

Ф. Круз (F. Kruse; Военно-морская высшая школа, департамент физики и центр дистанционного зондирования, США)

Получил степень доктора в области геологии Colorado School of Mines в 1987 г. Работает в сфере дистанционного зондирования Земли более 30 лет. В настоящее время — профессор Военно-морской высшей школы, преподает курсы оптического и радарного дистанционного зондирования. Он изучает распределение и характер земной поверхности материалов. Он также является одним из разработчиков программного обеспечения для обработки и анализа данных ДЗЗ ENVI.

У. Боу (W. Vaughan; DigitalGlobe, США)

Получил степень магистра в области геологии в Университете штата Колорадо в 1995 г. Работал в качестве ассоциированного научного сотрудника в Национальном центре атмосферных исследований и более 15 лет в производственных организациях. В настоящее время является старшим научным сотрудником компании DigitalGlobe и занимается исследованием новых спектральных возможностей спутника WorldView-3 с целью поиска практических приложений.

С. Перри (S. Perry; Perry Remote Sensing, США)

Получила степень бакалавра в области геологии в Университете штата Индиана по специальности «структурная геология и геологическая аэрофотосъемка». После получения степени магистра геологии в Colorado School of Mines сосредоточилась на автоматизированном анализе космических снимков для целей разведки полезных ископаемых, включая углеводородные. Имеет более 30 лет опыта исследовательской работы, участвовала в научной группе ASTER и была ведущим консультантом при разработке сенсора SWIR спутника WorldView-3.

Тестирование данных сенсора SWIR спутника WorldView-3 для создания минералогических карт*

WorldView-3 — запущенный недавно (в августе 2014 г.) коммерческий мультиспектральный спутник сверхвысокого разрешения, имеющий восемь каналов для съемки в видимом и ближнем инфракрасном (ИК) (от 0,42 до 1,04 мкм) диапазонах и восемь — в коротковолновом ИК-диапазоне (от 1,2 до 2,33 мкм). Проведенный путем моделирования восьми каналов WorldView-3 в коротковолновом ИК-диапазоне анализ использования гиперспектральных изображений района Куприт, штат Невада, стал примером идентификации и картирования обширной группы минералов, в том

числе каолинита, алунита, баддингтонита, мусковита, кальцита и гидротермального кремнезема. Применение частичного разделения показало распространение минералов, сходное с картируемым по данным гиперспектральной съемки; оно обосновало потенциал использования WorldView-3 как значимого инструмента картирования минералов. Тем не менее анализ матрицы неточностей с принятием гиперспектральной съемки за наземные контрольные данные выявил некоторые сложности в распознавании по мультиспектральным данным спектрально сходных

* Перевод с английского языка. Оригинал статьи «Validation of DigitalGlobe WorldView-3 Earth imaging satellite shortwave infrared bands for mineral mapping» опубликован SPIE под лицензией Creative Commons Attribution 3.0 Unported (<http://remotesensing.spiedigitallibrary.org/article.aspx?articleid=2300382>), DOI: 10.1117/1.JRS.9.096044

минералов. Последующее картирование минералов района Куприт, штат Невада, по данным съемки спутника WorldView-3 за 19 сентября 2014 г. с обработкой по той же схеме показало, что работа сенсора соответствует ожиданиям. Анализ применения данных съемки в коротковолновом ИК-диапазоне для минерального картирования хорошо согласуется с результатами моделирования. Не будучи столь функциональными, как гиперспектральные сенсоры, 8 тщательно отобранных коротковолновых ИК-каналов WorldView-3 создают новые возможности для дистанционного картирования минералов, недоступные какой-либо другой космической мультиспектральной системе.

ВВЕДЕНИЕ

Запущенный 13 августа 2014 г. WorldView-3 — последний в созвездии коммерческих съемочных спутников сверхвысокого разрешения, разработанных компанией DigitalGlobe (Логмонт, штат Колорадо, США). Спутник WorldView-1 был запущен в 2007 г. и оснащен системой панхроматической съемки с пространственным разрешением 0,5 м. Спутник WorldView-2, запущенный в 2009 г., предоставляет панхроматические данные сверхвысокого разрешения с размером пикселя 0,46 м, а также снимки в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах (от 0,4 до 1,04 мкм) при пространственном разрешении 1,85 м и 8 мультиспектральных каналах. WorldView-3 — результат постепенного улучшения предшествующих сенсоров, обладающий фактически такими же возможностями съемки в панхроматическом, видимом и ближнем ИК-диапазонах (но пространственное разрешение 0,31 и 1,24 м соответственно). Их дополняют 8 каналов в коротковолновом ИК-диапазоне (именуемые в данной статье каналами

S1–S8), с длинами волн от примерно 1,2 до 2,33 мкм и пространственным разрешением 3,7 м (однако доступны данные с разрешением только 7,5 м). Эта система также включает 12 дополнительных каналов для коррекции атмосферных искажений CAVIS (Clouds, Aerosols, Water Vapor, Ice and Snow — «Облака, Аэрозоли, Водный пар, Лед и Снег») с разрешением 30 м. Все это в совокупности дает WorldView-3 преимущество в виде 29 спектральных каналов, охватывающих диапазон от видимого и ближнего ИК до коротковолнового ИК, и делает WorldView-3 единственным на орбите коммерческим мультиспектральным спутником ДЗЗ, снимающим в коротковолновом ИК-диапазоне с высоким разрешением.

