

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ СПЕКТРАЛЬНОГО УГЛА ДЛЯ ЗАДАЧ КЛАССИФИКАЦИИ ЛИТОЛОГИЧЕСКИХ КЛАССОВ В ПРИМЕСЯХ

*Шаршеева К.Т., ст.преп. каф. ИВТ КГТУ им. И. Раззакова, пр. Ч. Айтматова 66,г. Бишкек тел. 0312545182, email: kunduz2000@mail.ru;*

Аннотация: В данной работе предложены и использованы производные метода спектрального угла, которые дают более точные результаты при литологическом картировании, в особенности, где есть большое количество примесей. В сравнительном анализе были рассмотрены методы спектрального угла со средним эталонным спектром, спектральных производных, с использованием нескольких эталонных спектров на основе SAM, спектрального анализа вариабельности. Результаты дополнительных исследуемых методов дали лучшие результаты, чем обычный метод спектрального угла и согласованная фильтрация, в том случае когда используется итерационный процесс.

Ключевые слова: метод спектрального угла, спектральный производный анализ, целевой спектр, эталонный спектр, литологическое картирование, классификационные точности, литологическое отображение.

## COMPARATIVE ANALYSIS OF VARIOUS SPECTRAL ANGLE METHODS FOR CLASSIFICATION PROBLEMS OF LITHOLOGICAL CLASSES IN IMPURITIES

*Sharshееva K.T., senior lecture, KSTU named after I. Razzakov, Ch. Aitmatov av.66, Tel.: 0312545182, email: [kunduz2000@mail.ru](mailto:kunduz2000@mail.ru)*

Annotation: In this paper, we propose and use the derivatives of the spectral angle method, which give more accurate results for lithological mapping, especially where there is a large amount of impurities. In a comparative analysis, spectral angle methods were considered with an average reference spectrum, spectral derivatives, using several SAM reference spectra, spectral analysis of variability. The results of the additional research methods yielded better results than the usual spectral angle method and matched filtering, in the event that an iterative process is used.

Keywords: spectral angle method, spectral derivative analysis, target spectrum, reference spectrum, lithological mapping, classification accuracy, lithological mapping.

Введение: В данной работе производится сравнительный анализ различных методов спектрального угла, который используется для выделения примесей различных фаций на снимках дистанционного зондирования Земли. Такие исследования актуальны для Кыргызстана, так как около 70% нашей страны занимает горная местность, которая труднодоступна для наземных работ и использование космических снимков являются перспективными, учитывая эти особенности.

**Литологическое отображение с помощью метода спектрального угла со средним эталонным спектром.** SAM - контролируемый алгоритм классификации, который использует спектральную угловую информацию для классификации гиперспектральных данных. Он обрабатывает каждый пиксель в гиперспектральном изображении как  $n$ -мерный вектор, где  $n$  равно числу спектральных диапазонов. Алгоритм измеряет подобия целевого спектра опорного спектра путем расчета спектральных углов между ними [2]. Меньший угол представляет более точное соответствие с эталонным спектром. Угол между целевым вектором  $a$  спектра и векторного эталонного спектра  $b$  может быть вычислено путем

$$\alpha = \cos^{-1} \left( \frac{a \cdot b}{\|a\| \|b\|} \right) \quad (1)$$

где  $\| \cdot \|$  является функцией нормы.

Уравнение (1) также может быть записана в виде

$$\alpha = \cos^{-1} \left\{ \frac{\sum_{i=1}^n a_i \cdot b_i}{\left[ \sum_{i=1}^n a_i^2 \right]^{1/2} \left[ \sum_{i=1}^n b_i^2 \right]^{1/2}} \right\} \quad (2)$$

где  $n$  - число спектральных полос,  
 $a_i$ - обозначает значение целевого спектра в полосе  $i$   
 и  
 $b_i$  обозначает значение эталонного спектра на  $i$  -полосе.

