

УДК 528.8.04

# Модифицированный метод ортогональной проекции для выявления объектов в многоспектральном анализе

© 2020 г. **А. В. Герус, канд. физ.-мат. наук; О. Ю. Панова;**  
**В. П. Саворский, канд. физ.-мат. наук**

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, Фрязино, Московская обл.

E-mail: andrewgierus@gmail.com

Поступила в редакцию 20.01.2020

DOI:10.17586/1023-5086-2020-87-06-43-50

---

Предложен метод распознавания объектов, не имеющих заданной формы, в мультиспектральном анализе. Он основан на применении процедуры ортогонализации в расширенном многомерном спектральном пространстве с отдельным использованием информации о яркости объектов. Проведена процедура оптимизации для уменьшения числа ошибок идентификации двух типов. Метод показал значительное преимущество по точности распознавания по сравнению с методом наименьших квадратов, являющегося основой большинства методов распознавания при решении подобных задач.

**Ключевые слова:** ортогональная проекция, вариативность, расширенное многомерное пространство, видимый диапазон, инфракрасный диапазон.

**Коды OCIS:** 280.4991, 280.4788, 280.4750.

---

## ВВЕДЕНИЕ

При дистанционном оптическом зондировании различных объектов на Земле одной из наиболее часто встречающихся задач является идентификация. В ряде случаев решение подобных задач затруднено тем, что изучаемые объекты не обладают определённой формой. В связи с этим, хорошо развитые методы, основанные на пространственной обработке изображений, оказываются неприменимыми, и приходится довольствоваться изучением только их оптических спектральных характеристик. Примером такой задачи является обнаружение небольших объектов, занимающих один или несколько пикселей в приёмном устройстве на известном фоне. В [1] рассмотрена теория распознавания ма-

лых объектов на известном фоне с помощью различных типов акустооптических фильтров. В работах [2, 3] предложен и разработан способ распознавания малых объектов с помощью метода ортогональной проекции (МОП). Другим примером подобных задач является выявление незаконных посевов наркосодержащих растений на фоне зерновых культур. Решению этой актуальной проблемы посвящены обзоры [4, 5] и ссылки к ним. Однако способы идентификации объектов, описанные в этих работах, зачастую сводятся к визуальному дешифрированию и являются достаточно примитивными.

В основе большинства расчётных, альтернативных визуальному дешифрированию методов идентификации объектов, лежит метод

наименьших квадратов (МНК), в рамках которого принадлежность исследуемого спектра тому либо иному объекту определяется путём сравнения исследуемого спектра с усреднёнными спектрами возможных гипотез и минимизации суммы квадратов различий спектральных компонент. Однако, как показано в [2, 3], этот метод не даёт достаточно достоверных результатов. В [6] показано, что МОП превосходит его по надёжности идентификации объектов. Однако и МОП не всегда даёт результаты требуемой надёжности, что повышает вероятность ошибок идентификации выше допустимого уровня. В связи с этим, целью настоящего исследования является модернизация МОП с тем, чтобы повысить надёжность распознавания объектов.

### ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ

Кратко опишем, следуя [6], метод ортогональной проекции. В спектральном анализе, помимо одномерного представления спектров, принято пользоваться формализмом многомерного пространства [7], заключающегося в том, что в этом пространстве по осям отложены коэффициенты отражения спектральных компонент, и каждый спектр представляется вектором в этом пространстве. В [1] было предложено расширить это пространство и отрицательными значениями, не имеющими физического смысла, но позволяющими в нём, помимо понятий нормы вектора, угла между векторами, ввести понятие вектора, ортогонального другому вектору или группе векторов. В обычном физическом пространстве это сделать невозможно из-за того, что скалярное произведение двух положительно определённых векторов в ноль обратиться не может. В этом пространстве справедливо следующее утверждение: если есть три произвольных неколлинеарных вектора  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{F}$ , то вектор  $\mathbf{F}$  всегда можно представить в виде

$$\mathbf{F} = \alpha\mathbf{A} + \beta\mathbf{B} + \mathbf{C},$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  — коэффициенты,  $\mathbf{C}$  — вектор, лежащий в плоскости, ортогональной векторам  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{B}$ , то есть, отвечающий условиям  $(\mathbf{A}\mathbf{C}) = (\mathbf{B}\mathbf{C}) = 0$ . Пусть теперь все три вектора  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{F}$  — нормированы, то есть, каждый вектор, умноженный скалярно сам на себя, даёт 1.

