

Метод синтеза многосенсорных видеоданных различного пространственного разрешения

Б.С. Жуков

¹*Институт космических исследований РАН
117997 Москва, Профсоюзная, 84/32
E-mail: bzhukov@nserv.iki.rssi.ru*

Для повышения эффективности космических исследований Земли необходим синтез многосенсорных видеоданных различного пространственного разрешения, полученных в разных спектральных диапазонах и/или с различным спектральным разрешением, с тем, чтобы оценить по ним совокупность физических, химических, биологических и других характеристик наблюдаемых объектов. Метод основан на совмещении видеоданных всех съемочных систем на общем базисе – системе классов, распознаваемых на изображениях, которые получены съемочной системой наиболее высокого разрешения обеспечивающей требуемую детальность классификации. Достоинствами данного метода являются универсальность, статистическая несмещенность оценок радиометрических характеристик классов и отсутствие необходимости в использовании априорной информации или моделей.

Введение

В космических исследованиях Земли увеличение информативности дистанционных измерений возможно за счет комплексирования съемочных систем различных спектральных диапазонов (от видимого до СВЧ) и/или за счет увеличения в том же диапазоне числа спектральных зон, в которых проводятся наблюдения. В Табл. 1 приводятся характерные примеры современных мультиспектральных сканеров, спектрорадиометров, видеоспектрометров, сканирующих атмосферных спектрометров, радиолокаторов с синтезированной апертурой и СВЧ радиометров. Среди них высокое пространственное разрешение от долей метра до десятков метров, требуемое для зондирования суши, могут обеспечить лишь панхроматические/мультиспектральные сканеры видимого и ближнего ИК диапазонов и радиолокаторы с синтезированной апертурой. С другой стороны, применимость таких перспективных съемочных систем как видеоспектрометры, тепловые сканеры и СВЧ радиометры ограничивает их низкое пространственное разрешение (от сотен метров для видеоспектрометров и тепловых сканеров до десятков километров для СВЧ радиометров), приводящее к ситуации, когда большинство или даже все пиксели в данных этих приборов содержат несколько различных классов объектов, т.е. являются «смешанными».

В связи с этим возникает проблема синтеза многосенсорных видеоданных различного пространственного и спектрального разрешения с тем, чтобы органически совместить детальную пространственную информацию, содержащуюся в видеоданных съемочных систем высокого пространственного разрешения, и дополнительную спектрорадиометрическую информацию, которая может содержаться в видеоданных съемочных систем более низкого пространственного разрешения. При этом видеоданные высокого разрешения дают возможность проанализировать состав смешанных пикселей в видеоданных более низкого разрешения и разделить их на отдельные классы.

Таблица 1. Примеры современных космических съемочных систем

Съемочная система	Спектральные зоны	Пространств. разрешение	Полоса обзора, км
Многозональный сканер «Геотон-1» («Ресурс-ДК»)	0,58-0,80 мкм	1 м	28
	0,50-0,60; 0,60-0,70; 0,70-0,80 мкм	3 м	
Многозональный комплекс ПСА+РДСА («Монитор-Э»)	ПСА: 0,51-0,85 мкм	8 м	90
	РДСА: 0,54-0,59; 0,63-0,68; 0,79-0,90 мкм	20 м	160
Многозональный сканер ETM+ (LANDSAT-7)	0,52-0,90 мкм	15 м	185
	0,45-0,515; 0,525-0,605; 0,63-0,69; 0,75-0,90; 1,55-1,75; 2,09-2,35 мкм	30 м	
	10,4-12,5 мкм	60 м	
Многозональный комплекс КМСС («Метеор-М»)	МСУ-100: 0,535-0,575; 0,63-0,68; 0,70-0,90 мкм	60 м	960
	МСУ-50: 0,37-0,45; 0,45-0,51; 0,58-0,69 мкм	120 м	
Спектрорадиометр ASTER (Terra)	0,52-0,60; 0,63-0,69; 0,76-0,86 мкм	15 м	60
	1,6-1,7; 2,145-2,185; 2,185-2,225; 2,235-2,285; 2,295-2,365; 2,360-2,430 мкм	30 м	
	8,125-8,475; 8,475-8,825; 8,925-9,275; 10,25-10,95; 10,95-11,65 мкм	90 м	
Спектрорадиометр MODIS (Terra; Aqua)	0,62-0,67; 0,84-0,88 мкм	250 м	2230
	0,46-0,48; 0,545-0,565; 1,23-1,25; 1,63-1,65; 2,105-2,155 мкм	500 м	
	29 зон в диапазоне 0,405-14,4 мкм	1000 м	
Видеоспектрометр MERIS (ENVISAT)	Программный выбор 15-ти зон шириной до 1,8 нм в диапазоне 0,39-1,04 мкм	300 м	1150
Сканирующий атмосферный спектрометр AIRS (Aqua)	2378 спектральных отсчетов в диапазонах 3,74-4,61; 6,20-8,22 и 8,8-15,4 мкм со спектральным разрешением $\lambda/\Delta\lambda = 1086-1570$	15 км	1400
РЛСА TSX-SAR (TerraSAR-X)	3,1 см	1-16 м (зависит от режима)	10-100 (зависит от режима)
РЛСА SAR (RADARSAT-1)	5,6 см	8-100 м (зависит от режима)	45-500 (зависит от режима)
СВЧ-радиометр AMSR-E (Aqua)	0,34-4,3 см	5,4-56 км (зависит от длины волны)	1445