В существующих литологических исследованиях по картированию, средний спектр всех образцов спектров литологического типа используется в качестве опорного спектра. Если спектральный угол между неизвестным спектром (т.е. целевого пикселя) и опорным спектром определенного литологического класса (то есть, средний спектр) меньше, чем указанный пользователем порог, пиксел назначается классу. В противном случае пиксел назначается нецелевому классу.

**Литологическое отображение путем включения спектральных производных.** Использование спектральных производных является перспективным методом для снижения эффекта различной освещенности.

Вычисление спектральной производной включает изменение зависимых переменных (отражательной способности) относительно независимых переменных (длина волны).

В этом исследовании, спектральные производные вычисляются с помощью аппроксимации. Производная первого порядка представляется как:

$$\left. \frac{ds}{d\lambda} \right| \approx \frac{s(\lambda_i) - s(\lambda_j)}{\Delta\lambda} \quad (3)$$

где  $(DS / D\lambda) |$  - производная первого порядка на длине волны  $i$  (например,  $i$ - спектральная полоса),

$\Delta\lambda$  - интервал между соседними полосами,

$\Delta\lambda = \Delta\lambda_j - \Delta\lambda_i$  и  $\lambda_j > \lambda_i$ , интервал между полосами предполагаются постоянными.

$S$  - представляет собой спектр гиперспектральных данных и является функцией от длины волны ( $\lambda$ ).

Производные высшего порядка вычисляются итеративно и любой порядок производной доступен с использованием аппроксимации. Поскольку спектральные производные чувствительны к шуму, а эффект шума усугубляется возрастанием порядка производной, была использована только производная первого порядка (первая производная).

Изображение имеет более широкий диапазон данных, чем спектральный коэффициент отражения изображения, которое имеет диапазон данных  $[0,1]$ , первая производная изображения впервые была нормирована в диапазоне данных  $[0,1]$  перед объединением. Для пикселя используется следующее уравнение нормализации,

$$D'_{ij} = \frac{d_{ij} - d_{min}}{d_{max} - d_{min}} \quad (4)$$

где

$D_{ij}$  - обозначает исходное значение отражательной способности пикселя (I, J),

$D_{max}$  и  $D_{min}$  представляют максимальные и минимальные значения всех первых производных групп и

$D'_{ij}$  - нормированное значение пикселя (I, J).

По мере того как процесс усреднения позволяет производить спектры, которые были менее шумные, средние значения обоих спектров отражения и нормированных производных были использованы в качестве эталонного спектра для каждого литологического класса на основе картирования SAM[2].

**Литологическое отображение с использованием нескольких эталонных спектров на основе SAM.** Учитывая, что многие типы пород демонстрируют спектральную изменчивость, вместо того чтобы использовать среднее значение спектра для каждого класса в SAM, в этом исследовании были использованы множество эталонных спектров для данного класса.

Предложенный метод можно обобщить следующим образом. Каждый целевой спектр (т.е. пиксель спектра) сравнивается со всеми эталонными спектрами заданного литологического класса. После того, как все спектральные углы между целевым спектром и каждого эталонного спектра класса вычисляются для пикселя, минимальный угол всех этих спектральных углов рассматривается в качестве конечного репрезентативного спектрального угла целевого пикселя. Если конечный спектральный угол целевого пикселя класса меньше, чем пороговое значение угла заданный пользователем, то целевой пиксель идентифицирован как принадлежащий к этому классу. В противном случае, пиксель идентифицируется как не принадлежащий к этому классу.

В частности, предположим, что имеется  $n$  эталонных спектров  $\mathbf{b}$  ( $\mathbf{b} = \{\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2 \dots \mathbf{b}_n\}$ ) для данного литологического класса, спектральный угол между целевым пикселем вектора  $\mathbf{a}$  и каждого эталонного вектора спектра  $\mathbf{b}_i$  является:

$$\alpha_i(\mathbf{a}, \mathbf{b}_i) = \cos^{-1} \left( \frac{\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}_i}{\|\mathbf{a}\| \cdot \|\mathbf{b}_i\|} \right) \quad (5)$$

заключительный представитель спектральный угол между целевого пикселя вектора  $\mathbf{a}$  и эталонных спектров  $\mathbf{b}$  литологического класса получается

$$\alpha(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \min [\alpha_1(\mathbf{a}, \mathbf{b}_1), \alpha_2(\mathbf{a}, \mathbf{b}_2), \dots, \alpha_n(\mathbf{a}, \mathbf{b}_n)], \quad (6)$$

где  $\min [ \dots ]$  - обозначает минимальный угол всех спектральных углов к эталонным спектрам  $\mathbf{b}$ .