Тогда соответствующим выбором коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$  и вектора  $\mathbf{C}$  мы можем получить вектор  $\mathbf{F}$ , ортогональный либо вектору  $\mathbf{A}$ , либо  $\mathbf{B}$ . В работе [1] доказывается, что максимальная проекция вектора  $\mathbf{F}$  на каждый из векторов ( $\mathbf{A}$  или  $\mathbf{B}$ ) при условии зануления проекции на другой из них, будет в том случае, если вектор  $\mathbf{C}$  тождественно равен 0. Тогда будут справедливы следующие выражения:

$$\mathbf{F}_a = \frac{\mathbf{A} - \mathbf{B}(\mathbf{A}\mathbf{B})}{\sqrt{1 - (\mathbf{A}\mathbf{B})^2}}, \quad (1)$$

$$\mathbf{F}_b = \frac{\mathbf{B} - \mathbf{A}(\mathbf{A}\mathbf{B})}{\sqrt{1 - (\mathbf{A}\mathbf{B})^2}}, \quad (2)$$

где  $\mathbf{F}_a$  и  $\mathbf{F}_b$  — векторы, ортогональные  $\mathbf{B}$  и  $\mathbf{A}$ , соответственно, и имеющие максимальные проекции на  $\mathbf{A}$  и  $\mathbf{B}$  соответственно.

Пусть для неизвестного вектора-спектра  $\mathbf{S}$  необходимо установить, совпадает ли он с каким-либо из векторов  $\mathbf{A}$  или  $\mathbf{B}$ , а если — нет, то с каким из них он более схож. Для того чтобы ответить на этот вопрос, нужно скалярно перемножить вектор  $\mathbf{S}$  на вектора  $\mathbf{F}_a$  и  $\mathbf{F}_b$ , а затем оценить величину отношения:

$$k_1 = \frac{(\mathbf{F}_a\mathbf{S})}{(\mathbf{F}_b\mathbf{S})}. \quad (3)$$

При этом критерий схожести формулируется следующим образом:

- 1) если  $k_1$  равно 0, то  $\mathbf{S}$  совпадает с  $\mathbf{B}$ ;
- 2) если  $k_1$  стремится к бесконечности, то  $\mathbf{S}$  совпадает с  $\mathbf{A}$ ;
- 3) если  $k_1 > 1$ , то вектор  $\mathbf{S}$  больше похож на  $\mathbf{A}$ ;
- 4) если  $k_1 < 1$ , то вектор  $\mathbf{S}$  больше похож на  $\mathbf{B}$ .

В работах [2, 3, 6] было показано, что в большинстве практических случаев применение нормированных спектров приводит к заметному уменьшению вариативности спектров каждого типа, что увеличивает их распознаваемость. Кроме того, в этих работах было показано, что полезным оказывается применять специальную калибровку, заключающуюся в покомпонентном делении исходных спектров каждого типа на соответствующие компоненты усреднённого спектра каждого типа полей. При этом уменьшается искажение спектров атмосферой, и они оказываются более гладкими. Таким образом, суть

МОП заключается в одновременном использовании нормированных спектров, применения специальной калибровки и вычисления проекций, ортогональных каждому из векторов гипотез и вычисления их отношений.

При этом не использовалась информация об интегральной яркости (сумме спектральных коэффициентов отражения) спектров. Флуктуации этой яркости ухудшают угловую распознаваемость спектров, однако сама яркость может нести и полезную информацию. Целью настоящей работы является попытка использовать эту информацию для улучшения распознаваемости объектов.