Описание метода

Предлагаемый метод синтеза многосенсорных видеоданных основан на совмещении видеоданных всех съемочных систем на общем базисе – системе классов, распознаваемых на изображениях, которые получены съемочной системой наиболее высокого разрешения, обеспечивающей требуемую детальность классификации. Далее на этом базисе проводится разложение видеоданных более низкого разрешения, причем информация высокого разрешения используется для анализа состава пикселей низкого разрешения.

С точки зрения этого подхода съемочную систему высокого разрешения, данные которой используются для определения исходной системы классов, будем условно называть “классифицирующим прибором” (КП). КП должен иметь необходимые пространственное разрешение и спектрорадиометрические измерительные характеристики для распознавания требуемых классов. В качестве КП могут использоваться, например, многоспектральные сканеры, а также радиолокаторы с синтезированной апертурой. Съемочные системы низкого разрешения (например, видеоспектрометры, тепловые ИК сканеры, СВЧ радиометры) рассматриваются как один многоканальный “измерительный прибор” (ИП), причем не требуется, чтобы все каналы ИП имели одинаковое разрешение. Функцией ИП является «измерение» дополнительных характеристик классов объектов, распознанных КП. Например, классами объектов, распознаваемыми КП, могут быть различные сельскохозяйственные поля, а данные ИП могут использоваться для измерения дополнительных количественных характеристик этих полей, например, влажности, состояния и содержания биохимических компонентов в растительности, влажности и характеристик почвы и др. Функции КП и ИП могут выполнять также различные каналы одного и того же прибора, имеющие различное пространственное разрешение.

Рассматриваемый метод синтеза видеоданных, полученных системой КП/ИП, в упрощенном виде проиллюстрирован на Рис. 1.

