

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ / ORIGINAL PAPERS

DOI: 10.17073/2500-0632-2019-1-65-75

**Методика обнаружения глинистых минералов и оксида железа
по данным многозональных изображений Landsat
(на примере территории провинции Тхай Нгуен, Вьетнам)**

Чинь Ле Хунг¹, Заблоцкий В. Р.²

¹Технический университет им. Ле Куи Дон, Ханой, Вьетнам, ✉trinhlehung125@gmail.com;

²Московский государственный университет геодезии и картографии, Москва, Россия,
v-r-zablotskii@ya.ru

Аннотация: Многозональные изображения Landsat с успехом использовались для выявления месторождений некоторых полезных ископаемых в разных регионах мира. Некоторые минералы, в том числе глинистые минералы и оксид железа, могут быть обнаружены по данным многозональной съемки из-за их спектральных характеристик. В данной работе представлены результаты применения метода главных компонент и технологии Crosta для обнаружения скоплений глинистых минералов и оксида железа на основе использования многозонального изображения Landsat 8 Oli провинции Тхай Нгуен, север Вьетнама. Полученные результаты показали возможность и целесообразность оперативного определения месторождения полезных ископаемых по данным дистанционного зондирования. Методы и средства обработки изображений, апробированные в этом исследовании, могут использоваться для создания карт распределения глинистых минералов и оксида железа, с целью эффективного и рационального поиска полезных ископаемых и разведки минерального сырья.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, метод главных компонент, минерал, Landsat, Vietnam.

Для цитирования: Чинь Ле Хунг, Заблоцкий В. Р. Методика обнаружения глинистых минералов и оксида железа по данным многозональных изображений Landsat (на примере территории провинции Тхай Нгуен, Вьетнам). *Горные науки и технологии*. 2019;4(1):65-75. DOI: 10.17073/2500-0632-2019-1-65-75.

**The Method of Detection of Clay Minerals and Iron Oxide
Based on Landsat Multispectral Images
(as Exemplified in the Territory of Thai Nguyen Province, Vietnam)**

Le Hung Trinh¹, V. R. Zablotskii²

¹Le Quy Don Technical University, Ha Noi city, Vietnam; ✉trinhlehung125@gmail.com;

²Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia, v-r-zablotskii@ya.ru

Abstract: Landsat multispectral images have been successfully used for discovering some mineral deposits in different regions of the world. Some minerals, including clay minerals and iron oxide, can be detected by multispectral surveys due to their spectral characteristics. This paper presents the results of the application of principal component analysis and Crosta technique for detecting accumulations of clay minerals and iron oxide based on a Landsat 8 Oli multispectral image of Thai Nguyen Province, north of Vietnam. The obtained results have demonstrated the feasibility and suitability of prompt detecting mineral deposits based on the remote sensing data. The image processing methods and facilities tested in this study can be used to create maps of distribution of clay minerals and iron oxide for effective and expedient prospecting and exploration for minerals.

Keywords: remote sensing, principal component analysis, mineral, Landsat, Vietnam.

For citation: Trinh Le Hung, Zablotskii V. R. The method of detection of clay minerals and iron oxide based on Landsat multispectral images (as exemplified in the territory of Thai Nguyen Province, Vietnam). *Mining Science and Technology*. 2019;4(1):65-75. (In Russ.). DOI: 10.17073/2500-0632-2019-1-65-75.

ВВЕДЕНИЕ

Полезные ископаемые являются важнейшим природным ресурсом любой страны. Минеральные ресурсы используются во многих отраслях: при производстве энергии, строительстве, металлургии, сельском хозяйстве и т.д. Поиск и обнаружение минеральных ресурсов – сложная задача. Традиционные методы, основанные на полевых, поисково-съёмочных работах, решают эту проблему, однако имеют высокую стоимость. Технология дистанционного зондирования обладает рядом преимуществ перед наземными способами разведки, что связано как с охватом широкой площади территории, так и с небольшим периодом повторного наблюдения. В работах [1–5, 7–10, 13–18, 20–23] подтверждается возможность использования многозональных изображений (Landsat, Aster) для мониторинга и обнаружения полезных ископаемых. Сканерные изображения фиксируют информацию о подстилающей поверхности в видимой, ближней и средней инфракрасных областях [6, 11, 12]. Это позволяет исследовать физические свойства изучаемой поверхности и делать предположения о почвах и горных породах.

Данные многозонального изображения Landsat использовались в течение ряда лет в засушливых и полузасушливых природных условиях для определения месторождения оксидов железа и гидротермальных минералов. Многие авторы использовали метод спектральных индексов для обнаружения минералов. Например, спектральные индексы, полученные по данным многозонального изображения Landsat и ASTER, использовались для поиска оксида железа (iron oxide), глинистых минералов (clay minerals), магнетита (magnetite content), железных минералов (ferrous minerals) и расчета индексов Abrams, Chica-Olma и Kaufmann [4, 10]. Crosta (1989) [5], Mia и Fujimitsu (2012) [16] использовали метод главных компонент (PCA) для обнаружения месторождений полезных ископае-

мых. Основываясь на методе главных компонентов, Fraser и др. (1997) [10] разработали метод DPCA (directed principal component analysis) для наблюдения за распределением полезных ископаемых. Метод DPCA также использовался в работе Khaleighi и Ranjbar (2011) [14] для картографирования содержания меди в Иране по данным многозональных изображений ASTER. Полученные в этих исследованиях результаты показывают, что метод главных компонент имеет более высокую точность обнаружения минералов, чем метод спектральных индексов.