Пусть имеются 2 группы однородных объектов, например, типов полей. У этих полей каждого типа по их спектральным характеристикам мы можем определить яркость каждого, среднюю по группе яркость  $I_i^0$  и среднеквадратичное отклонение от средней величины этой яркости  $\sigma_i$ , где  $i = a$  и  $i = b$ . Тогда, если есть какой-то неизвестный спектр, то мы, определив его яркость, сможем определить, какой плотности вероятности  $P_i$  он может соответствовать для каждой из двух гипотез полей, считая, что они имеют нормальное распределение:

$$P_i^j = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(I_i^0 - I_i^j)^2}{2\sigma_i^2}\right),$$

где  $j$  — номер  $j$ -го поля. После этого определим величину  $k_2$ , равную отношению вероятностей для гипотезы **A** к гипотезе **B**:

$$k_2^j = \frac{P_a^j}{P_b^j}. \quad (4)$$

Таким образом, если окажется, что  $k_2^j > 1$ , то по этому параметру объект больше похож на **A**, в противном случае — на **B**. После этого, получив коэффициенты  $k_1$  и  $k_2$ , необходимо выработать процедуру взвешивания вкладов ортогональной проекции и яркости для минимизации числа ошибок идентификации.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для проверки работоспособности разрабатываемой методики были использованы те же данные, что и в работе [6], в которой информация о яркости не принималась во внима-

ние. Использовался сервис «VEGA-Science» (<http://sci-vega.ru/>). В нём на базе ресурсов Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» [8, 9] организован доступ к долгосрочным большим архивам спутниковых данных. Были использованы спектры отражения 7 полей, засеянных технической коноплей, и 9 полей засеянных яровыми в Орловской области. Данные были получены путём спутниковых измерений аппаратурой ETM+ (КА «Landsat-7») в 7 диапазонах видимого и ближнего ИК спектров BLUE (450–515 nm), GREEN (525–605 nm), RED (630–690 nm), NIR (775–900 nm), SWIR1 (1550–1750 nm), SWIR2 (2080–2350 nm) (<https://landsat.gsfc.nasa.gov/the-enhanced-thematic-mapper-plus/>). Измерения проводились в трёх вегетативных периодах — в мае, июле и августе.

На рис. 1а и 1б приведены майские спектры полей, засеянных коноплей и яровыми. Эти спектры по каждому полю получались путём усреднения по относительно однородным пространственным областям. Видно, что они очень близки как по спектральному составу, так и по яркости. Так усреднённые яркости полей каждой из групп отличались менее, чем на 3%, в то время как разброс по яркости внутри этих групп (среднеквадратичное отклонение) был около 4%.

На рис. 1а пунктиром выделено поле № 3 со спектром, заметно отличающимся от спектров остальных конопляных полей. Возможно, такое отличие связано с тем, что это поле могло быть засеяно в другие сроки, чем остальные поля. В июле и августе это заметное различие пропало. Видно, что спектры обоих типов полей визуальными практически неразличимы, и задача их идентификации представляется весьма сложной.

При моделировании проводилась проверка, правильно ли определяется каждое поле. Мы брали каждый спектр из обеих групп и проверяли, на какой из усреднённых спектров он больше похож. Для обеих групп полей были вычислены средние спектры, средние яркости и среднеквадратичные отклонения от среднего для каждого вегетативного периода. После этого все спектры были нормированы. По формулам (1) и (2) для каждого из нормированных спектров были вычислены значения векторов  $F_a$  и  $F_b$ . И затем по формулам (3) и (4) сосчитаны значения коэффициентов  $k_1$  и  $k_2$ .