Первоначальные образцы подготовки могут содержать определенное количество отклоняющихся значений выборок (т.е. с большим количеством различных спектров, чем остальных образцов). Для устранения этих образцов вне слоя, процесс оптимизации предлагается уточнить первоначальные образцы подготовки.

Оптимизация обучающей выборки выполняется с использованием порогового значения угла, определяемого пользователем (аналитик), который также используется в последующем отображении SAM. Для конкретного класса сначала вычисляется спектральный угол между конкретным образцом  $C$  и любым другим образцом одного и того же класса. Минимальный спектральный угол для образца  $C$  берется из всех полученных спектральных углов для образца  $C$  и затем сравнивается с выбранным порогом угла [6]. Если минимальный спектральный угол для образца  $C$  меньше, чем пороговое значение, то образец  $C$  сохраняется в наборе обучающей выборки. В противном случае, образец  $C$  рассматривается как образец с аномальным значением и затем исключаются. После оптимизации спектры всех остальных обучающих выборок (здесь называемые оптимизированные образцы обучения) будут использоваться при отображении SAM.

**Спектральный анализ варибельности.** Поскольку знание изменчивости внутри класса и варибельности класса имеет отношение к точности итоговой классификации, спектральная изменчивость и спектральная разделяемость различных литологических классов исследуются до проведения литологического отображения. Внутриклассовая спектральная изменчивость измеряется с использованием стандартного отклонения и средних значений спектральных углов между эталонными спектрами одного и того же класса [7-8].

Варибельность между классами измеряется с использованием спектральных углов между двумя классами.

**Оценка эффективности.** Для того, чтобы в полной мере оценить эффективность предложенных методов на основе SAM, было использовано литологическое отображение со средним эталонным спектром.

Также для сравнения была использована согласованная фильтрация (СФ) (Matched Filtering (MF)), широко используемый метод литологического отображения.

СФ максимизирует отклик известного конечного элемента и подавляет реакцию составного неизвестного фона. СФ обеспечивает быстрое средство обнаружения конкретных материалов на основе соответствия к библиотеке или конечного элемента изображения спектров. Одним из преимуществ метода является то, что СФ не требует знания всех конечных элементов в пределах сцены изображения. Таким образом, СФ считался лучшим выбором для классификации в областях, весьма смешанных пород, где идентификация всех конечных элементов затруднено.

**Результаты литологического картирования с помощью различных методов спектрального угла.** Два района на северо-востоке Кыргызстана, были выбраны в качестве областей исследования из-за их превосходных обнажений породы.

Тем не менее, из-за разницы в спектральных характеристиках горных пород и влияния сбора данных изображения, спектральные вариации этих типов пород очень распространены.

Но составные части отложений (нецелевой класс) в этих областях также разнообразны, в связи с их сложными происхождениями, т.е. из-за различных источников пород с различными минеральными составляющими и разных возрастов. Таким образом, литологическая идентификация с использованием гиперспектральных изображений в области является трудной задачей.

Для решения задачи литологического картирования использовались Aster данные, так как они широко используются при геологическом картировании. Спектрорадиометр ASTER, установленный на спутнике Terra, специально предназначен для картографирования горных пород, содержащих эти минералы. ASTER-TIR является первым спутником дистанционного зондирования с достаточной системой спектральных, пространственных и радиометрических

резолуций для геологических приложений. ASTER, как правило, наблюдает более чем 500 сцен в день, геометрически хорошо корректируется (ортотрансформирование)[6]. Снимки Aster поверхности Исык-Кульской области были предоставлены Академией Наук КНР (RADICAS).