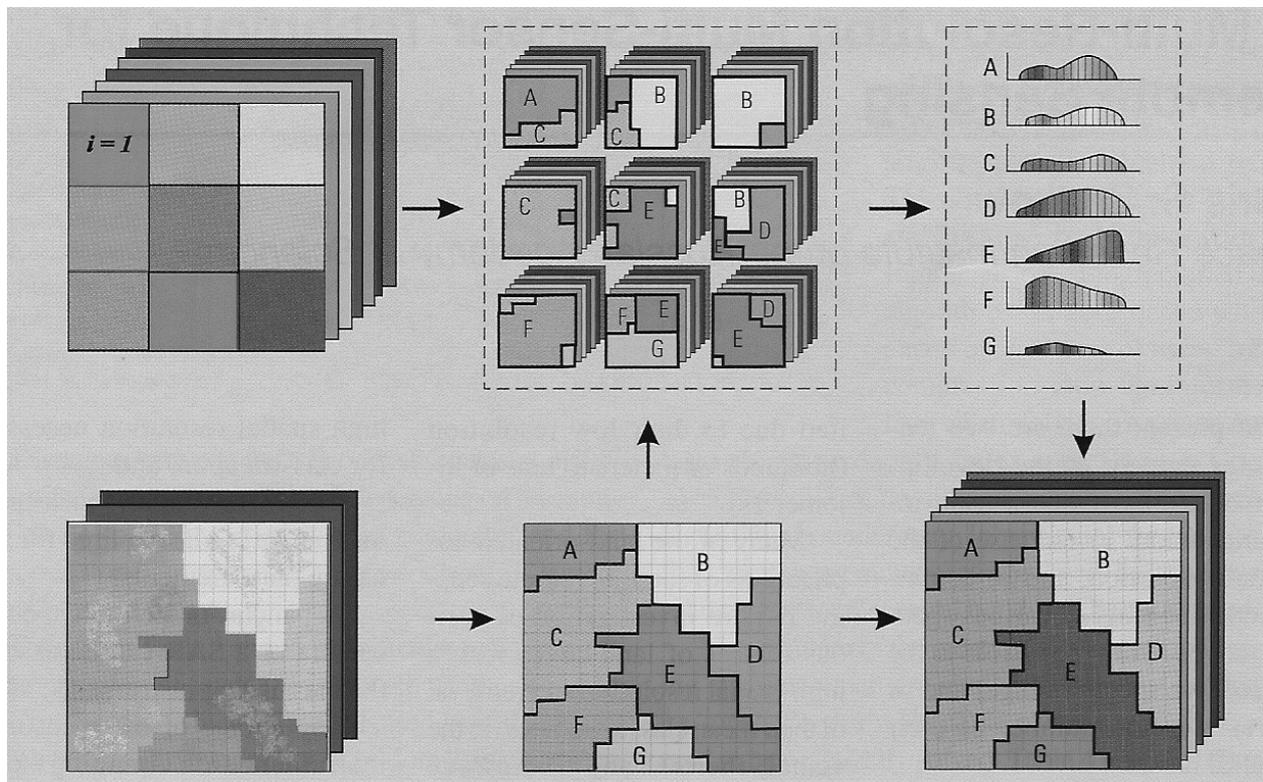


Рис.1. Иллюстрация метода на примере синтеза видеоданных, полученных многозональным сканером высокого разрешения (КП) и видеоспектрометром низкого разрешения (ИП)

Метод включает следующие основные этапы,:

1. *Классификация данных КП.* На первом этапе осуществляется классификация (многозональных) изображений КП, в результате чего получается классификационная карта $k(u, v)$, где каждому пикселу высокого разрешения (u, v) присвоен код k соответствующего ему класса. В зависимости от стоящей задачи для классификации могут использоваться различные алгоритмы классификации с обучением или без обучения [1]. В данной работе для этой цели используется кластерный алгоритм ISODATA.

2. *Определение вклада классов в сигналы пикселей ИП.* Вклад $c_j(U, V; k_0)$ класса k_0 в сигнал пиксела (U, V) в канале j ИП находится с учетом определяемой по классификационной карте доли площади, занимаемой этим классом в пикселе (U, V) , и функции рассеяния точки (ФРТ) ИП:

$$c_j(U, V; k_0) = \sum_{k(u, v) \in k_0} \rho_j(U, V; u, v),$$

где нормализованная на 1 ФРТ $\rho_j(U, V; u, v)$ характеризует вес, с которым сигнал от участка, соответствующего пикселу (u, v) , вносит вклад в сигнал пиксела (U, V) в канале j ИП. Предполагается, что ФРТ учитывает все эффекты, влияющие на разрешение данных ИП, включая эффект геометрической трансформации данных при совмещении изображений. Обычно ФРТ аппроксимируется гауссовой функцией.

