением ~1 нм отражённого солнечного излучения.

Спектрометр Maya 2000-Pro относится к серии высокочувствительных спектрометров Ocean Optics, оснащённых матричными ПЗС-детекторами (прибор с зарядовой связью, *англ.* CCD — Charge-Coupled Device) с покадровым переносом и освещением с обратной стороны. Это неохлаждаемый спектрометр, предназначенный главным образом для измерений при низкой освещённости, анализа ультрафиолетовых спектров и других научных применений.

Для анализа полученных результатов использовалась пакетная обработка данных с помощью программы на языке FORTRAN, а для визуализации результатов — программный пакет OriginPro.

С помощью учёта спектральных характеристик приборов осуществляли переход к физическим единицам — спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) L ($\text{Вт}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{ср}^{-1}\cdot\text{нм}^{-1}$).

Специфичность кривых спектральной отражательной способности растительности позволяет с достаточно высокой степенью точности регистрировать различия спектральных характеристик отдельных типов растительности, зависящих от их фактического состояния.

С этой целью проводили анализ изменения морфологии спектральных сигнатур энергетической яркости и коэффициента отражения разных типов растительности в зависимости от их фактического состояния, учтённого во время полевых обследований.

В рамках этой работы была осуществлена статистическая обработка данных полевой спектрометрии с расчётом средней арифметической, дисперсии и стандартного отклонения (Доспехов, 1985). На основе полученных значений проведена оценка достоверности различий спектральных характеристик растений в видимой и инфракрасной области спектра.

Результаты и обсуждение

В результате гиперспектральных измерений, проведённых на тестовых участках, были получены спектры отражения отдельных видов культурных (озимая пшеница, озимый ячмень, яровая пшеница, яровой ячмень, кукуруза, подсолнечник, соя, люцерна) и сорных (амброзия полыннолистная, дурнишник калифорнийский, осот полевой, лисохвост и др.) растений. На основе их обработки проведена работа по формированию базы данных спектральных характеристик сельскохозяйственных культур и сорных растений в программе Microsoft Access 2007 (Баула, 2013).

Получены данные спектральных характеристик посевов культурных растений по отдельным фазам роста (*рис. 1*, см. с. 117).

Установлено, что зерновые культуры озимой пшеницы и кукурузы в фазе молочно-восковой спелости характеризуются значительным возрастанием отражательной способности на красном участке спектра (625–740 нм). У растений озимой пшеницы в фазе полного созревания происходит сильное возрастание спектральной яркости и полное сглаживание минимумов поглощения хлорофилла по всему диапазону видимой части спектра (450–740 нм). На посевах технических культур подсолнечника и сои прослеживается снижение отражательной способности в видимой части спектра и некоторое её увеличение в ближнем инфракрасном диапазоне по мере достижения фазы бутонизации, что, вероятнее всего, обусловлено увеличением вегетативной массы и накоплением хлорофилла, каротиноидов и других пигментов в процессе роста растений (Сидько, Шевырнов, 1998).

Дальнейшим развитием исследования стало изучение особенностей отражательной способности посевов основных сельскохозяйственных культур и отдельных видов сорных растений в агроценозах выделенных тестовых участков.

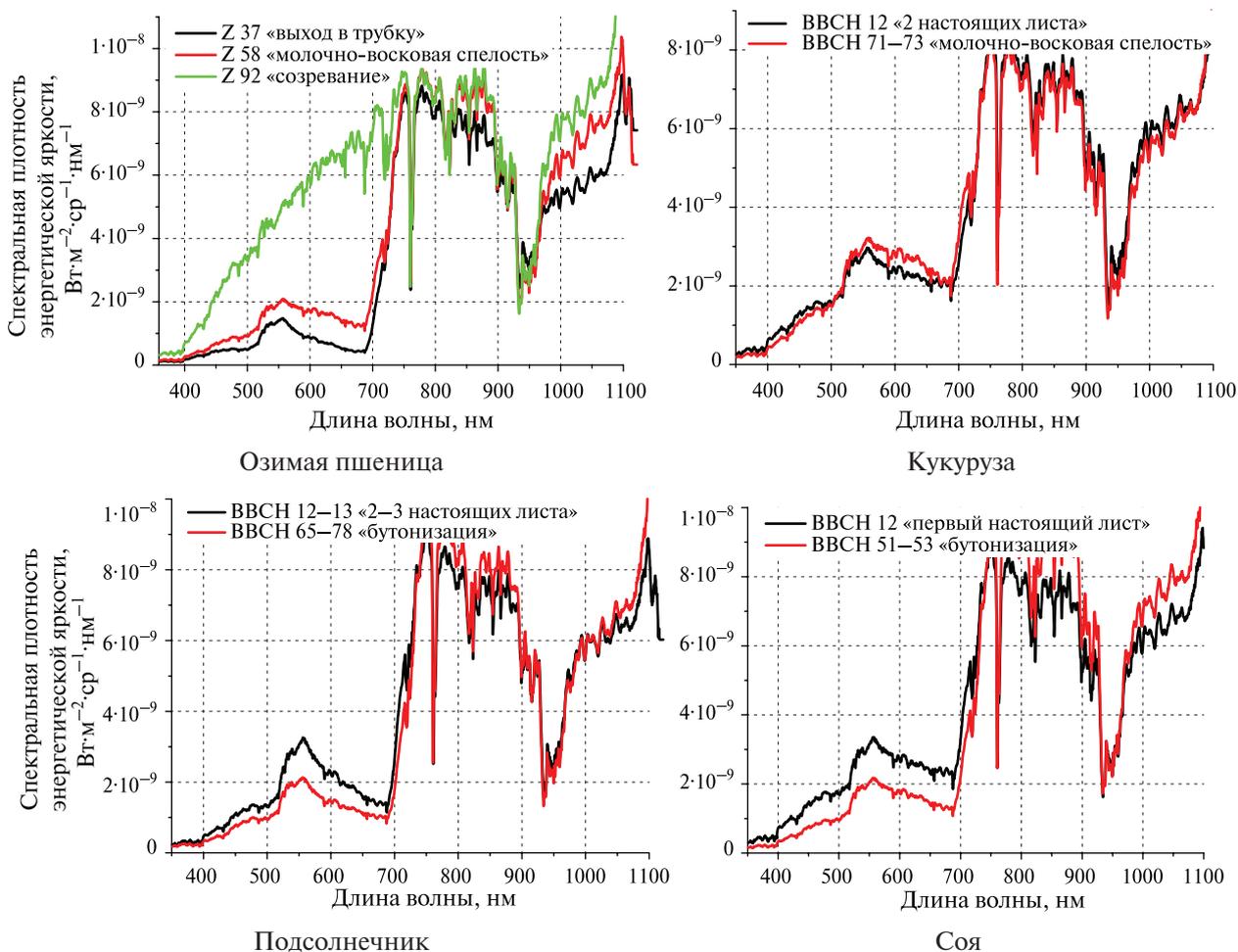


Рис. 1. Средние графики зависимостей СПЭЯ L культурных растений по фазам развития в диапазонах видимого и ближнего инфракрасного спектра электромагнитного излучения 350–1200 нм