Атмосферная коррекция проводилась с использованием FLAASH (Fast прямой видимости атмосферного анализа спектральных Нурег-кубов), реализованный в программном обеспечении ENVI. Значения DN (цифровое число) были преобразованы в кажущийся коэффициент отражения.

Литологические блоки, разработанные в этой области включают карбонатно-осадочные породы, осадочные породы, гранит, и дополнительные отложения.

Девять литологических классов, за исключением дополнительных отложений, были определены в области (таблица 1). Геологическая карта (Рис 2 b) была использована для выбора образцов для обучения и оценки точности. Образцы обучения были выбраны изначально, а затем были оптимизированы, чтобы удалить внеслойные образцы с использованием методов, предложенных выше. Для того, чтобы в полной мере использовать предложенные методы, из изображения сначала генерируется случайным образом распределенные пиксели.

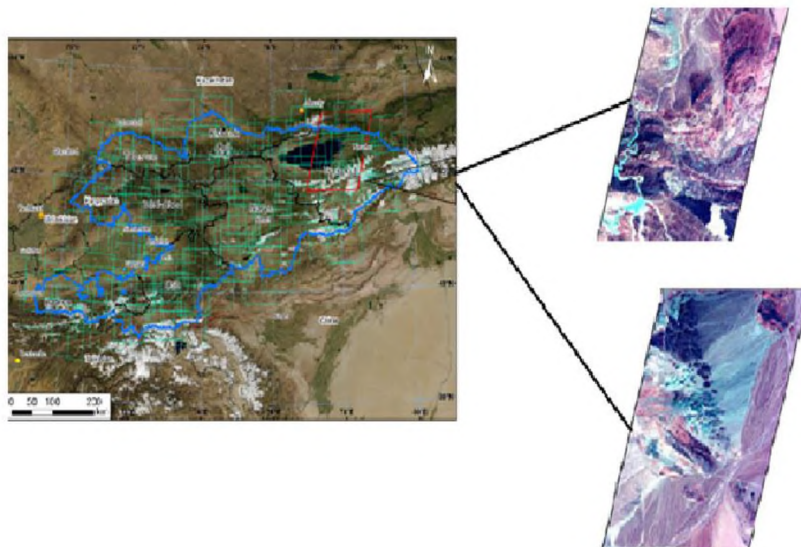


Рисунок 1. Данные и область исследования (юго-восток Исык-Кульской области)

Таблица 1. Таблица исследуемых литологических классов

Символьное обозначение литологического класса	Наименование литологического класса
G1	Калийный гранит
C1	Алеврит и туф
C2	Туф и известняк

C5	карбонат
C3	Карбонатный порфир и туф
C4	Карбонатный порфирит
J	аргиллит
G2	гранит
D	Известковая глина

Те пиксели, которые были расположены вблизи границ классов и трудно определить их атрибуты класса, и которые были вблизи учебных пикселей были исключены. Небольшая многоугольная область (приблизительно 10-30 пикселей) вокруг каждого оставшегося пикселя, был затем выбран в качестве тестовой области. Учебные и тестовые образцы, используемые в исследовании, приведены в таблице 1. Пространственное распределение тестовых образцов для каждого класса представлен на рис. 2 (с).