Данная работа посвящена задаче обнаружения глинистых минералов и оксидов железа в провинции Тхай Нгуен, север Вьетнама, по данным многозональной съемки Landsat 8 с использованием метода главных компонент. В работе также были использованы и некоторые другие методы обработки изображений, включающие создание цветных мозаик, растяжение гистограмм яркости, декорреляция, улучшение краев контуров, слияние изображений, расчет спектральных индексов – для оценки содержания минералов в горных породах и почвах.

МАТЕРИАЛЫ

Исследуемая территория. Провинция Тхай Нгуен находится в северной части Вьетнама, в 80 км от столицы Ханоя (рис. 1). Географические координаты – 21°20' до 22°03' с.ш., 105°52' до 106°14' в.д. Провинцию пересекают несколько горных хребтов, протянувшихся в направлении с северо-запада на юго-восток. На юго-западе провинции расположен горный хребет Тамдао, протяженностью 80 км. Растительный покров в провинции занимает около 80 % площади района, в основном это вновь насаженные леса и фруктовые деревья. Естественные леса остались в небольшой части территории и распространены в высокогорных хребтах. Горная почва занимает 48,4 % площади района, расположена на высотах более 200 м и образована в результате выветривания скаль-

ных и метаморфических пород и других отложений. Почва холмов составляет 31,4 % площади района, сформирована преимущественно на песчанике, алевролите и некоторых древних тектонических отложениях. Провинция Тхай Нгуен – богата минеральными ресурсами, в том числе железом и углем. Картинки некоторых минеральных шахт на исследуемой территории показаны на рис. 3 [24].

Исходные данные. В работе использовалось многозональное изображение, полученное со спутников Landsat 8 Oli, дата съемки 15 июня 2017 (рис. 2). Изображение получено в безоблачную погоду – необходимое условие выполнения съемок. Данное изображение было загружено из сайта Геологической службы Соединённых Штатов (Геологическая служба США – USGS –

<http://glovis.usgs.gov/>) с уровнем обработки L1T [25].

Landsat 8 является восьмым спутником в рамках программы Landsat и седьмым спутником этой серии, выведенный на орбиту Земли. Landsat 8 получает изображения поверхности Земли в видимом, ближнем ИК и тепловом ИК диапазоне, с пространственным разрешением от 15 до 100 м (табл. 1).

МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Для обнаружения оксидов железа и глинистых минералов по данным многозонального изображения Landsat 8 в работе использовался метод главных компонентов (PCA). Этот метод позволяет уменьшить размерность данных с наименьшими потерями ценной для дешифрирования информации.