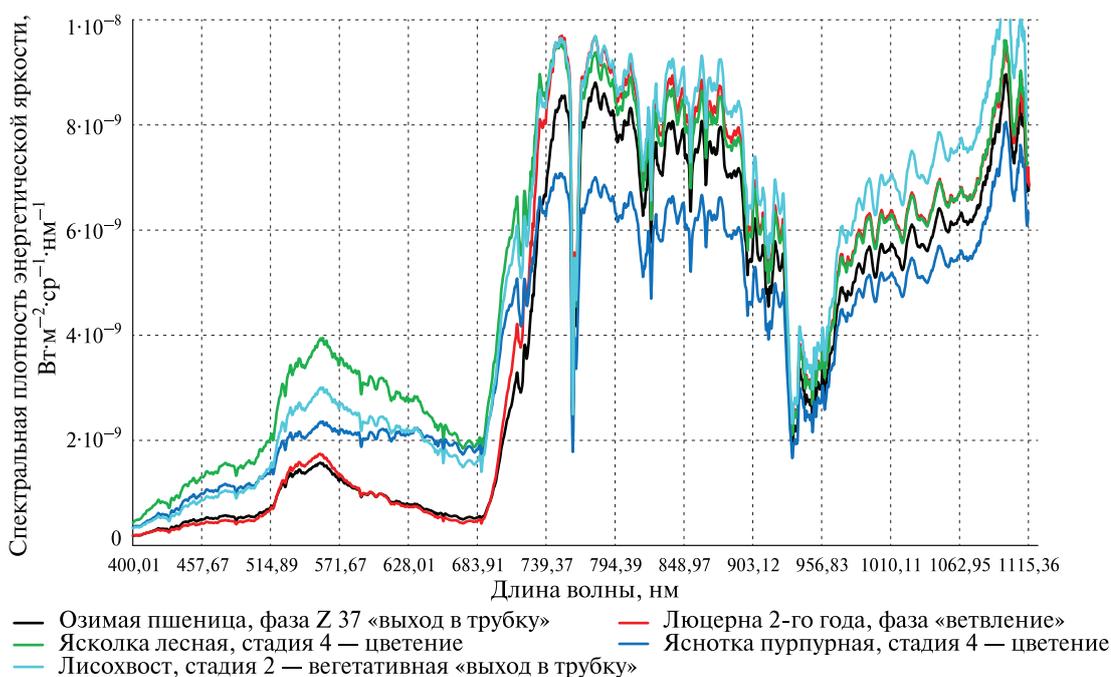


Рис. 2. Средние графики зависимостей СПЭЯ L от длины волны разных типов растительности в первый вегетационный период (III декада апреля)

Первый рассматриваемый вегетационный период изучаемых культур относится к третьей декаде апреля (табл. 1). На данный момент времени в агроценозах тестовых участков присутствовали возобновившие вегетацию посевы озимой пшеницы (Z 37 «выход в трубку») и люцерны второго года (фаза 09). В посевах озимой пшеницы локализованы участки сорных растений класса двудольные: ясколки лесной (*Cerastium arvense* L.) и яснотки пурпурной (*Lamium purpureum* L.), а также злаковый сорняк лисохвост мышехвостиковидный (*Alopecurus myosuroides* Huds.). Посевы пропашных культур и основные виды сорных растений находятся на стадии прорастания или начала формирования всходов.

На рис. 2 (см. с. 117) представлены средние графики зависимостей СПЭЯ *L* от длины волны разных типов растительности в первый вегетационный период.

Таблица 1. Фенологические характеристики развития культурных и сорных растений по отдельным периодам вегетации

Виды растений	Фазы развития
<i>Первый вегетационный период (III декада апреля)</i>	
Озимая пшеница (<i>T. aestivum</i> L.)	Z 37 «выход в трубку»
Люцерна 2-го года вегетации (<i>M. sativa</i> L.)	Ветвление
Ясколка лесная (<i>C. arvense</i> L.)	Стадия 4 — цветение
Яснотка пурпурная (<i>L. purpureum</i> L.)	Стадия 4 — цветение
Лисохвост мышехвостиковидный (<i>A. myosuroides</i> Huds.)	Стадия 2 — вегетативная «выход в трубку 3–4 междоузлия»
<i>Второй вегетационный период (III декада мая)</i>	
Озимая пшеница (<i>T. aestivum</i> L.)	Z 58 «молочно-восковая спелость»
Кукуруза (<i>Z. mais</i> L.)	ВВСН 12 «2 настоящих листа»
Подсолнечник (<i>H. annuus</i> L.)	ВВСН 12–13 «2–3 настоящих листа»
Соя (<i>G. max</i> (L.))	ВВСН 12 «первый настоящий лист»
Люцерна 2-го года (<i>M. sativa</i> L.)	Бутонизация
Амброзия полыннолистная (<i>A. artemisiifolia</i> L.)	Стадия 2 — стебление «удлинение 4–5 междоузлия»
Дурнишник калифорнийский (<i>X. strumarium</i> L.)	Стадия 2 — стебление «удлинение 4–5 междоузлия»
Лисохвост мышехвостиковидный (<i>A. myosuroides</i> Huds.)	Стадия 5 — плодоношение «молочная спелость»
Дикий овёс (<i>A. fatua</i> L.)	Стадия 5 — плодоношение «молочная спелость»
<i>Третий вегетационный период (III декада июля)</i>	
Озимая пшеница (<i>T. aestivum</i> L.)	Z 92 «созревание»
Озимый ячмень (<i>H. vulgare</i> L.)	Z 92 «созревание»
Яровая пшеница (<i>T. aestivum</i> L.)	Z 71–73 «молочно-восковая спелость»
Яровой ячмень (<i>H. vulgare</i> L.)	Z 71–73 «молочно-восковая спелость»
Кукуруза (<i>Z. mais</i> L.)	ВВСН 71–73 «молочно-восковая спелость»
Подсолнечник (<i>H. annuus</i> L.)	ВВСН 65–78 «бутонизация»
Соя (<i>G. max</i> (L.))	ВВСН 51–53 «бутонизация»
Амброзия полыннолистная (<i>A. artemisiifolia</i> L.)	Стадия 4 — цветение
Дурнишник калифорнийский (<i>X. strumarium</i> L.)	Стадия 5 — плодоношение «молочная спелость»
Канатник Теофраста (<i>A. theophrastii</i> Medik.)	Стадия 5 — плодоношение «молочная спелость»
Марь белая (<i>C. album</i> L.)	Стадия 5 — плодоношение «молочная спелость»
Щирица запрокинутая (<i>A. retroflexus</i> L.)	Стадия 5 — плодоношение «молочная спелость»
Осот полевой (<i>S. arvensis</i> L.)	Стадия 4 — цветение
Лисохвост мышехвостиковидный (<i>A. myosuroides</i> Huds.)	Стадия 5 — плодоношение «полная спелость»

Графическое сопоставление средних спектров отражения рассматриваемых объектов показывает, что наиболее значимые различия их отражательной способности наблюдаются в видимом диапазоне электромагнитного излучения 450–680 нм. В первую очередь отмечается более высокая спектральная яркость сорных растений класса двудольных: ясколки лесной (*C. arvensis* L.) и яснотки пурпурной (*L. purpureum* L.), а также злакового сорняка лисохвоста мышехвостиковидного (*A. myosuroides* Huds.) по сравнению с культурными растениями: озимой пшеницы и люцерны. При этом каждый вид растения имеет хорошо отличимую от других характерную кривую отражательной способности. Спектры отражения культурных растений озимой пшеницы и люцерны характеризуются более низкими показателями спектральной яркости в видимом диапазоне электромагнитного излучения. Причём средние значения спектральной яркости здоровых растений озимой пшеницы в значительной степени совпадают с кривой отражения люцерны, лишь незначительные отличия прослеживаются в пике отражения зелёного цвета.