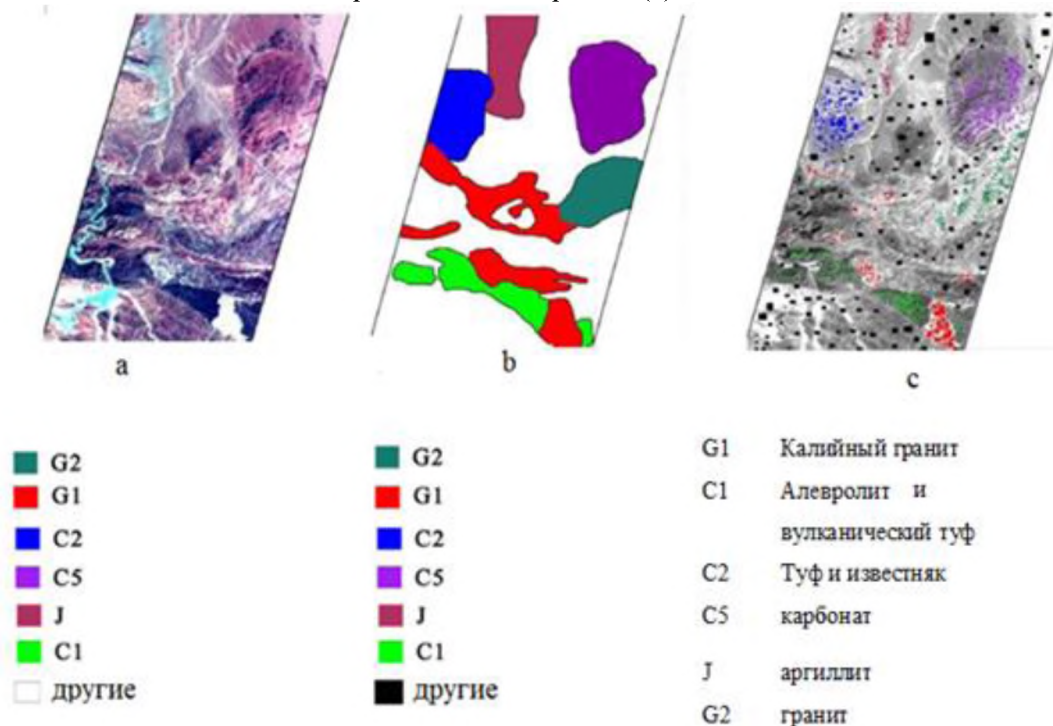


Рисунок 2 Пространственное распределение тестовых образцов.

- a) исследуемая область
- b) литологическая карта исследуемой области
- c) пространственное распределение тестовых образцов для каждого класса

**Спектральный анализ variability.** Спектральные кривые девяти литологических классов, выбранных из образа Aster и их первых производных показаны на рис. 2. Средний спектр и среднее первой производной для каждого класса также показаны для сравнения. Из рисунка видно, что все девять литологических единиц демонстрируют высокую внутриклассовую изменчивость как в спектральной величине и формы спектра, особенно для G1, классов C1, C3.

Кроме того, средний спектр для каждого класса значительно отличается от отдельных эталонных спектров. Таким образом, полученные средние спектры не полностью отражают спектральные свойства каждого литологического класса, что может привести к большим ошибкам. Тем не менее, эта цифра показывает, что первые производные спектров образца от каждого литологического класса и их средней производной более сходны. Таким образом, средняя спектральная производная литологического класса может представлять более адекватно спектральное свойство образцов класса.

Таблица 2 Внутрикласовые спектральные углы между образцами

Классы	Спектральные углы с эталонными спектрами (внутриклассовые)		Спектральные углы с эталонными спектрами (внутриклассовые) и их первые производные	
	Средний угол	Стандартное отклонение	Средний угол	Стандартное отклонение
G1	0.0536	0.0142	0.0474	0.0141
C1	0.0746	0.0247	0.0360	0.0150
C2	0.0370	0.0100	0.0320	0.0082
C3	0.1110	0.0331	0.0581	0.0200
C4	0.0401	0.0112	0.0369	0.0115
D	0.0538	0.0209	0.0406	0.0173
J	0.0536	0.0055	0.0474	0.0086
G2	0.0319	0.0082	0.0342	0.0085
C5	0.0491	0.146	0.0548	0.0221

Внутриклассовые спектральные углы для всех литологических классов приведены в таблице 2. Как видно из таблицы 2, средние значения внутриклассовых спектральных углов для некоторых классов, таких как C1, C3 и D являются относительно большими, что означает, что присущие им спектральные вариации относительно высокие.

Кроме того, из таблицы видно, что стандартное отклонение внутриклассовых спектральных углов при использовании первых производных значительно меньше, чем при использовании образцов спектров. Например, для класса C3 стандартное отклонение спектральных углов, при использовании эталонных спектров 0,0331, в то время как стандартное отклонение спектральных углов, при использовании комбинации эталонных спектров и производных составляет 0,02. Это указывает на то, что добавление первых производных является эффективным для снижения спектральной переменности.