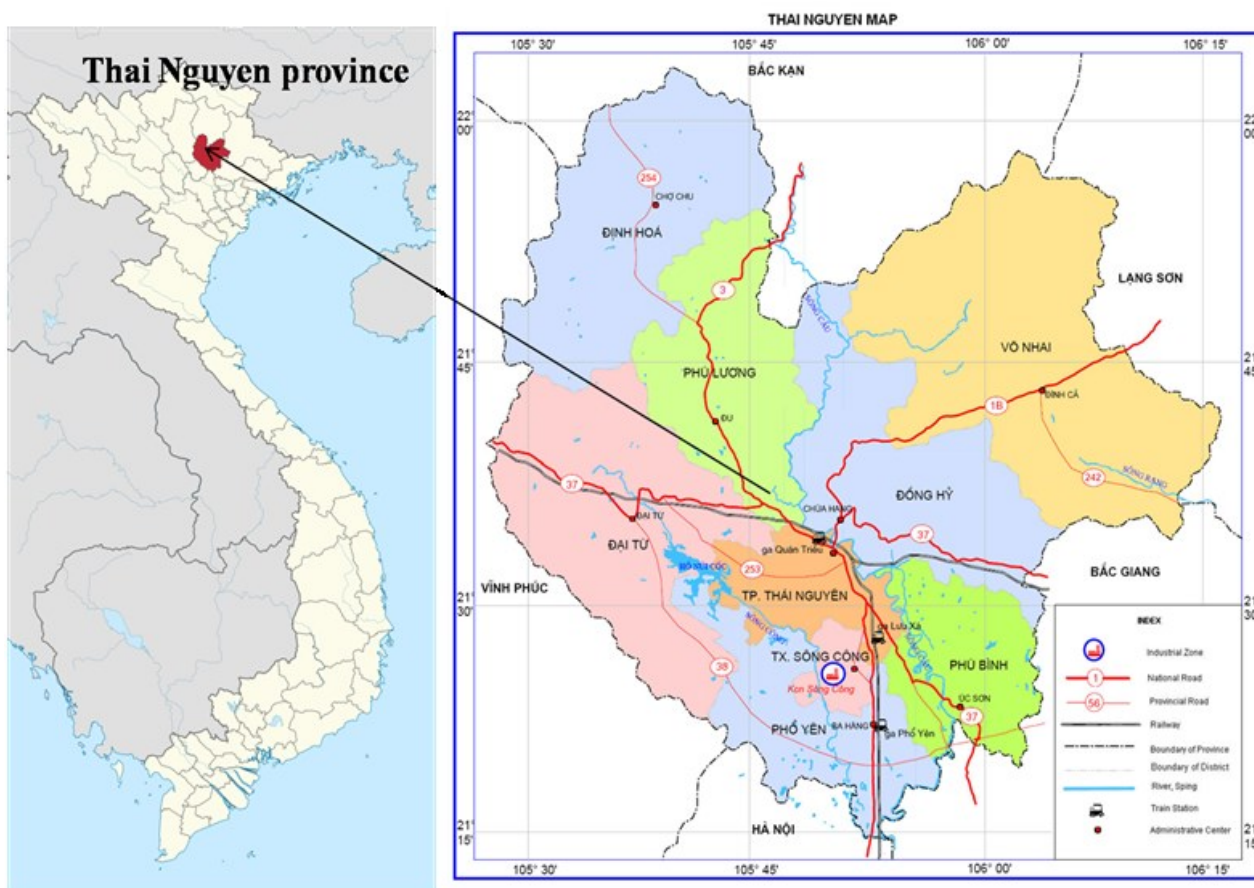


Рис. 1. Местоположение исследуемой территории, провинция Тхай Нгуен, Вьетнам

Fig. 1. Location of the study area, Thai Nguyen Province, Vietnam

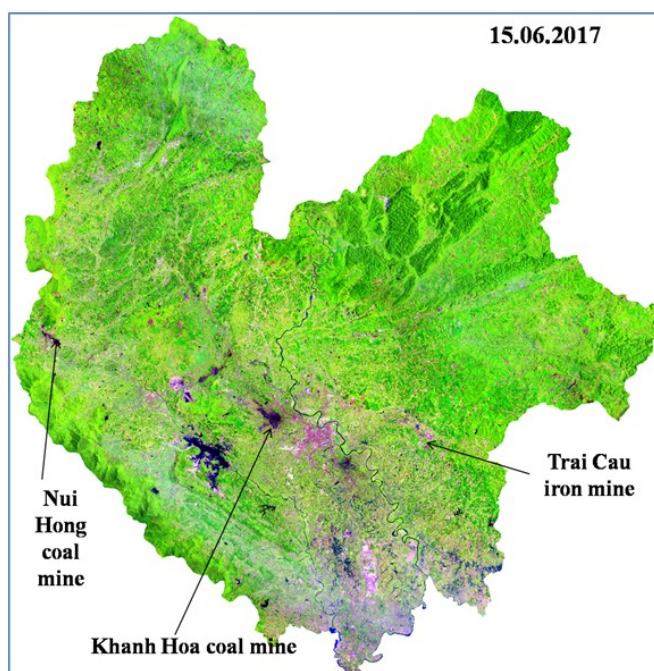


Рис. 2. Многозональное изображение Landsat 8 в провинции Тхай Нгуен, 15.06.2017

Fig. 2. Landsat 8 multispectral image in Thai Nguyen province, 15.06.2017



Рис. 3. Картинки некоторых минеральных шахт на исследуемой территории: угольная шахта Хань Хоа (а), Нуй Хонг (б) и железорудная шахта Чай Кау (в) [24]

Fig. 3. Pictures of some mineral mines in the study area: coal mines Han Hoa (a), Nui Hong (b), and Chai Kau iron ore mine (c) [24]

Таблица 1

Характеристики многозонального изображения, полученного со спутника Landsat 8

Characteristics of the multispectral image received from the Landsat 8 satellite

№	Спектральный канал	Диапазон (μм)	Спектральное разрешение (м)
1	Канал 1 – побережья и аэрозоли	0,433–0,453	30
2	Канал 2 – синий	0,450–0,515	30
3	Канал 3 – зеленый	0,525–0,600	30
4	Канал 4 – красный	0,630–0,680	30
5	Канал 5 – ближний ИК	0,845–0,885	30
6	Канал 6 – средний ИК	1,560–1,660	30
7	Канал 7 – средний ИК	2,100–2,300	30
8	Канал 8 – панхроматический	0,500–0,680	15
9	Канал 9 – перистые облака	1,360–1,390	30
10	Канал 10 – тепловой инфракрасный	10,30–11,30	100
11	Канал 11 – тепловой инфракрасный	11,50–12,50	100

В данной работе показано, что первый главный компонент (PC1) состоит из положительных элементов всех спектральных каналов изображения Landsat 8 (каналы 2, 3, 4, 5, 6 и 7). PC1 составляет около 95,12 % от собственного значения общей дисперсии для данных PCA. Собственный вектор для третьего главного компонента (PC3) указывает на то, что в PC3 преобладает растительность, которая имеет высокую отражательную способность в ближнем ИК диапазоне (канал 5). Отрицательное значение элемента в канале 5 на этом главном компоненте ($-0,77223$) также указывает на то, что растительные пиксели будут черными на этом главном компоненте. Поскольку элементы на собственные векторы для канала 2 и канала 4 в шестом главном компоненте (PC6) (табл. 2) также противоположны по знаку, можно предположить, что оксиды железа будут отличаться яркими пикселями в PC6. Гидроксильные минералы отображаются в виде темных пикселей в PC5 из-за того, что вклад отрицательный от канала 6 и положительный от канала 7 в этом PC5 (табл. 2). Если количество входных каналов уменьшить, чтобы избежать определенного спектрального контраста, вероятность определения уникального главного компонента для обнаружения минералов будет возрастать [15].

