

ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ
ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

УДК 004.021

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ОРТОГОНАЛЬНОЙ ПРОЕКЦИИ
ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ОБЪЕКТОВ, НЕ ИМЕЮЩИХ
ОПРЕДЕЛЕННОЙ ФОРМЫ, В МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОМ АНАЛИЗЕ

© 2020 г. А. В. Герус^а, *, О. Ю. Панова^а, В. П. Саворский^а

^аФрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
пл. Введенского, 1, Фрязино Московской обл., 141190 Российская Федерация

*E-mail: andrewgierus@gmail.com

Поступила в редакцию 10.10.2019 г.

После доработки 16.01.2020 г.

Принята к публикации 25.01.2020 г.

Развит методический подход к распознаванию объектов, не обладающих определенной формой, по данным их мультиспектральных спутниковых наблюдений. Подход основан на применении процедуры ортогонализации в расширенном многомерном спектральном пространстве, где вычисляются фильтры, ортогональные гипотезам искомого объекта и тех объектов, с которыми его можно спутать и которые затем скалярно перемножаются с исследуемыми спектрами. Показано, что лучше работать не с исходными спектрами, а с нормированными, что заметно снижает вариативность спектров, ухудшающую распознаваемость объектов, и с применением специальной калибровки, уменьшающей искажения спектров атмосферой. Показано, что данный способ обеспечивает существенно лучшую распознаваемость по сравнению с методом наименьших квадратов, лежащим в основе большинства распознавательных процедур.

DOI: 10.31857/S0033849420100022

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных целей дистанционного зондирования объектов Земли (ДЗЗ) является их идентификация. При решении этой задачи не всегда возможно использовать пространственную информацию об объектах, например, в случаях, когда интересующий объект является слишком малым, и занимает один или несколько пикселей в кадре. Другим примером является протяженный объект, который не имеет определенной формы. Такие проблемы возникают, в частности, при использовании средств ДЗЗ для обнаружения посевов запрещенных к культивированию растений, например, для обнаружения посевов наркосодержащих растений на фоне типовых сельскохозяйственных угодий, полей зерновых культур. Решению этой проблемы методом ортогональной проекции спектральных сигнатур сельскохозяйственных угодий в видимом диапазоне ДЗЗ и посвящена данная работа.

Названная проблема исследуется уже на протяжении более 40 лет, существует целый ряд работ по этой тематике (см. обзор [1] и ссылки, приведенные в нем). Однако, как отмечено в [1], до настоящего времени практика применения спут-

никовых наблюдений в данной области остается достаточно примитивной. В частности, это проявляется в том, что зачастую анализ спутниковых данных сводится к визуальному дешифрированию (см. в качестве примера [2]). Именно поэтому развитие новых и усовершенствование существующих методов обнаружения и контроля посевов наркосодержащих растений остается до сих пор актуальной проблемой ДЗЗ.

В работе [3] предложен способ идентификации малых объектов на известном фоне с помощью акустооптической фильтрации в реальном времени с использованием процедуры ортогонализации спектров возможных гипотез сигнала. Этот метод принципиально отличается от большинства методов, так или иначе основанных на вычислении различного рода метрических расстояний между многомерными векторами, описываемыми исходными спектрами и спектрами гипотез. В работах [4, 5] в развитии этой процедуры был разработан метод ортогональной проекции для обнаружения относительно малых объектов по данным измерений видимого диапазона в мульти- и гиперспектральном анализе. Было показано на конкретном примере исследования данных ДЗЗ, что метод ортогональной проекции дает более

устойчивые оценки различий спектральных сигнатур, чем метод минимума среднеквадратичных отклонений.