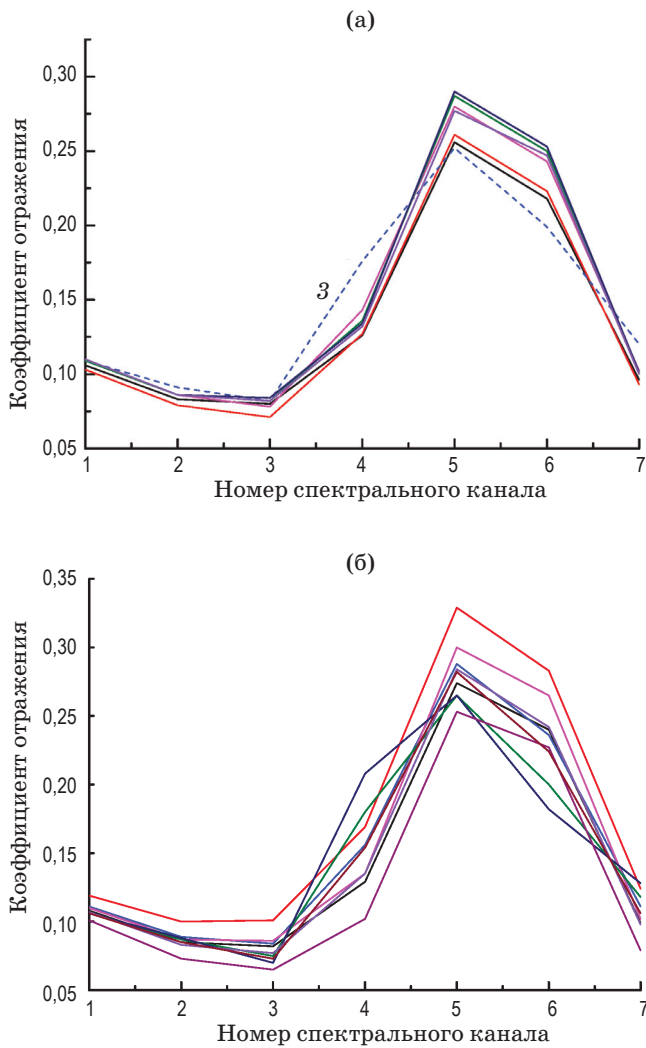


Рис. 1. Майские отражательные спектры полей, (а) конопляные поля, (б) яровые поля.

Для правильной интерпретации результатов необходимо установить достоверность отличия результатов вычисления от 1 величины  $k$  (каждого из коэффициентов  $k_1$  и  $k_2$ ). Исходя из точности измерений спектров, их вариативности при усреднении спектров по пространству, мы приняли существенным отличием  $k$  от 1, если  $0,95 < k < 1,05$ . То есть, если в результате вычислений величина  $k$  попадет в указанный интервал, то результат считали сомнительным или неопределенным.

На рис. 2 изображены кривые для значений коэффициентов  $k_1$  и  $k_2$  для полей, засеянных технической коноплей. Сплошными кривыми отмечены значения коэффициентов  $k_1$ , пунктирными —  $k_2$ . Цифрами отмечены месяцы, когда производились измерения. Точки, ле-

жащие выше уровня 1, отвечают правильно идентифицированным полям. Видно, что коэффициент  $k_1$  верно определен для всех полей, кроме поля № 3 в мае. Коэффициент  $k_2$  ошибочно определен в июле для полей № 1, 2, 5, 6; в августе для поля № 1 и не определен для поля № 2 в мае.

На рис. 3 изображены аналогичные зависимости для полей, засеянных яровыми, для наглядности не для прямых коэффициентов, а для их обратных величин. В этом случае пра-

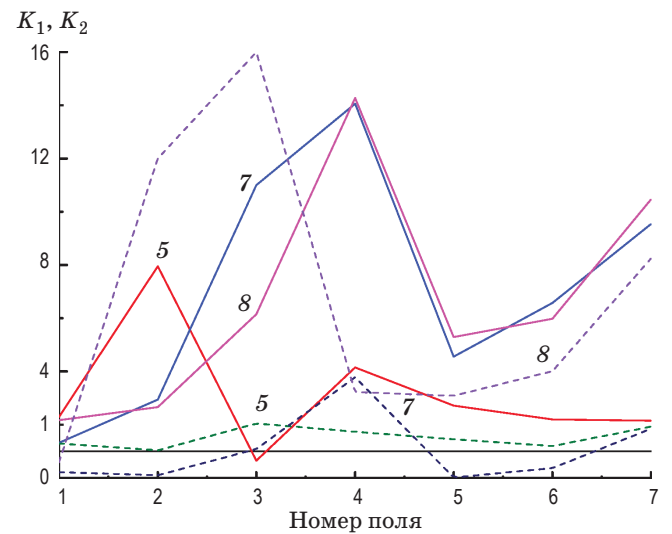


Рис. 2. Коэффициенты  $k_1$  и  $k_2$  для полей, засеянных технической коноплей.

