

УДК 543.42+634 (477.75)

DOI: 10.36305/2019-3-152-56-70

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕКОТОРЫХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР В РАЗЛИЧНЫЕ ФЕНОЛОГИЧЕСКИЕ ФАЗЫ ВЕГЕТАЦИИ

Владимир Александрович Табунщик¹, Татьяна Михайловна Чекмарёва²,
Роман Вячеславович Горбунов³

¹ ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН»
299011, Россия, г. Севастополь

E-mail: tabunshchik@ya.ru

² ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН»
299011, Россия, г. Севастополь

E-mail: aspirant@imbr-ras.ru

³ ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского РАН»
299011, Россия, г. Севастополь

E-mail: karadag_station@mail.ru

Для дешифрирования сельскохозяйственных культур в различные временные периоды необходимо обладать информацией о спектральной отражательной способности растений во время прохождения ими фенологических фаз вегетации. В работе предпринята попытка произвести оценку спектральной отражательной способности основных плодовых сельскохозяйственных культур и винограда в разные фенологические фазы вегетации с использованием космических снимков Sentinel-2 и программного комплекса ENVI. С помощью полевых методов исследования были подобраны участки, на которых произрастают персик, виноград, черешня, яблоня, слива, абрикос. Установлено, что посадка сельскохозяйственных культур выполнялась путем смешения сортов, с целью снижения риска получения дополнительных издержек в результате возможных неблагоприятных природных процессов и явлений. Для каждого участка получены и проанализированы максимальные, минимальные и средние значения коэффициента спектральной яркости в пределах 13 каналов космических снимков Sentinel-2. Космические снимки были выбраны за 07.04.2019, 27.04.2019 и 12.05.2019 года, как наиболее подходящие к периодам начала цветения (07.04.2019), окончания цветения (27.04.2019) и начала созревания плодов (12.05.2019), с минимальными значениями перекрытия облаками. Для устранения внешнего воздействия почвы в пределах каждого пикселя изображения был использован модуль линейного спектрального разделения программного комплекса ENVI, подобран эталонный фрагмент почвы и получены его спектральные характеристики, что позволило изобразить графики спектральных кривых рассматриваемых сельскохозяйственных культур в пределах каждого участка. Получить разграничение коэффициента спектральной яркости удалось не для всех участков, что связано с наличием дополнительных внешних элементов.

Ключевые слова: спектр; фенологическая фаза; вегетация; снимок; Sentinel-2; Крым

Введение

Изучение спектральной яркости различных природных образований имеет относительно небольшую историю и берет свое начало с работ Исаака Ньютона и Йозефа Фраунгофера, однако для современных исследователей его значение огромно.

Изначально изучение спектральной яркости основывалось на лабораторных исследованиях. Этот метод исследования до сих пор не потерял актуальности. Однако, огромный скачок в изучении спектральной яркости природных образований был достигнут именно с момента начала использования дистанционных методов исследования – от данных первых авиационных полетов и продолжающийся в данный момент довольно большим набором данных от космических спутников.

Smith M. J. и Pain C. F. (2009) рассматривают первичные источники цифровых моделей рельефа со спутниковых и бортовых платформ, а также более традиционные мультиспектральные сканеры, радиометрические и электромагнитные системы. Примеры применения этих методов обобщены и представлены в контексте геоморфометрического анализа и спектрального моделирования.

Yuan F. (2008) исследовал динамику изменения почвенного покрова в штате Миннесота с использованием классификации изображений и ГИС. Результаты работы показывают, что высокоточные характеристики растительного покрова могут быть эффективно извлечены из изображений путем анализа как спектральной, так и пространственной информации. Roberts D. A. с соавторами (2004) проводили исследование в бассейне реки Уинд на юго-западе Вашингтона, где с помощью бортового видимого инфракрасного спектрометра количественно определяли изменение спектрального отражения для доминирующих видов деревьев. Adamowski K. (1971) исследовал применение спектрального анализа для оценки спектральной плотности стохастической составляющей суточного временного ряда речного стока. Lunetta R. S. с соавторами (2009) на основе спектральных данных космических снимков Landsat 7 (ETM+) и вспомогательных источников данных производили характеристику и классификацию растительного покрова в бассейне реки Неузе в Северной Каролине. Mayaux P. с соавторами (2004) провели построение карты основных типов растительности и нерастительных образований земной поверхности в Африке, а также на Мадагаскаре и других прилегающих островах, а также провели классификацию растительного покрова опираясь на данные радиолокационных и тепловых датчиков. Как видим, применение изучения спектральной отражательной способности имеет огромное значение во многих сферах – при проведении автоматических и полуавтоматических классификаций природных объектов (Small et al., 2001; Asner, 2002; Mayaux et al., 2004; Ashish et al., 2009; Lunetta et al., 2009; Karami et al., 2013; Salih et al., 2017), изучении почвенного покрова (Jacquemoud et al., 1992; Lu et al., 2004; Rivero et al., 2009), метеорологических исследованиях (Landsberg et al., 1976; Parrish et al., 1992; Yuan, 2008), гидрологических исследованиях (Adamowski, 1971; Sanyal et al., 2005; Moller et al., 2010), геоморфологических исследованиях (Call et al., 2003; Smith et al., 2009), изучении растительного покрова (Hirano et al., 2003; Roberts et al., 2004; Lück-Vogel et al., 2006; Tabunshchik et al., 2018). В России первые крупные исследования спектральной отражательной способности различных природных образований относятся к 30-40 годам XX века (Исследование отражательной способности..., 1934; Кринов, 1947), и основаны в основном на данных аэросъемки. Во второй половине XX века эти исследования продолжились, уже в комплексе с данными получаемыми с космических спутников (Рачулик и др., 1981; Кондратьев и др., 1982; Чапурский, 1986; Колесникова и др., 2009), однако максимального развития достигли в современный период (Гусейнов и др., 2005; Козодеров и др., 2007, 2009; Жирин и др., 2013; Бондур, 2014; Борзов и др., 2014).

Как известно (Шульц, 1981), растения в процессе роста и развития проходят ряд фаз, последовательно сменяющих друг друга. Поэтому для дешифрирования сельскохозяйственных культур в различные временные периоды необходимо обладать информацией о спектральной отражательной способности растений в разные фенологические фазы вегетации.

Цель работы – изучить спектральные отражательной способности и построить графики спектральных кривых различных сельскохозяйственных культур в различные фенологические фазы вегетации.

Объекты и методы исследования

Исследование выполнялось с применением полевых, геоинформационных, картографических, картометрических методов исследования.

Для анализа спектральных характеристик растений в различные фенологические фазы вегетации были выбраны ключевые участки с несколькими сельскохозяйственными культурами (рис. 1).



Рис. 1 Географическое расположение исследуемых участков №1-29
Fig. 1 Geographical location of the study sites №1-29

В результате полевого обследования территории исследования было установлено, что часть ключевых сельскохозяйственных участков, на данный момент, не используется по прямому назначению и для исследования представляют интерес только следующие:

№5, №6, № 18 и №19 – персик – смесь сортов с разными сроками созревания;

№7, №8, №9, №10 и №16 – виноград технических и столовых сортов различных сроков созревания (Каберне, Мерло, Шардоне, Пино, Мускат янтарный, Восторг) и различных годов закладки виноградников;

№13, №14, №17 и №24 – черешня – смесь сортов с разными сроками созревания;

№20 – абрикос – смесь сортов;

№26, №27, №28 – яблоня смесь сортов;

№29 – слива – смесь сортов.

Полевое обследование показало, что на всех подходящих для исследования участках посадка культур выполнялась в виде смеси сортов с целью минимизировать экономические потери при неблагоприятных климатических условиях, т.к. фенологические фазы разных сортов немного сдвинуты относительно друг друга. Кроме того, это дает возможность получать дополнительные прибыли, так как увеличивается ассортимент выпускаемой продукции. С другой стороны, данное обстоятельство создает трудности для нахождения чистых спектральных характеристик

отдельных сортов и позволяет говорить только о конкретной культуре в целом, состоящей из смеси сортов.