Второй вегетационный период изучаемых культур относится к третьей декаде мая. Данный период является началом активной вегетации сорных растений. На тестовых участках выделены опытные площадки с чистым фоном сорных растений: амброзии полыннолистной (*Ambrosia artemisiifolia* L.), дурнишника калифорнийского (*Xanthium strumarium* L.), щирицы запрокинутой (*Amaranthus retroflexus* L.), мари белой (*Chenopodium album* L.), канатника теофраста (*Abutilon theophrastii* Medik.) и дикого овса (*Avena fatua* L.).

Посевы озимой пшеницы достигли фазы молочно-восковой спелости (фаза Z 58), а люцерны — фазы стеблевания (фаза 31). Посевы пропашных культур: кукурузы, подсолнечника и сои — находились на начальных стадиях онтогенеза, который характеризуется образованием стебля и формированием первой пары настоящих листьев.

На рис. 3 представлены средние графики зависимостей СПЭЯ L от длины волны разных типов растительности во второй вегетационный период.

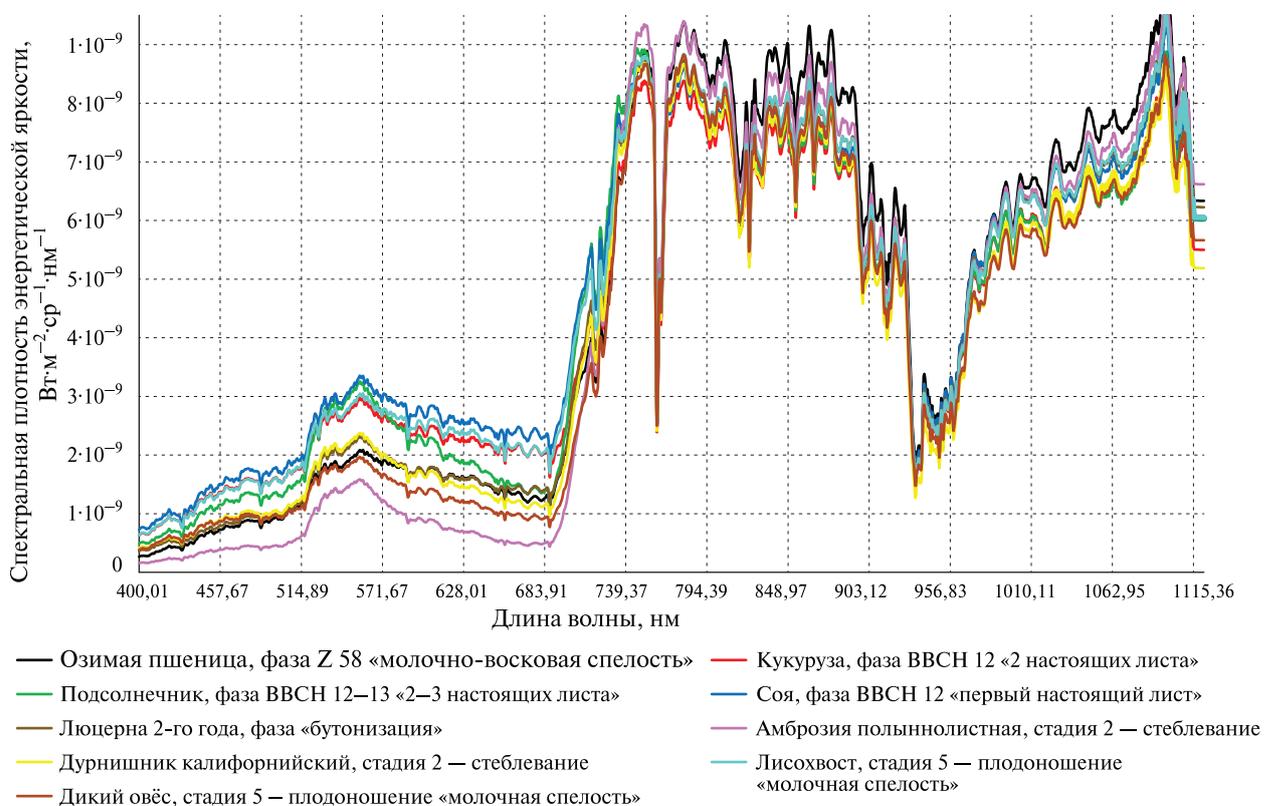


Рис. 3. Средние графики зависимостей СПЭЯ L от длины волны разных типов растительности во второй вегетационный период (III декада мая)

При сопоставлении средних спектров отражения растений был выявлен наиболее примечательный и хорошо выраженный признак амброзии полыннолистной, который характеризуется предельно низким по сравнению с другими растениями показателем спектральной яркости в видимом диапазоне, а также верхним пределом отражения в инфракрасном участке электромагнитного излучения.

Растения сои, кукурузы и злакового сорняка лисохвоста отличаются наиболее высокими показателями отражательной способности и меньшей глубиной поглощения на красном участке спектра в видимой области излучения. Подсолнечник характеризуется наиболее выраженной крутизной пика отражения зелёного цвета и глубиной поглощения красного участка спектра. Кривая отражения озимой пшеницы значительно совпадает с показателями спектральной яркости люцерны и дурнишника калифорнийского (*X. strumarium* L.), лишь немного отличаясь в пике отражения зелёного цвета. Дикий овёс (*A. fatua* L.) отличается от других растений наиболее глубоким поглощением излучения на красном участке спектра.

Третий сезонный период вегетации относится к третьей декаде июля, когда посеы озимой пшеницы достигали фазы созревания (фаза Z 92). Культуры кукурузы в это время находились в фазе молочно-восковой спелости (фаза 71–73), а посеы подсолнечника и сои — в фазе начала бутонизации (фаза 65–78).

На рис. 4 представлены средние графики зависимостей СПЭЯ L от длины волны разных типов растительности в третий вегетационный период.