В данной статье подведены итоги оценки использования 8 каналов в коротковолновом ИК-диапазоне (сенсор SWIR) для картирования минералов в хорошо изученном районе — Куприт, штат Невада. Горнодобывающий район Куприт расположен примерно в 200 км к северо-западу от Лас-Вегаса, штат Невада, США, вдоль шоссе 95. Район сложен разновозрастными породами — от кембрийских до третичных, известных интенсивными гидротермальными преобразованиями (рис. 1). С 1970 г. Куприт является тестовым участком для валидации мульти- и гиперспектральной съемки для минералогического и геологического картирования.

Для ознакомления с преобразованиями в Куприте на рис. 1а приведена карта, составленная по данным воздушной мультиспектральной съемки, традиционного полевого картирования и лабораторных исследований, модифицированная Национальной геологической службой США. Мы еще обратимся к ней. Нанесенные на карту зоны (окремненная, опализованная и аргиллизированная) соответствуют классическим описаниям преобразований, содержащих скорее ассоциации минералов, чем конкретные виды. Окремненные породы, согласно описаниям,

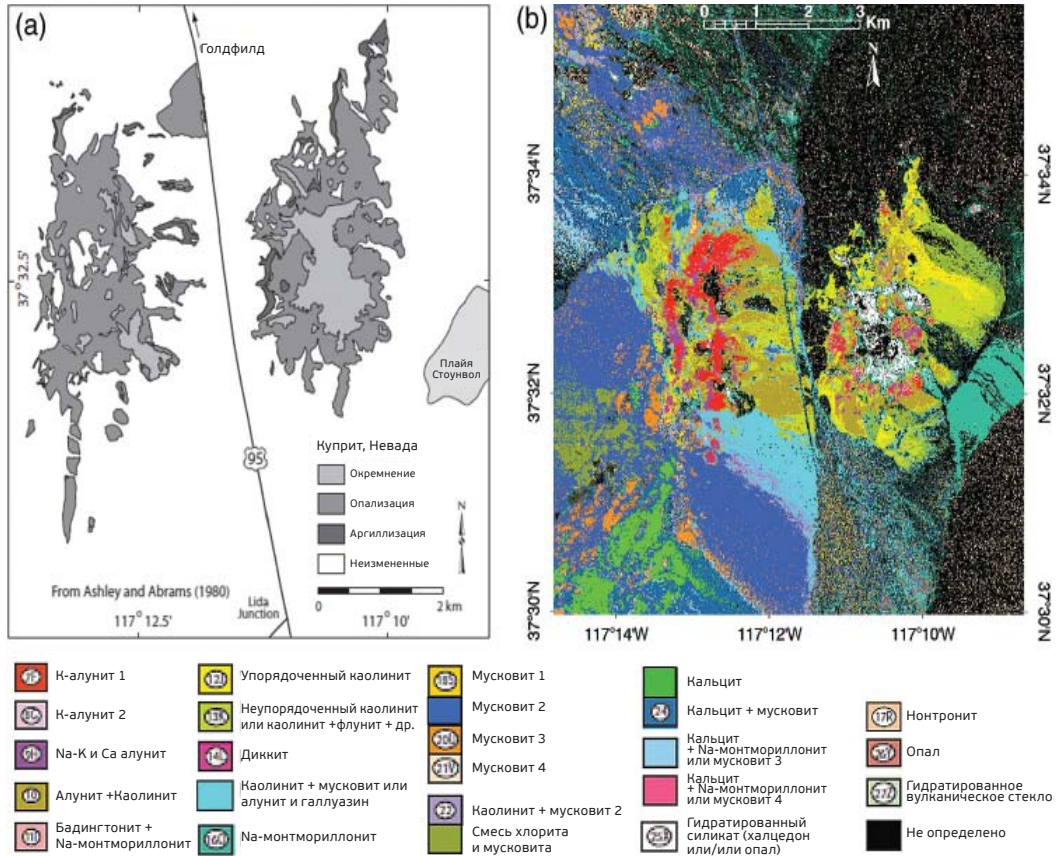


Рис. 1. а) Карта гидротермального преобразования района Куприт. б) Минералогическая карта района Куприт, составленная по материалам гиперспектральной съемки

содержат преимущественно кварц и халцедон, менее распространены алунит и каолинит, есть преобразованный кальцит. Опализованные породы (опалиты) содержат опал с разными количествами каолинита и алунита, небольшим содержанием кальцита. Аргиллизированные зоны обычно входят в опализованные или соседствуют с ними содержат преимущественно кварц, непреобразованный санадин, опал, монтмориллонит и каолинит.

Приведенные на рис. 16 данные Национальной геологической службы США

получены воздушным спектрометром AVIRIS (Airborne visible/infrared imaging spectrometer), снимающим в видимом и инфракрасном диапазонах; они дают более детальное представление о минералогии пород дневной поверхности. Минералогическая карта геологической службы — это обобщенное представление о минералах, основанное на использовании экспертных систем для сопоставления спектральных характеристик и форм. Оно подтверждено полевыми проверками, рентгенографией минералов и спектральными лабораторными

измерениями. Спектральная карта включает определение и отображение нескольких минеральных ассоциаций, а также информацию о минеральном составе, степени кристаллизации, спектральном смешивании относительно выбранного из библиотеки спектра. Хотя все это дает исчерпывающую информацию о минералогии Куприта, отметим, что большинство гиперспектральных алгоритмов не производят карты соответствующего уровня детальности, поэтому для данного исследования выбраны более общие классы минералов. Обширные группы ключевых минералов проще определить; в их числе каолиниты, алуниты, баддингтониты, мусковиты, карбонаты и некоторые типы силикатов. Отметим, что большинство алгоритмов картируют для каждого пикселя только спектрально доминирующие минералы. Этот подход и адаптирован для данного исследования.

