

УДК 528.88(15)

С.Л. Кравцов

## О ПРИМЕНЕНИИ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ В ГЕОЛОГИИ

*Излагаются основы спектроскопии минералов, а также индексы минералов для изображений многоспектральных сенсоров Landsat TM/ETM+ и Terra ASTER. Представляются результаты вычисления индексов минералов по изображениям многоспектральных сенсоров Landsat ETM+ и Terra ASTER, а также относительного содержания минералов по изображению гиперспектрального сенсора AVIRIS.*

### Введение

Для минералов химический состав (присутствие специфических химических элементов или ионов, заряд некоторых ионов и т. д.) и кристаллическая структура определяют форму спектра, а также наличие, относительную глубину, ширину полуглубины и местоположение полос поглощения. В этой связи в геологических исследованиях все более широкое применение находят методы дистанционного зондирования, основанные на использовании многоспектральных и гиперспектральных данных. Это позволяет в короткие сроки выявить новые перспективные участки месторождений полезных ископаемых (минералов) и, что особенно существенно, снизить стоимость геологоразведочных работ по освоению новых месторождений [1].

### 1. Спектроскопия минералов

На сегодняшний день известно более 4 тыс. минералов и существует множество вариантов их классификации. Общепринятая в настоящее время кристаллохимическая классификация подразделяет все минералы на классы: самородные элементы и интерметаллические соединения; сульфиды, сульфосоли и им подобные соединения; галогениды (фториды, хлориды, бромиды и иодиды); окислы (простые и сложные окислы, гидроокислы, содержащие гидроксил); кислородные соли (нитраты, карбонаты, сульфаты, хроматы, вольфраматы, молибдаты, фосфаты, арсенаты, ванадаты, бораты, силикаты); органические соединения.

*Карбонаты* – соли угольной кислоты (слагают около 1,8 % массы земной коры). Известно около 80 минералов, но наиболее распространены карбонаты *Ca* и *Mg*. Они имеют большое практическое значение как руды и строительный материал. К минералам класса карбонатов относятся: кальцит  $\{CaCO_3\}$ , доломит  $\{MgCO_3\}$ , сидерит  $\{FeCO_3\}$ . Спектры карбонатов содержат диагностические колебательные полосы поглощения, обусловленные ионом  $CO_3^{2-}$ . В свободном ионе  $CO_3^{2-}$  есть четыре колебательные моды [2]: симметричное колебание  $\nu_1=9,407$  мкм; боковой изгиб  $\nu_2=11,4$  мкм; асимметричное колебание  $\nu_3=7,067$  мкм (как правило, наиболее сильное) и плоскостной изгиб  $\nu_4=14,7$  мкм (рис. 1, з). Комбинационные полосы и полосы обертонов фундаментальных колебаний  $CO_3^{2-}$  расположены в ближней ИК-области спектра. При этом наиболее сильны (и одновременно наиболее широки) две полосы поглощения:  $\nu_1 + 2 \cdot \nu_3$  в диапазоне 2,50–2,55 мкм и  $3 \cdot \nu_3$  в диапазоне 2,30–2,35 мкм (рис. 1, а). Три более слабых полосы поглощения расположены в диапазонах около 2,12–2,16 мкм ( $\nu_1 + 2 \cdot \nu_3 + \nu_4$  или  $3 \cdot \nu_1 + 2 \cdot \nu_4$ ), 1,97–2,00 мкм ( $2 \cdot \nu_1 + 2 \cdot \nu_3$ ) и 1,85–1,87 мкм ( $\nu_1 + 3 \cdot \nu_3$ ) [2].

*Сульфаты* – соли серной кислоты (около 0,1 % массы земной коры). Существует до 260 минералов этого класса. Некоторые сульфаты образуют крупные скопления и имеют большое значение для строительной и химической промышленности. Ион сульфата  $SO_4^{2-}$  обуславливает группу

интенсивных фундаментальных колебаний около 8,7 мкм и две или более изгибные моды около 16 мкм (например, спектры гипса  $\{CaSO_4 \cdot 2H_2O\}$  и алунита  $K(Al_3(OH)_6(SO_4)_2)$ ), рис. 1, д) [3, 4]. Более слабые особенности в спектрах сульфатов расположены на более коротких длинах волн по сравнению с сильными фундаментальными колебаниями. Сложная особенность около 4,6 мкм обусловлена комбинационными тонами иона  $SO_4^{2-}$ , сопровождаемыми водными комбинационными тонами.