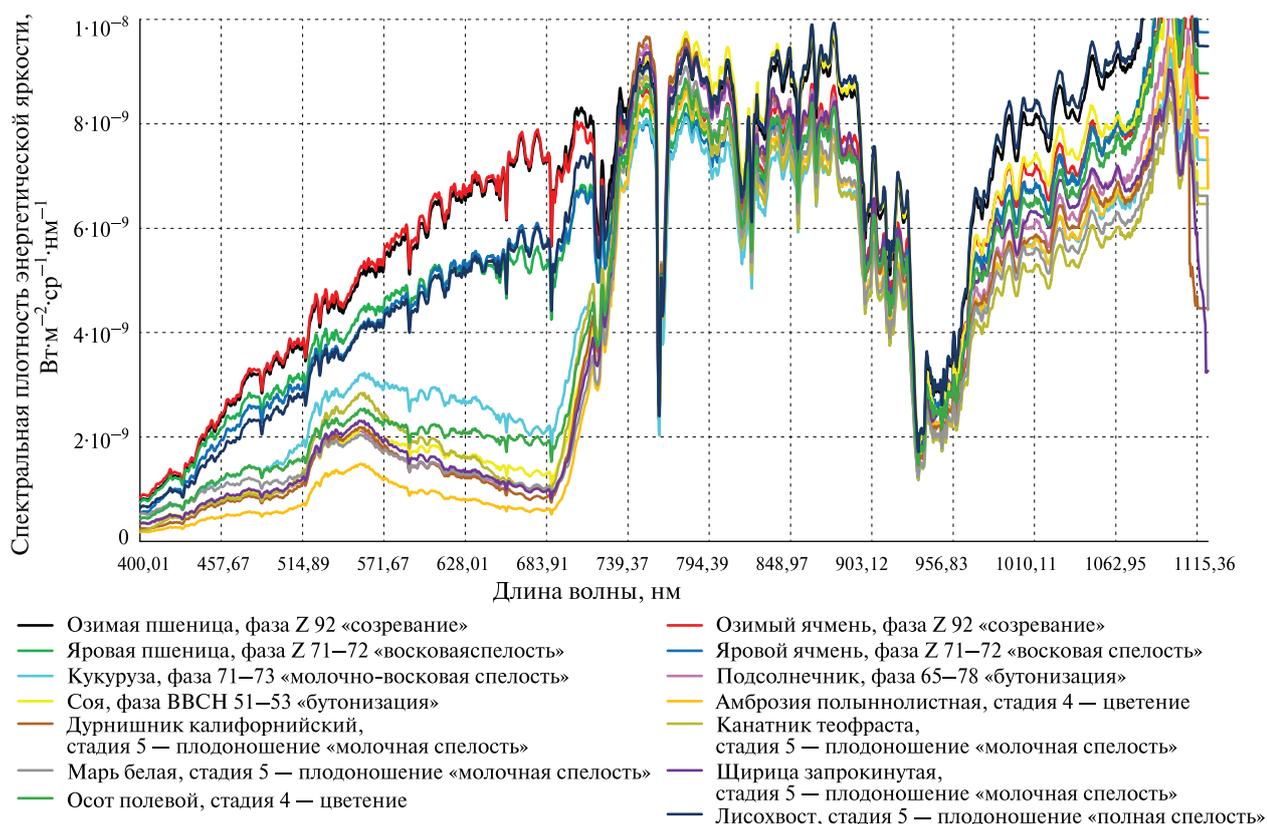


Рис. 4. Средние графики зависимостей СПЭЯ L от длины волны разных типов растительности в третий вегетационный период (III декада июля)

В первую очередь отмечается значительное расхождение кривых отражения зерновых и пропашных культур в промежутке 350–700 нм. Это связано с процессом созревания пшеницы и ячменя и уменьшения содержания в них хлорофилла и воды. При этом также хорошо прослеживается совпадение спектров отражения яровых пшеницы и ячменя (Z 71–72 «молочно-восковая спелость») со злаковым сорняком лисохвостом мышехвостиковидным.

Таблица 2. Оценка спектральных характеристик культурных и сорных растений по отдельным периодам вегетации

Виды растений	СПЭЯ, %				
	B	G	R	RE	NIR
<i>Первый вегетационный период (III декада апреля)</i>					
Озимая пшеница (<i>T. aestivum</i> L.)	0,42±0,09	1,24±0,18	0,47±0,05	4,22±0,22	8,44±0,68
Люцерна 2-го года вегетации (<i>M. sativa</i> L.)	0,44±0,03	1,17±0,07	0,49±0,04	3,57±0,15	5,95±0,27
Ясколка лесная (<i>C. arvense</i> L.)	1,38±0,09	2,99±0,14	2,03±0,07	5,15±0,17	5,79±0,33
Яснотка пурпурная (<i>L. purpureum</i> L.)	1,01±0,07	1,89±0,17	1,74±0,05	3,96±0,12	4,64±0,34
Лисохвост мышехвостиковидный (<i>A. myosuroides</i> Huds.)	0,96±0,04	2,28±0,12	1,62±0,08	4,78±0,15	6,39±0,47
<i>Второй вегетационный период (III декада мая)</i>					
Озимая пшеница (<i>T. aestivum</i> L.)	0,81±0,06	1,62±0,04	1,27±0,04	3,31±0,12	5,93±0,38
Кукуруза (<i>Z. mais</i> L.)	1,44±0,15	2,40±0,20	1,98±0,22	3,78±0,33	5,41±0,49
Подсолнечник (<i>H. annuus</i> L.)	1,19±0,06	2,17±0,13	1,46±0,08	4,39±0,23	5,46±0,27
Соя (<i>G. max</i> (L.))	1,53±0,06	2,61±0,06	2,19±0,11	4,34±0,17	5,48±0,25
Люцерна 2-го года (<i>M. sativa</i> L.)	0,84±0,07	1,72±0,13	1,29±0,13	3,72±0,19	5,59±0,10
Амброзия полыннолистная (<i>A. artemisiifolia</i> L.)	0,40±0,01	1,03±0,03	0,49±0,01	3,19±0,11	5,66±0,20
Дурнишник калифорнийский (<i>X. strumarium</i> L.)	1,01±0,22	2,02±0,52	1,28±0,29	3,93±0,73	5,16±0,22
Лисохвост мышехвостиковидный (<i>A. myosuroides</i> Huds.)	1,30±0,14	2,29±0,19	1,80±0,27	4,10±0,22	5,60±0,25
Дикий овёс (<i>A. fatua</i> L.)	0,83±0,04	1,40±0,08	0,90±0,07	2,94±0,18	5,08±0,30
<i>Третий вегетационный период (III декада июля)</i>					
Озимая пшеница (<i>T. aestivum</i> L.)	2,83±0,30	4,75±0,38	6,19±0,46	6,68±0,37	6,99±0,33
Озимый ячмень (<i>H. vulgare</i> L.)	2,81±0,24	4,78±0,31	6,26±0,32	6,32±0,12	6,10±0,38
Яровая пшеница (<i>T. aestivum</i> L.)	2,38±0,03	3,94±0,03	4,65±0,04	4,39±0,02	6,07±0,07
Яровой ячмень (<i>H. vulgare</i> L.)	2,20±0,10	3,76±0,03	4,88±0,02	5,45±0,02	6,03±0,07
Кукуруза (<i>Z. mais</i> L.)	1,70±0,12	3,42±0,24	2,96±0,28	4,60±0,19	5,25±0,08
Подсолнечник (<i>H. annuus</i> L.)	0,96±0,01	1,67±0,02	1,11±0,02	3,77±0,11	5,95±0,17
Соя (<i>G. max</i> (L.))	1,01±0,03	1,87±0,07	1,42±0,09	3,79±0,17	5,64±0,08
Амброзия полыннолистная (<i>A. artemisiifolia</i> L.)	0,38±0,03	0,96±0,01	0,45±0,01	2,78±0,03	4,98±0,07
Дурнишник калифорнийский (<i>X. strumarium</i> L.)	0,76±0,08	1,58±0,15	0,92±0,09	3,61±0,29	5,26±0,35
Канатник Теофраста (<i>A. theophrastii</i> Medik.)	0,84±0,03	2,04±0,04	1,10±0,03	3,96±0,06	4,91±0,07
Марь белая (<i>C. album</i> L.)	1,02±0,05	1,50±0,06	1,02±0,06	3,14±0,05	5,14±0,08
Щирица запрокинутая (<i>A. retroflexus</i> L.)	0,89±0,02	1,76±0,04	1,10±0,03	3,46±0,06	5,58±0,04
Осот полевой (<i>S. arvensis</i> L.)	1,21±0,09	1,99±0,10	1,74±0,17	3,80±0,09	5,87±0,13
Лисохвост мышехвостиковидный (<i>A. myosuroides</i> Huds.)	2,01±0,06	3,68±0,04	4,80±0,07	5,96±0,08	5,46±0,25

Примечание: B — синий участок спектра (450–520 нм), G — зелёный (530–610 нм), R — красный (625–680 нм), RE — красный расширенный (680–740 нм), NIR — ближний инфракрасный (800–1100 нм).