Гидроксильные минералы отражают электромагнитное излучение в диапазоне 1,55–1,75 мкм (канал 6 изображения Landsat 8) значительно сильнее, чем в других исследуемых диапазонах, и сильно поглощаются в диапазоне от 2,05 до 2,35 мкм (канал 7) [7]. Таким образом, для обнаружения глинистых минералов используют спектральные каналы в синем (канал 2), ближнем ИК (канал 5) и среднем инфракрасных диапазонах (каналы 6 и 7) изображения Landsat 8. Каналы 3 (зеленый) и 4 (красный) не используются, чтобы избежать влияния оксидов железа и растительного покрова. Результаты преобразования главных компонентов на комбинации каналов 2, 5, 6 и 7 изображения Landsat 8 для территории провинции Тхай Нгуен (Вьетнам) показаны в табл. 3. Анализ полученных результатов показал, что PC4 с относительно сильной положительной нагрузкой для канала 7 (0,7384) и умеренной отрицательной нагрузкой для канала 6 ($-0,5791$) может использоваться для обнаружения гидроксильных минералов. PC4 выделяет гидроксильные минералы как темные пиксели. С помощью метода инверсии гидроксильные минералы представлены светлыми пикселями на PC4 (рис. 4, а).

Таблица 2

Результаты анализа главных компонентов для 6 мультиспектральных каналов изображения Landsat 8

The findings of main component analysis for 6 multispectral image channels of Landsat 8

Канал	B2	B3	B4	B5	B6	B7	Собственное значение (%)
PC1	0,32708	0,26698	0,22964	0,38848	0,39815	0,64149	95,123
PC2	-0,14263	0,05132	0,24151	0,03498	0,60180	0,58675	2,689
PC3	0,22824	0,23004	0,46350	-0,77223	-0,15801	0,11465	1,935
PC4	-0,09365	-0,38327	-0,56946	-0,42576	0,36687	0,33932	0,196
PC5	-0,17823	0,13023	0,12403	-0,25107	-0,54775	0,06205	0,035
PC6	-0,56011	-0,53438	0,54677	0,08179	-0,08079	0,28967	0,023

Таблица 3

Результат анализа главных компонент для обнаружения гидроксильных минералов

The findings of main component analysis for identifying hydroxyl minerals

Главные компоненты	Собственный вектор				Собственное значение (%)
	B2	B5	B6	B7	
PC1	0,3566	0,6158	0,6218	0,3270	95,481
PC2	0,1340	0,6730	-0,4379	-0,5808	3,119
PC3	-0,9072	0,2833	0,2935	-0,1024	1,310
PC4	-0,1783	0,2959	-0,5791	0,7384	0,090

Таблица 4

Результат анализа главных компонент для обнаружения глинистых минералов

The findings of main component analysis for identifying clay minerals

Главные компоненты	Собственный вектор				Собственное значение (%)
	B2	B4	B5	B6	
PC1	0,3680	0,2381	0,6351	0,6360	95,775
PC2	0,0992	0,4337	-0,7340	0,5132	2,410
PC3	-0,7739	-0,3509	0,0548	0,5244	1,724
PC4	0,5058	-0,7951	-0,2343	0,2389	0,091