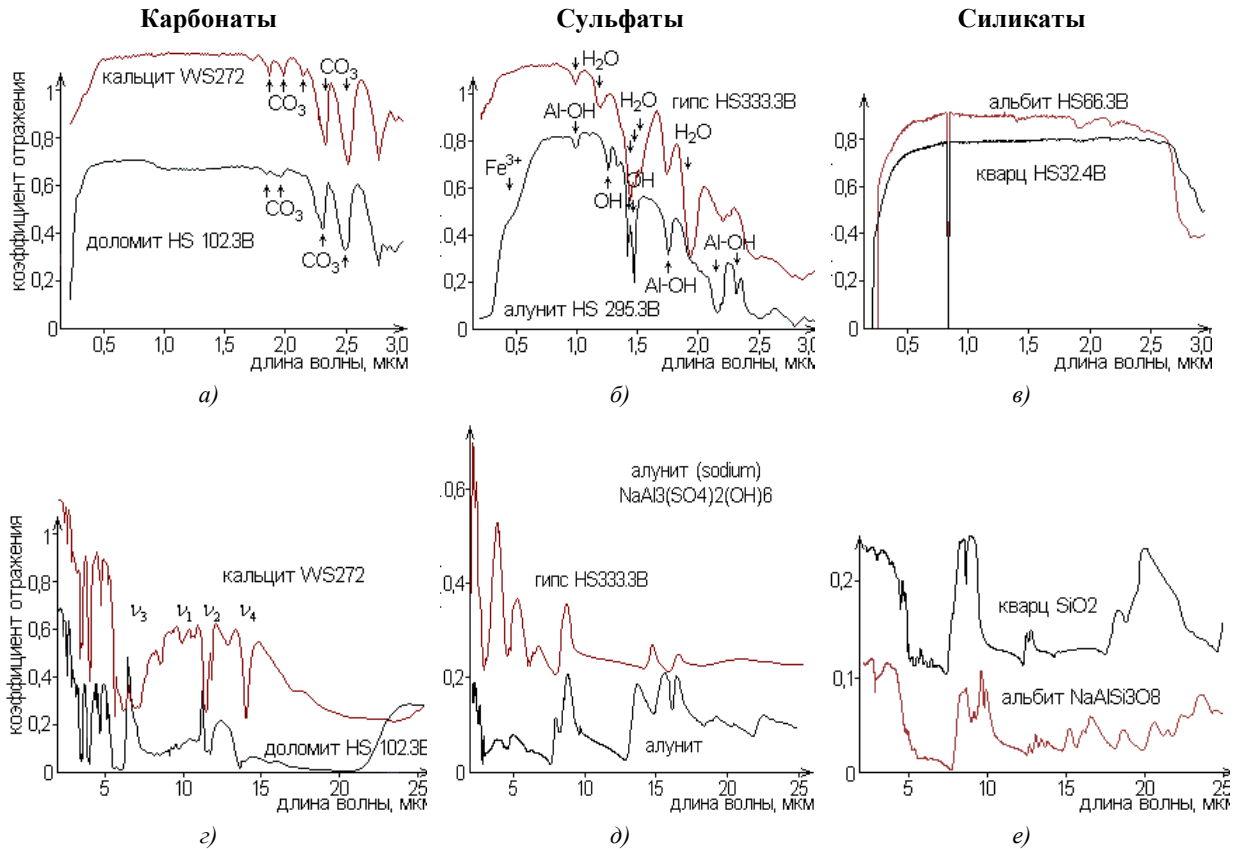


Рис. 1. Спектры минералов класса карбонатов, сульфатов и силикатов:  
 а), б), в) видимая/ближняя ИК-области спектра; г), д), е) ИК-область спектра.  
 Спектр кальцита смещен вверх на 0,2; гипса – на 0,2; кварца на рис. 1, е – на 0,1  
 (воспроизведено из библиотек спектров USGS (USGS Spectroscopy Lab., США)  
 и ASTER (Jet Propulsion Laboratory, США))

**Силикаты** – наиболее многочисленная (около 800 видов) группа породообразующих минералов, слагающая до 80 % массы земной коры. Силикаты имеют сложный химический состав. Чаше их компонентами являются  $Si$ ,  $Al$ ,  $Fe$ ,  $Mg$ ,  $Ca$ ,  $Na$ ,  $K$ , реже –  $Mn$ ,  $Fe$ ,  $B$  и др. К классу силикатов относят минералы: кварц  $\{SiO_2\}$ , ортоклаз  $\{K[AlSi_3O_8]\}$ , микроклин  $\{K[AlSi_3O_8]\}$ , альбит  $\{NaAlSi_3O_8\}$ , анортит  $\{CaAl_2Si_2O_8\}$ . Силикаты обычно не имеют явно выраженных полос поглощения в видимой, ближней и средней ИК-областях спектра. Наиболее интенсивные спектральные особенности силикатов, расположенные в области 8–12 мкм, обусловлены фундаментальными асимметричными  $Si-O-Si$  валентными колебаниями (полоса 9,2 мкм в кварце, рис. 1, е). Когда  $Al$  заменяет  $Si$ , также возникают валентные колебания  $Si-O-Al$ . Для кварца это проявляется в виде четкой двойной полосы в области 8–10 мкм [3].

Вторая группа наиболее интенсивных полос поглощения силикатов, расположенная в области 18–25 мкм (полоса около 25 мкм для кварца), характеризуется как деформационные колебания  $O-Si-O$ , или изгибные моды [3]. Катион  $Al$  и другие могут внести дополнитель-

ные полосы в этой области. Более слабые полосы в спектре кварца в диапазоне 12–15 мкм (12,5, 12,7 и 14,5 мкм) вызваны симметрическими валентными колебаниями  $Si-O-Si$ . Если некоторые атомы  $Si$  заменяются  $Al$ , то добавляются дополнительные валентные колебания  $Si-O-Al$  в более широком диапазоне. Например, спектр альбита содержит восемь характерных полос в диапазоне 12–20 мкм (рис. 1, е). Дополнительные слабые полосы (впадины – полосы тона обертона/комбинации внутренних и собственных колебаний) в спектрах силикатов расположены в диапазоне 3–7 мкм.

**Пироксены** (цепочечные силикаты) – группа минералов, в структуре которых имеются цепочки  $[SiO_4]^{4-}$  тетраэдров. Период идентичности таких цепочек равен двум. Общую формулу пироксенов можно записать как  $R_2^{2+}[Si_2O_6]$ . Основными элементами, входящими в состав минералов в качестве катионов ( $R$ ), являются  $Mg, Fe^{2+}, Fe^{3+}, Ca, Na, Al, Mn$ . Многие пироксены – породообразующие минералы. Ион металла обуславливает наличие в спектре сильных полос поглощения в видимой и ближней ИК-областях (например, спектрах диопсида  $\{CaMgSi_2O_6\}$  с частичной заменой  $Mg$  на  $Fe^{2+}$  и бронзита  $\{(Mg, Fe)SiO_3\}$  с преобладанием  $Mg$ , рис. 2, а, в) [2]. Фундаментальные колебания  $Si-O$  в спектрах пироксенов в ИК-области спектра подобны колебаниям других силикатов.

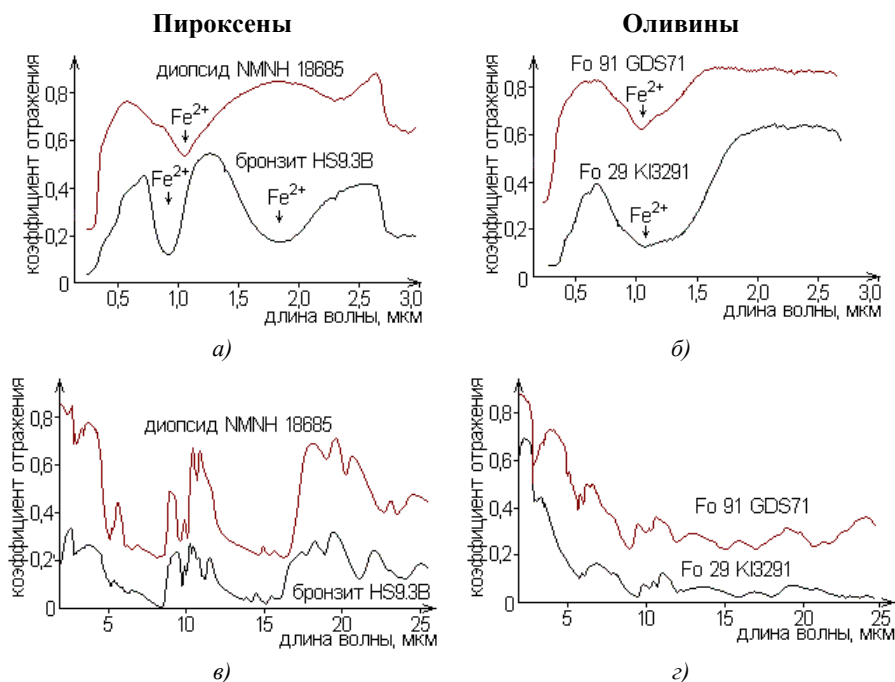


Рис. 2. Спектры пироксенов и оливинов:  
а), б) видимая/ближняя ИК-области спектра; в), з) ИК-область спектра.  
Спектр диопсида смещен вверх на 0,2  
(воспроизведено из библиотеки спектров USGS (USGS Spectroscopy Lab., США))