Представленные здесь результаты развивают проведенное ранее исследование, в котором гиперспектральные данные стали основой моделирования данных WorldView-3 и прогноза эффективности минералогического картирования по ним. Картографические продукты на основе WorldView-3 получены по той же методологии и алгоритмам, что и прогнозные, с которыми провели прямое сравнение. Сравнение показало, что способность картировать отдельные ключевые минералы Куприта по данным WorldView-3 соответствует прогнозной. В целом замеры в коротковолновом ИК-диапазоне подходят для минералогического картирования и дают беспрецедентно высокое пространственное разрешение и мультиспектральные возможности.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ WORLDVIEW-3

В предварительном прогнозном исследовании возможности применения WorldView-3

для спектрального минералогического картирования для моделирования данных коротковолнового ИК-диапазона были использованы данные AVIRIS. Их опробовали и привели в соответствие 8 выбранным каналам WorldView-3 с пространственным разрешением 3,7 и 7,5 м; по характерным спектральным сигнатурам, полученным для известных участков распространения минералов, на карту нанесли отдельные минералы. Результат показал, что спектральные каналы WorldView-3 позволят идентифицировать и картировать некоторые ключевые минералы; однако существует вероятность возникновения ошибок мультиспектрального картирования в случае спектрально сходных минералов.

Данные AVIRIS и обработка

Точкой отсчета для проведенного ранее моделирования каналов коротковолнового ИК-диапазона и минералогического картирования стали спектральные энергетические яркости, полученные сенсором AVIRIS и собранные Лабораторией реактивного движения NASA в октябре 2010 г. Пространственное разрешение данных — 3 м. AVIRIS — это съемочный спектрометр (гиперспектральная съемочная система), измеряющий яркость в диапазоне от 0,4 до 2,5 мкм по 224 каналам со спектральным разрешением примерно 10 нм и варьирующим в зависимости от высоты полета пространственным разрешением (от 2 до 20 м). В данной работе использовали 86 коротковолновых ИК-каналов в промежутке от 1,2 до 2,5 мкм с пространственным разрешением 3 м.

Данные AVIRIS были корегистрированы с ортотрансформированными снимками радиометра ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) и отобраны для анализа при исходном разрешении WorldView-3 в 3,7 м и предлагаемом производителем — 7,5 м. Затем в про-

грамме ACORN была проведена атмосферная коррекция; в дальнейшем данные очистили по полевым калибровочным спектрам. Это позволило провести прямое сравнение лабораторных и полевых спектров (спектральных библиотек) как визуальными, так и автоматизированными методами. Из данных извлекли характерные средние гиперспектральные сигнатуры отражения распространенных минералов, важных для понимания общей геологии и гидротермальных изменений района Куприт, нанесли на карту изученные выходы минералов (рис. 2а), используя алгоритм частичного разделения с помощью фильтра по эталонам, адаптированного к спектральной смеси (mixture-tuned-matched filter (MTMF) partial unmixing algorithm) (рис. 2б).

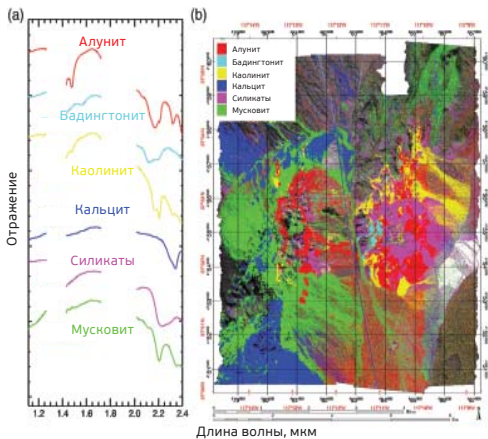


Рис. 2. а) Средний коротковолновый ИК-спектр, полученный по данным воздушного спектрометра AVIRIS; пространственное разрешение для выбранных «участков интереса» (regions of interest — ROI) с известным минералогическим составом — 7,5 м. б) Минералогическая карта, построенная по алгоритму MTMF, показывает преобладающий в спектре каждого конкретного пикселя данных AVIRIS минерал

Данные AVIRIS проанализировали, используя стандартный подход — линейную трансформацию с минимальным коэффициентом шума, чтобы убрать шумы, а затем применили MTMF. Традиционно используемый

с гиперспектральными данными, этот метод находит известные спектральные сигнатуры при наличии смешанного или неизвестного фона (рис. 3). MTMF также называют «частичным разделением», поскольку он не требует знания всего спектра и каждый индивидуальный материал может быть выделен независимо от состава фона. MTMF объединяет лучшие качества классического фильтра по эталонам (matched filter — MF) и ограничения применимости смешения спектров. Он позволяет как определить отдельные минералы, так и оценить их распространенность в пикселях путем вычисления двух параметров: уровня согласованности и уровня недопустимости.