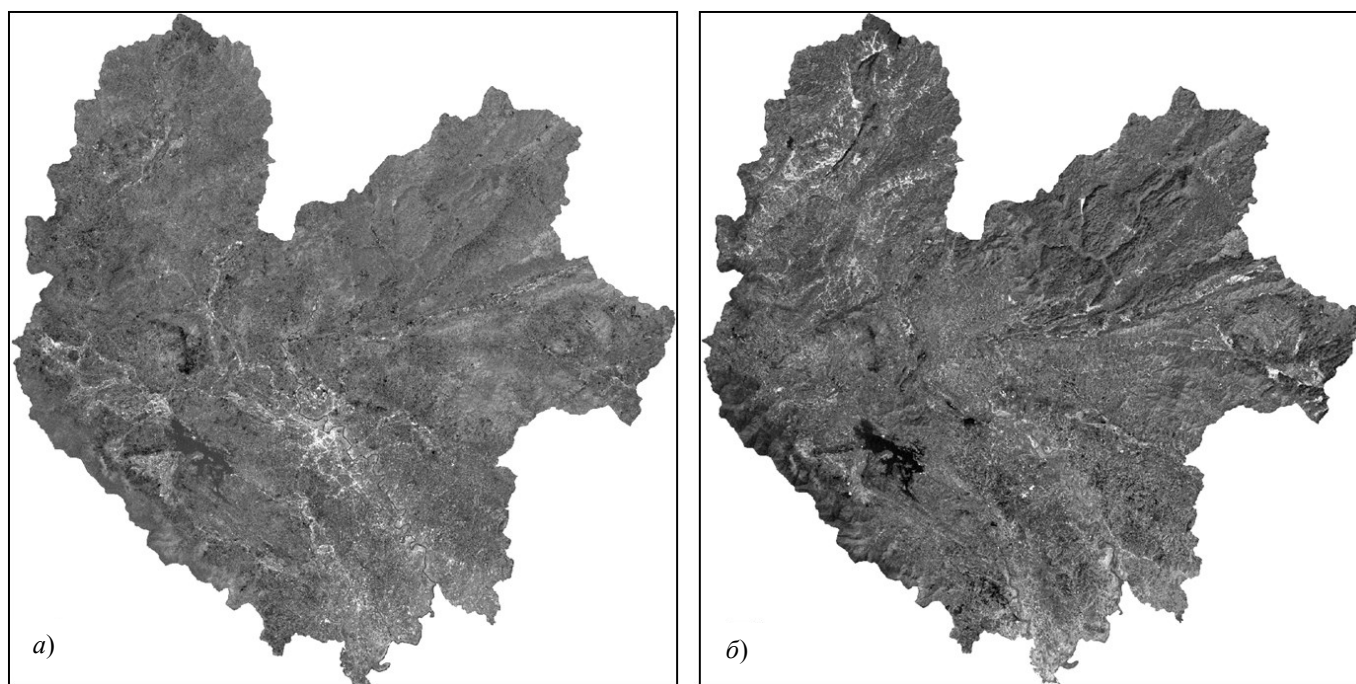


Рис. 4. Компонент PC4, яркие пиксели указывают на местоположение гидроксильных минералов (а) и оксидов железа (б)

Fig. 4. Component PC4, bright pixels indicate the location of hydroxyl minerals (a) and iron oxides (b)

Аналогично для обнаружения оксидов железа в работе используют спектральные каналы 2, 4, 5 и 6 изображения Landsat 8. Зеленый канал (канал 3) не используется, чтобы избежать влияния растительности на результаты обнаружения минералов. Результаты преобразования главных компонент в комбинации каналов 2, 4, 5 и 6 изображения Landsat 8 на территории провинции Тхай Нгуен (Вьетнам) показаны в табл. 4. В этом случае PC4 выделяет оксид железа как темные пиксели (элемент собственного вектора для канала 4 равен $-0,7951$ и для канала 2 $+0,5058$). Это изображение (PC4) можно инвертировать по яркости (**brightness inverse**), чтобы показать местоположение оксидов железа как яркие пиксели (рис. 4, б).

Изображения главных компонент (PC4) для гидроксильных минералов и оксидов железа объединяются для создания одного изображения, отображающего пиксели с аномальными концентрациями как гидроксидов, так и оксидов железа, – как самых ярких. Это слияние двух изображений также получено с помощью метода главных компонен-

тов, таких как PC1, имеющих положительные собственные значения для обоих входных изображений. Затем эти изображения комбинируются с использованием технологии Crosta для получения трехслойного изображения. Блок-схема метода обработки изображений для обнаружения гидроксильных минералов и оксидов железа по данным многозонального изображения Landsat 8 показана на рис. 5.

Для обработки многозонального изображения был создан пакет программ RS-MINERALS на основе языка программирования Matlab. Пакет предназначен для анализа спутниковых изображений по методу главных компонент. Пакет программ RS-MINERALS обеспечивает возможность открытия и обработки спутниковых изображений в формате TIFF, включая основные модули, такие как View (отображения), Idicies (спектральные индексы), PCA (метод главных компонент), DPCA (directed PCA), Interpreter (обработка изображений). Интерфейс программы показан на рис. 6.

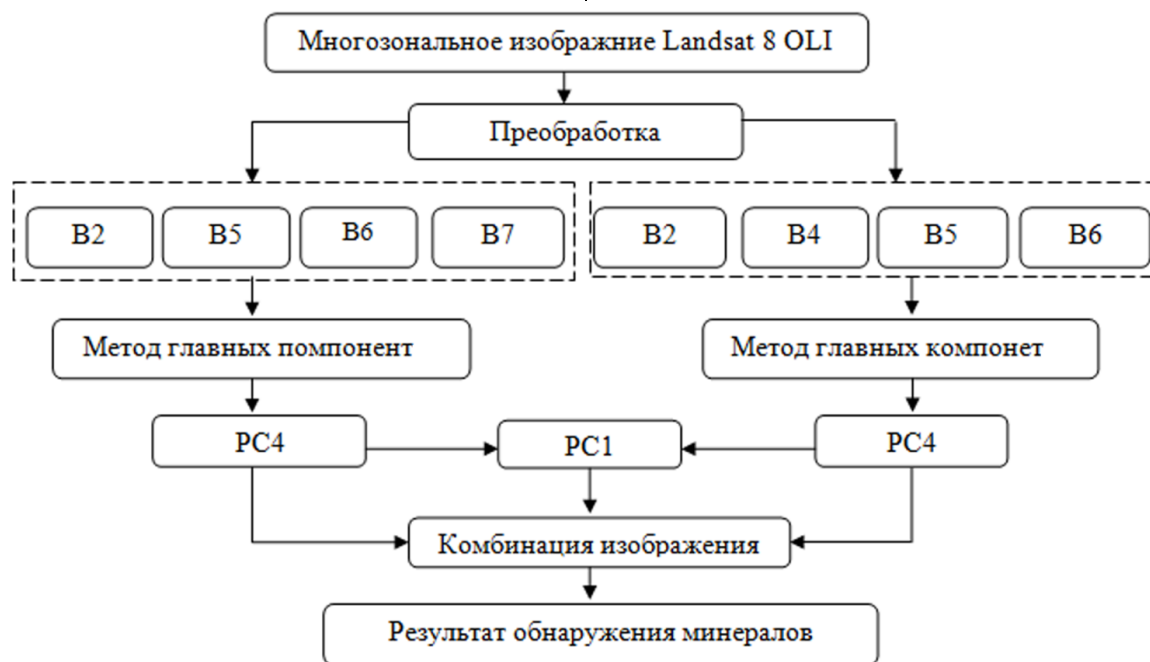


Рис. 5. Метод обработки изображений для обнаружения гидроксильных минералов и оксида железа с использованием многозонального изображения Landsat 8 Oli