Для данных культур с помощью полевых наблюдений были выявлены даты наступления фаз вегетации. Для персика фаза цветения в 2019 году продлилась с 6 апреля по 18 апреля, для черешни – с 12 апреля по 25 апреля в зависимости от сортов. Для яблони начало вегетации с 27 марта по 9 апреля, начало цветения с 23 апреля по 03 мая, завязь плодов с 03 мая по 12 мая.

Для анализа коэффициента спектральной яркости рассматриваемых участков были использованы космические снимки Sentinel-2, спутника Sentinel-2 Европейского космического агентства производящие съемку местности в 13 различных каналах (табл. 1).

Таблица 1

Характеристики спектральных каналов спутника Sentinel-2

Table 1

Characteristics of Sentinel-2 satellite spectral channels

Канал Band	Sentinel-2A		Sentinel-2B		Пространственное разрешение (м) Spatial resolution (m)
	Основная длина волны (нм) Central wave length (nm)	Ширина канала (нм) Band width (nm)	Основная длина волны (нм) Central wave length (nm)	Ширина канала (нм) Band width (nm)	
Band 1 – Coastal aerosol	442,7	21	442,2	21	60
Band 2 – Blue	492,4	66	492,1	66	10
Band 3 – Green	559,8	36	559,0	36	10
Band 4 – Red	664,6	31	664,9	31	10
Band 5 – Vegetation rededge	704,1	15	703,8	16	20
Band 6 – Vegetation rededge	740,5	15	739,1	15	20
Band 7 – Vegetation rededge	782,8	20	779,7	20	20
Band 8 – NIR	832,8	106	832,9	106	10
Band 8A – Narrow NIR	864,7	21	864,0	22	20
Band 9 – Water vapour	945,1	20	943,2	21	60
Band 10 – SWIR – Cirrus	1373,5	31	1376,9	30	60
Band 11 – SWIR	1613,7	91	1610,4	94	20
Band 12 – SWIR	2202,4	175	2185,7	185	20

Космические снимки были выбраны за 07.04.2019, 27.04.2019 и 12.05.2019 года, как наиболее подходящие к периоду начала вегетации (07.04.2019), окончания вегетации (27.04.2019) и начала созревания плодов (12.05.2019), с минимальными значениями перекрытия облаками.

Предварительная обработка космических снимков осуществлялась с использованием плагина Semi-Automatic Classification Plugin for QGIS программного комплекса QGIS. Дальнейшая обработка осуществлялась с использованием программного продукта ENVI. Обработка космических снимков осуществлялась в QGIS в связи с тем, что в ENVI обработка данных Sentinel-2 интегрирована только с последней версией программы 5.3, а в исследовании применялась версия ENVI 5.0.

Однако, поскольку космические снимки Sentinel-2 имеют пространственное разрешение от 10 до 60 м на пиксель (таблица 1), то в пределах одного пикселя оказываются расположенными не только изучаемые сельскохозяйственные культуры, но и участки почвы (иногда с травянистой растительностью). Поэтому необходимо разделение коэффициента спектральной яркости различных составляющих (в нашем

случае сельскохозяйственными культурами и почвы) в пределах каждого пикселя снимка. Для этих целей была использована методика, описанная в работах (Roberts et al., 2004; Yuan, 2002; Tansey et al., 2009).

Суть ее состоит в следующем. Итоговое значение коэффициента спектральной яркости пикселя складывается из суммы коэффициента спектральной яркости выбранной сельскохозяйственной культуры и коэффициента спектральной яркости почвы. В пределах каждого пикселя выбранная сельскохозяйственная культура и почва занимают определенное площадное соотношение, которая в сумме составляет 100% (или 1). Если принять значение пикселя за 1, то выбранная сельскохозяйственная культура и почва будут занимать какую-либо долю от 1. Исходя из вышесказанного можно представить это в виде системы двух уравнений:

$$\begin{aligned} \text{КСЯ} &= L_1 * \text{КСЯ}_1 + L_2 * \text{КСЯ}_2 + \dots + L_n * \text{КСЯ}_n \\ L_1 + L_2 + \dots + L_n &= 1 \end{aligned}$$

где КСЯ – коэффициент спектральной яркости пикселя, КСЯ_n – коэффициент спектральной яркости объекта n , L_n – доля объекта n в пикселе.

Для решения этой системы уравнений и нахождения некоторых неизвестных был использован программный продукт ENVI который позволяет провести спектральное разделение в пределах пикселя космического снимка. Для этого был использован модуль «Линейное спектральное разделение» («Linear spectral un mixing»), группы инструментов «Спектральное разделение» («Spectral Un mixing») набора инструментов «Спектр» («Spectral»).

В основе использования модуля «Линейное спектральное разделение» («Linear spectral un mixing») лежит тот факт, что частота любого пикселя является результатом линейных математических комбинаций частот отражения всех характерных объектов в пределах данного пикселя, где вес частот отражения каждого характерного объекта непосредственно пропорционален занимаемой данным объектом области частот пикселя. Если спектры всех характерных объектов, находящихся на снимке, известны, то их содержание в пределах пикселя может быть вычислено по спектральной кривой каждого пикселя. Результаты применения алгоритма линейного спектрального разделения включают одно изображение для каждого материала. Значения пикселей в этих изображениях показывают процент от их площади (Yuan et al., 2002, 2008).

Для применения инструмента «Линейное спектральное разделение» («Linear spectral un mixing») на территории города федерального значения Севастополь были выбраны два эталонных участка почвы покрытой растительностью и без растительного покрова. Таким образом были получены коэффициенты спектральной яркости использованные как эталоны для оценки доли почвы в пикселях изображения на рассматриваемых участках. Если при применении инструмента «Линейное спектральное разделение» («Linear spectral un mixing») полученные значения находятся в диапазоне от 0 до 1, то это свидетельствует об успешной реализации применения инструмента. Если полученные значения менее 0 или более 1, это означает что спектральное разделение провести не удалось, так как содержатся дополнительные классы объектов неучтённые в построении модели спектрального разделения и для которых сложно подобрать эталонные спектры.

Результаты и обсуждение

В результате анализа космических снимков с использованием программ QGIS и ENVI были получены значения коэффициента спектральной яркости для различных сельскохозяйственных культур в период начала вегетации, конца вегетации и начала созревания плодов, пространственно локализованных в разных частях территории города федерального значения Севастополь (таблица 2, 3, 4).

Таблица 2

Минимальные значения коэффициента спектральной яркости в пределах рассматриваемых участков в начале вегетации, конце вегетации и начале созревания плодов

Table 2

The minimum values of the spectral brightness coefficient within the considered areas at the beginning of vegetation, the end of vegetation and the beginning of fruit ripening