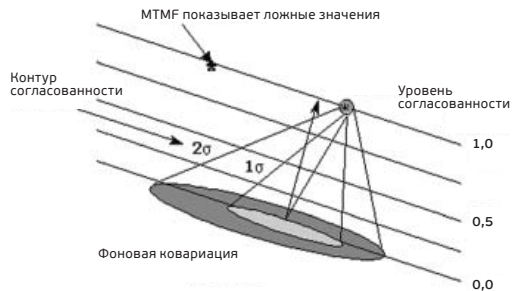


Рис. 3. Концептуальная схема MTMF иллюстрирует идентификацию и количественную оценку известного целевого спектра при наличии неоднородного фона. Более высокие уровни согласованности (от 0,0 до 1,0 или от 0 до 100%) показывают, что в выбранном пикселе преобладает спектр целевого материала. Низкие уровни недопустимости (образующие конические области 1σ, 2σ и т. д.) ограничивают спектральную сигнатуру контекстом смешения фоновой и целевой сигнатур. Лучшие спектральные совпадения можно картировать при условии высокого уровня согласованности и низкого уровня недопустимости

Эти атрибуты, как правило, используются для определения частоты появления и спектральной распространенности минералов в каждом пикселе набора данных спектрального изображения. Уровень согласованности показывает спектральную распространенность материала, а уровень недопустимости сообщает, является ли

замер пригодной для обработки смесью фона и искомой сигнатуры. Для выявления подходящих смесей обычно применяются диаграммы рассеяния, однако это довольно субъективная оценка.

В данном исследовании для взаимной стандартизации наборов данных выбрали «Соотношение допустимости MTMF» (уровень согласованности/уровень недопустимости). Все данные, которые прошли обработку MTMF, ограничили пороговыми значениями так, чтобы они отражали только лучшее совпадение с минералом (один материал на один пиксель) с соотношением допустимости MTMF более 0.025. Данные AVIRIS показывают только преобладающий минерал [рис. 2(б)], и затем их можно было сравнить с модельными данными WorldView-3. Классы минералов, картированные по AVIRIS, в общем, согласуются с основными группами минералов и выходов, отраженных на ранее опубликованных картах гидротермального преобразования и минералогических картах, составленных по материалам гиперспектральной съемки (рис. 1). Чтобы обеспечить сопоставимость результатов, метод картирования по MTMF, примененный к данным AVIRIS и прогнозным данным WorldView-3, впоследствии применили к орбитальным данным WorldView-3.

Моделирование данных WorldView-3

Модельные амплитудно-частотные характеристики в коротковолновом ИК-диапазоне создали по спецификациям и общим передаточным функциям, предоставленным DigitalGlobe (табл. 1). Данные AVIRIS опробовали в соответствии с каналами WorldView-3, используя прогнозные полосы пропускания, которые были схожи с измеренными на реальном спутнике WorldView-3, запущенном на орбиту в 2014 г. (табл. 1, рис. 4). Модельные спектральные данные путем агрегации (осреднения) пикселей привели к пространственному разрешению 3,7 и 7,5 м. Для тестов использовали данные с разрешением 7,5 м. Средние спектры отражения выбранных минералов в коротковолновом ИК-диапазоне получили из прогнозных данных WorldView-3, взяв за основу известные участки местности (те же точки, что и для данных AVIRIS) (рис. 5а). Спектральные сигнатуры загрузили в MTMF, чтобы провести сопоставление сигнатур и картировать участки (рис. 5б). Результаты визуально сопоставили со средними спектрами AVIRIS и картой, приведенной на рис. 2.

Несмотря на то что в Куприте проводились многочисленные кампании по дистанционному зондированию, полностью проверенных наземных контрольных данных для

Идентификатор канала КИК-диапазона	WorldView-3 (прогнозные данные)	Идентификатор канала КИК-диапазона
Канал S1	1,2097	1,2091
Канал S2	1,5695	1,5716
Канал S3	1,6495	1,6611
Канал S4	1,7295	1,7295
Канал S5	2,1645	2,1637
Канал S6	2,2045	2,2022
Канал S7	2,2594	2,2593
Канал S8	2,3291	2,3292

Табл. 1. Сравнение прогнозных и реальных каналов WorldView-3 в коротковолновом ИК-диапазоне. Полные амплитудно-частотные характеристики запущенного спутника WorldView-3 (измерены до запуска) показаны на рис. 4.

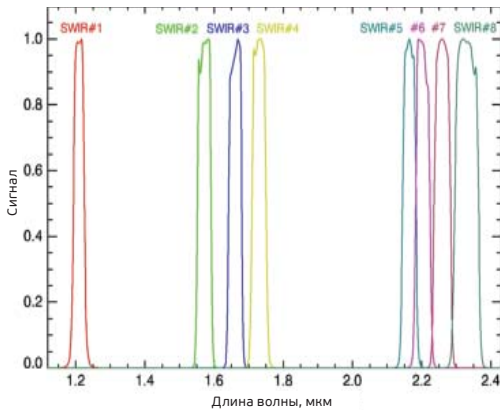


Рис. 4. Амплитудно-частотные характеристики коротковолнового ИК-диапазона спутника WorldView-3 (26 сентября 2013 г.)

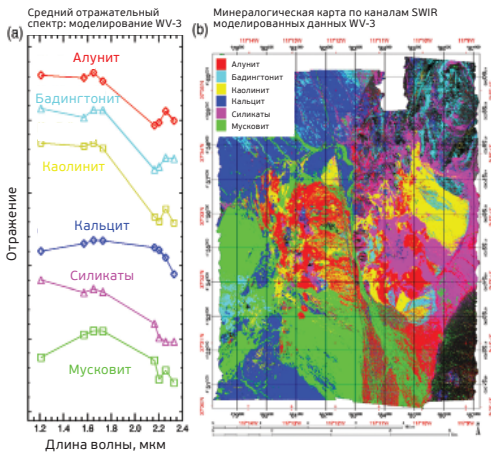


Рис. 5. а) Средний отражательный спектр, полученный из прогнозных данных WorldView-3 в ИК-диапазоне с пространственным разрешением 7,5 м для «участков интереса» с известной минералогией. б) Минералогическая карта МТМФ, показывающая преобладающие в спектре каждого пикселя минералы. (Сравните с данными AVIRIS — рис. 2.)