Fig. 5. Image processing method for detection of hydroxyl minerals and iron oxide using a Landsat 8 Oli multispectral image



Рис. 6. Интерфейс программы RS-MINERALS

Fig. 6. RS-MINERALS software program interface

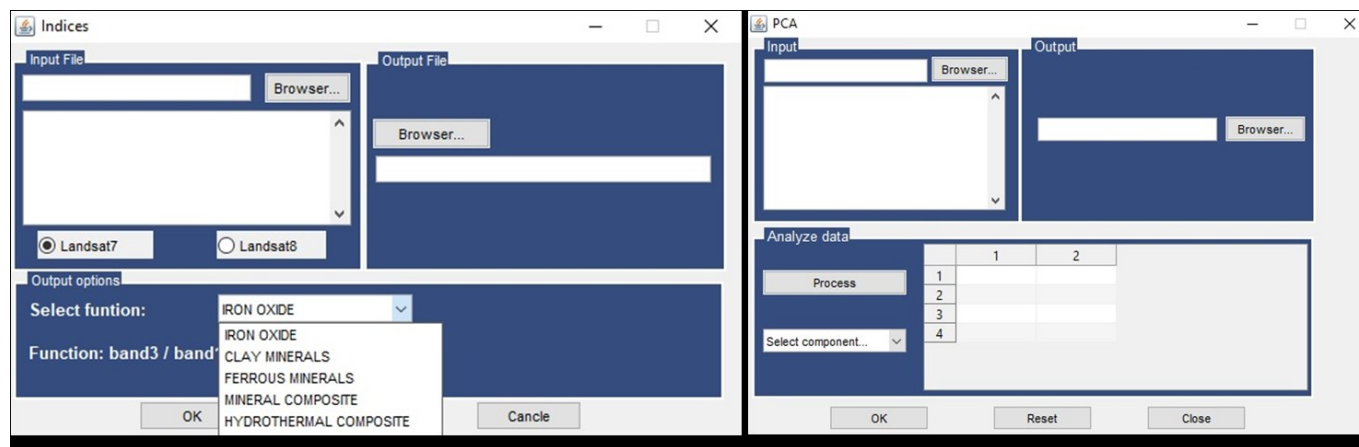


Рис. 7. Модули PCA (а) и Indices (б) в пакете программ RS-MINERALS

Fig. 7. PCA (a) and Indices (b) modules in the RS-MINERALS software package

Модуль PCA позволяет вычислять главные компоненты для снимков Landsat. На выходе программа отображает собственные векторы и собственные значения для выбранных главных компонентов, содержащих наиболее ценную информацию о минералах (рис. 7, а).

Модуль Indices позволяет рассчитывать минеральные индексы, такие как глинистые минералы (clay minerals), оксид железа (iron oxide), железистые минералы (ferrous minerals), минеральные композиты (mineral composite), индекс Abramm, индекс Kaufmann и индекс Chica-Olma (рис. 7, б).

Модуль Interpreter имеет инструменты комбинации спектральных каналов многозонального изображения (Band combinations) и инверсии яркости (Brightness inversion). Инструмент «Brightness inversion» позволяет инвертировать яркость пикселей, чтобы выделить местонахождение минералов по изображению основного компонента.

Модуль DPCA позволяет выделить местонахождение полезных ископаемых по методу DPCA, описанному Fraser и Green

(1987). В этом методе PC1 рассчитывается из отношений спектральных каналов Landsat TM: (канал 4/канал 3) и (канал 5/канал 7). Изображение (канал 5/канал 4) и изображение (канал 7 + канал 1) использовались для создания цветного RGB изображения.

Результат комбинации изображения для обнаружения гидроксильных минералов и оксида железа показал на рис. 8. На этом изображении белые пиксели представляют области, богатые как гидроксильными, так и железными минералами. Области, в которых содержится много гидроксильных минералов, показаны от ярко-красного до оранжевого цвета, а районы, богатые железом, – от яркого голубого до синего [15].

Для оценки точности обнаружения гидроксильных минералов и оксида железа по данным многозональной съемки Landsat 8 в работе использовалась карта минералов провинции Тхай Нгуен, Вьетнам, масштабом 1 : 200 000 (рис. 9). Полученные результаты показали, что железные минералы распределены по большей части провинции Тайгун

Нгуен. Место расположения крупных железорудных шахт, таких как Trai Cau (Чай Кау), Hoa Trung (Хоа Чунг), Linh Nham (Линь Ньям), Thanh Chu (Тхань Чу), Tien Bo (Тьен Бо) отчетливо отображается на изображении после цветовой комбинации с использовани-

ем технологии Crosta. Результаты также показали, что гидроксильные минералы сосредоточены в районах местонахождения крупных угольных шахт, таких как Nui Hong (Нуй Хонг), Khanh Hoa (Хань Хоа), Phan Me (Фан Ме) (см. рис. 8).