В данной работе приведены результаты разработки метода ортогональной проекции для идентификации протяженных объектов, не имеющих определенной формы. При этом нами ставилась задача адаптации метода ортогональной проекции раннего выявления посадок технической конопли на фоне яровых зерновых. Эта обусловлено тем, что в задаче выявления участков наркосодержащей конопли средствами спутникового мониторинга видимого диапазона техническая конопля является модельной культурой, поскольку имеет полностью совпадающие спектральные сигнатуры с наркосодержащей коноплей [6]. Сложность решения такой задачи заключается в том, что на ранней стадии роста (в мае) спектры конопли и яровых зерновых практически неотличимы как по яркости (сумма коэффициентов отражения спектральных компонент), так и по составу. В работе анализируются данные, полученные на полях средней полосы России (Орловская обл.) в 2002 г. Так, средний по полям коэффициент спектральной яркости (КСЯ) технической конопли отличался от КСЯ яровых на 3%, что меньше, чем разброс яркости среди полей одной из культур (среднеквадратичное отклонение ~4%). Ни один из известных методов идентификации не дает хоть сколько-нибудь надежного результата. В более поздний период времени (в июле или августе) задача выявления конопли существенно упрощается. В июле средняя яркость конопляных полей отличалась уже на 10%, а в августе – на 15%.

1. ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Суть метода заключается в следующем. Как известно (см., например, [7]) в многоспектральном анализе спектры можно представлять вектором в многомерном пространстве, по осям которого отложены интенсивности спектральных компонент (или коэффициентов отражения). Как указано в [3], в общем случае это пространство целесообразно расширить на отрицательные значения. Тогда в этом расширенном пространстве помимо понятий угла между векторами, нормы вектора и других можно ввести понятие вектора, ортогонального другому вектору или группе векторов, что невозможно сделать в обычном пространстве физических векторов. Причиной тому является факт, что вектор, ортогональный физическому вектору (конкретному спектру), обязательно должен иметь отрицательные компоненты, которые обращают скалярные произведения двух векторов в ноль. В этом пространстве справедливо

утверждение [3]: если есть три произвольных неколлинеарных вектора \vec{A} , \vec{B} и \vec{F} , то вектор \vec{F} всегда можно записать в виде

$$\vec{F} = \alpha\vec{A} + \beta\vec{B} + \vec{C}, \tag{1}$$

где \vec{C} – вектор, отвечает условиям $(\vec{A}\vec{C}) = (\vec{B}\vec{C}) = 0$, а α и β – коэффициенты. То есть вектор \vec{C} ортогонален плоскости $\vec{A}\vec{B}$. Предположим, что все три вектора \vec{A} , \vec{B} и \vec{F} нормированы, т.е. $(\vec{A}\vec{A}) = (\vec{B}\vec{B}) = (\vec{F}\vec{F}) = 1$. Тогда, умножив скалярно последовательно (1) на \vec{A} и \vec{B} и проведя простейшие преобразования, получим соотношения для α и β :

$$\alpha = \frac{(\vec{F}\vec{A}) - (\vec{F}\vec{B})(\vec{A}\vec{B})}{1 - (\vec{A}\vec{B})^2}, \quad \beta = \frac{(\vec{F}\vec{B}) - (\vec{F}\vec{A})(\vec{A}\vec{B})}{1 - (\vec{A}\vec{B})^2}. \tag{2}$$

Мы всегда можем так подобрать α , β и \vec{C} , чтобы $(\vec{F}\vec{A})$ или $(\vec{F}\vec{B})$ были равны нулю, т.е. чтобы вектор \vec{F} был ортогонален векторам \vec{A} или \vec{B} . В [3] доказывается, что при этом “незануленное” скалярное произведение будет максимально при $\vec{C} \equiv 0$, т.е., когда векторы \vec{A} , \vec{B} и \vec{F} лежат в одной плоскости. В этом случае вектор \vec{F} , ортогональный вектору \vec{A} и имеющий максимальное скалярное произведение с \vec{B} , можем записать в следующем виде:

$$F_a = \frac{\vec{B} - \vec{A}(\vec{A}\vec{B})}{\sqrt{1 - (\vec{A}\vec{B})^2}}. \tag{3}$$

И аналогично вектор, ортогональный вектору \vec{B} и имеющий максимальное скалярное произведение с \vec{A} , запишем в виде

$$\vec{F}_b = \frac{\vec{A} - \vec{B}(\vec{A}\vec{B})}{\sqrt{1 - (\vec{A}\vec{B})^2}}. \tag{4}$$