этого района нет — самые лучшие, детальные минералогические карты построены по гиперспектральной съемке (рис. 16). Нанесенные на карту в рамках данного исследования классы минералов основаны на данных AVIRIS, они в целом соответствуют главным группам минералов, их распространение согласуется с ранее опубликованными

картами гидротермального изменения и гиперспектральными минералогическими картами (рис. 1). Чтобы провести валидацию, описанные минералогические карты AVIRIS (рис. 26) были взяты за наземные контрольные данные, по ним оценили поведение WorldView-3. Можно было провести прямое сравнение спектрального и пространственного охвата, а также пространственного разрешения этих данных.

Визуальное сопоставление двух минералогических карт показало хорошую сходимость (рис. 26 и 56). Матрицу неточностей вычислили, приняв за наземные контрольные данные материалы AVIRIS: картирование по ним сравнили с результатами обработки данных WorldView-3. Точность составила 50,92%, а коэффициент Каппа для попиксельного сопоставления картографических продуктов, полученных по AVIRIS и WorldView-3, равен 0,38 (табл. 2). Значения в диагональных ячейках матрицы неточностей показывают: модельные данные WorldView-3 лучше всего подошли для обнаружения и картирования баддингтона, кальцита и силикатов. Тем не менее оценки ошибок комиссии и оmissии (табл. 2) свидетельствуют об обнаружении баддингтона там, где его не увидел AVIRIS (рис. 26 и 56). Из табл. 2 видно, что значительное количество ошибок во всех классах минералов приурочено к неклассифицированным зонам, а значит, большинство ошибок — не сложности определения конкретного материала, а невозможность выявления его по мультиспектральным данным, что предположительно связано с тем, что модельные данные WorldView-3 не сохраняют ключевые спектральные особенности из-за низкого спектрального разрешения. Кроме того, табл. 2 показывает, что для существующих каналов и спектральном разрешении модельных данных WorldView-3 есть значительное сходство между

Класс	Неопределенный	Алунит	Бадингтонит	Каолин	Кальцит	Силикат	Мусковит	Итого:
Неопределенный	45,39	16,92	1,21	18,50	2,61	10,73	11,44	28,11
Алунит	4,30	34,69	0,26	3,55	2,06	0,32	3,75	7,45
Бадингтонит	13,72	4,20	73,54	8,91	2,23	9,39	3,51	9,30
Каолин	6,24	14,14	20,76	46,84	4,03	8,49	14,47	11,55
Кальцит	11,46	5,34	0,71	6,53	82,44	0,50	5,79	15,60
Силикат	10,13	6,77	3,26	7,08	2,31	67,93	5,13	10,89
Мусковит	8,56	17,95	0,26	8,59	4,31	2,65	55,90	17,10
Итого:	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Класс	Комиссия (%)	Омиссия (%)	Точность производителя	Точность пользователя
Неопределенный	22,13	54,41	45,59	77,87
Алунит	42,75	65,31	34,69	57,25
Бадингтонит	97,46	26,46	73,54	2,54
Каолин	70,28			
Кальцит	49,10			
Силикат	67,31			
Мусковит	43,86			

Примечание: синим отмечена корреляция между прогнозными данными WorldView-3 и AVIRIS.

Табл. 2. Матрица ошибок и дополнительная статистика сравнения прогнозных данных WorldView-3 (вертикальная ось) с данными спектрометра AVIRIS, обработанными по алгоритму частичного разделения с помощью фильтра по эталонам, адаптированного к спектральной смеси (МТМФ) (горизонтальная ось). Точность 50,92%, коэффициент Каппа равен 0,3843

алунитом, каолинитом и мусковитом, а также между бадингтонитом и каолинитом.

Исключение неклассифицированных пикселей из матрицы неточностей повышает общую точность до 63,43%, а коэффициент Каппа — до 0,54 (табл. 3). Улучшаются диагонали матрицы неточностей, проще оценивать ошибки комиссии и омиссии для конкретных минералов. Бадингтонит, каолинит и силикаты чаще других картируются неверно. Пиксели алунита, каолинита и мусковита из данных AVIRIS в картографических продуктах по модельным данным WorldView-3, обработанным МТМФ, чаще всего отсутствуют.

Некоторые минералы по каналам коротковолнового ИК-диапазона WorldView-3 определяются лучше. Проверка матриц неточностей показала, что велика эффектив-

ность картирования кальцита, бадингтонита и силикатов. Но сходство минералов с близкими спектрами в КИК сохраняется, так как при высоком спектральном разрешении алунит, каолинит и мусковит имеют характерные спектральные особенности в районе 2,2 мкм (рис. 2а).

РЕАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ WORLDVIEW-3: АЛГОРИТМ «ЭМПИРИЧЕСКОЙ ЛИНИИ», МИНЕРАЛОГИЧЕСКОЕ КАРТИРОВАНИЕ И СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Данные WorldView-3 на район Куприт были получены 19 сентября 2014 г., их пространственное разрешение 3,7 м. Данные в коротковолновом ИК-диапазоне компания DigitalGlobe привела к пространственному разрешению 7,5 м и объединила с данными видимого и ИК-диапазона

Класс	Неопределенный	Алунит	Бадингтонит	Каолин	Кальцит	Силикат	Мусковит	Итого:
Неопределенный								
Алунит		41,75	0,26	4,36	2,12	0,35	4,23	11,76
Бадингтонит		5,06	74,44	10,94	2,29	10,52	3,96	5,94
Каолин		17,02	21,01	57,47	4,14	9,51	16,34	18,70
Кальцит		6,42	0,72	8,01	84,65	0,56	6,54	22,06
Силикат		8,14	3,30	8,69	2,37	76,09	5,80	13,17
Мусковит		21,60	0,26	10,53	4,43	2,97	63,13	28,38
Итого:		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Класс	Комиссия (%)	Омиссия (%)	Точность производителя	Точность пользователя
Неопределенный				
Алунит	20,80	58,25	41,75	79,20
Бадингтонит	91,30	25,56	74,44	8,70
Каолин	59,88	42,53	57,47	40,12
Кальцит	21,37	15,35	84,65	78,63
Силикат	40,91	23,91	76,09	59,09
Мусковит	26,10	36,87	63,13	73,90

Примечание: синим отмечена корреляция между прогнозными данными WorldView-3 и AVIRIS.

Табл. 3. Матрица ошибок и дополнительная статистика сравнения WorldView-3 прогнозных данных WorldView-3 (вертикальная ось) с данными спектрометра AVIRIS, обработанными по алгоритму частичного разделения с помощью фильтра по эталонам, адаптированного к спектральной смеси (MTMF) (горизонтальная ось). Неклассифицируемые пиксели удалены. Точность 63,43%, коэффициент Кappa 0,5406

с разрешением 1,6 м методом ближайшего соседа. Получился 16-канальный куб данных. DigitalGlobe провела атмосферную коррекцию набора спектральных энергетических яркостей по алгоритму «эмпирической линии», для расчета взяты гиперспектральные данные AVIRIS за октябрь 2010 г. Данные AVIRIS предварительно прошли атмосферную коррекцию в модели FLAASH. По обработанным в FLAASH спектральным яркостям светлых и темных объектов (плайя и базальт соответственно) и спектрам тех же материалов/участков на снимках WorldView-3 построили модель линейной регрессии (алгоритм «эмпирической линии», вычисление и коррекция). Яркости каждого канала WorldView-3 сопоставили с известными яркостями AVIRIS (отметим, что DigitalGlobe планирует провести программную атмосферную коррекцию WorldView-3,

чтобы реализовать потенциал каналов CAVIS, но для материалов данного исследования она была недоступна). По данным коротковолнового ИК-диапазона WorldView-3 были получены репрезентативные спектральные яркости известных минералов для тех участков, которые не удалось картировать по AVIRIS и модельным данным WorldView-3. Минералогическое картирование провели по стандартному алгоритму MTMF; результаты картирования по спутниковым данным WorldView-3 сопоставили с работами по AVIRIS и модельным данным WorldView-3.

Сопоставление съемок в коротковолновом ИК-диапазоне

По данным AVIRIS, модельного и реального WorldView-3 построили цветные

композиаты КИК-диапазона; выбрали каналы 1,65, 2,20 и 2,33 мкм (RGB) (рис. 6). Те районы, которые предположительно прошли преобразование, соответствуют пикселям пурпурного и красного цветов. Согласно источникам, преобразованный минерал алунит (линия поглощения около 2,16 мкм) показан темно-пурпурным цветом, а аргиллизированные районы (с высоким содержанием каолинита) и участки с мусковитом (линия поглощения — 2,2 мкм) — более чистыми красным и розовым цветами. Обратите внимание на значительное визуальное сходство цветных композитов AVIRIS, модельных и реальных данных WorldView-3 (рис. 6).

Сравнение спектральных образов изученных участков

Спектральные образы, полученные для каждого из трех наборов данных для «участков интереса», показали хорошую сопоставимость между спектрами AVIRIS, модельного и реального WorldView-3 (рис. 7).

Все спектры имеют ожидаемую форму и показывают ключевые особенности поглощения; во всех классах ошибка

составила менее 5%. Согласованность почти всех спектров находится в пределах 2%. Реальные спектры WorldView-3 хорошо описывают минералогию Куприта, ожидаемый спектр очень схож с модельным спектром WorldView-3, созданным по AVIRIS. Ключевые особенности, присутствующие в спектре WorldView-3, включают линии поглощения на 2,2 и 2,3 мкм для мусковита (рис. 7а), 2,33 мкм для кальцита (рис. 7б), асимметричную линию 2,2 мкм для каолинита (рис. 7в), 2,16 мкм для алунита (рис. 7г) и широкое «плечо» в районе 2,25 мкм для силикатов (рис. 7д). У баддингтонита различима линия поглощения в районе 2,1 мкм, но она смещена на 2,2 мкм, потому что у WorldView-3 нет канала с позицией 2,1 мкм (рис. 7е). Совокупность этих спектральных образов создает основу для картирования минералов района Куприт по алгоритму MTMF.