Участок Area	Канал Band												
	1	2	3	4	5	6	7	8	8A	9	10	11	12
07.04.2019													
5	0,05	0,05	0,06	0,09	0,11	0,13	0,15	0,14	0,16	0,08	0,01	0,25	0,19
6	0,05	0,05	0,07	0,10	0,11	0,13	0,15	0,15	0,17	0,08	0,01	0,25	0,20
7	0,05	0,06	0,08	0,11	0,13	0,15	0,17	0,17	0,19	0,09	0,01	0,26	0,18
8	0,05	0,05	0,07	0,09	0,12	0,13	0,15	0,15	0,17	0,08	0,01	0,26	0,19
9	0,05	0,05	0,06	0,09	0,10	0,12	0,13	0,13	0,15	0,07	0,01	0,23	0,18
10	0,05	0,05	0,06	0,07	0,11	0,15	0,17	0,17	0,19	0,09	0,01	0,25	0,17
13	0,04	0,04	0,05	0,08	0,11	0,12	0,14	0,14	0,16	0,07	0,01	0,22	0,15
14	0,05	0,05	0,07	0,09	0,12	0,14	0,16	0,17	0,18	0,09	0,01	0,25	0,18
16	0,05	0,05	0,06	0,09	0,11	0,13	0,15	0,15	0,17	0,08	0,01	0,23	0,17
17	0,05	0,05	0,06	0,09	0,12	0,15	0,17	0,17	0,19	0,09	0,01	0,25	0,19
18	0,05	0,05	0,07	0,10	0,12	0,16	0,18	0,18	0,20	0,09	0,01	0,24	0,17
19	0,03	0,04	0,06	0,09	0,11	0,18	0,21	0,20	0,23	0,10	0,01	0,23	0,16
20	0,05	0,05	0,06	0,09	0,12	0,15	0,17	0,17	0,19	0,09	0,01	0,24	0,18
26	0,05	0,04	0,05	0,06	0,10	0,13	0,15	0,14	0,16	0,08	0,01	0,21	0,14
27	0,05	0,05	0,06	0,07	0,10	0,13	0,15	0,15	0,18	0,08	0,01	0,22	0,16
28	0,04	0,04	0,05	0,06	0,08	0,10	0,11	0,10	0,13	0,06	0,01	0,15	0,10
29	0,05	0,04	0,05	0,06	0,10	0,14	0,16	0,14	0,18	0,08	0,01	0,21	0,13
27.04.2019													
5	0,04	0,04	0,06	0,08	0,11	0,15	0,17	0,16	0,19	0,08	0,01	0,22	0,15
6	0,04	0,04	0,06	0,09	0,12	0,15	0,17	0,17	0,19	0,08	0,01	0,24	0,18
7	0,04	0,05	0,06	0,09	0,12	0,16	0,18	0,18	0,20	0,09	0,01	0,24	0,18
8	0,04	0,04	0,06	0,07	0,11	0,15	0,16	0,16	0,19	0,09	0,01	0,23	0,16
9	0,04	0,04	0,05	0,07	0,10	0,13	0,14	0,14	0,16	0,07	0,01	0,23	0,16
10	0,04	0,03	0,05	0,05	0,10	0,15	0,17	0,17	0,20	0,09	0,01	0,21	0,13
13	0,03	0,03	0,04	0,07	0,10	0,14	0,16	0,16	0,18	0,08	0,01	0,20	0,13
14	0,04	0,04	0,05	0,07	0,11	0,16	0,18	0,17	0,20	0,09	0,01	0,22	0,16
16	0,04	0,04	0,05	0,08	0,11	0,14	0,16	0,16	0,18	0,08	0,01	0,22	0,17
17	0,04	0,04	0,05	0,07	0,11	0,14	0,16	0,16	0,18	0,08	0,01	0,23	0,17
18	0,03	0,04	0,06	0,09	0,11	0,18	0,21	0,20	0,23	0,10	0,01	0,23	0,16
19	0,04	0,04	0,06	0,08	0,12	0,16	0,18	0,18	0,20	0,09	0,01	0,23	0,18
20	0,04	0,04	0,05	0,07	0,11	0,16	0,18	0,17	0,20	0,08	0,01	0,22	0,16
26	0,04	0,03	0,04	0,05	0,10	0,16	0,18	0,18	0,21	0,09	0,01	0,21	0,15
27	0,04	0,04	0,05	0,07	0,10	0,15	0,17	0,16	0,19	0,09	0,01	0,22	0,16
28	0,03	0,03	0,05	0,05	0,10	0,15	0,17	0,16	0,20	0,08	0,01	0,19	0,11
29	0,03	0,03	0,05	0,05	0,10	0,16	0,18	0,18	0,21	0,09	0,01	0,19	0,11
12.05.2019													
5	0,03	0,03	0,06	0,06	0,11	0,18	0,21	0,20	0,23	0,07	0,01	0,20	0,13
6	0,03	0,04	0,06	0,07	0,12	0,17	0,20	0,19	0,22	0,07	0,01	0,23	0,15
7	0,04	0,04	0,06	0,07	0,13	0,18	0,21	0,20	0,23	0,07	0,01	0,25	0,16
8	0,04	0,03	0,06	0,07	0,12	0,17	0,19	0,19	0,22	0,07	0,01	0,22	0,13
9	0,03	0,03	0,05	0,05	0,11	0,15	0,17	0,16	0,19	0,06	0,01	0,22	0,13

Продолжение таблицы 2

10	0,03	0,03	0,05	0,05	0,11	0,19	0,22	0,21	0,25	0,08	0,01	0,19	0,11
13	0,03	0,02	0,05	0,06	0,09	0,18	0,20	0,19	0,23	0,07	0,01	0,18	0,11
14	0,03	0,03	0,05	0,06	0,11	0,18	0,22	0,21	0,24	0,07	0,01	0,22	0,14
16	0,03	0,03	0,06	0,06	0,11	0,18	0,21	0,19	0,24	0,07	0,01	0,21	0,13
17	0,03	0,03	0,06	0,07	0,12	0,17	0,20	0,19	0,22	0,07	0,01	0,24	0,16
18	0,03	0,04	0,07	0,08	0,11	0,20	0,23	0,22	0,26	0,08	0,01	0,20	0,12
19	0,03	0,04	0,06	0,09	0,13	0,17	0,20	0,19	0,22	0,07	0,01	0,24	0,18
20	0,03	0,03	0,06	0,06	0,11	0,18	0,21	0,19	0,23	0,06	0,01	0,22	0,15
26	0,04	0,03	0,05	0,05	0,11	0,21	0,24	0,22	0,27	0,07	0,01	0,22	0,13
27	0,04	0,04	0,06	0,06	0,11	0,18	0,21	0,19	0,24	0,07	0,01	0,22	0,14
28	0,03	0,03	0,05	0,04	0,10	0,20	0,25	0,22	0,28	0,08	0,01	0,18	0,09
29	0,03	0,03	0,05	0,04	0,10	0,24	0,29	0,26	0,32	0,08	0,01	0,19	0,09

Таблица 3

Максимальные значения коэффициента спектральной яркости в пределах рассматриваемых участков в начале вегетации, конце вегетации и начале созревания плодов

Table 3

The maximum values of the spectral brightness coefficient within the considered areas at the beginning of vegetation, the end of vegetation and the beginning of fruit ripening