Пусть теперь мы имеем библиотеку известных нормированных спектров-векторов \vec{A} и \vec{B} , а в результате измерений после нормировки получили нормированный спектр неизвестного объекта \vec{D} . И мы хотим узнать, совпадает ли он с одним из векторов \vec{A} или \vec{B} , а если нет, то на какой из них он больше похож. Для этого мы скалярно перемножим этот вектор с каждым из векторов \vec{F}_a и \vec{F}_b . В случае совпадения с одним из указанных векторов, скалярное произведение с \vec{F} с противоположным индексом обратится в ноль. В случае несовпадения мерой похожести этого вектора на один из векторов \vec{A} или \vec{B} может служить отношение

$$r = \frac{(\vec{F}_a\vec{D})}{(\vec{F}_b\vec{D})}.$$

Параметр r – отношение проекций неизвестного вектора \vec{D} на вычисленные векторы-фильтры \vec{F}_a и \vec{F}_b . Если эта величина больше 1, то вектор \vec{D} более похож на вектор \vec{V} , и наоборот.

Таким образом, если есть две (или больше) гипотез физических векторов (отражательных спектров сигналов), то выяснить, гипотеза какого объекта больше соответствует изучаемому вектору сигнала, можно путем определения скалярного произведения его на вектора фильтров \vec{F}_a и \vec{F}_b .

2. РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА

Для разработки устойчивой и стабильной методики выявления и оценки исследования результатов незаконного землепользования использовался сервис “ВЕГА-Science” (<http://sci-vega.ru/>). В нем на базе ресурсов Центра коллективного пользования “ИКИ-Мониторинг” [8] организован доступ к долговременным большим архивам спутниковых данных. Архивы предоставляют доступ к безоблачным наблюдениям целевых регионов в заданном периоде фенологического цикла. В частности, в них возможно искать и обрабатывать архивные наборы данных дистанционных наблюдений с космического аппарата (КА) “Landsat-7” начиная с 1999 г. для средней полосы Европейской части России, в том числе, данные по полям с технической коноплей. Также в архивах доступны различные карты типов сельскохозяйственной растительности, покрывающие целевой регион. Такие карты регулярно строятся и обновляются в автоматическом режиме по данным прибора MODIS [9, 10]. Для точного позиционирования и выделения постоянных объектов также возможно использовать высокоточную подложку от компании DIGITAL GLOBE (<http://mapsapi.digitalglobe.com>). Таким образом, в сервисе имеется необходимая возможность поиска и выбора полей с технической коноплей и полей с другими сельскохозяйственными культурами.

Кроме доступа к долговременным архивам спутниковых данных, сервис “ВЕГА-Science” также поддерживает их углубленный анализ. Эта возможность предоставляется в виде набора информационных web-инструментов, которые позволяют выполнять обработку доступной в системе информации ДЗЗ на мощностях самих центров хранения данных [11, 12]. Такая обработка проводится в автоматическом режиме и описана в работах [13, 14]. Именно в таком, автоматическом режиме нами была проведена обработка спутниковых данных при оценке среднестатистических характеристик исследуемых объектов, сельскохозяйственных полей с целевой культурой (техническая конопля) и фоновой культурой (яровые зерновые).

Для математического моделирования были использованы оптические сигналы с семи полей, засеянных технической коноплей, и девяти полей, засеянных на трех сроках вегетации в 2002 г.) Данные по КСЯ (без атмосферной коррекции) получены по данным спутниковых измерений аппаратурой ETM+ (КА “Landsat-7”) в семи диапазонах видимого и ближнего ИК-спектров – BLUE: 450...515 нм (канал 1), GREEN: 525...605 нм (канал 2), RED: 630...690 нм (канал 3), NIR: 775...900 нм (канал 4), SWIR1: 1550...1750 нм (канал 5), SWIR2: 2080...2350 нм (канал 6), Панхроматический: 0.52...0.90 нм (канал 7) (<https://landsat.gsfc.nasa.gov/the-enhanced-thematic-mapper-plus/>).