При рассмотрении совокупности кривых показателей спектральной яркости пропашных культур и сорных растений видно, что амброзия полыннолистная, как и в предыдущем примере, характеризуется хорошо выраженным предельно низким показателем отражательной способности в видимом диапазоне электромагнитного спектра. Максимальным пределом спектральной яркости отличаются растения кукурузы в фазе ВВСН 71–73 «молочная спелость», он проявляется вследствие увеличения отражательной способности на красном участке спектра и сглаживания пика отражения зелёного цвета. Средние показатели спектральной яркости растений подсолнечника в фазе 53–57 «начало бутонизации» практически совпадают с кривыми отражения сорных растений дурнишника калифорнийского (*X. strumarium* L.), щирицы запрокинутой (*A. retroflexus* L.) и мари белой (*C. album* L.). Растения сои (фаза 51–53 «бутонизация») отличаются от указанной совокупности увеличением спектральной яркости на красном участке спектра. Сорные растения канатника Теофраста (*A. theophrastii* Medik.) выделяются высоким пиком отражения зелёного цвета и глубиной поглощения красного. Осот полевой (*Sonchus arvensis* L.) отличается меньшим, чем у кукурузы, но более высоким по сравнению с другими растениями показателем спектральной яркости на красном участке спектра.

В табл. 2 приведены результаты статистического расчёта интервалов значений СПЭЯ L культурных и сорных растений по отдельным периодам вегетации.

В результате анализа интервалов значений СПЭЯ L были выявлены особенности изменения отражательной способности культурных посевов и сорных растений по отдельным периодам вегетации:

- отличительные особенности отражательной способности некоторых видов культурных и сорных растений проявляются по отдельным периодам вегетации в видимом диапазоне спектра 450–680 нм;
- в ближнем инфракрасном диапазоне 800–1100 нм разности средних значений спектральной яркости разных типов растительности перекрываются суммами их стандартных отклонений;
- отражательная способность растений озимой пшеницы до момента наступления фазы Z 92 «созревание» перекрывается пределами варьирования спектральной яркости люцерны;
- пределы варьирования показателей спектральной яркости озимых пшеницы и ячменя в фазе Z 92 «созревание» совпадают, а также установлено сходство отражательной способности яровых пшеницы и ячменя в фазе Z 71–72 «молочно-восковая спелость». Подтверждена значительная схожесть отражательной способности яровых пшеницы и ячменя (Z 71–72 «молочно-восковая спелость») со злаковым сорняком лисохвостом мышехвостиковидным в стадии 5 — плодоношение «полная спелость»;
- спектры отражения растений кукурузы в фазе ВВСН 12 «2 настоящих листа» не разделимы со спектрами сои и лисохвоста, а в фазе ВВСН 71–73 «молочная спелость» отличаются от других культурных и сорных растений максимальным пределом показателя спектральной яркости, который проявляется вследствие увеличения отражательной способности растений на красном участке спектра (625–680 нм) и сглаживания пика отражения зелёного цвета (530–610 нм);
- интервалы значений спектральной яркости растений подсолнечника во втором и третьем вегетационных периодах перекрываются пределами отражательной способности сорных растений дурнишника калифорнийского, канатника Теофраста, щирицы запрокинутой и мари белой по всему видимому диапазону спектра 450–680 нм;
- отличие отражательной способности растений сои от общей совокупности спектральных характеристик культурных и сорных растений проявляется в виде увеличения яркости в зелёном (530–610 нм) и красном (625–680 нм) участках спектра на момент достижения фазы ВВСН 51–53 «бутонизация» в третьем вегетационном периоде;
- выявлено ярко выраженное достоверное отличие амплитуды колебаний спектральной яркости амброзии полыннолистной от общей совокупности спектров отражения культурных и сорных растений в видимом диапазоне спектра 450–680 нм;

- отличием отражательной способности также характеризуются сорные растения ясколки лесной и яснотки пурпурной в видимом диапазоне 450–680 нм, дикого овса — на зелёном (530–610 нм) и красном (625–680 нм) участках спектра, осота полевого — в видимом диапазоне 450–680 нм.

Заключение

На тестовых участках Всероссийского научно-исследовательского института биологической защиты растений проведены испытания современной гиперспектральной аппаратуры, в результате которых получены оригинальные спектральные характеристики посевов основных сельскохозяйственных культур. Сформирована база данных гиперспектральных оптических характеристик посевов сельскохозяйственных культур отдельных видов сорных растений в видимой и ближней инфракрасной областях спектра.

Использование полученной информации открывает возможности для оперативного контроля за состоянием посевов сельскохозяйственных культур с целью обеспечения высокой эффективности защитных мероприятий, что, в свою очередь, будет способствовать оптимизации финансовых затрат при выращивании сельскохозяйственных культур и снижению пестицидной нагрузки на агроэкосистемы. Другое большое значение эти данные имеют для валидации дистанционных космических наблюдений с использованием многоспектральной и гиперспектральной аппаратуры.

Исследования выполнены согласно Государственному заданию № 075-00376-19-00 Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках научно-исследовательской работы по теме № 0686-2019-0012.

Литература

1. *Абросимов А. В., Дворкин Б. А.* Перспективы применения данных ДЗЗ из космоса для повышения эффективности сельского хозяйства в России // *Геоматика*. 2009. № 4. С. 45–49.
2. *Акопов А. К., Баула Г. Г., Кривошеин В. В., Кротков А. Ю., Третьяков В. А.* Разработка методики наземных валидационных измерений спектров сельскохозяйственных культур // *Космонавтика и ракетостроение*. 2015. № 6(85). С. 45–50.
3. Альbedo и угловые характеристики отражения подстилающей поверхности и облаков / под ред. Кондратьева К. Я. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 233 с.
4. *Антонов В. Н., Сладких Л. А.* Мониторинг состояния посевов и прогнозирование урожайности яровой пшеницы по данным ДЗЗ // *Геоматика*. 2009. № 4. С. 50–53.
5. *Аншаков Г. П., Журавель Ю. Н., Федосеев А. А.* Эффективность использования мультиспектральных и гиперспектральных данных дистанционного зондирования в задачах мониторинга окружающей среды // *Вестн. Самарского гос. аэрокосм. ун-та*. 2013. № 4(42). С. 38–48.
6. *Архипова О. Е., Качалина Н. А., Тютюнов Ю. В., Ковалев О. В.* Оценка засоренности антропогенных фитоценозов на основе данных дистанционного зондирования Земли (на примере амброзии полыннолистной) // *Исслед. Земли из космоса*. 2014. № 6. С. 15–26.
7. *Барталев С. А., Луян Е. А., Нейштадт И. А., Савин И. Ю.* Дистанционная оценка параметров сельскохозяйственных земель по спутниковым данным спектрорадиометра MODIS // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2005. Вып. 2. Т. 2. С. 228–236.
8. *Баула Г. Г., Брычихин М. Н., Истомина М. И., Кротков А. Ю., Сженев Е. Ю., Ризванов А. А., Третьяков В. А.* Формирование базы данных гиперспектральных оптических характеристик сельскохозяйственных культур в ультрафиолетовой, видимой и ближней инфракрасной областях спектра // *Космонавтика и ракетостроение*. 2013. № 4(73). С. 178–184.
9. *Воронина П. В., Мамаш Е. А.* Классификация тематических задач мониторинга сельского хозяйства с использованием данных дистанционного зондирования MODIS // *Вычислительные технологии*. 2014. Т. 19. № 3. С. 76–102.
10. *Выгодская И. Н., Горшкова И. И.* Теория и эксперимент в дистанционных исследованиях растительности. М.: Гидрометеиздат, 1987. 246 с.
11. *Григорьев А. Н., Рыжиков Д. М.* Общая методика и результаты спектрорадиометрического исследования отражательных свойств борщевика Сосновского в диапазоне 320–1100 нм в интересах

- дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 1. С. 183–192.
12. Данилов Р.Ю., Исмаилов В.Я., Третьяков В.А., Кремнева О.Ю., Шумилов Ю.В., Ризванов А.А., Кривошеин В.В., Костенко И.А. Разработка прецизионных технологий фитосанитарного мониторинга агроэкосистем на основе использования данных дистанционного гиперспектрального зондирования Земли // Достижения науки и техники АПК. 2018. Т. 32. № 10. С. 82–86.
 13. Деркачева А.А., Тутубалина О.В., Зимин М.В., Голубева Е.И. Применение авиационных гиперспектральных снимков и наземных данных для целей точного земледелия // Земля из космоса — наиболее эффективные решения. 2015. № 5. С. 43–46.
 14. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта (с основами статистической обработки результатов исследований). Казань; М.: Агропромиздат, 1985. 351 с.
 15. Зимин М.В., Тутубалина О.В., Голубева Е.И., Рис Г.У. Методика наземного спектрометрирования растений Арктики для дешифрирования космических снимков // Вестн. Московского гос. ун-та. Сер. 5. «География». 2014. № 5. С. 34–41.
 16. Исмаилов Э.Я., Надыкта В.Д., Исмаилов В.Я., Костенко И.А., Швец А.А. Гиперспектральные исследования поражения сельскохозяйственных культур фитопатогенами // Космонавтика и ракетостроение. 2012. № 3(68). С. 98–103.
 17. Качалина Н.А., Архипова О.Е., Гречищев А.В. Оценка засоренности агрофитоценозов Ростовской области с использованием гиперспектральных данных дистанционного зондирования Земли // Информация и космос. 2016. № 1. С. 131–136.
 18. Кочубей С.М., Шадчин Т.М., Кобец Н.И. Спектральные свойства растений как основа методов дистанционной диагностики. Киев: Наукова думка, 1990. 134 с.
 19. Кринов Е.А. Спектральная отражательная способность природных образований. М.: Изд-во АН СССР, 1947. 270 с.
 20. Лунева Н.Н. Геоботанический учет засоренности посевов сельскохозяйственных культур // Методы мониторинга и прогноза развития вредных организмов. М.; СПб.: ВИЗР РАСХН, 2002. С. 82–88.
 21. Макаренков А.А. Алгоритмы предварительной обработки информации от аэрокосмических систем гиперспектральной съемки Земли: дис. ... канд. техн. наук. Рязань, 2015. 141 с.
 22. Марков М.В. Сорно-полевая растительность и методика ее изучения. Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1970. 51 с.
 23. Михайленко И.М., Воронков И.В. Методы обнаружения сорняков, болезней и вредителей растений по данным дистанционного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 3. С. 72–83.
 24. Нагалецкий Ю.Я., Чистяков В.И. Физическая география Краснодарского края. Краснодар: Северный Кавказ, 2003. 256 с.
 25. Пьянков С.В., Калинин Н.А., Связов Е.М., Смирнова А.А., Некрасов И.Б. Мониторинг состояния сельскохозяйственных культур в Пермском крае по данным дистанционного зондирования Земли // Вестн. Пермского ун-та. Биология. 2009. Вып. 10(36). С. 147–153.
 26. Розенберг Г.С., Саксонов С.В., Кузнецова Р.С., Сенатор С.А. Космический мониторинг в ландшафтно-экологических исследованиях // Изв. Самарского науч. центра Российской акад. наук. 2012. Т. 14. № 1–1. С. 9–14.
 27. Сидько А.Ф., Шевырногов А.П. Изучение сезонной зависимости спектральной яркости посевов сельскохозяйственных культур от содержания хлорофилла и физиологических параметров растений // Исслед. Земли из космоса. 1998. № 3. С. 96–105.
 28. Сидько А.Ф., Пугачева И.Ю., Шевырногов А.П. Исследование динамики спектральной яркости посевов сельскохозяйственных культур в период вегетации на территории Красноярского края // Журн. Сибирского федерального ун-та. Сер. «Техника и технологии». 2009. Т. 2. № 1. С. 100–111.
 29. Терехин Э.А. Спектральные отражательные свойства сельскохозяйственной растительности Белгородской области (по материалам космической съемки) // Науч. ведомости Белгородского гос. ун-та. Сер. «Естественные науки». 2012. Вып. 20. № 15(134). С. 188–193.
 30. Третьяков В.А., Кротков А.Ю., Кривошеин В.В., Данилов Р.Ю. Улучшение процесса тематической обработки гиперспектральной информации // Цифровая обработка сигналов. 2017. № 3. С. 28–32.
 31. Чабан Л.Н., Вечерук Г.В., Гаврилова Т.С. Исследование возможностей классификации растительного покрова по гиперспектральным изображениям в пакетах тематической обработки данных дистанционного зондирования // Тр. Московского физико-техн. ин-та. 2009. Т. 1. № 3. С. 171–180.
 32. Чабан Л.Н., Вечерук Г.В., Кондранин Т.В., Кудрявцев С.В., Николенко А.А. Моделирование и тематическая обработка изображений, идентичных видеоданным с готовящейся к запуску и разрабатываемой гиперспектральной аппаратуры ДЗЗ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 111–121.

33. Campbell J. B. Introduction to Remote Sensing. N. Y.: Guilford Press, 1996. 622 p.
34. Colwell R. N. Determining the Prevalence of Certain Cereal Crop Diseases by Means of Aerial Photography // *Hilgardia*. 1956. V. 26. No. 5. P. 223–286.
35. Govender M., Chetty K., Bulcock H. A review of hyperspectral remote sensing and its application in vegetation and water resource studies // *Water SA*. 2007. V. 33. No. 2. P. 145–151.
36. Hatfield J. L., Gitelson A. A., Schepers J. S., Walthall C. L. Application of Spectral Remote Sensing for Agronomic Decisions — Celebrate the Centennial // *A Supplement to Agronomy J*. 2008. P. 117–131.
37. Krezhova D., Dikova B., Maneva S. Ground based hyperspectral remote sensing for disease detection of tobacco plants // *Bulgarian J. Agricultural Science*. 2014. V. 20. No. 5. P. 1142–1150.
38. Lillesand T. M., Kiefer R. M., Chipman J. W. Remote Sensing and Image Interpretation. Fifth Edition. New Jersey: John Wiley and Sons, Inc., 2003. 784 p.