Участок Area	Канал Band												
	1	2	3	4	5	6	7	8	8A	9	10	11	12
07.04.2019													
5	0,06	0,07	0,09	0,14	0,15	0,21	0,23	0,21	0,26	0,11	0,01	0,32	0,27
6	0,06	0,07	0,08	0,13	0,14	0,19	0,22	0,22	0,24	0,11	0,01	0,30	0,24
7	0,08	0,11	0,15	0,22	0,23	0,25	0,27	0,27	0,29	0,11	0,01	0,39	0,32
8	0,06	0,07	0,09	0,15	0,16	0,20	0,23	0,25	0,26	0,11	0,01	0,33	0,28
9	0,06	0,07	0,09	0,14	0,15	0,21	0,23	0,23	0,27	0,10	0,01	0,31	0,26
10	0,06	0,07	0,09	0,12	0,15	0,23	0,27	0,27	0,29	0,12	0,01	0,31	0,23
13	0,07	0,07	0,09	0,14	0,15	0,24	0,29	0,26	0,32	0,12	0,01	0,31	0,26
14	0,07	0,09	0,11	0,17	0,19	0,22	0,25	0,25	0,29	0,11	0,01	0,35	0,29
16	0,06	0,07	0,10	0,15	0,17	0,22	0,28	0,24	0,30	0,11	0,01	0,33	0,27
17	0,06	0,06	0,09	0,13	0,15	0,21	0,24	0,22	0,26	0,12	0,01	0,29	0,23
18	0,06	0,07	0,09	0,14	0,17	0,23	0,29	0,23	0,32	0,13	0,01	0,32	0,28
19	0,05	0,07	0,09	0,14	0,17	0,24	0,30	0,26	0,34	0,13	0,01	0,32	0,26
20	0,06	0,08	0,10	0,14	0,16	0,21	0,24	0,24	0,26	0,13	0,01	0,31	0,26
26	0,07	0,08	0,10	0,14	0,16	0,19	0,21	0,22	0,24	0,10	0,01	0,31	0,25
27	0,07	0,07	0,09	0,12	0,14	0,18	0,20	0,22	0,23	0,10	0,01	0,30	0,22
28	0,06	0,06	0,07	0,10	0,11	0,16	0,18	0,19	0,21	0,09	0,01	0,25	0,17
29	0,06	0,07	0,10	0,12	0,13	0,19	0,23	0,24	0,25	0,10	0,01	0,29	0,21
27.04.2019													
5	0,05	0,07	0,10	0,15	0,17	0,23	0,27	0,26	0,28	0,12	0,01	0,34	0,28
6	0,05	0,06	0,08	0,13	0,15	0,21	0,24	0,25	0,26	0,11	0,01	0,30	0,25
7	0,07	0,11	0,15	0,22	0,24	0,26	0,29	0,29	0,31	0,12	0,01	0,41	0,34
8	0,06	0,08	0,11	0,17	0,19	0,23	0,27	0,27	0,30	0,11	0,01	0,37	0,31
9	0,05	0,07	0,10	0,16	0,17	0,23	0,27	0,28	0,28	0,11	0,01	0,34	0,28
10	0,05	0,05	0,08	0,10	0,14	0,26	0,30	0,30	0,33	0,12	0,01	0,29	0,21
13	0,06	0,07	0,09	0,14	0,16	0,29	0,35	0,32	0,38	0,12	0,01	0,31	0,25
14	0,06	0,08	0,11	0,16	0,19	0,23	0,25	0,25	0,28	0,11	0,01	0,34	0,27
16	0,05	0,07	0,10	0,15	0,18	0,23	0,28	0,27	0,33	0,11	0,01	0,33	0,27
17	0,05	0,05	0,07	0,10	0,13	0,19	0,22	0,22	0,25	0,11	0,01	0,27	0,22
18	0,05	0,07	0,09	0,14	0,17	0,24	0,30	0,26	0,34	0,13	0,01	0,32	0,26
19	0,06	0,06	0,09	0,13	0,17	0,23	0,26	0,26	0,28	0,11	0,01	0,33	0,27
20	0,05	0,06	0,09	0,13	0,16	0,23	0,26	0,27	0,29	0,12	0,01	0,32	0,25
26	0,07	0,07	0,09	0,13	0,16	0,21	0,24	0,25	0,27	0,11	0,01	0,31	0,24

Продолжение таблицы 3

27	0,06	0,06	0,08	0,11	0,14	0,20	0,23	0,25	0,26	0,11	0,01	0,29	0,21
28	0,05	0,05	0,07	0,09	0,12	0,22	0,25	0,26	0,28	0,10	0,01	0,25	0,17
29	0,04	0,06	0,08	0,10	0,13	0,22	0,26	0,29	0,30	0,10	0,01	0,26	0,18
12.05.2019													
5	0,05	0,06	0,10	0,15	0,17	0,25	0,31	0,33	0,34	0,10	0,01	0,33	0,26
6	0,05	0,06	0,09	0,13	0,16	0,25	0,30	0,31	0,33	0,09	0,01	0,31	0,24
7	0,07	0,11	0,17	0,24	0,25	0,29	0,32	0,31	0,34	0,09	0,01	0,42	0,34
8	0,05	0,07	0,12	0,18	0,20	0,29	0,34	0,33	0,38	0,09	0,01	0,37	0,29
9	0,05	0,07	0,11	0,17	0,19	0,27	0,32	0,36	0,36	0,09	0,01	0,36	0,29
10	0,04	0,05	0,08	0,10	0,14	0,29	0,37	0,38	0,39	0,10	0,01	0,28	0,18
13	0,05	0,06	0,10	0,15	0,18	0,30	0,37	0,31	0,41	0,09	0,01	0,33	0,26
14	0,04	0,07	0,10	0,15	0,17	0,26	0,30	0,29	0,33	0,09	0,01	0,31	0,25
16	0,05	0,06	0,10	0,15	0,18	0,26	0,31	0,32	0,35	0,09	0,01	0,33	0,26
17	0,05	0,06	0,08	0,12	0,16	0,23	0,28	0,27	0,30	0,09	0,01	0,31	0,24
18	0,05	0,07	0,10	0,15	0,18	0,28	0,38	0,33	0,42	0,10	0,01	0,34	0,27
19	0,05	0,06	0,10	0,14	0,17	0,25	0,29	0,29	0,33	0,09	0,01	0,32	0,25
20	0,05	0,05	0,08	0,13	0,15	0,23	0,27	0,27	0,30	0,08	0,01	0,30	0,23
26	0,06	0,07	0,10	0,14	0,17	0,29	0,34	0,36	0,37	0,08	0,01	0,31	0,25
27	0,06	0,06	0,09	0,11	0,14	0,27	0,31	0,35	0,36	0,08	0,01	0,30	0,20
28	0,05	0,05	0,08	0,08	0,13	0,32	0,39	0,41	0,43	0,09	0,01	0,24	0,15
29	0,04	0,05	0,09	0,10	0,13	0,33	0,41	0,42	0,45	0,10	0,01	0,25	0,15

Таблица 4

Средние значения коэффициента спектральной яркости в пределах рассматриваемых участков в начале вегетации, конце вегетации и начале созревания плодов

Table 4

The average values of the spectral brightness coefficient within the considered areas at the beginning of vegetation, the end of vegetation and the beginning of fruit ripening

Участок Area	Канал Band												
	1	2	3	4	5	6	7	8	8A	9	10	11	12
07.04.2019													
5	0,06	0,06	0,08	0,12	0,13	0,16	0,17	0,17	0,20	0,09	0,01	0,29	0,24
6	0,05	0,06	0,07	0,11	0,12	0,15	0,16	0,16	0,18	0,08	0,01	0,27	0,23
7	0,07	0,08	0,10	0,16	0,17	0,20	0,22	0,21	0,24	0,10	0,01	0,34	0,28
8	0,06	0,06	0,08	0,12	0,14	0,17	0,19	0,18	0,21	0,09	0,01	0,29	0,24
9	0,05	0,06	0,07	0,11	0,13	0,15	0,17	0,16	0,19	0,08	0,01	0,27	0,23
10	0,06	0,06	0,07	0,09	0,13	0,18	0,20	0,20	0,23	0,10	0,01	0,29	0,20
13	0,05	0,05	0,07	0,10	0,12	0,15	0,17	0,17	0,20	0,09	0,01	0,27	0,22
14	0,06	0,06	0,08	0,12	0,15	0,18	0,20	0,20	0,22	0,10	0,01	0,29	0,24
16	0,05	0,06	0,07	0,11	0,13	0,15	0,17	0,17	0,20	0,09	0,01	0,28	0,23
17	0,05	0,06	0,07	0,11	0,13	0,17	0,19	0,19	0,21	0,09	0,01	0,27	0,21
18	0,06	0,06	0,08	0,11	0,14	0,18	0,21	0,21	0,23	0,10	0,01	0,29	0,23
19	0,05	0,06	0,08	0,11	0,15	0,21	0,24	0,23	0,26	0,11	0,01	0,29	0,22
20	0,06	0,06	0,08	0,11	0,13	0,17	0,20	0,20	0,22	0,10	0,01	0,27	0,21
22	0,05	0,05	0,07	0,08	0,13	0,27	0,32	0,31	0,34	0,14	0,01	0,23	0,14
26	0,06	0,07	0,08	0,12	0,14	0,17	0,19	0,19	0,21	0,09	0,01	0,27	0,21
27	0,06	0,06	0,07	0,10	0,12	0,15	0,17	0,17	0,20	0,09	0,01	0,27	0,19
28	0,05	0,05	0,06	0,08	0,10	0,13	0,14	0,15	0,16	0,07	0,01	0,20	0,13
29	0,05	0,05	0,06	0,09	0,12	0,16	0,18	0,18	0,21	0,09	0,01	0,25	0,17
27.04.2019													
5	0,05	0,06	0,08	0,12	0,14	0,19	0,21	0,21	0,23	0,10	0,01	0,29	0,24
6	0,05	0,05	0,07	0,11	0,13	0,17	0,19	0,19	0,21	0,09	0,01	0,28	0,23
7	0,06	0,07	0,10	0,16	0,18	0,21	0,23	0,23	0,25	0,11	0,01	0,35	0,29
8	0,05	0,06	0,08	0,13	0,16	0,19	0,22	0,21	0,24	0,10	0,01	0,31	0,25