На рис. 1а и 1б приведены усредненные (по пространству) спектры отражения $K_{отр}$ этих полей, полученные в мае. Пунктиром на рис. 1а обозначен спектр поля, который заметно отличается от остальных спектров. Мы предполагаем, что это различие связано с тем, что это поле могло быть засеяно в заметно другое (относительно иных полей) время. Доказательством тому может служить тот факт, что в последующие вегетативные периоды это отличие было снивелировано. Из рисунков хорошо видно, что разброс (вариативность) спектров довольно велик, а различия между спектрами коноплей и яровых очень малы – визуально они вообще неразличимы.

На рис. 2а и 2б приведены аналогичные спектры, но нормированные. Спектр поля, который отличается, также выделен пунктиром. Видно, что он заметно отличается от остальных спектров коноплей. Нормировка, как и в [4], проводилась так, что сумма квадратов компонент каждого из спектров была равна 1. При такой нормировке пропадает информация об интегральном коэффициенте отражения (яркости), зато заметно уменьшается вариативность спектров, что, как показано в [5], в большинстве случаев заметно повышает распознаваемость объектов. Одной из мер различия спектров может служить угол между ними, косинус которого равен скалярному произведению нормированных векторов. Расчет показывает, что угол между усредненным нормированным спектром коноплей и таким же спектром яровых (1.6°) меньше, чем угол между средним спектром и спектрами разных полей коноплей ($\sim 3^\circ$). То есть задача распознавания конопляных полей кажется неразрешимой.

При поиске нужного объекта могут возникать два типа ошибок распознавания – в одних случаях искомый объект может быть пропущен, т.е. не обнаружен, в других, наоборот, “неправильный” объект может быть воспринят, как искомый. В данном случае при решении задачи поиска полей с наркосодержащими растениями, первый тип

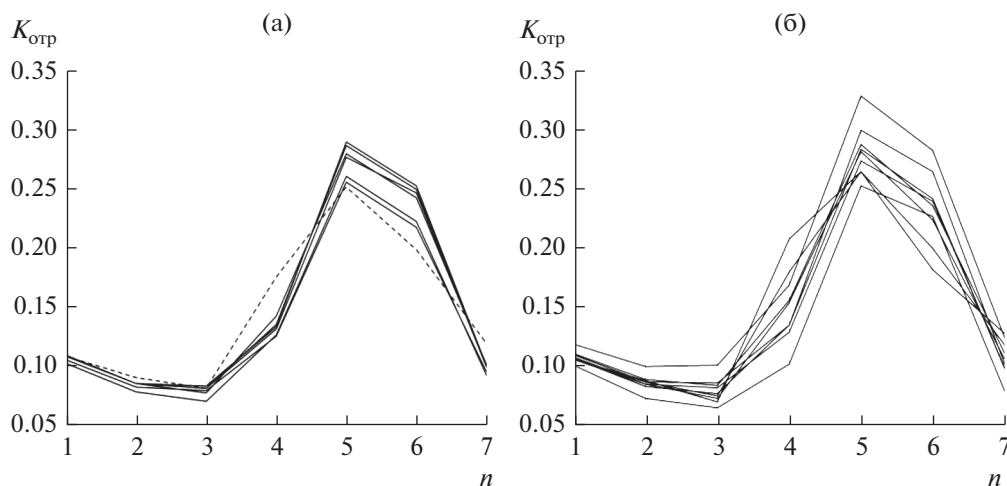


Рис. 1. Спектры семи полей конопли (а) и девяти полей яровых (б), май 2002 г., n – номер спектрального канала, пунктир – поле 3.