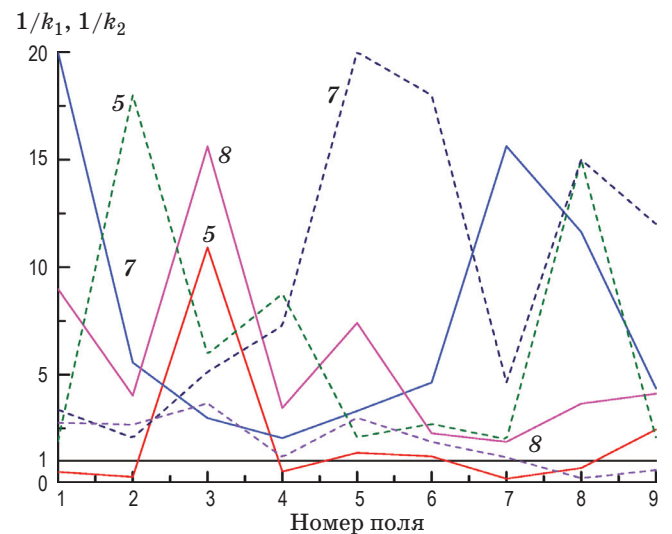


Рис. 3. Коэффициенты  $1/k_1$  и  $1/k_2$  для полей, засеянных яровыми.

вильная идентификация, как и на рис. 2, отвечает значению коэффициентов  $k$ , больших 1.

Сплошными линиями также отмечены коэффициенты  $k_1$ , пунктирными —  $k_2$ . Месяцы, в которых производились измерения, также отмечены цифрами. Из рисунка видно, что коэффициент  $k_1$  неверно определён для полей № 1, 2, 4, 7, 8 в мае. А коэффициент  $k_2$  ошибочно идентифицирован в августе для полей № 8 и 9.

Таким образом, коэффициент  $k_1$ , отвечающий за ортогональную проекцию, то есть, за угловое отличие между спектрами, дал одну ошибку в мае, неверно определив конопляное поле, и 5 ошибок также в мае, неверно определив поля, засеянные яровыми, признав их за конопляные. В остальные месяцы он ошибок не давал. Коэффициент  $k_2$ , ответственный за различие в интенсивностях спектров, суммарно дал 7 ошибок идентификации и одно поле не смог определить. Причём, ошибки были во все месяцы.

В этой работе мы попытались учесть информацию, даваемую как величиной ортогональной проекции, так и яркостью объектов. Для этого можно было бы просто перемножить коэффициенты  $k_1$  и  $k_2$ . При этом количество ошибочно определённых полей сокращается, но не так сильно, как хотелось бы. Поэтому мы поступали следующим образом. Для каждого из исследуемых спектров  $\mathbf{S}$  вычисляли коэффициенты  $q_1^a = (\mathbf{F}_a \mathbf{S})$ ,  $q_1^b = (\mathbf{F}_b \mathbf{S})$ ,  $q_2^a = P_a$  и  $q_2^b = P_b$ . Простейший вариант взвешивания этих коэффициентов заключался в вычислении суммы типа

$$C_i = \frac{q_1^i + r q_2^i}{1 + r}$$

для каждой из гипотез, где  $r$  — пока неизвестный весовой множитель. Затем следует брать их отношение. Но такой способ тоже дал не слишком сильное улучшение по сравнению с МОП. Учитывая, что информация об ортогональной проекции и яркости, в определённом смысле, ортогональна, мы вычисляли коэффициент

$$k = \sqrt{\frac{(q_1^a)^2 + r(q_2^a)^2}{(q_1^b)^2 + r(q_2^b)^2}}$$

Если вектор  $\mathbf{S}$  больше похож на  $\mathbf{A}$ , то величина  $k$  должна быть больше 1, в противном случае  $\mathbf{S}$  больше похож на  $\mathbf{B}$ . Величину  $r$  подбирали так, чтобы количество ошибочно определённых полей было минимально.