Продолжение таблицы 4

9	0,05	0,05	0,07	0,12	0,14	0,17	0,19	0,18	0,21	0,09	0,01	0,28	0,23
10	0,04	0,04	0,06	0,07	0,12	0,20	0,23	0,22	0,25	0,10	0,01	0,26	0,17
13	0,04	0,05	0,06	0,10	0,13	0,18	0,21	0,20	0,23	0,10	0,01	0,26	0,20
14	0,05	0,05	0,07	0,11	0,14	0,19	0,22	0,22	0,24	0,10	0,01	0,27	0,21
16	0,04	0,05	0,07	0,11	0,14	0,18	0,20	0,20	0,22	0,09	0,01	0,27	0,21
17	0,04	0,04	0,06	0,09	0,12	0,16	0,19	0,18	0,21	0,09	0,01	0,24	0,19
18	0,05	0,06	0,08	0,11	0,15	0,21	0,24	0,23	0,26	0,11	0,01	0,29	0,22
19	0,05	0,05	0,07	0,11	0,14	0,21	0,23	0,23	0,26	0,10	0,01	0,27	0,21
20	0,04	0,05	0,07	0,09	0,13	0,19	0,21	0,21	0,23	0,10	0,01	0,26	0,19
26	0,05	0,06	0,07	0,10	0,14	0,19	0,21	0,21	0,24	0,10	0,01	0,26	0,19
27	0,05	0,05	0,07	0,09	0,12	0,17	0,19	0,19	0,22	0,09	0,01	0,27	0,19
28	0,04	0,04	0,06	0,07	0,11	0,17	0,20	0,20	0,22	0,09	0,01	0,23	0,15
29	0,04	0,04	0,06	0,07	0,11	0,18	0,21	0,21	0,24	0,10	0,01	0,23	0,14
12.05.2019													
5	0,04	0,05	0,08	0,11	0,15	0,22	0,25	0,24	0,28	0,08	0,01	0,28	0,21
6	0,04	0,05	0,08	0,11	0,14	0,20	0,22	0,22	0,25	0,07	0,01	0,28	0,21
7	0,05	0,07	0,11	0,16	0,19	0,23	0,26	0,25	0,29	0,08	0,01	0,35	0,28
8	0,04	0,06	0,09	0,14	0,16	0,22	0,25	0,24	0,28	0,08	0,01	0,31	0,24
9	0,04	0,05	0,08	0,13	0,15	0,19	0,22	0,21	0,24	0,07	0,01	0,29	0,23
10	0,03	0,04	0,06	0,07	0,12	0,23	0,27	0,27	0,31	0,08	0,01	0,24	0,14
13	0,03	0,04	0,07	0,10	0,13	0,21	0,24	0,24	0,27	0,08	0,01	0,27	0,19
14	0,03	0,04	0,07	0,09	0,13	0,23	0,27	0,26	0,30	0,08	0,01	0,26	0,18
16	0,04	0,04	0,07	0,10	0,14	0,22	0,26	0,25	0,29	0,08	0,01	0,27	0,20
17	0,04	0,04	0,07	0,10	0,13	0,20	0,24	0,23	0,26	0,07	0,01	0,26	0,19
18	0,04	0,05	0,08	0,12	0,15	0,23	0,26	0,26	0,29	0,08	0,01	0,30	0,23
19	0,04	0,05	0,08	0,11	0,14	0,22	0,26	0,25	0,29	0,08	0,01	0,28	0,21
20	0,03	0,04	0,06	0,08	0,12	0,21	0,24	0,24	0,27	0,07	0,01	0,24	0,17
26	0,04	0,05	0,08	0,10	0,14	0,24	0,28	0,27	0,31	0,08	0,01	0,26	0,18
27	0,05	0,05	0,07	0,09	0,13	0,21	0,25	0,25	0,28	0,07	0,01	0,27	0,17
28	0,03	0,04	0,06	0,06	0,11	0,25	0,30	0,29	0,33	0,08	0,01	0,22	0,12
29	0,03	0,03	0,06	0,05	0,11	0,28	0,34	0,33	0,37	0,09	0,01	0,21	0,11

Учитывая тот факт, что наиболее удобно работать со средними значениями коэффициента спектральной яркости, модель линейного спектрального разделения основывалась именно на них. В качестве эталонного участка были выбраны два участка со схожими характеристиками. В результате, были получены значения коэффициента спектральной яркости сельскохозяйственных культур, прошедшие процедуру линейного спектрального разделения, которые представлены в таблице 5 и на рисунках 2 и 3.

Таблица 5

Средние значения коэффициента спектральной яркости в пределах рассматриваемых участков в начале вегетации, конце вегетации и начале созревания плодов, полученные путем спектрального разделения

Table 5

Mean values of the spectral brightness coefficient within the considered areas at the beginning of vegetation, the end of vegetation and the beginning of fruit ripening, obtained by spectral unmixing

Участок Area	Канал Band												
	1	2	3	4	5	6	7	8	8A	9	10	11	12
07.04.2019													
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	0,06	0,04	0,02	0,08	0,09	0,07	0,04	0,03	0,07	0,05	0,01	0,28	0,27
7	0,07	0,08	0,12	0,19	0,20	0,20	0,22	0,22	0,25	0,11	0,01	0,38	0,33