3. *Оценка средних ИП-спектров классов.* ИП-спектры классов $S_j(k)$, усредненные по их площади на обрабатываемом фрагменте изображения, оцениваются независимо в каждом канале ИП путем обращения методом наименьших квадратов системы уравнений модели линейной смеси:

$$H_j(U, V) = \sum_{k=1}^K c_j(U, V; k) S_j(k) + \varepsilon_j(U, V), \quad (1)$$

где $\varepsilon_j(U, V)$ - ошибка модели линейной смеси, включающая как приборные ошибки (радиометрический шум, ошибки геометрического совмещения данных и др.), так и эффекты спектральной неоднородности классов в зонах ИП. Оцененные ИП-спектры классов $S_j(k)$ вместе с их исходными КП-спектрами образуют синтезированные спектры классов. Для того, чтобы уменьшить ошибки восстановления спектров малых классов, при решении рекомендуется использовать методы регуляризации [2].

4. *Восстановление ИП-изображения высокого разрешения.* Рассмотрим воображаемую съемочную систему, имеющую спектральные зоны ИП и пространственное разрешение КП – такая система будет для краткости обозначаться как ИПВ (измерительный прибор высокого разрешения). В предлагаемом методе ИПВ-изображение аппроксимируется путем присвоения пикселям классификационной карты оцененных ИП-спектров соответствующих классов:

$$\tilde{H}_j(u, v) = S_j(k(u, v)). \quad (2)$$

Отличие изображения (2) от “настоящего” ИПВ-изображения состоит в том, что в (2) сигнал ИПВ постоянен в пределах каждого класса. В “настоящем” же ИПВ-изображении возможны также вариации ИП-сигнала внутри классов, поскольку классы, которые кажутся однородными при использовании данных КП, могут не являться однородными в спектральных зонах ИП. Изображение (2) вместе с исходным КП-изображением образует синтезированное изображение.

Для того, чтобы избежать усреднения ИП-сигналов классов по всей площади класса на изображении, этапы (2-4) алгоритма применяется не ко всему изображению, а последовательно к его отдельным фрагментам, используя «скользящее окно» (например, на Рис.1 показано окно 3×3

отдельным фрагментам, используя «скользящее окно» (например, на Рис.1 показано окно 3×3 ИП пиксела). При этом окно перемещается по геометрически совмещенному КП/ИП изображению с шагом 1 ИП-пиксел в каждом направлении. При каждом положении окна проводится восстановление ИП-спектров представленных в этом окне классов с использованием только ИП-пикселей этого окна. Полученное в результате ИПВ-изображение сохраняется в пределах центрального ИП-пиксела в окне. После сдвига окна на 1 ИП-пиксел сохраняется ИПВ-изображение в пределах следующего ИП-пиксела и т.д. В результате, восстанавливается полное ИПВ-изображение.

Для того, чтобы гарантировать, что при загрузлении ИПВ-изображения до исходного разрешения будет получено исходное ИП-изображение, решение методом наименьших квадратов системы уравнений (1) следует проводить при условии сохранения ИП-сигнала центрального пиксела в окне (U_0, V_0) :

$$H_j(U_0, V_0) = \sum_{k=1}^K c_j(U_0, V_0; k) S_j(k) \quad (3)$$

Вариант метода, где решение системы уравнений (1) проводится при условии (3), назван консервативным синтезом, в отличие от неконсервативного синтеза, где условие (3) не используется. При малом уровне приборных ошибок лучшие результаты дает консервативный синтез, а при большом уровне ошибок – неконсервативный синтез, позволяющий фильтровать шум при сохранении резкости ИПВ-изображения [2].

При синтезе в скользящем окне масштаб внутриклассового усреднения ограничивается только размерами окна. При выборе размеров окна необходимо учитывать, что уменьшение размеров окна ведет к уменьшению масштаба пространственного усреднения ИП-спектров классов, однако с другой стороны при этом уменьшается допустимая детальность классификации. В работе [2] найдено, что оптимальный размер окна обычно составляет от 5×5 до 7×7 ИП пикселей.

Применимость метода для решения конкретных задач определяется выполнением следующих условий:

1. Данные КП должны быть достаточны для распознавания классов, требуемых стоящей задачей.