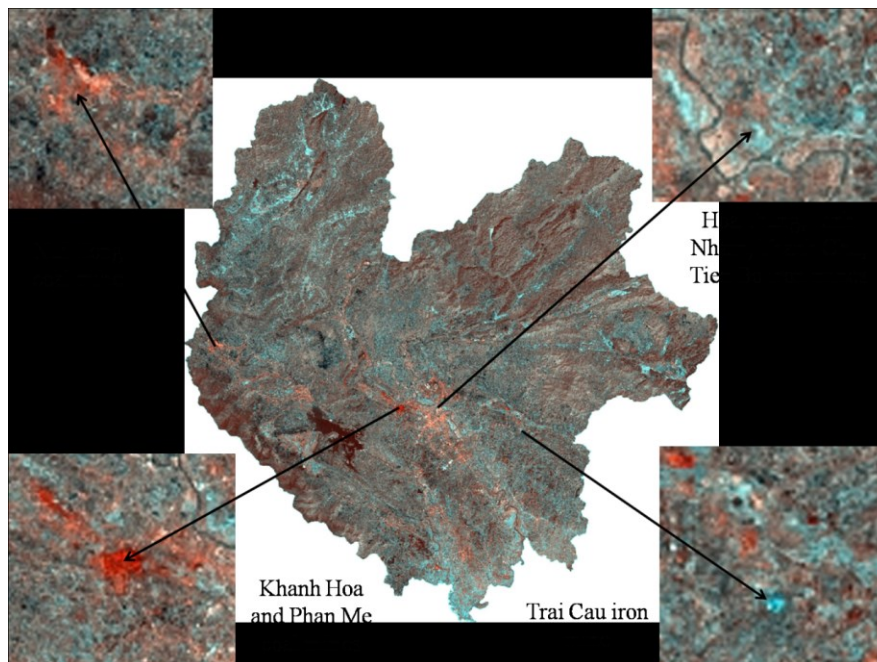


Рис. 8. Комбинация изображения на основе технологии Crosta

Fig. 8. Crosta-based image combination

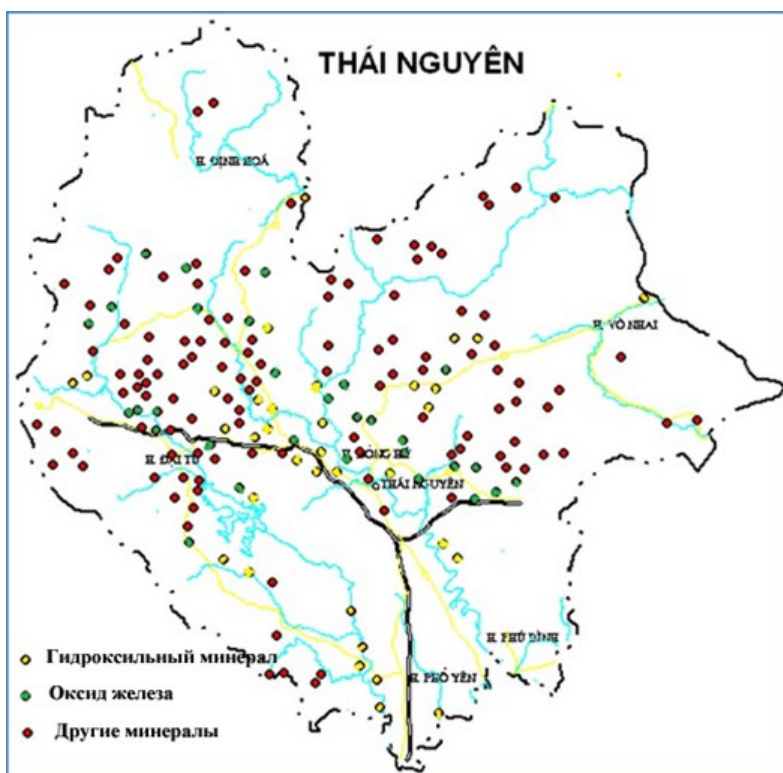


Рис. 9. Карта минералов провинции Тхай Нгуен (Вьетнам), масштаб 1: 200 000

Fig. 9. Map of minerals of Thai Nguyen province (Vietnam), scale 1 : 200,000

ВЫВОДЫ

Многозональные изображения Landsat 8 могут использоваться эффективно для обнаружения и прогнозирования месторождения гидроксильных минералов и оксида железа. Метод анализа главных компонентов способен обнаруживать минералы с большей надежностью вследствие устранения дублирующей информации в спектральных каналах. В данной работе гидроксильные минералы и оксид железа были обнаружены в горной породе, а также в открытых почвах в окрестности горнодобывающих предприятий.

Выбросы горной породы вокруг шахт очень хорошо дешифрируются на изображениях главных компонентов на основе технологии Crosta. В провинции Тхай Нгуен на территории с разреженным растительным покровом, гидроксильные минералы и оксид железа могут также обнаруживаться по результатам дешифрирования скальных пород и песчаных отложений. Результаты, полученные в данной работе, могут быть использованы для создания и обновления карты распределения минералов с целью прогнозирования новых скоплений минерального сырья.