Сравнение минералогических карт, построенных по данным, обработанным по алгоритму MTMF

Спектральные яркости орбитального сенсора WorldView-3 для определенных минералов были получены на изученных

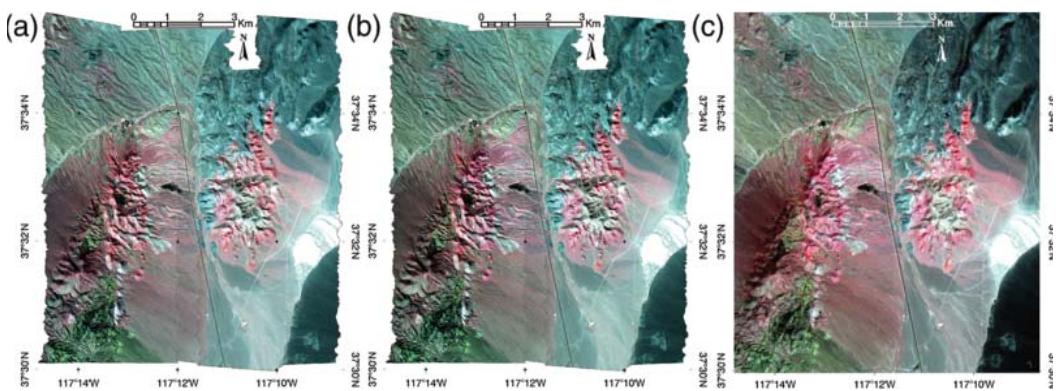


Рис. 6. Цветной (RGB) композит коротковолнового ИК-диапазона; использованы: а) каналы 137, 194, 207 (1,652, 2,198, 2,327 мкм) каналы AVIRIS; б) каналы S3, S6, S8 (1,65, 2,20, 2,33 мкм) модельных данных WorldView-3; в) каналы S3, S6, S8 (1,661, 2,202, 2,329 мкм) спутниковых данных WorldView-3

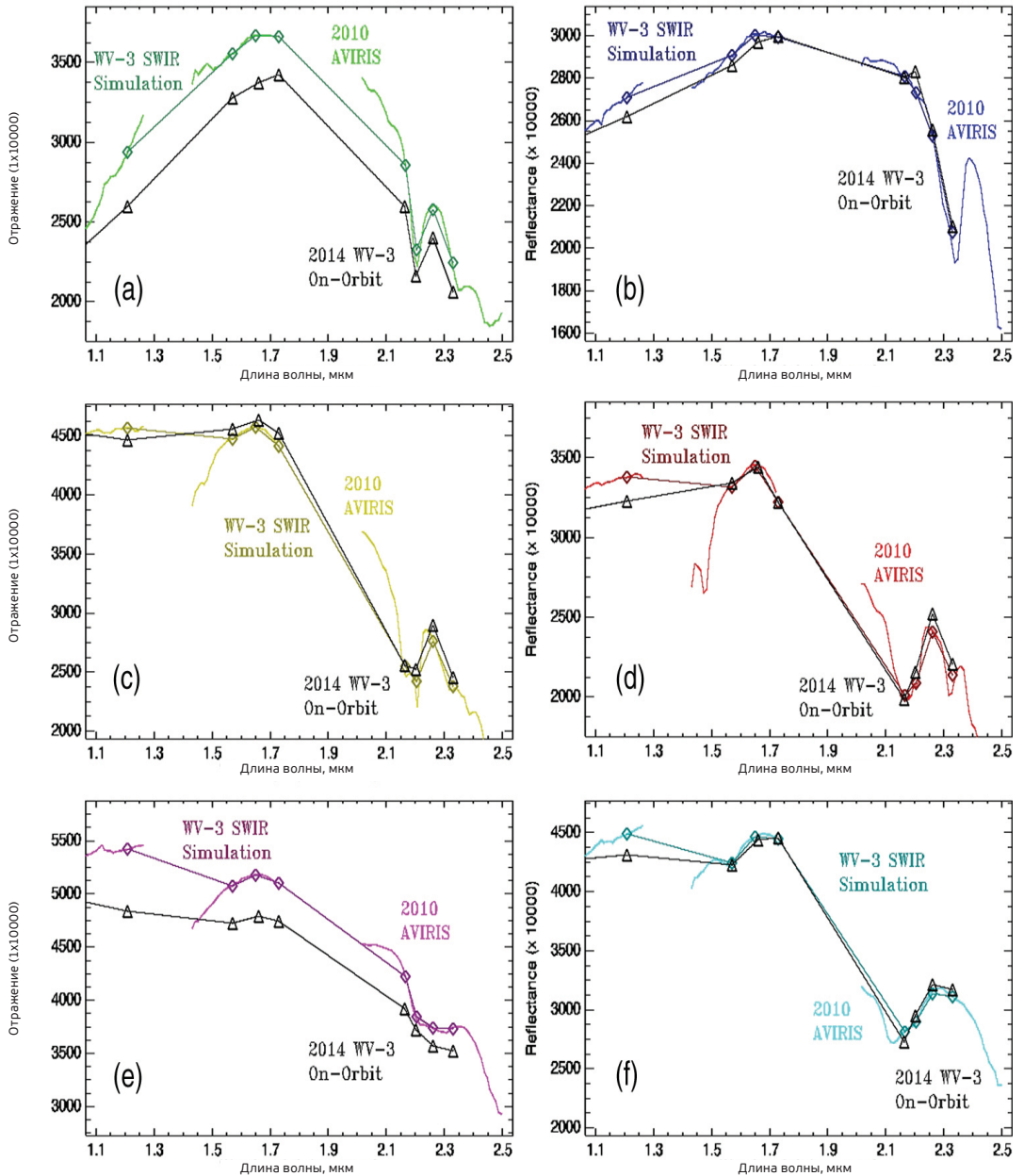


Рис. 7. Сопоставление спектральных образов в коротковолновом ИК-диапазоне участков с известной минералогией, полученных по трем наборам данных (AVIRIS, модельные и прогнозные данные WorldView-3): а) мусковит; б) кальцит; в) каолинит; г) alunит; д) гидротермальные силикаты; е) баддингтонит. Цветные символы показывают спектры WorldView-3, практически совпадающие со спектрами AVIRIS, но с меньшим количеством каналов