**Оливины** относятся к подклассу островных силикатов с общей формулой  $A_2[SiO_4]$  ( $A$  – двухвалентные катионы, которые могут быть представлены следующими химическими элементами:  $Mg, Fe, Mn, Ni, Zn, Ca, Pb$ ). В группу оливинов входят минералы: форстерит  $\{Mg_2[SiO_4]\}$ , собственно оливин  $\{(Mg, Fe)_2[SiO_4]\}$ , фаялит  $\{Fe_2[SiO_4]\}$ , тэфроит  $\{Mn_2[SiO_4]\}$ , кнебелит  $\{(Fe, Mn)_2[SiO_4]\}$ , монтичеллит  $\{CaMg[SiO_4]\}$ , кирштейнит  $\{CaFe[SiO_4]\}$ , глаукохroit  $\{CaMn[SiO_4]\}$ .

Спектр оливинов имеет три сильных и несколько более слабых полос поглощения в диапазоне 6–50 мкм. Наиболее сильная полоса в спектре оливинов обусловлена колебанием  $SiO$  около 10 мкм с двумя более слабыми изгибами  $SiO$  около 25 и 19 мкм и еще более слабыми полосами поглощения около 35 и 16 мкм. Спектры форстерита с различным содержанием  $FeO$  представлены на рис. 2, б, г. Образец Fo 29 имеет содержание  $FeO$  53,65 %, тогда как Fo 91 – 7,93 %. Полоса поглощения около 1 мкм обусловлена ионом  $Fe^{2+}$  [2]. Присутствие  $Mg$  вызывает сильное поглощение около 23 мкм в спектре Fo 91. Для обоих образцов асимметричное фундаментальное колебание  $Si-O-Si$  расположено около 11 мкм, а более слабое симметричное поглощение – около 12 мкм.

*Оксиды и гидроксиды железа, железные сульфаты* – важная группа минералов для дистанционного зондирования из-за схожих, сильных, хорошо идентифицируемых полос поглощения в видимой и ближней ИК-областях спектра. К этой группе минералов относятся: гематит  $\{Fe_2O_3\}$ , гетит  $\{FeOOH\}$ , ярозит  $\{KFe_3[SO_4]_2(OH)_6\}$ . Полосы поглощения, обусловленные наличием  $Fe^{2+}$  и  $Fe^{3+}$ , являются сложными и многочисленными. Так, содержание  $Fe^{2+}$  вызывает широкую полосу поглощения около 1 мкм, а также меньшие полосы поглощения около 0,5 и 0,55 мкм. Полосы поглощения около 0,4, 0,7 и 0,85 мкм указывают на  $Fe^{3+}$  (рис. 3, а). Двойная структура полос поглощения около 0,6 и 1,1 мкм обусловлена одновременным присутствием  $Fe^{2+}$  и  $Fe^{3+}$ .

*Минералы  $Fe-Mg-OH$* . К содержащим  $Mg$  силикатам относятся хлорит  $\{(Mg, Fe)_5(Al, Fe^{3+})_2Si_3O_{10}(OH)_8\}$ , тальк  $\{Mg_3Si_4O_{20}(OH)_2\}$  и роговая обманка. Спектры этих минералов содержат острые, часто многочисленные полосы поглощения в области 2,3–2,4 мкм, относящиеся к группе  $Mg-OH$  (рис. 3, б). *Амфиболы* (ленточные силикаты) – соли метакремниевой кислоты  $H_{16}Si_8O_{24}$ . Структура амфибол определяется соединенными в цепи  $Al-Si$  тетраэдрами, но они вдвое шире, чем «пироксеновые цепи», и их называют лентами. К группе амфибол относятся минералы: тремолит  $\{Ca_2Mg_5[Si_4O_{11}]_2[OH]_2\}$ , актинолит  $\{Ca_2(Mg, Fe)_5[Si_4O_{11}]_2[OH]_2\}$  и роговая обманка. Для спектров амфибол характерны слабые гидроксильные полосы поглощения около 1,4 мкм, а также две полосы поглощения вследствие наличия групп  $Mg-OH$  и  $Fe-OH$  около 2,315 и 2,375 мкм (рис. 3, в).

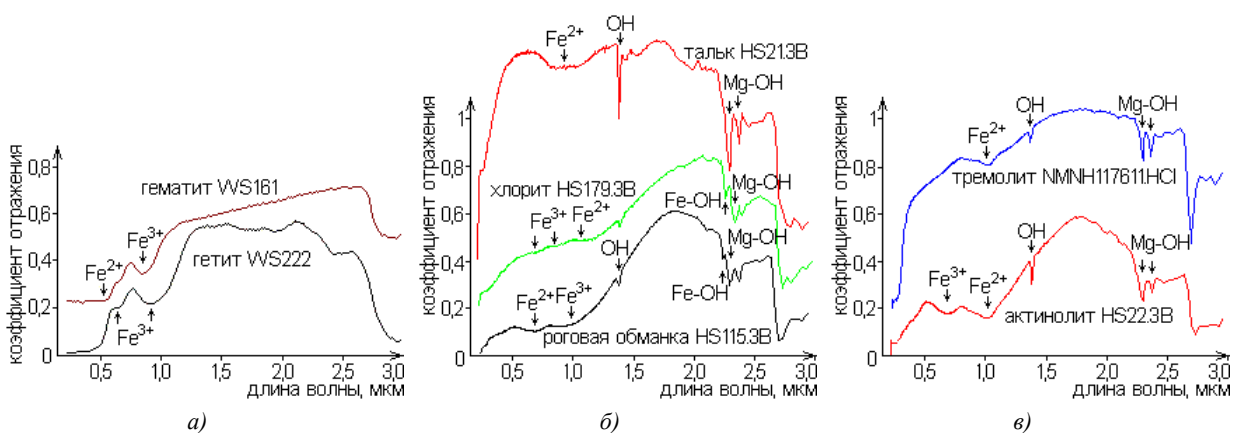


Рис. 3. Спектры некоторых видов минералов:

а) спектры гематита и гетита; б) спектры содержащих  $Mg$  силикатов; в) спектры амфибол.