В таблице 3 приведены межклассовые спектральные углы измеренные с использованием среднего эталонного спектра и в сочетании с соответствующим средним значением первых производных. Из таблицы видно, классы C1, C3, C5 сильно отделимы от других классов (т.е. с относительно большими спектральными углами), тогда как C2 и J классы менее отделимы от других классов (т.е. с относительно малыми спектральными углами). Таблица 3 показывает также, что спектральные углы между большинством классов, измеренных с комбинированными спектрами и первыми производными больше, чем измеренные с обычными спектрами, что означает, что спектральная разделяемость улучшается за счет включения первых производных.



Таблица 3 Межклассовые спектральные углы между образцами и их среднее значение измеренные с использованием эталонных спектров и в сочетании с первыми производными (все в радианах).

Верхний треугольник: измеренные с использованием среднего спектра отражения спектральных углов;

нижний треугольник: измеренные с использованием среднего спектров и первые производные спектральных углов.

	G1	C1	C2		C3	C4	D
G1	0	0.1061	0.073	G1	0.0708	0.1148	0.1276
C1	0.1432	0	0.1412	C1	0.1041	0.1929	0.1963
C2	0.0872	0.1631	0	C2	0.0774	0.0522	0.064
C3	0.0926	0.1337	0.0781	C3	0	0.1181	0.1386
C4	0.116	0.206	0.0553	C4	0.1209	0	0.0291
D	0.149	0.2028	0.0644	D	0.144	0.058	0
J	0.0797	0.2378	0.0391	J	0.1094	0.05	0.0707
G2	0.0779	0.1831	0.1014	G2	0.1521	0.0757	0.105
C5	0.161	0.1732	0.057	C5	0.0729	0.0785	0.0794

	J	G2	C5
G1	0.0701	0.0777	0.1564
C1	0.1557	0.2136	0.2161
C2	0.0304	0.0488	0.1123
C3	0.0922	0.0735	0.1598
C4	0.0427	0.0647	0.0683
D	0.0698	0.093	0.0782
J	0	0.0737	0.1368
G2	0.0755	0	0.1069
C5	0.0907	0.147	0

### Литологические результаты картирования

Классификационные точности из четырех разных способов суммированы в таблице 5. Можно видеть, что SAM со средним эталонными спектрами и метод МФ имеют аналогичные точности. Два предложенных метода дают значительно более высокую общую точность и. В частности, использование множества опорных спектров SAM приводит к более высокой точности классификации, с общей точностью 79.31% и коэффициент каппа 73,52%.

(коэффициент Каппа - показатель точности классификации, использующий результат классификации и проверочный набор данных)



Таблица 4 Классификационные точности из четырех разных способов

класс	MF	SAM	SAM и первая производная	Метод многократных эталонных спектров SAM
G1	71.12	68.43	80.08	79.58
C1	64.84	62.35	73.47	74.96
C2	57.45	64.34	69.71	75.28
C3	49.51	44.23	59.30	59.88
C4	70.61	70.61	82.79	82.89
D	63.19	61.21	68.60	75.73
J	66.54	72.05	74.31	82.97
G2	66.77	68.27	75.64	81.20
C5	68.73	62.24	72.77	79.33
Others	69.45	74.44	78.43	81.22
OA	66.97	68.72	75.63	79.31
Каппа	57.59	59.30	68.75	73.52

Из анализа статистики (таблица 4) видно, что результаты классификации, полученные предложенными методами являются статистически более точными, чем от SAM со средним спектром и методом СФ (при доверительном уровне 99%). В результате классификации производимый методом многократных эталонных спектров SAM статистически даже лучше, чем SAM со средним спектром и первой производной.

Таблица 5. Сравнение результатов анализа каппа из предложенных методов и существующих методов (на уровне достоверности 99%).