В табл. 1 приведены результаты идентификации полей (значения коэффициента  $k$ ), засеянных технической коноплей по модифицированному МОП (ММОП) и по МНК. Параметр  $r = 0,0025$ , что отвечало минимальному числу ошибочных результатов. Правильно определённым полям соответствовали значения коэффициентов, больших 1. Жирным шрифтом выделены значения коэффициентов, меньших 1, которые означают ошибочную идентификацию, а курсивом — не определённую. Из таблицы видно, что ММОП дал только один неверный результат (для 1-го поля в июле), в то время как МНК ошибочно определил одно поле в мае, два в июле и одно поле в мае не смог идентифицировать.

В табл. 2 приведены аналогичные результаты идентификации полей, засеянных яровыми при том же значении коэффициента  $r$ . Правильно определённые поля отвечали величине коэффициента  $k$ , меньшей 1. Видно, что

Таблица 1. Идентификация полей, засеянных технической коноплей

№ поля	ММОП			МНК		
	май	июль	август	май	июль	август
1	1,33	<b>0,79</b>	1,16	2,48	<b>0,19</b>	3,70
2	1,08	1,16	3,11	2,59	<b>0,65</b>	6,26
3	1,93	1,98	6,54	<b>0,86</b>	8,18	33,9
4	1,73	4,66	6,29	1,17	29,6	137
5	1,46	4,52	4,67	1,18	4,43	24,5
6	1,21	5,78	5,49	1,04	6,81	43,5
7	1,93	2,69	9,95	2,45	7,74	61,3

Таблица 2. Идентификация полей, засеянных яровыми

№ поля	ММОП			МНК		
	май	июль	август	май	июль	август
1	0,55	0,23	0,18	4,37	0,27	0,03
2	0,71	0,41	0,26	0,76	0,31	0,08
3	0,17	0,23	0,09	0,16	0,27	0,07
4	0,18	0,44	0,39	0,91	5,85	0,10
5	0,49	0,29	0,18	0,75	0,24	0,03
6	0,45	0,17	0,47	0,80	0,17	0,14
7	0,51	0,18	0,66	1,76	0,24	0,39
8	0,94	0,05	0,93	1,70	0,10	0,36
9	0,48	0,17	0,49	0,28	0,20	0,09

ошибок идентификации полей по ММОП нет, в то время как МНК неверно установил три поля в мае и одно — в июле. Таким образом, суммарное количество ошибок идентификации полей обоих типов по ММОП было равно одной, а по МНК — их было семь и одно поле осталось не определенным.

В ряде случаев ошибки идентификации имеют разный вес. Например, более важно установить присутствие одного из объектов, чем установить другой. В данном случае ставилась задача выявления незаконных заборов наркосодержащей конопли, имеющей идентичные спектральные характеристики с технической коноплей, на фоне посадок яровых. В этом случае более важно было не пропустить поля с коноплей. Для этого случая оптимизация коэффициента  $r$  привела к тому, что при  $r = 0,0006$  ошибок идентификации полей, засеянных коноплей, не было, но два поля, засеянных яровыми в мае (№ 2 и 8), были ошибочно определены как конопляные. В качестве углового различия между спектрами можно было бы использовать просто косинус угла между ними, то есть скалярное произведение нормированных векторов, однако, как показали наши вычисления, этот способ даёт заметно худшие результаты при идентификации, чем ортогональная проекция.

## ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЗЕРНОВЫХ ПОЛЕЙ

Разработанный метод был применён в настоящей работе для идентификации большего чис-

ла полей различных типов. Для этого мы использовали данные (<http://sci-vega.ru/>), полученные по полям в Ставропольском крае в 2014 году, измеренные в 8 частотных каналах в 7 вегетативных периодах с конца апреля по начало сентября. Были исследованы 2 поля с сахарной свёклой, 2 поля с подсолнечником, 2 поля, засеянных льном-кудряшом, 2 поля с озимой пшеницей, 5 полей с кукурузой и 3 поля с яровым ячменем. На рис. 4а и 4б для примера приведены спектры полей с кукурузой и льном-кудряшом конца апреля.

Визуально эти спектры вообще не различимы. Похожая ситуация и с рядом других пар, особенно в ранние вегетативные периоды.

В табл. 3 приведены результаты идентификации всех возможных пар полей. В графах «1» приведены ошибки идентификации культур, указанных первыми в графе «Культуры», в графах «2» — ошибки вторых культур. Цифры без скобок означают номера полей, в скобках — вегетативный период. Курсивом отмечены неопределённые поля.