Спектры гематита, хлорита и тремолита смещены вверх на 0,2, талька – на 0,4 (воспроизведено из библиотеки спектров USGS (USGS Spectroscopy Lab., США))

*Слюды* представляют собой гидроксил и фторсодержащие алюмосиликаты. Они имеют важное промышленное значение – благодаря высоким электроизоляционным свойствам ис-

пользуются в радиоэлектронике, электромашиностроении, электротермии. Эти минералы разделяют на четыре основных типа, название которым дает общий минерал в каждой группе: мусковит (белая слюда), флогопит (янтарная или магниальная слюда), биотит (черная слюда), лепидолит (литиевая слюда).

**Белые слюды.** К группе белых слюд относят следующие минералы: собственно мусковит, серицит, фенгит, парагонит. Спектр мусковита  $\{KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2\}$  характеризуется полосами поглощения около 1,4 и 2,2 мкм (рис. 4, а). Фенгит  $\{KAl_{3-2n}(Mg, Fe)_nSi_{3+n}O_{20}(OH)_2\}$  (*Fe*-богатый, *Al*-бедный) имеет полосу поглощения группы *Al*–*OH* около 2,23 мкм. Парагонит  $\{NaAl_3Si_3O_{10}(OH)_2\}$  (*Al*-богатый) содержит полосу поглощения группы *Al*–*OH* около 2,193 мкм [4].

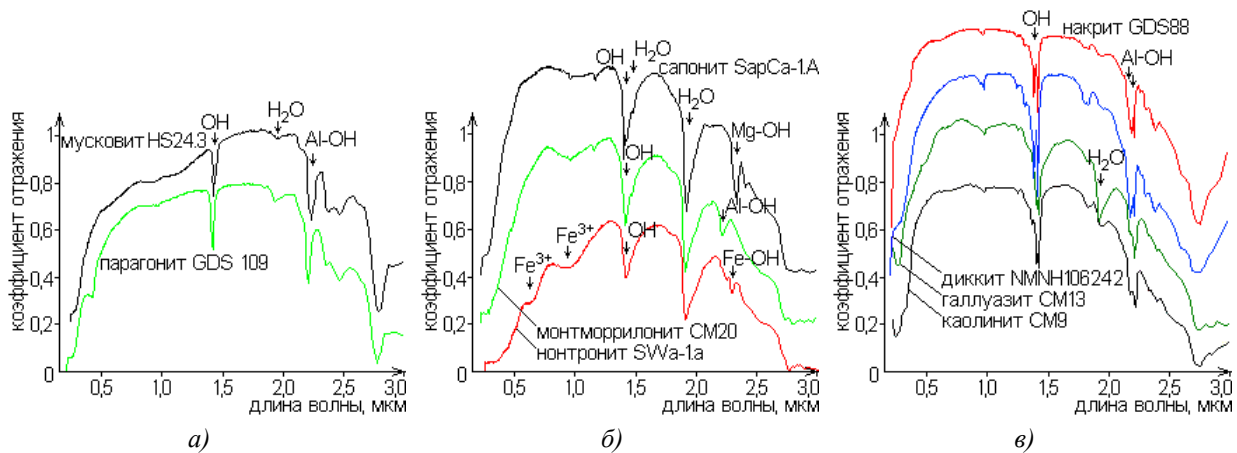


Рис. 4. Спектры некоторых видов минералов:

а) спектры белых слюд; б) спектры смектитов; в) спектры каолинов.

Спектры мусковита и монтморрилонита смещены вверх на 0,2, сапонита – на 0,4 (воспроизведено из библиотеки спектров USGS (USGS Spectroscopy Lab., США))

**Смектиты** (глинистые минералы подкласса слоистых силикатов) слагают многие гипергенные образования, входят в состав глин, почв, коры выветривания, бокситов, особенно осадочного типа, обогащенного глинистым веществом. В своем составе они содержат до 50 %  $SiO_2$ , до 20 %  $Al_2O_3$  и до 20 %  $H_2O$ . К смектитам относят *Fe*-богатые (нонтронит  $\{Fe^{3+}_2(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2Na_{0,3}nH_2O\}$ ) и *Mg*-богатые (сапонит  $\{(1/2Ca, Na)_{0,3}(Mg, Fe^{2+})_3(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2nH_2O\}$ ) глины, а также монтморрилонит  $\{(1/2Ca, Na)_{0,7}(Al, Mg, Fe)_4(Si, Al)_8O_{20}(OH)_4nH_2O\}$ . Для спектра смектитов характерно наличие полосы поглощения группы *Al*–*OH* около 2,2 мкм (рис. 4, б).

**Каолины** – группа глинистых минералов (минералы подкласса слоистых силикатов), включающая собственно каолинит  $\{Al_2Si_2O_5(OH)_4\}$ , диккит  $\{Al_4(Si_4)_{10}(OH)_8\}$ , накрит, аноксит, а также галлуазит  $\{Al_4(Si_4O_{10})(OH)_2\}$ . Образуются главным образом при изменении полевых шпатов, фельдшпатоидов и других силикатов при гидротермальном процессе и процессах глубокого химического выветривания. Для спектров минералов каолина (рис. 4, в) характерно наличие двойных полос поглощения около 1,4 (группа *OH*) и 2,16–2,2 мкм (группа *Al*–*OH*).

## 2. Индексы минералов

В соответствии с особенностями спектров минералов применительно к изображениям сенсоров Landsat TM/ETM+ и Terra ASTER разработан ряд индексов минералов, использующих

отношения значений яркости спектральных каналов. Спектральные каналы выбраны таким образом, чтобы подчеркнуть наличие специфических минералов. Один канал выбирается в области спектра, в которой минералы имеют очень высокие значения коэффициентов отражения, а другой канал – в области спектра, в которой минералы имеют очень низкие значения коэффициентов отражения. Канал, охватывающий область спектра, в которой коэффициенты отражения специфических минералов имеют высокие значения, помещается в числитель отношения, чтобы наличие данных минералов приводило к высоким значениям и отображалось в ярких тонах на изображении [5, 6].