	SAM	SAM и первая производная	Метод многократных эталонных спектров SAM	MF
SAM	/	значительное	значительное	не знач.
SAM и первая производная	12.8494	/	значительное	Знач.
Метод многократных эталонных спектров SAM	19.8758	7,0594	/	Знач.
СФ	2.2245	15,1700	22,2522	/

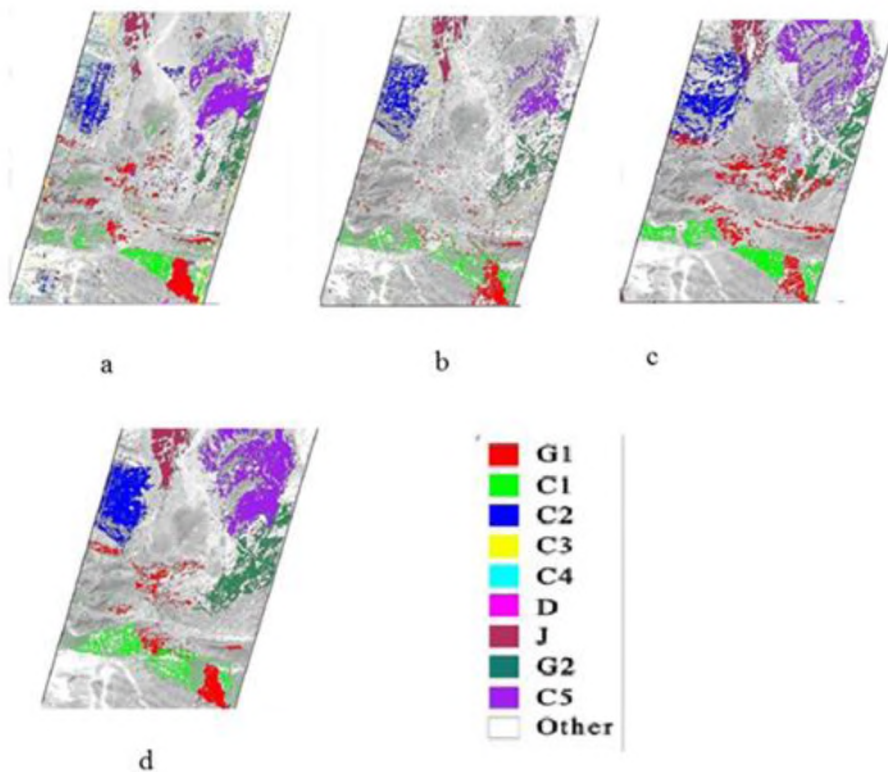


Рисунок 3 Результаты классификации с использованием различных методов.