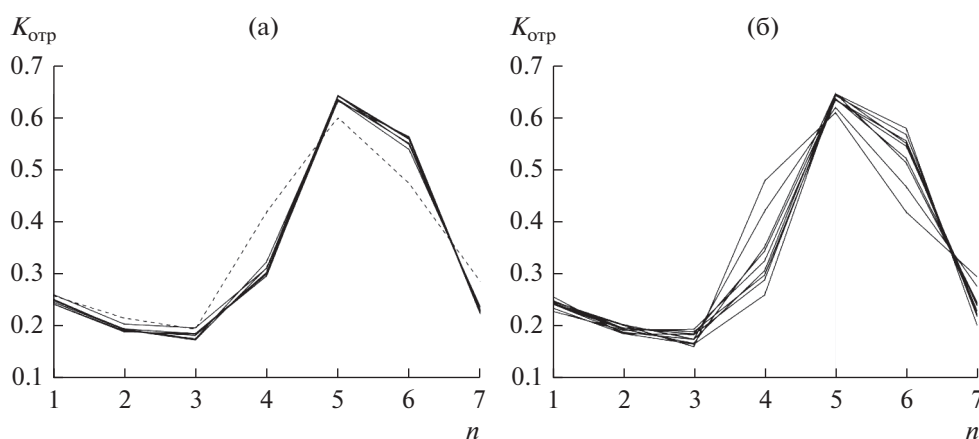


Рис. 2. Нормированные спектры семи полей конопли (а) девяти полей яровых (б), май 2002 г., n – номер спектрального канала, пунктир – поле 3.

ошибок более неприятен, чем второй. Кроме того, при данном способе распознавания существенное значение имеет достоверность отличия величины r от 1. Исходя из точности измерения спектров, их вариативности при усреднении по пространству полей, мы приняли эту величину за 10%. То есть если величина r лежит в пределах от 0.9 до 1.1, мы считаем результат сомнительным.

Помимо нормированных спектров полей были исследованы и спектры, полученные специальной калибровкой. Она заключалась в том, что компоненты исходных спектров всех полей делились на соответствующие компоненты усредненного спектра конопли. При других типах калиб-

ровки (делении на компоненты спектра яровых или на полусумму компонент конопли и яровых), а также без калибровки, ошибок первого типа, когда поля с коноплей пропускались, были немного больше. Смысл такого типа калибровок заключается в том, что уменьшается влияние искажения спектров атмосферой (в каждом месяце для всех полей измерения производились в один день). Для идентификации объектов методом наименьших квадратов калибровка заметного эффекта не дает.

На рис. 3а приведены результаты распознавания полей технической конопли в разные месяцы методом ортогональной проекции для калиброванных спектров первого из описанных типов.

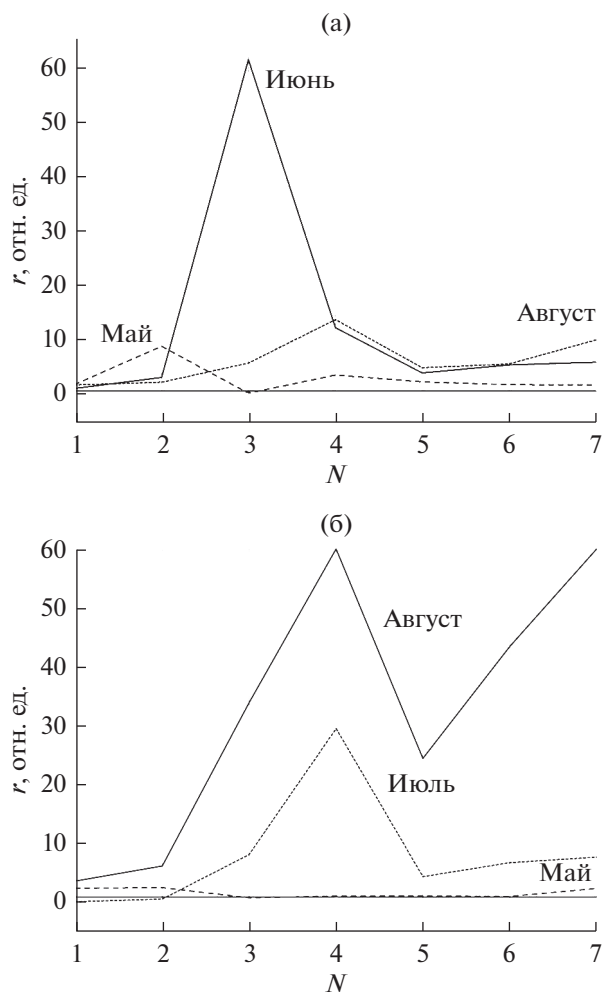


Рис. 3. Результаты распознавания конопляных полей методом ортогональной проекции (а) и методом наименьших квадратов (б); N – номер поля, горизонтальной кривой обозначен уровень $r = 1$.