Отношение значений яркости каналов является простым методом идентификации минералов, эффективно уменьшающим влияние эффектов освещения и атмосферы. При этом в момент получения изображений должен выполняться ряд условий: минералы должны быть «обнажены»; район съемки должен иметь низкие относительные содержания зеленой растительности, влажности почвы, а также паров воды в атмосфере.

Применительно к изображениям сенсора Terra ASTER разработан также метод относительной глубины полосы поглощения. Он использует края полосы поглощения в числителе и минимум полосы поглощения в знаменателе [4].

Следует, однако, отметить, что точность результатов, полученных с использованием индексов минералов, невысока. Действительно, при сравнении охватываемой каждым каналом изображения области спектра с шириной полос поглощения минералов становится очевидным, что изображения сенсоров Landsat TM/ETM+, Terra ASTER и иных многоспектральных сенсоров не позволяют идентифицировать минералы так же хорошо, как изображения гиперспектральных сенсоров [6].

*Индексы минералов для изображений сенсора Landsat.* Изображения сенсоров Landsat TM/ETM+ (табл. 1) широко используются в геологических приложениях [4] вследствие благоприятного местоположения каналов для идентификации содержащих железо минералов, минералов глины, силикатов и карбонатов (рис. 5, табл. 2 и 3). Ограничивающими факторами при этом являются: недостаточное количество каналов, большая ширина охватываемых ими областей спектра, а также низкое пространственное разрешение. Так, пространственное разрешение 120 м канала дальней ИК-области спектра допускает только оценочный характер исследований относительного содержания кварца и силикатов, полезный лишь для исследований регионального масштаба.

Таблица 1

Характеристики изображений сенсоров Landsat TM/ETM+ и Terra ASTER

Сенсор	Охватываемая спектральными каналами область спектра, мкм			Пространственное разрешение, м	Ширина охвата, км
	VNIR	SWIR	TIR		
Landsat TM/ETM+	1: 0,45–0,52 2: 0,53–0,61 3: 0,63–0,69 4: 0,78–0,90	5: 1,55–1,75 7: 2,09–2,35	6: 10,40–12,50	VNIR – 30 SWIR – 30 TIR – 60 для TM; 120 для ETM+	183 для TM; 185 для ETM+
Terra ASTER	1: 0,52–0,60 2: 0,63–0,69 3: 0,76–0,86	4: 1,60–1,70 5: 2,145–2,185 6: 2,185–2,225 7: 2,235–2,285 8: 2,295–2,365 9: 2,36–2,43	10: 8,125–8,475 11: 8,475–8,825 12: 8,925–9,275 13: 10,25–10,95 14: 10,95–11,65	VNIR – 15 SWIR – 30 TIR – 90	60

Примечание: VNIR, SWIR, TIR – соответственно видимая /ближняя ИК, средняя и дальняя ИК-области спектра.

*Индексы минералов для изображений сенсора Terra ASTER.* Изображения сенсора Terra ASTER имеют большее количество каналов (14), а также более высокое пространственное разрешение (15–90 м, см. табл. 1), чем изображения сенсоров Landsat TM/ETM+, и соответ-



венно больший потенциал для геологических исследований (рис. 6, табл. 4 и 5). Кроме того, в отличие от сенсоров Landsat TM/ETM+ сенсор Terra ASTER проводит съемку и в ночное время, что позволяет значительно улучшить дешифрируемость геологических объектов (за счет уменьшения неравномерности нагрева Солнцем освещенных и затененных поверхностей). Однако меньший пространственный охват изображений сенсора Terra ASTER по сравнению с изображениями сенсоров Landsat TM/ETM+ требует составления мозаики из смежных разновременных изображений для охвата больших областей. Это снижает точность результатов.

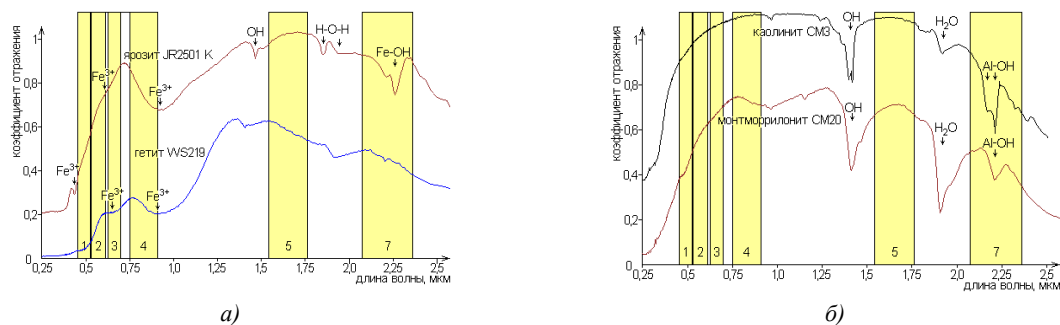


Рис. 5. Соотношение между спектрами минералов и областями спектра, охватываемыми каналами изображений сенсоров Landsat TM/ETM+: а) спектры содержащих  $Fe^{3+}$  минералов; б) спектры минералов глины

Таблица 2

Характеристики индексов минералов для изображений сенсоров Landsat TM/ETM+

Индексы минералов	Отношение каналов	Характеристика
Содержащие трехвалентное железо минералы	$\frac{I_{(x,y)}^{TM3}}{I_{(x,y)}^{TM1}}$	Содержащие $Fe^{3+}$ минералы (гематит, гетит, ярозит и т. д.) имеют схожее поведение спектра: значение коэффициента отражения является очень низким в канале 1, умеренно высоким в канале 3 и очень высоким в каналах 5 и 7. Содержащие $Fe^{3+}$ минералы и растительность имеют схожие значения коэффициента отражения в канале 1 и канале 2. С другой стороны, в канале 3 содержащие $Fe^{3+}$ минералы показывают высокий коэффициент отражения, тогда как растительность имеет сильную полосу поглощения. Таким образом, для идентификации содержащих $Fe^{3+}$ минералов используется отношение каналов 3/1 вместо каналов 2, 5 и 7
Содержащие двухвалентное железо минералы	$\frac{I_{(x,y)}^{TM5}}{I_{(x,y)}^{TM4}}$	Содержание в минералах $Fe^{2+}$ вызывает сильную широкую полосу поглощения около 1 мкм (затрагивающую краем канал 4) [6]. Поэтому данное отношение позволяет идентифицировать содержащие $Fe^{2+}$ минералы (хлорит, эпидот, амфиболы и т. д.)
Минералы глины	$\frac{I_{(x,y)}^{TM5}}{I_{(x,y)}^{TM7}}$	Почти все минералы характеризуются высокими значениями коэффициента отражения в середине ближней ИК-области спектра (канал 5), но минералы глины (каолинит, монтморрилонит и т. д.) имеют полосу поглощения около 2,2 мкм (рис. 5, б) в середине дальней ИК-области спектра (канал 7). Поэтому данное отношение позволяет идентифицировать минералы глины [6]

Примечание:  $I_{(x,y)}^{TM1}$ ,  $I_{(x,y)}^{TM3}$ ,  $I_{(x,y)}^{TM4}$ ,  $I_{(x,y)}^{TM5}$ ,  $I_{(x,y)}^{TM7}$  – значения яркости пикселя  $(x, y)$  изображения сенсоров Landsat TM/ETM+ соответственно в каналах 1, 3–5, 7.