General methods and results of ground hyperspectral studies of seasonal changes in the reflective properties of crops and certain types of weeds

R. Yu. Danilov¹, O. Yu. Kremneva¹, V. Ya. Ismailov¹, V. A. Tretyakov²,
A. A. Rizvanov², V. V. Krivoshein², A. A. Pachkin¹

¹ All-Russian Research Institute of Biological Plant Protection, Krasnodar 350039, Russia
E-mail: daniloff.roman2011@yandex.ru

² Central Research Institute for Mechanical Engineering, Korolev 141070, Russia
E-mail: sportinz@mail.ru

The paper presents the results of experimental studies aimed at assessing the possibility of taxonomic identification and determination of morphophysiological changes of different types of cultivated and weed plants in field agrocenoses based on the analysis of data from ground-based hyperspectral measurements of plant objects. To implement the tasks, a field validation measurement technique has been developed for the reflection spectra of the studied objects using the Ocean Optics Maya 2000-Pro automated spectrometer, which allows on-line measurements of the spectral density of objects in the spectral density range from 350 to 1200 nm with high spectral resolution ~1 nm reflected solar radiation. In order to organize hyperspectral surveys, test plots with different species composition of cultivated and weed plants were arranged on the experimental fields of the scientific crop rotation of the All-Russian Scientific Research Institute of Biological Plant Protection. As a result of measurements carried out on test plots, the reflection spectra were obtained for certain types of cultivated and weed plants. On the basis of their processing, the database of the spectral characteristics of crops and weeds has been developed. The analysis of the obtained data revealed the peculiarities of changes in the reflectivity of cultivated crops and weeds for individual periods of the growing season. The obtained data are important for the validation of remote space observations using multispectral and hyperspectral instrumentation.

Keywords: spectrometer, ground hyperspectral measurements, cultivated and weedy plants, spectral density of energy brightness, spectral characteristics of plants

Accepted: 27.11.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-113-127

References

1. Abrosimov A. V., Dvorkin B. A., Perspektivy primeneniya dannykh DZZ iz kosmosa dlya povysheniya effektivnosti sel'skogo khozyaistva v Rossii (Prospects of application of remote sensing data from space to improve the efficiency of agriculture in Russia), *Geomatika*, 2009, No. 4, pp. 45–49.
2. Akopov A. K., Baula G. G., Krivoshein V. V., Krotkov A. Yu., Tretyakov V. A., Razrabotka metodiki nazemnykh validatsionnykh izmerenii spektrov sel'skokhozyaistvennykh kul'tur (The Development of

- Methodology for Ground Validation Measurements of Range of Crops), *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2015, No. 6(85), pp. 45–50.
3. *Al'bedo i uglovyie kharakteristiki otrazheniya podstilayushchei poverkhnosti i oblakov* (Albedo and angular reflection characteristics of the underlying surface and clouds), Kondratyev K. Ya. (ed.), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1981, 233 p.
 4. Antonov V. N., Sladkikh L. A., Monitoring sostoyaniya posevov i prognozirovanie urozhainosti yarovoi pshenitsy po dannym DZZ (Monitoring of crop condition and forecasting of productivity of spring wheat by remote sensing data), *Geomatika*, 2009, No. 4, pp. 50–53.
 5. Anshakov G. P., Zhuravel Yu. N., Fedoseev A. A., Effektivnost' ispol'zovaniya mul'tispektral'nykh i giperspektral'nykh dannykh distantsionnogo zondirovaniya v zadachakh monitoringa okruzhayushchei sredy (The effectiveness of using multispectral and hyperspectral remote sensing data for environmental monitoring), *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta*, 2013, No. 4(42), pp. 38–48.
 6. Arkhipova O. E., Kachalina N. A., Tyutyunov Yu. V., Kovalev O. V., Otsenka zasorennosti antropogennykh fitotsenozov na osnove dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli (na primere ambrozii polynolistnoi) (Weediness Assessment of Anthropogenic Phytocenoses on the Basis of Satellite Remote Sensing Data (A Case Example of Common Ragweed)), *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, No. 6, pp. 15–26.
 7. Bartalev S. A., Loupian E. A., Neishtadt I. A., Savin I. Yu., Distantsionnaya otsenka parametrov sel'skokhozyaistvennykh zemel' po sputnikovym dannym spektrometrii MODIS (Remote estimation of agricultural land parameters by satellite data of MODIS Spectroradiometer), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2005, Issue 2, Vol. 2, pp. 228–236.
 8. Baula G. G., Brychikhin M. N., Istomina M. I., Krotkov A. Yu., Szhenov E. Yu., Rizvanov A. A., Tretyakov V. A., Formirovanie bazy dannykh giperspektral'nykh opticheskikh kharakteristik sel'skokhozyaistvennykh kul'tur v ul'traioletovoi, vidimoi i blizhnei infrakrasnoi oblasti spektra (Development of a Database of Hyperspectral Optical Characteristics of Agricultural Crops in the Ultraviolet, Visible and Near Infrared Regions' Spectrum), *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2013, No. 4(73), pp. 178–184.
 9. Voronina P. V., Mamash E. A., Klassifikatsiya tematiceskikh zadach monitoringa sel'skogo khozyaistva s ispol'zovaniem dannykh distantsionnogo zondirovaniya MODIS (Classification of thematic monitoring for agriculture problems using remote sensing MODIS data), *Vychislitel'nye tekhnologii*, 2014, Vol. 19, No. 3, pp. 76–102.
 10. Vygodskaya I. N., Gorshkova I. I., *Teoriya i eksperiment v distantsionnykh issledovaniyakh rastitel'nosti* (Theory and experiment in remote studies of vegetation), Moscow: Gidrometeoizdat, 1987, 246 p.
 11. Grigoriev A. N., Ryzhikov D. M., Obshchaya metodika i rezul'taty spektrometrii issledovaniya otrazhatel'nykh svoystv borshchevika Sosnovskogo v diapazone 320–1100 nm v interesakh distantsionnogo zondirovaniya Zemli (General methodology and results of spectroradiometric research of reflective properties of the Heracleum Sosnowskyi in the range 320–1100 nm for Earth remote sensing), *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 1, pp. 183–192.
 12. Danilov R. Yu., Ismailov V. Ya., Tretyakov V. A., Kremneva O. Yu., Shumilov Yu. V., Rizvanov A. A., Krivoshein V. V., Kostenko I. A., Razrabotka pretsizionnykh tekhnologii fitosanitarnogo monitoringa agroekosistem na osnove ispol'zovaniya dannykh distantsionnogo giperspektral'nogo zondirovaniya Zemli (Development of precision technologies of agroecosystems phytosanitary monitoring based on the use of data of remote hyperspectral sensing of the Earth), *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*, 2018, Vol. 32, No. 10, pp. 82–86.
 13. Derkacheva A. A., Tutubalina O. V., Zimin M. V., Golubeva E. I., Primenenie aviatsionnykh giperspektral'nykh snimkov i nazemnykh dannykh dlya tselei tochnogo zemledeliya (Application of aerial hyperspectral images and ground data for precision agriculture), *Zemlya iz kosmosa — naibolee effektivnye resheniya*, 2015, Issue 5, pp. 43–46.
 14. Dospikhov B. A., *Metodika polevogo opyta (s osnovami statisticheskoi obrabotki rezul'tatov issledovaniya)* (Methodology of field experience (with the basics of statistical processing of research results)), Kazan-Moscow: Agropromizdat, 1985, 351 p.
 15. Zimin M. V., Tutubalina O. V., Golubeva E. I., Rees G. U., Metodika nazemnogo spektrometrirovaniya rastenii Arktiki dlya deshifirovaniya kosmicheskikh snimkov (Ground spectrometry of Arctic plants for the interpretation of space imagery), *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta, Ser. 5: Geografiya*, 2014, No. 5, pp. 34–41.
 16. Ismailov E. Ya., Nadykta V. D., Ismailov V. Ya., Kostenko I. A., Shvets A. A., Giperspektral'nye issledovaniya porazheniya sel'skokhozyaistvennykh kul'tur fitopatogenami (Hyperspectral Monitoring of Arable Crop Phytopathogen Infestation), *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2012, No. 3(68), pp. 98–103.
 17. Kachalina N. A., Arkhipova O. E., Grechishchev A. V., Otsenka zasorennosti agrofitotsenozov Rostovskoi oblasti s ispol'zovaniem giperspektral'nykh dannykh distantsionnogo zondirovaniya Zemli (Weediness assessment of anthropogenic phytocenoses in Rostov region using hyperspectral remote sensing data), *Informatsiya i kosmos*, 2016, No. 1, pp. 131–136.