2. Классы должны быть разделимы в данных ИП, т.е. должно выполняться условие:

$$\det \mathbf{A}_j \neq 0, \text{ где } \mathbf{A}_j = \left\{ A_j(k, k') = \sum_{U, V} c_j(U, V; k) c_j(U, V; k') \right\} \quad (4)$$

Для этого, в частности, необходимо, чтобы число классов в окне не превышало числа ИП-пикселей, а при консервативном синтезе было, по крайней мере, на единицу меньше. Кроме того, не допустима ситуация, когда два или более классов содержатся только в одном ИП пикселе. В случае, когда в каком-либо окне условие (4) не выполняется, проводится объединение наименьшего по площади класса со спектрально наиболее близким классом до тех пор, пока классы не становятся разделимыми. В этом случае для объединенных классов оценивается их средневзвешенный ИП-спектр.

Рассматриваемый метод не следует путать с методом чистых классов, предложенным в [3] и широко применяемым в практике дистанционного зондирования. Метод чистых классов также, как и предлагаемый метод, основан на решении уравнений линейной смеси (1), однако используемые при этом подходы прямо противоположны. В методе чистых классов априорно или по однородным областям на изображении задаются спектры чистых классов $S_j(k)$ и затем путем решения системы уравнений (1) определяются пропорции $c(U, V; k)$ классов k в пикселах (U, V) . В отличие от этого, в предлагаемом методе пропорции классов в пикселах ИП определяются по видеоданным высокого разрешения, полученным КП, и далее используются для определения спектров классов $S_j(k)$.

Результатами применения данного метода являются:

- классификационная карта, показывающая пространственное распределение классов с пространственным разрешением КП;
- синтезированный КП/ИП спектр каждого класса, охватывающий все спектральные зоны / диапазоны, в которых проводятся измерения, причем ИП-спектр класса может изменяться по площади класса;
- синтезированное КП/ИП-изображение, имеющее число спектральных зон, равное сумме спектральных зон КП и ИПВ, и размер пиксела КП.

Достоинствами данного метода является сочетание:

- универсальности (он применим к синтезу видеоданных любых съемочных систем при условии, что по данным наиболее высокого разрешения могут быть распознаны все требуемые данной задачей классы объектов),
- радиометрической точности (оценки спектров классов в каждой спектральной зоне являются статистически несмещенными),
- отсутствие необходимости в использовании априорной информации или моделей.

Пример применения метода

В качестве примера применения рассматриваемого метода на Рис. 2 показан синтез изображений, полученных сканером ASTER в трех каналах видимого и ближнего ИК диапазонов с разрешением 15 м (Рис.2а), в шести каналах коротковолнового ИК диапазона с разрешением 30 м (Рис.2б) и в пяти каналах теплового ИК диапазона с разрешением 90 м (Рис.2с). Структура с/х полей хорошо прослеживается лишь на Рис.2а, на Рис.2б границы полей размазаны, а на Рис.2с хорошо различаются только большие поля в правой части изображения. При синтезе три канала ASTER с разрешением 15 м рассматривались как КП, а остальные каналы – как ИП. Использовался консервативный синтез в скользящем окне 5×5 ИП пикселей. На синтезированном изображении (Рис.2д) во всех спектральных зонах ASTER сохраняется детальность изображений, полученных в каналах наиболее высокого разрешения.

На Рис.3 показаны синтезированные спектры во всех 14 спектральных зонах ASTER для нескольких небольших участков, которые практически не различаются на исходных тепловых ИК изображениях. Судя по спектрам, участок 1 соответствует зеленому полю, участки 2 и 3 – убраным полям, а участок 4 – полю, покрытому водой (вероятно, посеvy риса). Анализ синтезированных спектров может позволить оценить характеристики этих участков значительно более детально, чем при использовании только трех спектральных зон видимого и ближнего ИК диапазонов.

Дальнейшими примерами применения данного метода являются:

- синтез многосенсорных данных видимого, ближнего инфракрасного (ИК) и теплового ИК диапазонов для оценки состояния с-х. посевов [2],
- синтез многосенсорных данных видимого, ближнего ИК, коротковолнового ИК и теплового ИК диапазонов для минералогических исследований [2, 4],
- синтез многозональных и видеоспектрометрических данных для оценки характеристик прибрежных вод [5],
- синтез данных многозонального сканера и атмосферного спектрометра для исследования газовых и аэрозольных эмиссий пожаров [6].