Таблица 3

Некоторые RGB-композиции отношений каналов изображений сенсоров Landsat TM/ETM+

Группы минералов	Каналы дисплея		
	<i>R</i>	<i>G</i>	<i>B</i>
Композиция минералов	$\frac{I_{(x,y)}^{TM5}}{I_{(x,y)}^{TM7}}$	$\frac{I_{(x,y)}^{TM5}}{I_{(x,y)}^{TM4}}$	$\frac{I_{(x,y)}^{TM3}}{I_{(x,y)}^{TM1}}$
	Используется для отделения содержащих $Fe^{2+}$ и $Fe^{3+}$ минералов от минералов глины. Красные оттенки, вероятно, указывают на наличие содержащих $Fe^{2+}$ и $Fe^{3+}$ минералов. Желтые оттенки указывают на присутствие минералов глины [6, 7]. Отвалы добывающей промышленности, а также вспаханная земля отображаются в диапазоне оттенков от желтого до красного. Растительность отображается в ярких сине-зеленых тонах		
Гидротермальная композиция	$\frac{I_{(x,y)}^{TM5}}{I_{(x,y)}^{TM7}}$	$\frac{I_{(x,y)}^{TM3}}{I_{(x,y)}^{TM1}}$	$\frac{I_{(x,y)}^{TM4}}{I_{(x,y)}^{TM3}}$
	Используется для идентификации гидротермально измененной коренной подстилающей породы – большая часть рудных месторождений, как полагают, связана с гидротермальными залежами		

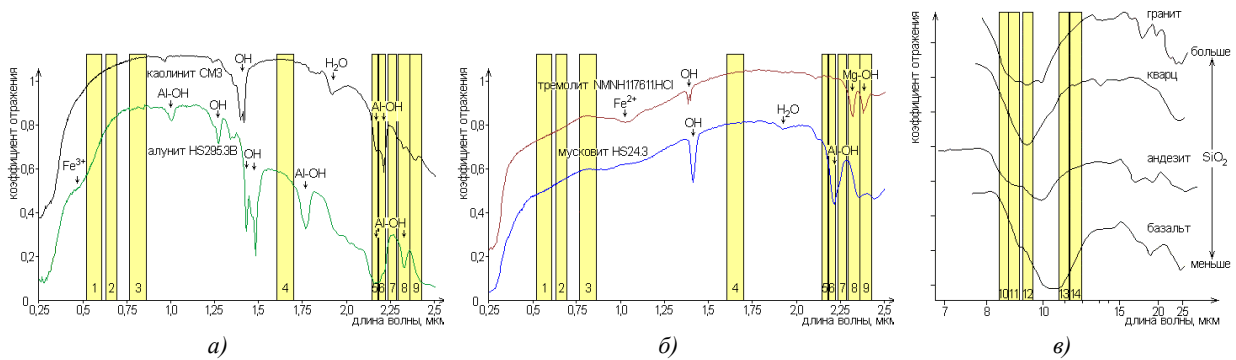


Рис. 6. Соотношение между спектрами минералов и областями спектра, охватываемыми каналами изображений сенсора Terra ASTER: а) спектры каолинита и алунита; б) спектры тремолита и мусковита; в) спектры гранита, кварца, андезита и базальта. Спектры каолинита и тремолита смещены вверх на 0,2

Таблица 4

Некоторые RGB -композиции отношений каналов изображений сенсора Terra ASTER

Группы минералов	Каналы дисплея		
	<i>R</i>	<i>G</i>	<i>B</i>
Содержащие Al – OH , изменение глинистых пород по составу	$\frac{I_{(x,y)}^{AST5}}{I_{(x,y)}^{AST6}}$	$\frac{I_{(x,y)}^{AST7}}{I_{(x,y)}^{AST6}}$	$\frac{I_{(x,y)}^{AST7}}{I_{(x,y)}^{AST5}}$
Глина, амфибола, латерит	$\frac{I_{(x,y)}^{AST5} \cdot I_{(x,y)}^{AST7}}{(I_{(x,y)}^{AST6})^2}$	$\frac{I_{(x,y)}^{AST6}}{I_{(x,y)}^{AST8}}$	$\frac{I_{(x,y)}^{AST4}}{I_{(x,y)}^{AST5}}$
Железная шляпа, изменение пород по составу, вмещающая порода	$\frac{I_{(x,y)}^{AST4}}{I_{(x,y)}^{AST2}}$	$\frac{I_{(x,y)}^{AST4}}{I_{(x,y)}^{AST5}}$	$\frac{I_{(x,y)}^{AST5}}{I_{(x,y)}^{AST6}}$
Содержащие Si, карбонаты, индекс основной степени	$\frac{I_{(x,y)}^{AST11}}{I_{(x,y)}^{AST10}} \cdot \frac{I_{(x,y)}^{AST12}}{I_{(x,y)}^{AST10}}$	$\frac{I_{(x,y)}^{AST13}}{I_{(x,y)}^{AST14}}$	$\frac{I_{(x,y)}^{AST12}}{I_{(x,y)}^{AST13}}$

Хотя сенсор Terra ASTER многоспектральный, возможна эффективная обработка его изображений в гиперспектральном стиле (в частности, методом линейного смешивания с соответствующей предварительной обработкой). В этом случае результаты идентификации групп минералов по изображениям гиперспектрального сенсора и изображениям многоспектрального сенсора Terra ASTER сопоставимы [4].



### 3. Результаты вычисления некоторых индексов минералов

Анализ результатов вычисления некоторых индексов минералов по изображениям много-спектральных сенсоров Landsat ETM+ и Terra ASTER (рис. 7, а–е) и оценки относительного содержания некоторых минералов по изображениям гиперспектрального сенсора AVIRIS методом линейного смешивания (рис. 7, ж–и) позволяет рассматривать итоги обработки изображений многоспектральных сенсоров Landsat TM/ETM+ и Terra ASTER как первое приближение для планирования приобретения изображений гиперспектральных сенсоров с более высокими пространственным и спектральным разрешениями.