18. Kochubei S. M., Shadchin T. M., Kobets N. I., *Spektral'nye svoystva rastenii kak osnova metodov distantsionnoi diagnostiki* (Spectral properties of plants as the basis of remote diagnostics methods), Kiev: Naukova dumka, 1990, 134 p.
19. Krinov E. A., *Spektral'naya otrazhatel'naya sposobnost' prirodnnykh obrazovaniy* (Spectral reflectance of natural formations), Moscow: Izd. AN SSSR, 1947, 270 p.
20. Luneva N. N., Geobotanicheskiy uchet zasorennosti posevov sel'skokhozyaistvennykh kul'tur (Geobotanical records of weediness of agricultural crops), *Metody monitoringa i prognoza razvitiya vrednykh organizmov*, Moscow; Saint Petersburg, 2002, pp. 82–88.
21. Makarenkov A. A., *Algoritmy predvaritel'noi obrabotki informatsii ot aerokosmicheskikh sistem giperspektral'noi s'emki Zemli: Diss. kand. tekhn. nauk* (Algorithms of preliminary information processing from aerospace systems of hyperspectral earth survey. Cand. techn. sci. thesis), Ryazan, 2015, 141 p.
22. Markov M. V., *Sorno-polevaya rastitel'nost' i metodika ee izucheniya* (Weed-field vegetation and methods of its study), Kazan: Izd. Kazanskogo universiteta, 1970, 51 p.
23. Mikhailenko I. M., Voronkov I. V., *Metody obnaruzheniya sornyakov, boleznei i vreditel'ei rastenii po dannym distantsionnogo zondirovaniya* (Methods for detection of weeds, pests and diseases of plants from remote sensing data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 3, pp. 72–83.
24. Nagalevskii Yu. Ya., Chistyakov V. I., *Fizicheskaya geografiya Krasnodarskogo kraya* (Physical geography of the Krasnodar Territory), Krasnodar: Severnyi Kavkaz, 2003, 256 p.
25. Pyankov S. V., Kalinin N. A., Sviyazov E. M., Smirnova A. A., Nekrasov I. B., *Monitoring sostoyaniya sel'skokhozyaistvennykh kul'tur v Permskom krae po dannym distantsionnogo zondirovaniya Zemli* (Monitoring of conditions of agricultural crops in the Perm Krai on information of the remote sensing of Earth), *Vestnik Permskogo universiteta. Biologiya*, 2009, Issue. 10(36), pp. 147–153.
26. Rozenberg G. S., Saksonov S. V., Kuznetsova R. S., Senator S. A., *Kosmicheskii monitoring v landshaftno-ekologicheskikh issledovaniyakh* (Space monitoring in landscape-ecological researches), *Izvestiya Samar'skogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2012, Vol. 14, No. 1–1, pp. 9–14.
27. Sid'ko A. F., Shevyrnogov A. P., *Izuchenie sezonnoi zavisimosti spektral'noi yarkosti posevov sel'skokhozyaistvennykh kul'tur ot sodержaniya khlorofilla i fiziologicheskikh parametrov rastenii* (Study of seasonal dependence of spectral brightness of crops on chlorophyll content and physiological parameters of plants), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1998, No. 3, pp. 96–105.
28. Sid'ko A. F., Pugacheva I. Y., Shevyrnogov A. P., *Issledovanie dinamiki spektral'noi yarkosti posevov sel'skokhozyaistvennykh kul'tur v period vegetatsii na territorii Krasnoyarskogo kraya* (Investigation of the Spectral Brightness Dynamics of Agricultural Crops during Vegetation Period at the Krasnoyarsk Territory), *J. Siberian Federal University. Engineering and Technologies*, 2009, Vol. 2, No. 1, pp. 100–111.
29. Terekhin E. A., *Spektral'nye otrazhatel'nye svoystva sel'skokhozyaistvennoi rastitel'nosti Belgorodskoi oblasti (po materialam kosmicheskoi s'emki)* (Spectral reflectance properties of agricultural vegetation of Belgorod region based on remote sensing data), *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Estestvennye nauki*, 2012, Issue. 20, No. 15(134), pp. 188–193.
30. Tretyakov V. A., Krotkov A. Yu., Krivoshein V. V., Danilov R. Yu., *Uluchshenie protsessa tematicheskoi obrabotki giperspektral'noi informatsii* (Improving the thematic processing of hyperspectral information), *Tsifrovaya obrabotka signalov*, 2017, No. 3, pp. 28–32.
31. Chaban L. N., Vecheruk G. V., Gavrilova T. S., *Issledovanie vozmozhnostei klassifikatsii rastitel'nogo pokrova po giperspektral'nym izobrazheniyam v paketakh tematicheskoi obrabotki dannyykh distantsionnogo zondirovaniya* (Classification Study hyperspectral vegetation images in thematic processing packages remote sensing data), *Trudy Moskovskogo fiziko-tekhnicheskogo instituta*, 2009, Vol. 1, No. 3, pp. 171–180.
32. Chaban L. N., Vecheruk G. V., Kondranin T. V., Kudriavtsev C. B., Nikolenko A. A., *Modelirovanie i tematicheskaya obrabotka izobrazhenii, identichnykh videodannym s gotovyashcheisya k zapusku i razrabatyvaemoi giperspektral'noi apparatury DZZ* (Modeling and thematic processing of images identical to the imagery from workable and preparing for the space launch hyperspectral remote sensors), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 111–121.
33. Campbell J. B., *Introduction to Remote Sensing*, New York: Guilford Press, 1996. 622 p.
34. Colwell R. N., *Determining the Prevalence of Certain Cereal Crop Diseases by Means of Aerial Photography*, *Hilgardia*, 1956, Vol. 26, No. 5, pp. 223–286.
35. Govender M., Chetty K., Bulcock H., *A review of hyperspectral remote sensing and its application in vegetation and water resource studies*, *Water SA*, 2007, Vol. 33, No. 2, pp. 145–151.
36. Hatfield J. L., Gitelson A. A., Schepers J. S., Walthall C. L., *Application of Spectral Remote Sensing for Agronomic Decisions — Celebrate the Centennial*, *A Supplement to Agronomy J.*, 2008, pp. 117–131.
37. Krezhova D., Dikova B., Maneva S., *Ground based hyperspectral remote sensing for disease detection of tobacco plants*, *Bulgarian J. Agricultural Science*, 2014, Vol. 20, No. 5, pp. 1142–1150.
38. Lillesand T. M., Kiefer R. M., Chipman J. W., *Remote Sensing and Image Interpretation. Fifth Edition*, New Jersey: John Wiley and Sons, Inc., 2003, 784 p.