Из табл. 3 видно, что общее количество ошибок и неопределённых результатов для ММОП равно 16. Из них в 1-й вегетативный период (конец апреля) количество ошибок равно 8, то есть, составляет половину всех ошибок. Для общего количества вычислений, равного 560, число ошибочных или неопределённых составляет менее 3%, что с учётом близости спектров считаем вполне удовлетворительным.

Для МНК полное число ошибок равно 31, что примерно вдвое хуже количества ошибок,

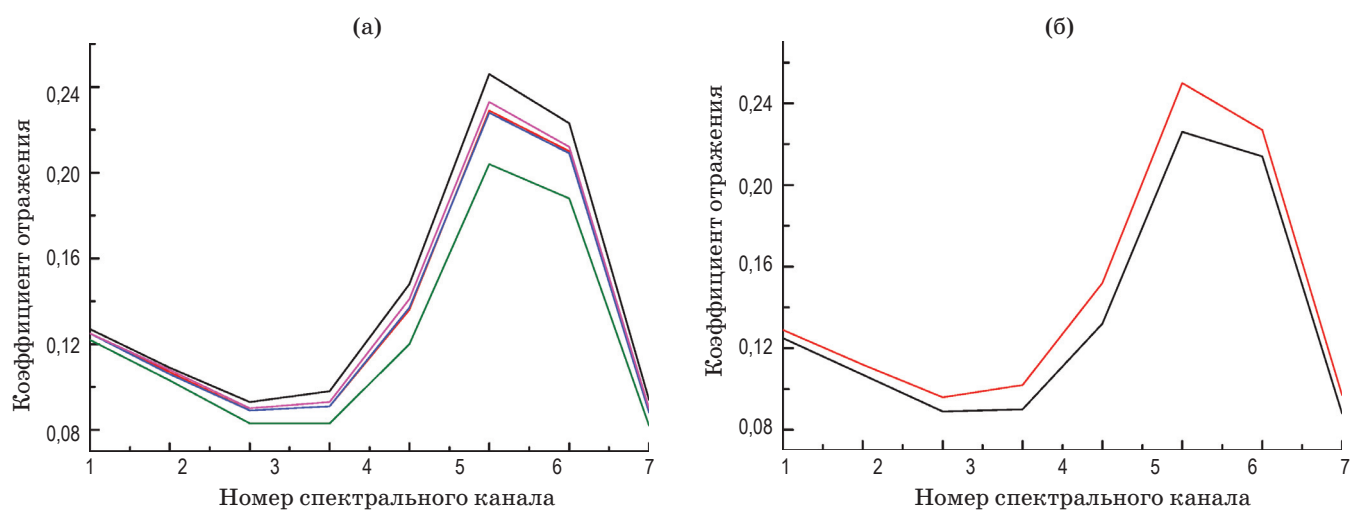


Рис. 4. Апрельские спектры кукурузы и льна-кудряш. (а) кукуруза, (б) лён-кудряш.

Таблица 3. Ошибки идентификации

Культуры	ММОП		МНК	
	1	2	1	2
Кукуруза-лён	1(1), 5(2)	1(1)	1(1), 3(2), 5(2), 5(5)	1(1)
Кукуруза-пшеница	–	–	–	–
Кукуруза-подсолнечник	1(1)	2(1)	1(1)	2(1)
Кукуруза-свёкла	1(1)	2(1)	1(1)	2(1)
Кукуруза-ячмень	–	–	–	–
Лён-пшеница	–	–	–	–
Лён-подсолнечник	2(1)	1(1)	2(1)	1(1)
Лён-свёкла	–	1(6)	2(1)	2(1), 1(6), 1(7)
Лён-ячмень	–	2(6)	–	1(5), 2(6)
Пшеница-подсолнечник	2(7)	–	2(7)	–
Пшеница-свёкла	–	1(6)	–	1(6)
Пшеница-ячмень	1(3)	–	1(3)	1(4), 2(4), 1(5), 2(5)
Подсолнечник-свёкла	–	1(7)	2(1)	2(1), 1(6)
Подсолнечник-ячмень	–	–	–	3(4)
Свёкла-ячмень	1(6)	–	1(6), 1(7)	3(4)

полученных при идентификации по ММОП. При этом не было ни одного поля, которое МНК смог бы верно идентифицировать среди ошибочно определённых ММОП. Улучшение распознаваемости с применением ММОП, по сравнению с МОП, для этой группы полей оказалось не таким значительным, какое было для случая полей с зерновыми и коноплей.