Продолжение таблицы 5

8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	0,06	0,05	0,06	0,09	0,12	0,17	0,19	0,19	0,22	0,10	0,01	0,30	0,20
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	0,05	0,04	0,04	0,09	0,11	0,12	0,12	0,11	0,14	0,07	0,01	0,28	0,23
16	0,06	0,03	0,02	0,09	0,10	0,08	0,06	0,06	0,09	0,06	0,01	0,30	0,27
17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	0,07	0,04	0,03	0,09	0,12	0,14	0,12	0,11	0,16	0,09	0,01	0,35	0,30
19	0,04	0,03	0,04	0,09	0,14	0,22	0,22	0,21	0,25	0,11	0,01	0,32	0,26
20	0,06	0,04	0,04	0,09	0,12	0,14	0,14	0,13	0,17	0,09	0,01	0,29	0,23
26	0,08	0,05	0,03	0,09	0,11	0,08	0,03	0,02	0,07	0,04	0,01	0,29	0,24
27	0,06	0,05	0,05	0,08	0,11	0,12	0,13	0,13	0,16	0,08	0,01	0,27	0,19
28	0,05	0,05	0,06	0,07	0,10	0,12	0,14	0,14	0,16	0,07	0,01	0,19	0,13
29	0,05	0,05	0,06	0,08	0,11	0,15	0,17	0,17	0,20	0,09	0,01	0,25	0,17
27.04.2019													
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	0,06	0,04	0,04	0,11	0,13	0,09	0,08	0,05	0,10	0,06	0,01	0,36	0,33
7	0,06	0,07	0,10	0,17	0,19	0,21	0,23	0,23	0,26	0,11	0,01	0,36	0,30
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	0,04	0,03	0,03	0,04	0,10	0,19	0,20	0,18	0,23	0,10	0,01	0,29	0,18
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	0,05	0,07	0,10	0,17	0,19	0,21	0,23	0,22	0,26	0,12	0,01	0,34	0,30
16	0,05	0,12	0,16	0,35	0,32	0,16	0,14	0,14	0,21	0,14	0,01	0,58	0,62
17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	0,05	0,05	0,07	0,11	0,15	0,21	0,23	0,23	0,26	0,11	0,01	0,30	0,24
19	0,05	0,05	0,06	0,10	0,14	0,20	0,22	0,21	0,25	0,10	0,01	0,29	0,23
20	0,04	0,07	0,10	0,19	0,21	0,20	0,21	0,21	0,26	0,14	0,01	0,38	0,36
26	0,07	0,05	0,05	0,09	0,14	0,15	0,15	0,11	0,17	0,07	0,01	0,31	0,23
27	0,06	0,13	0,15	0,26	0,24	0,09	0,07	0,09	0,17	0,11	0,01	0,60	0,50
28	0,04	0,04	0,04	0,06	0,10	0,16	0,18	0,17	0,20	0,08	0,01	0,23	0,14
29	0,04	0,04	0,05	0,06	0,10	0,18	0,21	0,20	0,23	0,09	0,01	0,23	0,14
12.05.2019													
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	0,02	0,04	0,07	0,08	0,15	0,29	0,33	0,33	0,37	0,11	0,01	0,28	0,17
13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	0,02	0,04	0,09	0,15	0,19	0,30	0,35	0,34	0,39	0,12	0,01	0,37	0,29
16	0,02	0,08	0,16	0,29	0,32	0,37	0,41	0,40	0,46	0,16	0,01	0,62	0,57
17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	0,06	0,13	0,22	0,38	0,39	0,40	0,44	0,43	0,49	0,17	0,01	0,73	0,70
19	0,05	0,12	0,19	0,36	0,35	0,38	0,42	0,42	0,47	0,16	0,01	0,64	0,63
20	0,05	0,06	0,18	0,36	0,43	0,41	0,42	0,43	0,49	0,23	0,01	0,71	0,81
26	0,05	0,07	0,12	0,15	0,19	0,31	0,36	0,34	0,39	0,10	0,01	0,34	0,27
27	0,08	0,14	0,20	0,24	0,30	0,36	0,40	0,40	0,48	0,14	0,01	0,68	0,49
28	0,03	0,03	0,06	0,06	0,12	0,27	0,32	0,31	0,35	0,09	0,01	0,22	0,12
29	0,03	0,03	0,06	0,05	0,11	0,30	0,36	0,35	0,40	0,10	0,01	0,21	0,11

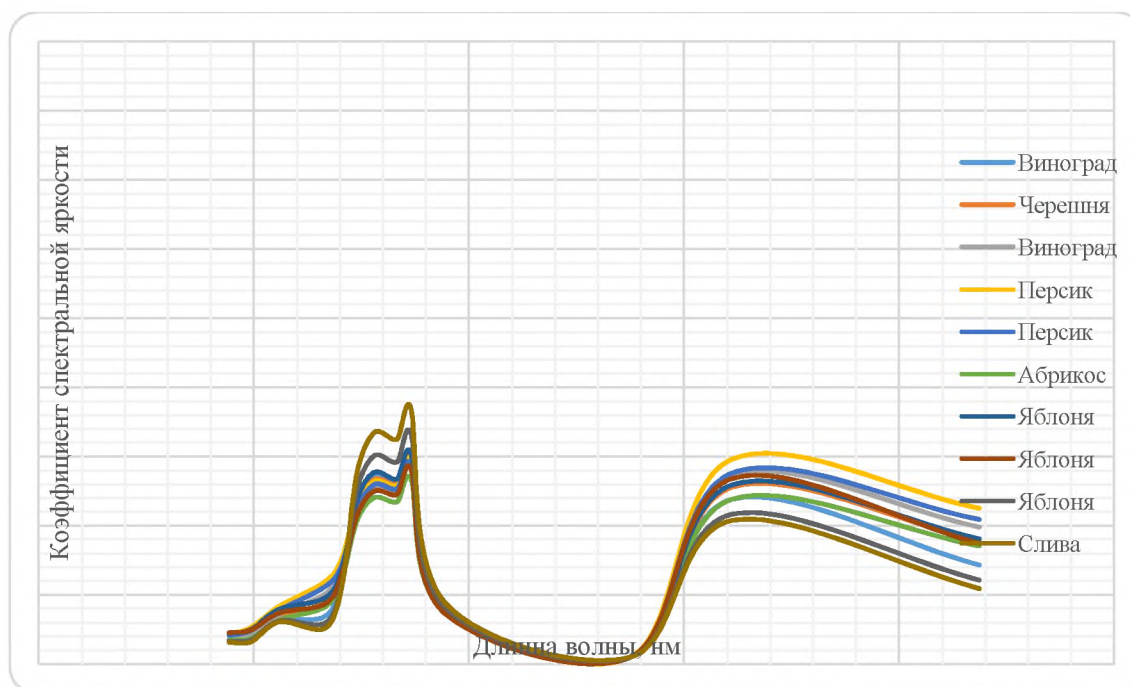


Рис. 2 Значения коэффициента спектральной яркости для выбранных культур за 12 мая 2019 года до применения алгоритма линейного спектрального разделения

Fig. 2 Spectral brightness coefficient values for selected crops for May 12, 2019 before applying the linear spectral unmixing algorithm

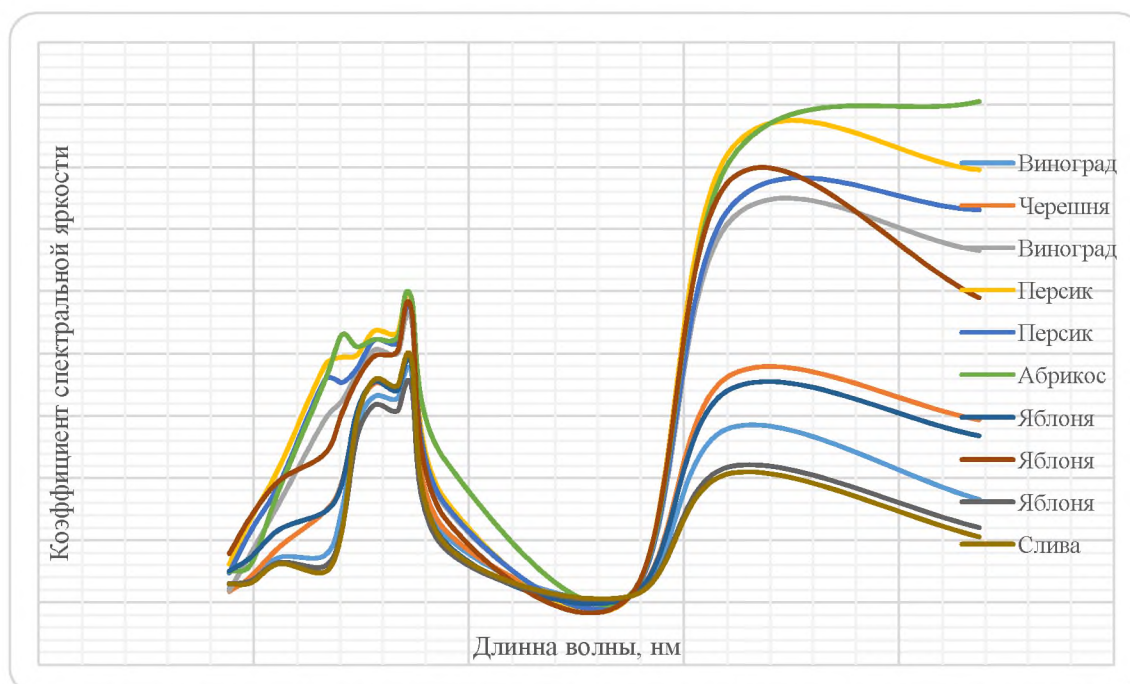


Рис. 3 Значения коэффициента спектральной яркости для выбранных культур за 12 мая 2019 года после применения алгоритма линейного спектрального разделения

Fig. 3 Spectral brightness coefficient values for selected crops for May 12, 2019 after applying the linear spectral unmixing algorithm

Как видно из рисунка 2, графики спектральных кривых до обработки методом линейного спектрального разделения для всех культур имеют примерно одинаковый вид, что свидетельствует о значительном вкладе внешних составляющих в спектральную характеристику культур. После спектрального разделения (рис. 3) для каждой культуры прослеживается определённое значение коэффициента спектральной

яркости на графике спектральных кривых, позволяющее использовать ее в качестве эталона.