Горизонтальной прямой обозначен уровень r , равный 1. Точки, лежащие ниже этого уровня, означают неверное распознавание. Видно, что в мае только одно поле (3) из семи не было верно идентифицировано. В остальные два месяца ошибок при идентификации этим методом не было.

На рис. 3б приведены аналогичные результаты, полученные методом наименьших квадратов, являющегося основой большинства других методов распознавания объектов. Из рисунка видно, что в мае поле 3 было неверно идентифицировано. То, что в мае поле 3 не удалось идентифицировать обоими методами, не удивительно. Как видно из рис. 2а, нормированный спектр этого поля сильно отличается от прочих. Угол между ним и средним спектром составляет 7.67° , что значительно превышает угол между средними

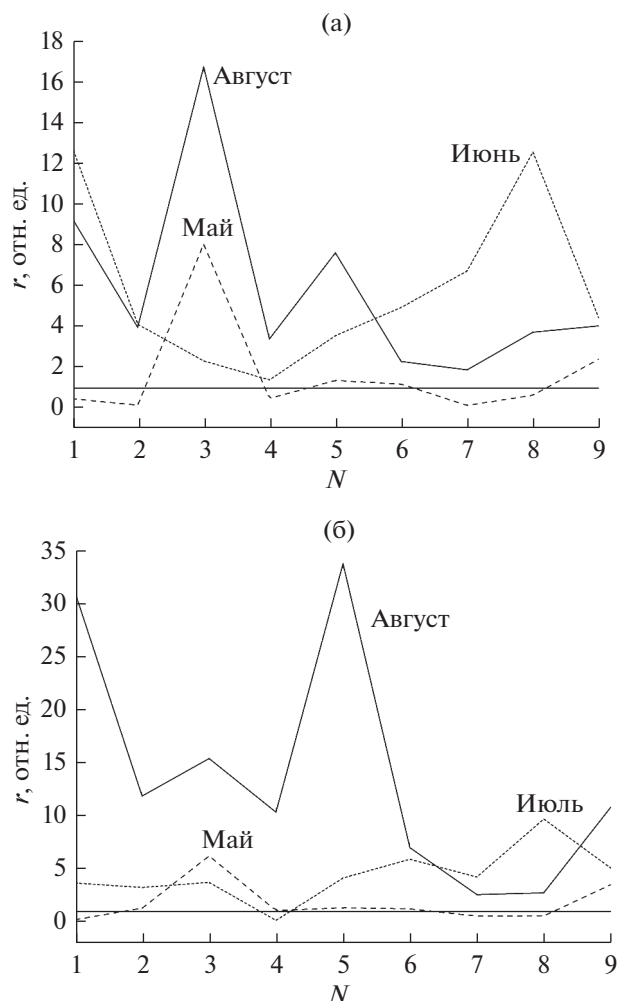


Рис. 4. Результаты распознавания яровых методом ортогональной проекции (а) и методом наименьших квадратов (б); N – номер поля, горизонтальной кривой обозначен уровень $r = 1$.

спектрами конопли и яровых (1.63°). В июле и августе это отличие практически полностью нивелировано.

Кроме того, результат идентификации поля 6 следует отнести к сомнительным ($r = 1.09$), а полей 4 и 5 – к почти сомнительным ($r = 0.87$ и 1.16 соответственно). В июле поля 1 и 2 по этому методу также определены неверно. Из сравнения рис. 3а и 3б видно, что распознавание конопляных полей в мае методом ортогональной проекции дает значительно более надежные результаты – практически все значения r , полученные методом наименьших квадратов находятся возле 1, в то время как метод ортогональной проекции дает значения r , заметно отличающиеся от 1 (кроме поля 3).