Библиографический список / References

1. Опарин В. Н., Потапов В. П., Гинлиятуллина О. Л. О комплексной оценке состояния окружающей среды по данным дистанционного зондирования земли в регионах с высокой техногенной нагрузкой // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2014. № 6. С. 199–209.
2. Oparin V. N., Potapov V. P., Ginliyatullina O. L., On comprehensive assessment of environmental condition based on data of earth remote sensing in regions with high man-induced impact: Physical and technical issues of mining, 2014, No. 6, pp. 199–209. (in Russ.)
3. Усиков В. И., Липина Л. Н. Оценка геоэкологической ситуации в районе Малого Хингана по данным дистанционного зондирования земной поверхности // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2018. № 2. С. 154–160.
4. Usikov V. I., Lipina L. N. Evaluation of geoeological situation in the area of Maly Khingan based on data of remote sensing of the earth's surface: Physical and technical issues of mining, 2018, No. 2, pp. 154–160. (in Russ.)
5. Abrams M. J. Remote sensing of porphyry copper in Southern Arizona, Economic Geology, 1983, No. 78, pp. 591–604.
6. Alasta A. F. Using remote sensing data to identify iron deposits in central western Libya, International conference on Emerging trends in Computer and Image processing, Bangkok, 2011, pp. 56–61.
7. Crosta A. P., Moore J. M. Enhancement of LANDSAT Thematic Mapper imagery for residual soil mapping in SW Minas Gerais State Brazil: a prospecting case history in greenstone belt terrain, Proceedings of the 9th Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology, Calgary (Ann Arbor, MI: Environmental Research Institute of Michigan), 1989, pp. 1173–1187.
8. Clark R. N., Swayze G. A., Wise R., Livo K. E., Hoefen T. M., Kokaly R. F., Sutley S. J. USGS Digital Spectral library, USGS Open file Rep, 1989.
9. Dematte J. A. M., Fiorio P. R., Ben-Dor E. Estimation of soil properties by orbital and laboratory reflectance means and its relation with soil classification, The Open Remote Sensing Journal, 2009, Vol. 2, pp. 12–23.
10. Dogan H.D. (2012). Mineral composite assessment of Kelkit River Basin in Turkey by means of remote sensing, Journal Earth System Science, Vol. 118(6), pp. 701–710.
11. Fongaro C., Dematte J., Rizzo R., Safanelli J., Mendes W., Dotto A., Vicente L., Franceschini M., Ustin S. Improvement of Clay and Sand Quantification Based on a Novel Approach with a Focus on Multispectral Satellite Images, Remote Sensing, 2018, 10, 1555; doi:10.3390/rs10101555.
12. Fraster S. J., Green A. A. A software defoliant for geological analysis of band ratio, International journal of remote sensing, 1997, Vol. 8, pp. 525–532.
13. Goetz A. F., Rock F. H., Rowan B. N. Remote sensing for exploration: An overview, Economic Geology, 1983, Vol. 78, 573–590.
14. Hunt G. R., Ashley R. P. Spectra of altered rocks in the visible and near infrared, Economic Geology, 1979, Vol. 74, pp. 1613–1629.
15. Kaufman H. Mineral exploration along the Agaba-Levant structure by use of TM-data concepts, processing and results, International Journal of Remote Sensing, 1988, 9:1630–1658.
16. Khaleghi M., Ranjbar H. Alteration mapping for exploration of porphyry copper mineralization in Sar-duiyed area, Kerman province, Iran using ASTER SWIR data, Australian Journal of Basic and Applied Sciences,

2011, 5(8), pp. 61–69.

15. Loughlin W. P. Principal component analysis for alteration mapping, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1991, 57(g), pp. 1163–1169

16. Mia M. B., Fujimitsu Y. Mapping hydrothermal altered mineral deposits using LANDSAT 7 ETM+ image in and around Kuju volcano, Kyushu, Japan, *Journal Earth System Science*, 2012, Vol. 121(4), pp.1049–1057.

17. Pour A. B., Hashim M. Integrating PALSAR and ASTER data for mineral deposits exploration in tropical environments: a case study from Central Belt, Peninsular Malaysia, *International Journal of Image and Data Fusion*, 2015, 6(2), pp. 170–188.

18. Pour A. B., Park T., Park Y., Hong J., Zoheir B., Pradhan B., Ayoobi I., Hashim M. Application of Multi-Sensor Satellite Data for Exploration of Zn–Pb Sulfide Mineralization in the Franklinian Basin, North Greenland, *Remote Sensing*, 2018, 10(8), 1186; doi:10.3390/rs10081186.

19. Singh A., Harrison A. Standardized principal components, *International Journal of Remote Sensing*, 6(6), 1985, pp. 883–896.

20. Sridhar B. B., Vincent R. K. Mapping and estimation of phosphorus and copper concentrations in Fly Ash spill area using LANDSAT TM data, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2009, Vol. 75(9), pp. 1030–1033.

21. Trinh L. H. Application of remote sensing technique to detect and map iron oxide, clay minerals and ferrous minerals in Thai Nguyen province, *Горные науки и технологии*, 2016, Vol. 1, 60 – 66.

22. Trinh L. H. Application of band ratio method to detect iron oxide, clay minerals and ferrous minerals, *Mining Industry Journal*, 2014, Vol. 4, pp. 19–24.

23. Van der Meer F. D., van der Werff H. M. A., van Ruitenbeek F. J. A. Potential of ESA's Sentinel-2 for geological applications, *Remote Sensing of Environment*, 2014, 148, 124–133

24. Vietnam national coal-mineral industries holding corporation limited (Vinacomin). Available at: www.vinacomin.com.vn.

25. The official website of GloVis. Available at: <http://glovis.usgs.gov>.