Как видно из таблицы 5, провести процедуру линейного спектрально разделения удалось не для всех сельскохозяйственных культур. Так, не удалось провести линейное спектральное разделение на участке №5, занятого под персик разных сроков созревания, на участках №8, №9, занятых под виноград разных сроков созревания (№6 и №7 – только на период начала созревания плодов) и участках №13 и №17, занятых под черешню разных сроков созревания. Одновременно с этим, процедура линейного спектрально разделения полностью удалась на участках №26, №27 и №28, занятых под яблоню разных сроков созревания, а также на участках: №29, занятого под сливу разных сроков созревания, № 20, занятого под абрикос разных сроков созревания, № 10 и № 16, занятых под виноград разных сроков созревания, № 14, занятого под черешню разных сроков созревания, №18 и №19, занятых под персик разных сроков созревания. Связано это с тем, что в период начала созревания плодов, на некоторых участках появляются дополнительные составляющие вносящие свой вклад в общий совокупный спектр участка (сорная растительность различных видов). К тому же, невозможность линейного спектрального разделения связана с сильными перемешиванием сортов сельскохозяйственных растений на участке. На некоторых участках невозможно было выделить полное число элементов системы влияющих на суммарное значение спектра.

Выводы

Современная система посадки плодовых сельскохозяйственных культур, когда на одном участке сочетаются несколько сортов одного вида, приносит экономический эффект, но затрудняет определение чистых спектральных коэффициентов яркости и построения графики спектральных кривых для конкретного сорта. К тому же, при анализе необходимо исключать спектральные характеристики примесей (почвы, сорной и травянистой растительности), которые неизбежным образом попадают в пределы пикселя изображения. Космические снимки Sentinel-2 относительно неплохо показали себя при проведении исследования, однако для более полных и исчерпывающих данных необходимо использовать снимки с более высоким разрешением пикселя.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках темы НИР «Изучение пространственно-временной организации водных и сухопутных экосистем с целью развития системы оперативного мониторинга на основе данных дистанционного зондирования и ГИС-технологий. Регистрационный номер: АААА-А19-119061190081-9».

Литература / References

Бондур В.Г. Современные подходы к обработке больших потоков гиперспектральной и многоспектральной аэрокосмической информации // Исследование Земли из космоса. 2014. № 1. С. 4-17.

[Bondur V.G. Modern approaches to processing large flows of hyperspectral and multispectral aerospace information. Issledovaniye Zemli iz kosmosa. 2014. 1: 4-17.]

Борзов С.М., Потатуркин О.И. Обнаружение выборочных рубок леса по данным дистанционных измерений высокого пространственного разрешения // Исследование Земли из космоса. 2014. № 4. С. 87.

[Borзов S.M., Potaturkin O.I. Detection of selective felling based on remote sensing data of high spatial resolution. Issledovaniye Zemli iz kosmosa. 2014. 4: 87]

Гусейнов Г.А., Смоктий О.И. Информационные свойства спектральных коэффициентов яркости и вегетационных индексов для калибровки аэрокосмических снимков // Труды СПИИРАН. 2005. Т. 2. № 2. С. 360-367.

[Huseynov G.A., Smokty O.I. Information properties of spectral brightness coefficients and vegetation indices for calibration of aerospace images // *Trudy SPIIRAN*. 2005. 2(2): 360-367]

Жирин В.М., Эйлина С.П., Князева С.В. Опыт лесоводственного анализа последствий пожаров по космическим изображениям // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 3. С. 243-259.
[Zhirin V.M., Eidlina S.P., Knyazeva S.V. The experience of forestry analysis of the consequences of fires from space images // *Sovremennyye problem distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2013. 10 (3): 243-259.]

Исследование отражательной способности. М.: Гос. науч.-техн. горно-геол.-нефт. изд-во, 1934. 84с.

[The study of reflectivity. Moscow: State scientific and technical mining geological oil Publishing House, 1934. 84 p.]

Козодеров В.В., Кондранин Т.В., Казанцев О.Ю., Бобылев В.И., Щербаков М.В., Борзяк В.В., Дмитриев Е.В., Егоров В.Д., Каменцев В.П., Беляков А.Ю., Логинов С.Б. Обработка и интерпретация данных гиперспектральных аэрокосмических измерений для дистанционной диагностики природно-техногенных объектов // Исследование Земли из космоса. 2009. № 2. С. 36-54.

[Kozoderov V.V., Kondranin T.V., Kazantsev O.Yu., Bobylev V.I., Scherbakov M.V., Borzyak V.V., Dmitriev E.V., Egorov V.D., Kamentsev V.P., Belyakov A.Yu., Loginov S.B. Processing and interpretation of hyperspectral aerospace measurements for remote diagnostics of natural and technogenic objects. *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*. 2009. 2: 36-54]

Козодеров В.В., Кондранин Т.В., Косолапов В.С., Головкин В.А., Дмитриев Е.В. Восстановление объема фитомассы и других параметров состояния почвенно-растительного покрова по результатам обработки многоспектральных спутниковых изображений // Исследование Земли из космоса. 2007. № 1. С. 57-65.

[Kozoderov V.V., Kondranin T.V., Kosolapov V.S., Golovko V.A., Dmitriev E.V. Recovering the volume of phytomass and other parameters of the state of the land cover based on the processing of multispectral satellite images. *Issledovaniye Zemli iz kosmosa*. 2007. 1: 57-65]

Колесникова О.Н., Черепанов А.С. Возможности ПК ENVI для обработки мультиспектральных и гиперспектральных данных // Геоматика. 2009. № 3. С. 24-27.
[Kolesnikova O.N., Cherepanov A.S. Possibilities ENVI for processing multispectral and hyperspectral data // *Geomatika*. 2009. 3: 24-27.]

Кондратьев К.Я., Феченко П.П. Спектральная отражательная способность и распознавание растительности. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 216с.

[Kondratiev K.Ya., Fechenko P.P. Spectral reflectance and vegetation recognition. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1982. 216 p.]

Кринов Е.Л. Спектральная отражательная способность природных образований. М.: Изд. АН СССР, 1947. 272с.

[Krinov E.L. Spectral reflectance of natural formations. Moscow: Publishing USSR Academy of Sciences, 1947. 272 p.]

Рачкулик В.Н., Ситникова М.В. Отражательные свойства и состояние растительных покровов. Л.: Гидрометеиздат, 1981. 267с.

[Rachkulik V.N., Sitnikova M.V. Reflective properties and condition of vegetation. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1981. 267 p.]

Чанурский Л.И. Отражательные свойства природных объектов в диапазоне 400-2500 нм. Часть 1. Л.: МО СССР, 1986. 160с.

[*Chapursky L.I.* Reflective properties of natural objects in the range of 400-2500 nm. Part 1. Leningrad: Ministry of Defense of the USSR, 1986. 160 p.]

Шульц Г.Э. Общая фенология. Л.: Наука, 1981. 188с.

[*Schulz G.E.* General phenology. Leningrad: Nauka, 1981. 188 p.]