На рис. 4а представлены результаты идентификации яровых полей методом ортогональной

Таблица 1. Ошибки идентификации

Месяц	Ортогональная проекция				Наименьшие квадраты			
	конопля		яровые		конопля		яровые	
	ошибки 1-го типа	сомнительные	ошибки 2-го типа	сомнительные	ошибки 1-го типа	сомнительные	ошибки 2-го типа	сомнительные
Май	1	—	5	—	1	1	3	1
Июль	—	—	—	—	2	—	1	—
Август	—	—	—	—	—	—	—	—

проекции. Видно, что в мае из девяти полей верно идентифицированы только четыре. При других калибровках ошибок распознавания второго типа меньше, зато больше более важных ошибок первого типа. В другие месяцы идентификация яровых этим методом была безошибочна. На рис. 4б представлены результаты идентификации яровых, полученные методом наименьших квадратов. В мае три из девяти полей определены неверно (1, 7, 8), а результат идентификации поля 4 следует отнести к сомнительным. В июле неверно идентифицировано поле 4. В августе ошибок идентификации нет.

Заметим, что повышение требования к достоверности с 10 до 20% никак не сказывается на распознаваемости методом ортогональной проекции, в то время как при применении метода наименьших квадратов целый ряд полей из категории распознанных переходит в разряд сомнительных. Результаты идентификации полей обоими методами приведены в табл. 1. Видно, что метод ортогональной проекции значительно лучше выявляет посадки конопли, пропустив лишь одно поле в мае. В более поздние периоды он вообще не дал ошибок при идентификации как конопляных полей, так и яровых.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нормировка спектров оказывается полезной — потеря яркостной информации полностью окупается уменьшением вариативности спектров каждого типа. Нормировка спектров в сочетании со специальной калибровкой и применением метода ортогональной проекции дает выигрыш по сравнению с другими методами в распознаваемости объектов, особенно в тех случаях, когда яркости спектров возможных гипотез сигналов

мало различаются. Из сравнения рисунков видно, что когда эти яркости близки (в мае) метод наименьших квадратов, более чувствительный именно к яркости, проигрывает методу ортогональной проекции. В августе, когда спектры и так хорошо различимы, этот метод догоняет метод ортогональной проекции. Но в мае и июле он дает больше сбоев, особенно первого типа, чем метод ортогональной проекции.

Рассмотренный метод благодаря своей простоте и эффективности может быть использован в широком классе задач, требующих быстрого принятия решений.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 16-29-09615 офи_м).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саворский В.П., Панова О.Ю., Савченко Е.В. // Совр. проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 5. С. 13.
2. Afghanistan Opium Survey 2017. Cultivation and Production: United Nations Office on Drugs and Crime (UNODC) Research. Afghanistan, 2017.
3. Герус А.В., Герус Т.Г. // Физ. основы приборостроения. 2015. Т. 4. № 17. С. 70.
4. Герус А.В., Савченко Е.В., Саворский В.П. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 27.
5. Герус А.В., Савченко Е.В., Саворский В.П. // Журн. радиоэлектроники. 2017. № 11. С. 1684. <http://jre.cplire.ru/jre/nov17/8/text.pdf>.

6. *Walthall C.L., Daughtry C. S.T., Pachepsky L.* // Beltsville, MD, USA: USDA-ARS Hydrology and Remote Sensing Laboratory, 2003.
7. *Manolakis D., Shaw G.* // IEEE Signal Processing Magazine. 2002. V. 19. № 1. P. 378.
8. *Лупян Е.А., Бурцев М.А., Балашов И.В. и др.* // Совр. проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263.
9. *Плотников Д.Е., Барталев С.А., Лупян Е.А.* // Совр. проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Т. 2. № 5. С. 322.
10. *Барталев С.А., Егоров В.А., Лупян Е.А. и др.* // Комп. оптика. 2011. Т. 35. № 1. С. 103.
11. *Кашицкий А.В., Балашов И.В., Лупян Е.А. и др.* // Совр. проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 1. С. 156.
12. *Кашицкий А.В., Лупян Е.А., Балашов И.В., Константинова А.М.* // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 9. С. 772.
13. *Толпин В.А., Барталев С.А., Бурцев М.А. и др.* // Совр. проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2007. Т. 2. № 4. С. 380.
14. *Толпин В.А., Лупян Е.А., Барталев С.А. и др.* // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 7. С. 581.