Таблица 5

Некоторые индексы минералов для изображений сенсора Terra ASTER

Группы минералов	Отношение или комбинация каналов	Группы минералов	Отношение или комбинация каналов
<i>Содержащие Fe</i>			
Трехвалентное железо, $Fe^{3+}$	$\frac{I_{(x,y)}^{AST2}}{I_{(x,y)}^{AST1}}$	Оксиды железа	$\frac{I_{(x,y)}^{AST4}}{I_{(x,y)}^{AST3}}, \frac{I_{(x,y)}^{AST4}}{I_{(x,y)}^{AST1}}$
Двухвалентное железо, $Fe^{2+}$	$\frac{I_{(x,y)}^{AST5}}{I_{(x,y)}^{AST3}} + \frac{I_{(x,y)}^{AST1}}{I_{(x,y)}^{AST2}}$	Железные силикаты (биотит, хлорит, амфиболы)	$\frac{I_{(x,y)}^{AST5}}{I_{(x,y)}^{AST4}}$
<i>Карбонаты/мафические минералы</i>			
Карбонаты, кальцит, хлорит, эпидот	$\frac{I_{(x,y)}^{AST7} + I_{(x,y)}^{AST9}}{I_{(x,y)}^{AST8}}$	Карбонаты, $Mg-OH$	$\frac{I_{(x,y)}^{AST4}}{I_{(x,y)}^{AST8}}$
Эпидот, хлорит, амфибола, $CO_3$	$\frac{I_{(x,y)}^{AST6} + I_{(x,y)}^{AST9}}{I_{(x,y)}^{AST7} + I_{(x,y)}^{AST8}}$	Амфибола	$\frac{I_{(x,y)}^{AST6}}{I_{(x,y)}^{AST8}}$
Карбонаты, амфиболы, $Mg-OH$	$\frac{I_{(x,y)}^{AST6} + I_{(x,y)}^{AST9}}{I_{(x,y)}^{AST8}}$	Доломит	$\frac{I_{(x,y)}^{AST6} + I_{(x,y)}^{AST8}}{I_{(x,y)}^{AST7}}$
<i>Силикаты</i>			
Серицит, мусковит (белая слюда), иллит, смектит, $Al-OH$	$\frac{I_{(x,y)}^{AST5} + I_{(x,y)}^{AST7}}{I_{(x,y)}^{AST6}}$	Каолинит, $Al-OH$	$\frac{I_{(x,y)}^{AST7}}{I_{(x,y)}^{AST5}}, \frac{I_{(x,y)}^{AST7}}{I_{(x,y)}^{AST6}}, \frac{I_{(x,y)}^{AST4}}{I_{(x,y)}^{AST6}}$
Алунит, каолинит, пирофиллит	$\frac{I_{(x,y)}^{AST4} + I_{(x,y)}^{AST6}}{I_{(x,y)}^{AST5}}$	Глина	$\frac{I_{(x,y)}^{AST5} \cdot I_{(x,y)}^{AST7}}{(I_{(x,y)}^{AST6})^2}$
Алунит, изменение пород по составу	$\frac{I_{(x,y)}^{AST4}}{I_{(x,y)}^{AST5}}$	Мусковит, $Al-OH$	$\frac{I_{(x,y)}^{AST7}}{I_{(x,y)}^{AST6}}$
<i>Содержащие Si</i>			
Богатые кварцем скалы	$\frac{I_{(x,y)}^{AST14}}{I_{(x,y)}^{AST15}}$	Содержащие $Si$ скалы	$\frac{I_{(x,y)}^{AST11} \cdot I_{(x,y)}^{AST11}}{I_{(x,y)}^{AST10} \cdot I_{(x,y)}^{AST12}}$
Индекс основной степени (гранаты, пироксены, эпидот, хлорит)	$\frac{I_{(x,y)}^{AST12}}{I_{(x,y)}^{AST13}}$	Содержащие $Si-O$	$\frac{I_{(x,y)}^{AST14}}{I_{(x,y)}^{AST10}}, \frac{I_{(x,y)}^{AST10} + I_{(x,y)}^{AST12}}{I_{(x,y)}^{AST11}}$
Содержащие $SiO_2$	$\frac{I_{(x,y)}^{AST13}}{I_{(x,y)}^{AST12}}, \frac{I_{(x,y)}^{AST14}}{I_{(x,y)}^{AST12}}, \frac{I_{(x,y)}^{AST12}}{I_{(x,y)}^{AST13}}$	Содержащие $Si$	$\frac{I_{(x,y)}^{AST11}}{I_{(x,y)}^{AST10}}, \frac{I_{(x,y)}^{AST12}}{I_{(x,y)}^{AST10}}, \frac{I_{(x,y)}^{AST11}}{I_{(x,y)}^{AST12}}$

Примечание:  $I_{(x,y)}^{AST1}, I_{(x,y)}^{AST2}, \dots, I_{(x,y)}^{AST14}$  – значения яркости пикселя  $(x, y)$  изображения сенсора Terra ASTER соответственно в каналах 1–14.