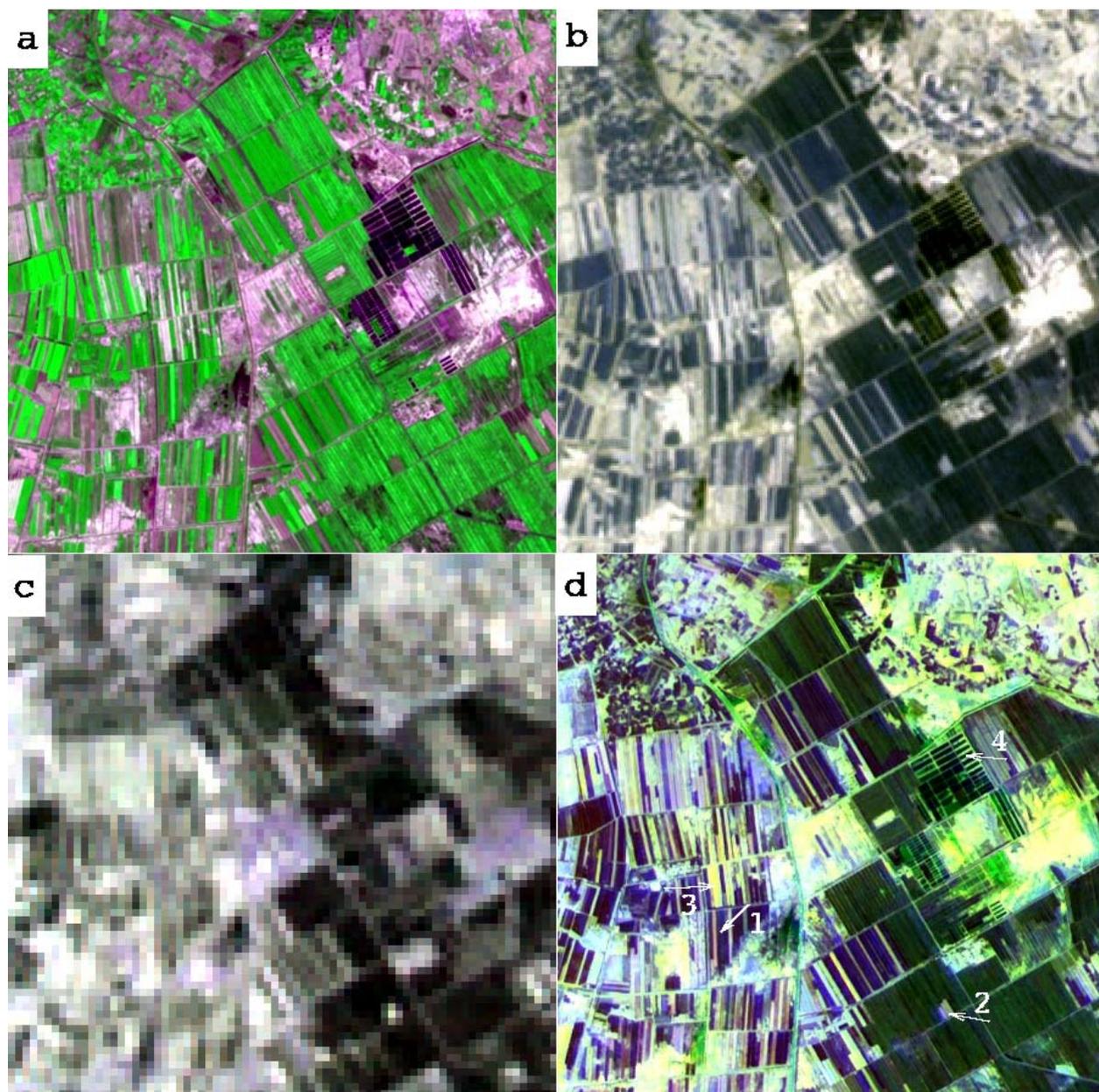


Рис. 2. Синтезирование зональных изображений ASTER, полученных в районе Рукиго, Китай: а – изображение в каналах видимого и ближнего ИК диапазонов (размер пиксела 15 м): R: 0.63-0.69 мкм, G: 0.76-0.86 мкм, B: 0.52-0.60 мкм; б – изображение в каналах коротковолнового ИК диапазона (размер пиксела 30 м): R: 1.6-1.7 мкм, G: 2.235-2.285 мкм, B: 2.36-2.43 мкм; в – изображение в каналах теплового ИК диапазона (размер пиксела 90 м): R: 8.125-8.475 мкм, G: 8.925-9.275 мкм, B: 10.25-10.95 мкм; д – синтезированное изображение (размер пиксела 15 м): R: 2.235-2.285 мкм, G: 0.63-0.69 мкм, B: 10.3-11.0 мкм

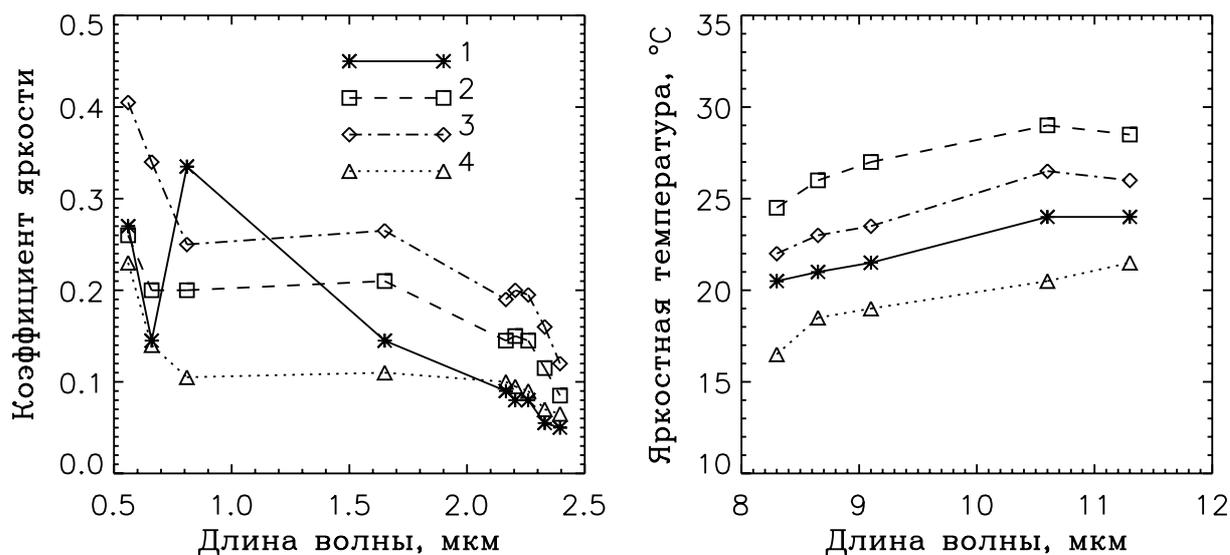


Рис.3. Синтезированные спектры участков, помеченных цифрами на Рис. 2.

Литература

1. Richards A. Remote Sensing Digital Image Analyses. An Introduction // Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 1986.
2. Zhukov B., Oertel D., Lanzl F. et al. Unmixing-based multi-sensor multi-resolution image fusion // IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 1999. Vol.37. No.3. P.1212-1226.
3. Adams J.B., Smith M.O., Johnson P.E. Spectral mixture modelling: a new analysis of rock and soil types at the Viking Lander I site // J. Geophys. Res., 1986. Vol.91. No.B8. P.8098-8112.
4. Reinhäckel G., Zhukov B., Oertel D. et al. Unmixing of simulated ASTER data with applications for the assessment of mining impacts in Central Germany // Proc. SPIE, 1998. Vol. 3438. P.345-354.
5. Roman A., Polidori L., Mathieu-Marni S. et al. Spatial resolution improvement by merging MERIS-ETM images for coastal water monitoring // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2006. Vol. 3. No.2. P.227-231.
6. Tank V., Oertel D., Zhukov B. et al. FOCUS on ISS - Sensor and Data Fusion for Earth Observation from Space // International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems, MFI 2001, 2001. P.19-24.