Adamowski K. Spectral density of a river flow time series // *Journal of Hydrology*. 1971. Vol. 14(1). pp. 43–52. doi:10.1016/0022-1694(71)90091-6

Ashish D., McClendon R.W., Hoogenboom G. Land use classification of multispectral aerial images using artificial neural networks // *International Journal of Remote Sensing*. 2009. Vol. 30(8). pp. 1989–2004. doi:10.1080/01431160802549187

Asner G.P., Heidebrecht K.B. Spectral unmixing of vegetation, soil and dry carbon cover in arid regions: Comparing multispectral and hyperspectral observations // *International Journal of Remote Sensing*. 2002. Vol. 23(19). pp. 3939–3958. doi:10.1080/01431160110115960

Call K.A., Hardy J.T., Wallin D.O. Coral reef habitat discrimination using multivariate spectral analysis and satellite remote sensing // *International Journal of Remote Sensing*. 2003. Vol. 24(13). pp. 2627–2639. doi:10.1080/0143116031000066990

Hirano A., Madden M., Welch R. Hyperspectral image data for mapping wetland vegetation // *Wetlands*. 2003. Vol. 23 (2). pp. 436–448. doi:10.1672/18-20

Jacquemoud S., Baret F., Hanocq J.F. Modeling spectral and bidirectional soil reflectance // *Remote Sensing of Environment*. 1992. Vol. 41 (2-3). pp. 123–132.

Karami M., Rangzan K., Saberi A. Using GIS servers and interactive maps in spectral data sharing and administration: Case study of Ahvaz Spectral Geodatabase Platform (ASGP) // *Computers & Geosciences*. 2013. Vol. 60. pp. 23–33. doi:10.1016/j.cageo.2013.06.007

Landsberg H.E., Kaylor R.E. Spectral analysis of long meteorological series // *Journal of Interdisciplinary Cycle Research*. 1976. vol. 7. no. 3. pp. 237–243.

Lu D., Li G., Valladares G.S., Batistella M. Mapping soil erosion risk in Rondônia, Brazilian Amazonia: using RUSLE, remote sensing and GIS // *Land Degradation & Development*. 2004. Vol. 15(5). pp. 499–512. doi:10.1002/ldr.634

Lück-Vogel M., Mbolambi C., Rautenbach K., Adams J., van Niekerk L. Vegetation mapping in the St Lucia estuary using very high-resolution multispectral imagery and LiDAR // *South African Journal of Botany*. 2006. Vol. 107. pp. 188–199. doi:10.1016/j.sajb.2016.04.010

Lunetta R.S., Ediriwickrema J., Iiames J., Johnson D.M., Lyon J.G., Mc Kerrow A., Pilant A. A Quantitative Assessment of a Combined Spectral and GIS Rule-Based Land-Cover Classification in the Neuse River Basin of North Carolina // *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2009. Vol. 69(3). pp. 299–310. doi:10.14358/pers.69.3.299

Mayaux P., Bartholomé E., Fritz S., Belward, A. A new land-cover map of Africa for the year 2000 // *Journal of Biogeography*. 2004. Vol. 31(6). pp. 861–877. doi:10.1111/j.1365-2699.2004.01073.x.

Molleri G. S. F., Kampel, M., de Moraes Novo E. M. L. Spectral classification of water masses under the influence of the Amazon River plume // *Acta Oceanologica Sinica*. 2010. Vol. 29(3). pp. 1–8. doi:10.1007/s13131-010-0031-1

Parrish D.F., Derber J.C. The National Meteorological Center's spectral statistical-interpolation analysis system // *Monthly Weather Review*. 1992. vol. 120. no. 8. pp. 1747–1763.

Rivero R. G., Grunwald S., Binford M. W., Osborne, T. Z. Integrating spectral indices into prediction models of soil phosphorus in a subtropical wetland // *Remote Sensing of Environment*. 2009. Vol. 113(11). pp. 2389–2402. doi:10.1016/j.rse.2009.07.015

Roberts D.A., Ustin S.L., Ogunjemiyo S., Greenberg J., Dobrowski S.Z., Chen J., Hinckley T.M. Spectral and Structural Measures of Northwest Forest Vegetation at Leaf to Landscape Scales // *Ecosystems*. 2004. Vol. 7(5). doi:10.1007/s10021-004-0144-5

Salih A.A. M., Ganawa E.-T., Elmahl A.A. Spectral mixture analysis (SMA) and change vector analysis (CVA) methods for monitoring and mapping land degradation/desertification in arid and semiarid areas (Sudan), using Landsat imagery // *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. 2017. Vol. 20, S21–S29. doi:10.1016/j.ejrs.2016.12.008

Sanyal J., Lu X.X. Remote sensing and GIS-based flood vulnerability assessment of human settlements: a case study of Gangetic West Bengal, India // *Hydrological Processes*. 2005. Vol. 19(18). pp. 3699–3716. doi:10.1002/hyp.5852

Small C. Estimation of urban vegetation abundance by spectral mixture analysis // *International Journal of Remote Sensing*. 2001. Vol. 22(7). pp. 1305–1334.

Smith M.J., Pain C.F. Applications of remote sensing in geomorphology // *Progress in Physical Geography*. 2009. Vol. 33(4). pp. 568–582. doi:10.1177/0309133309346648

Tabunshchik V.A., Petukova E.A., Hytrin M.O. The use of Satellite Imagery Sentinel-2 for Analysis of Land Used in Agriculture (for Example Razdolnensky District of the Republic of Crimea) // *Proceedings of the T.I. Vyazemsky Karadag scientific station - Nature Reserve of the RAS*. 2018. no 1. pp. 43-57.

Tansey K., Chambers I., Anstee A., Denniss A., Lamb A. Object-oriented classification of very high resolution airborne imagery for the extraction of hedgerows and field margin cover in agricultural areas // *Applied Geography*. 2009. Vol. 29(2). pp. 145–157. doi:10.1016/j.apgeog.2008.08.004

Yuan F. Land cover change and environmental impact analysis in the Greater Mankato area of Minnesota using remote sensing and GIS modelling // *International Journal of Remote Sensing*. 2008. Vol. 29(4). pp. 1169–1184. doi:10.1080/01431160701294703

Yuan M., Dickens-Micozzi M., Magsig M.A. Analysis of Tornado Damage Tracks from the 3 May Tornado Outbreak Using Multispectral Satellite Imagery // *Weather and Forecasting*. 2002. Vol. 17(3). pp. 382–398. doi:10.1175/1520-0434(2002)017<0382:aotdtf>2.0.co;2.

Статья поступила в редакцию 18.11.2019 г.

Tabunshchik V.A., Chekmareva T.M., Gorbunov R.V. Spectral characteristics of some agricultural crops in different phenological phases of vegetation // *Plant Biology and Horticulture: theory, innovation*. 2019. № 3(152). P. 56-70.

For deciphering crops from satellite images at different time periods, it is necessary to have information about the spectral reflectivity of plants during their passage through the phenological phases of vegetation. An attempt was made to evaluate the spectral reflectivity of the main fruit crops and grapes in different phenological phases of the growing season using Sentinel-2 satellite images and the ENVI software package. Field research methods, plots were selected on which peach, grapes, cherries, apple trees, plums, and apricots grow are used. It was established that planting crops was carried out by mixing cultivars in order to reduce the risk of additional costs as a result of possible adverse natural processes and phenomena. For each section, the maximum, minimum, and average values of the spectral brightness coefficient were obtained and analyzed within 13 bands of Sentinel-2 satellite images. Space images were selected for 04/07/2019, 04/27/2019 and 05/12/2019, as the most suitable for the periods of the beginning of flowering (04/07/2019), the end of flowering (04/27/2019) and the beginning of fruit ripening (12/05/2019), with minimal cloud overlap values. To eliminate the external influence of the soil within each pixel of the image, the linear spectral separation module of the ENVI software package was used, a reference soil fragment was selected and its spectral characteristics were obtained, which made it possible to depict graphs of the spectral curves of the crops under study within each section. It was not possible to obtain a distinction of the spectral brightness coefficient for all sections, which is associated with the presence of additional external elements.

Keywords: *spectrum; phenological phase; vegetation; image; Sentinel-2; Crimea*