Landsat ETM+

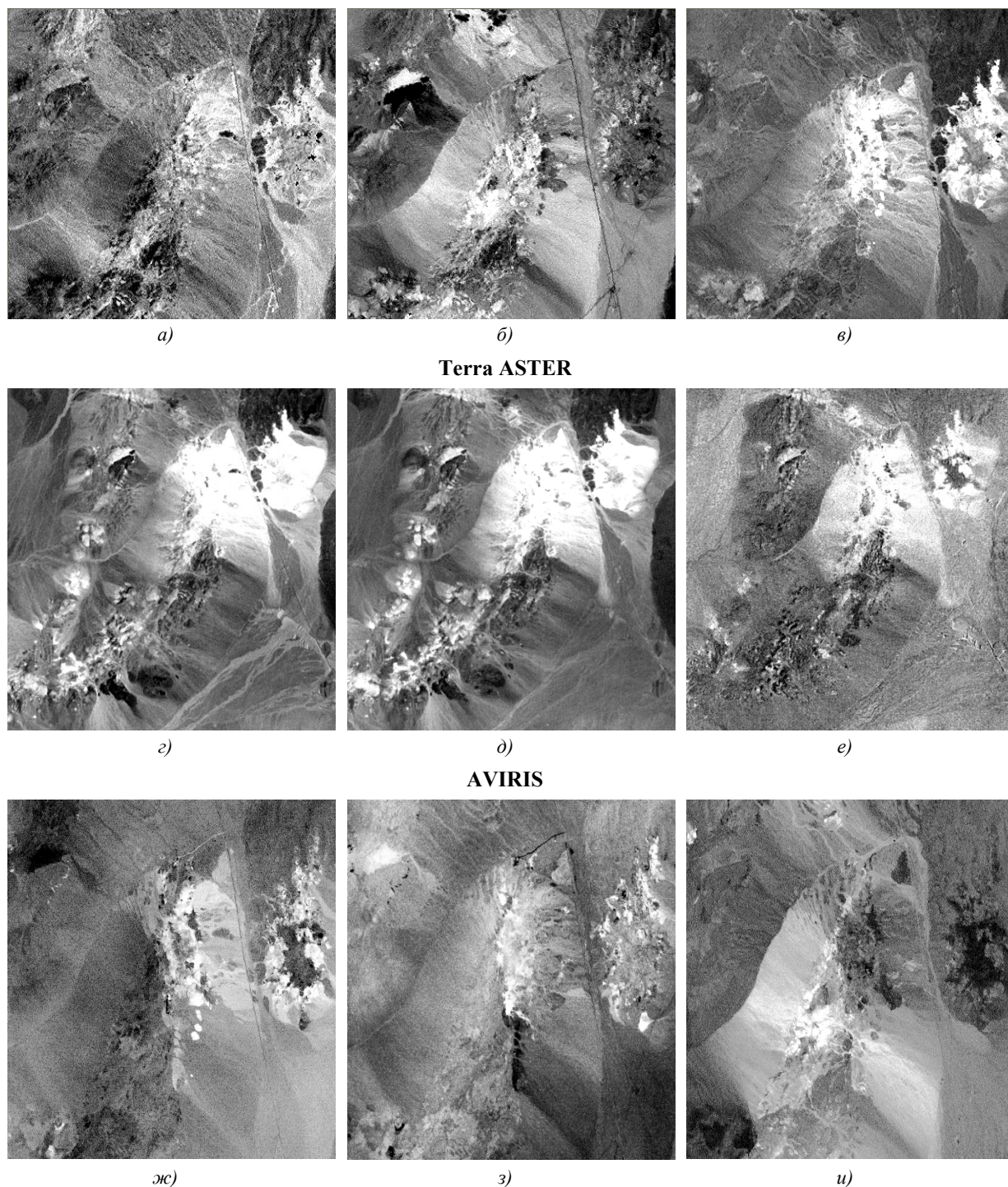


Рис. 7. Результаты вычисления индексов минералов по изображениям многоспектральных сенсоров Landsat ETM+ и Terra ASTER, а также относительного содержания минералов по изображению гиперспектрального сенсора AVIRIS: а) индекс содержащих  $Fe^{3+}$  минералов; б) индекс содержащих  $Fe^{2+}$  минералов; в) индекс минералов глины; г) индекс минерала алузит; д) индекс минерала каолинит; е) индекс минерала мусковит; ж) относительное содержание справочного материала алузит; з) относительное содержание справочного материала каолинит; и) относительное содержание справочного материала мусковит (исходное изображение сенсора Landsat 7 ETM+ (получено 20.07.2000 г.; запад штата Невада, США) взято с сайта компании Global Land Cover Facility (Institute for Advanced Computer Studies, США); исходное изображение сенсора Terra ASTER (получено 24.08.2001 г.) взято с сайта U-Cursos; исходное изображение гиперспектрального сенсора AVIRIS (получено в 1997 г.) взято с сайта компании MicroImages Inc., США)

### Заключение

Изображения многоспектральных сенсоров Landsat TM/ETM+ и Terra ASTER широко используются в геологических приложениях вследствие благоприятного местоположения каналов для идентификации минералов. Вместе с тем результаты вычисления индексов минералов по изображениям многоспектральных сенсоров Landsat ETM+ и Terra ASTER имеют невысокую точность по сравнению с результатами оценки относительного содержания минералов по изображению гиперспектрального сенсора AVIRIS. Это обусловлено недостаточным количеством каналов, большой шириной охватываемых ими областей спектра, а также низким пространственным разрешением изображений многоспектральных сенсоров Landsat ETM+ и Terra ASTER. Таким образом, результаты обработки изображений многоспектральных сенсоров можно рассматривать как первое приближение для планирования приобретения изображений гиперспектральных сенсоров с более высокими спектральным и пространственным разрешениями.

### Список литературы

1. Introduction to hyperspectral imaging with TNTmips. – Lincoln, Nebraska, USA: MicroImages Inc., 2006. – 24 p.
2. Clark, R.N. Chapter 1: Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy, in manual of remote sensing / R.N. Clark // Remote sensing for the earth sciences. – N.-Y., 1999. – Vol. 3. – P. 3–58.
3. Mid-infrared (2,1 to 25 mm) spectra of minerals / J.W. Salisbury [et al.]. – Baltimore: Johns Hopkins university press, 1992. – 267 p.
4. Lau, I.C. Regolith-landform and mineralogical mapping of the White Dam Prospect, eastern Orary Domain, South Australia, using integrated remote sensing and spectral techniques / I.C. Lau. – Australia: Adelaide University, 2004. – 330 p.
5. Introduction to remote sensing of environment (RSE) with TNTmips. – Lincoln, Nebraska, USA: MicroImages Inc., 2006. – 32 p.
6. Yetkin, E. Alteration mapping by remote sensing: Application to Hasandag-Melendiz volcanic complex / E. Yetkin. – Ankara, Turkey, 2003. – 114 p.
7. Vandenberg, G.S. Identification and characterization of mining waste using Landsat Thematic Mapper imagery / G.S. Vandenberg // Proc. of the annual meeting of the American society of mining and reclamation and the Billings symposium. – Billings, 2003. – P. 1329–1347.

Поступила 17.03.08

*Объединенный институт проблем  
информатики НАН Беларуси,  
Минск, Сурганова, 6  
e-mail: Krautsou\_sl@rambler.ru*

**S.L. Krautsou**

### **APPLICATION OF REMOTE SENSING DATA IN GEOLOGY**

Fundamentals of minerals spectroscopy and mineral indexes for the images of multispectral sensors Landsat TM/ETM + and Terra ASTER are considered. Calculation results of mineral indexes using images of multispectral sensors Landsat ETM + and Terra ASTER, and also of the relative mineral content using images of hyperspectral sensor AVIRIS are presented.