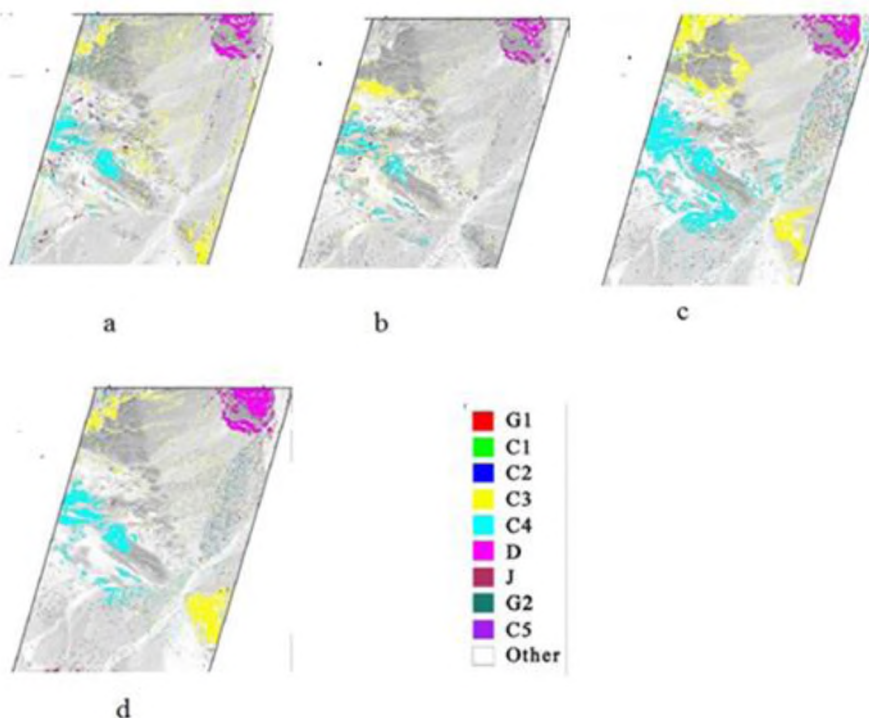


Рисунок 4 Результаты классификации с использованием различных методов.  
К рисункам 3. и 4:

- a) согласованная фильтрация
- b) Литологическое отображение с помощью SAM со средним эталонным спектром
- c) Литологическое отображение путем включения спектральных производных
- d) Литологическое отображение с использованием нескольких эталонных спектров на основе SAM.

Литологические результаты картирования с использованием четырех различных методов приведены на рис. 3 и 4. Путем сравнения с эталонной картой (рис. 3 (b)), результат классификации с использованием SAM со средним эталонным спектром (Рис. 3 (c)) показывает аналогичный вид, что и метод СФ (рис. 3 (a)). Очевидная разница между этими двумя результатами, что есть меньше неправильной классификации между целевыми классами и фона в результате SAM со средним эталонным спектром (т.е. меньше пикселей четвертичных отложений не распознали в качестве целевых классов). По сравнению с этими двумя существующими методами, результаты классификации по предложенной методике улучшаются в разной степени. Например, при использовании средних спектров и их средние первые производные, С3, D, J и С5 классы более точно определены, и есть меньше упущений и ошибок для класса С1 (Рис. 3 (c)). Тем не менее, хотя класс С4 лучше отображается включением первых спектральных производных, чрезмерная оценка класса С4 по-прежнему значительны. При наличии нескольких эталонных спектров SAM, все девять литологических класса более точно определены (рис. 3 (d)).

#### **Выводы:**

В данной работе предложены и использованы производные методы спектрального угла, которые дают более точные результаты при литологическом картировании, в особенности, где есть большое количество примесей. Результаты дополнительных исследуемых методов дали лучшие значения, чем обычный метод спектрального угла и согласованная фильтрация, в особенности в случае использования итерационного процесса.

С использованием сравниваемых методов были получены результаты мониторинга кварца, карбоната и мафита. В дальнейшем рассмотренные методы можно использовать для прогнозирования и других полезных ископаемых. Однако этот процесс требует знаний экспертов во многих областях.

#### **Литература:**

1. Данные Центрально- Азиатский институт прикладных исследований Земли (ЦАИЗ) (электронный ресурс)
2. Кашкин В. Б., Сухинин А. И. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений: Учеб. пособие. — М.: Логос, 2001., 264 с.
3. Труды: Фак. МГУ им. М.В. Ломоносова. Картография, геоинформатика и аэрокосмическое зондирование, 2004, 424 с
4. Чандра А.М., Гош С.К. - Дистанционное зондирование и географические информационные системы, 312 с.
5. Ninomiya, Y., 2002. Mapping quartz, carbonate minerals and mafic-ultramafic rocks using remotely sensed multispectral thermal infrared ASTER data. P SPIE, 4710, pp. 191-202.
6. Ninomiya, Y., 2003. Rock type mapping with indices defined for multispectral thermal infrared ASTER data: case studies. PSPIE, 4886, pp. 123-132.
7. Fu, B.H., Lin, A.M., Kano, K., Maruyama, T., Guo, J.M., 2003. Quaternary folding of the eastern Tian Shan, northwest China. Tectonophysics 369, 79–101
8. Fu, B.H., Zheng, G.D., Ninomiya, Y., Wang, C.Y., Sun, G.Q., 2007. Mapping hydrocarbon-induced mineralogical alteration in the northern Tian Shan using ASTER multispectral data. Terra Nova 19, 225–231.