Это объясняется тем, что процедура оптимизации этим методом значительно затруднена малым числом полей каждого типа (от 2 до 5), участвующих в усреднении и вычислении среднеквадратичных отклонений для амплитудных составляющих. Ошибка при таких вычислениях оказывается довольно большой. Отметим, что оптимальный яркостный

весовой коэффициент во всех случаях лежал в пределах от 0 до 0,001. Поэтому во всех случаях выигрыш от этой оптимизации был не такой значительный. Тем не менее, выигрыш по сравнению с МНК, даже в таких неоптимальных условиях, оказался весьма заметным.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разделение информации об угловом расстоянии между спектрами (методом ортогональной проекции) и их яркости приводит к заметному улучшению распознаваемости объектов по сравнению с обычным МОП.

При идентификации полей с технической коноплей и зерновыми весовые коэффициенты вкладов от ортогональной проекции и различий в яркостях, приводящие к минимальному числу ошибок распознавания, оказались равными 1 и 0,0025. Столь значительное различие объясняется тем, что при очень малом различии в угловом пространстве между исследуемыми спектрами, сама величина ортогональных проекций оказывается малой по

сравнению с плотностями вероятности объектов иметь те или иные яркости. Для других пар сравниваемых типов спектров весовые коэффициенты могут заметно отличаться от данных.

Проверка метода для большого количества разных типов полей с зерновыми, обладающих близкими спектрами, даже не в оптимальных условиях применимости метода (малое количество полей каждого типа), показала высокую распознаваемость и значительно меньшее количество ошибочных результатов, чем МНК, являющегося основой большинства методов распознавания спектров.

ММОП является достаточно простым в реализации и может использоваться для оперативного разделения типов объектов. В случае, когда гипотез объектов не две, а более, метод может применяться попарно со всеми возможными вариантами пар гипотез.

Исследование выполнено при поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований в рамках научного проекта № 16-29-09615 офи\_м.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Герус А.В., Герус Т.Г. Акустооптические методы идентификации объектов в гиперспектральном анализе // Физические основы приборостроения. 2015. Т. 4. № 4(17). С. 70–83. DOI: 10.25210/jfor-1504-070083.
2. Герус А.В., Савченко Е.В., Саворский В.П. Алгоритм распознавания акустических, оптических, электрических сигналов от слабых источников в присутствии известного фона // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2017. № 11. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/nov17/8/text.pdf>.
3. Герус А.В., Савченко Е.В., Саворский В.П. Использование метода ортогональной проекции для идентификации малых объектов в мультиспектральном анализе // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 27–35. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-27-35.
4. Afghanistan Opium Survey 2017. Cultivation and Production: United Nations Office on Drugs and Crime (UNODC) Research. Afghanistan. 2017. 73 p.
5. Саворский В.П., Панова О.Ю., Савченко Е.В. Методы анализа данных спутникового мониторинга растительных ареалов для выявления участков незаконного земледелия при проведении специальных экспертиз // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 5. С. 13–30. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-13-30.
6. Герус А.В., Панова О.Ю., Саворский В.П. Оперативное обнаружение целевых участков сельскохозяйственной растительности методом ортогональной проекции // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 4. С. 77–85. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-4-77-85.
7. Manolakis D., Shaw G. Detection algorithms for hyperspectral imaging applications // IEEE Signal Processing Magazine. 2002. V. 19. N 1. P. 29–43. DOI: 10.1109/79.974724.
8. Толпин В.А., Лупян Е.А., Барталев С.А. и др. Возможности анализа состояния сельскохозяйственной растительности с использованием спутникового сервиса «ВЕГА» // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 7. С. 581–586.
9. Лупян Е.А., Бурцев М.А., Балашов И.В. и др. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263–284.