«участках интереса» (рис. 7), они легли в основу карты пространственного распространения минералов (рис. 8в). Было проведено визуальное сравнение этой карты, и MTF-обработки данных AVIRIS (рис. 8а) и модельных данных WorldView-3 (рис. 8б). Реальные данные WorldView-3 (рис. 8в) в целом совпадают с результатом картирования по модельным данным (рис. 8б). В некоторых аспектах они даже более согласуются с картами AVIRIS, т. е. работают эффективнее, чем показал прогноз. Выяснилось, например, что реальный сенсор WorldView-3 подходит для картирования баддингтонита и каолинита лучше, чем предполагала модель. Отметим, что распространение баддингтонита на карте по WorldView-3 ограничено и лучше согласуется с картой по AVIRIS (голубые зоны, расположенные ближе к центру левого изображения), в то время как модельные данные WorldView-3 дали более обширное распространение баддингтонита в районах, сложенных алунитом или неидентифицируемых (голубые зоны ближе к верхней части центрального изображения и ближе к краю правой части рис. 8).

Сравнительная статистика

Повторимся, гиперспектральные данные AVIRIS являются основой самых детальных минералогических карт района Куприт. Сравнение минералогической карты по AVIRIS и карты по реальным данным WorldView-3, обработанным MTF, показывает, что картированные классы минералов в целом согласуются с ключевыми группами минералов и их распространением, отраженным на выпущенных ранее и гиперспектральных картах.

Минералогическая карта по AVIRIS приведена на рис. 2б и 8а. Она заменила наземные контрольные данные для оценки свойств WorldView-3 (рис. 8в). Матрицы неточностей были рассчитаны по AVIRIS в качестве наземных контрольных данных, затем была проведена оценка пригодности для картирования конкретных преобразованных минералов. Эффективность реальных данных WorldView-3 (табл. 4) в целом совпала с прогнозируемой (табл. 2). Хотя визуальное сопоставление двух минералогических карт говорит о хорошей сходимости, более детальная проверка матриц неточностей (табл. 4) показала, что точность равна 55,90%,

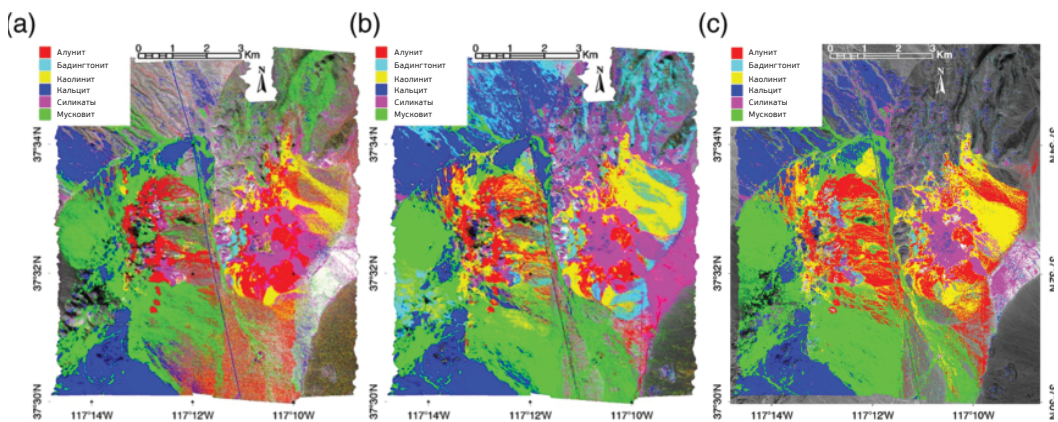


Рис. 8. Минералогическая карта, составленная по: а) данным AVIRIS, обработанным по алгоритму MTF; б) прогнозным данным WorldView-3; в) реальным данным WorldView-3.

коэффициент Каппа при попиксельном сравнении карт составил 0,39. Значения в диагональных клетках матрицы неточностей показывают: реальные данные WorldView-3 лучше всего подходят для идентификации и картирования кальцита и мусковита. Дальнейшая оценка ошибок коммисии и оmissии свидетельствует о том, что WorldView-3 позволяет картировать больше бадингтонита, чем AVIRIS. Для реальных данных WorldView-3 это менее заметно — только 16 263 пикселей (2%) были признаны бадингтонитом в неклассифицируемых по AVIRIS местах, для сравнения — в модельных данных таких пикселей было 109 827 (14%). Кроме того, при картировании по данным с запущенного на орбиту спутника WorldView-3 велики ошибки коммисии для каолинита и алунита. Большинство ошибок вызваны картирова-

нием неклассифицируемых по AVIRIS пикселей (рис. 4). В целом у WorldView-3 серьезные ошибки оmissии почти для всех картируемых минералов, показывающие, что во многих случаях нельзя идентифицировать минералы по мультиспектральным данным с обработкой алгоритмом MTF. Эти ошибки похожи на выявленные при моделировании WorldView-3. Табл. 4 показывает, что при существующих амплитудно-частотных характеристиках и спектральном разрешении WorldView-3 при картировании часто возникает путаница между алунитом, каолинитом и мусковитом. Это наиболее часто происходит на аллювиальных конусах, где смешиваются все три минерала. Возникает путаница между бадингтонитом и каолинитом, вероятно, потому, что у WorldView-3 нет спектрального канала именно для линии

Класс	Неопределенный	Алунит	Бадингтонит	Каолин	Кальцит	Силикат	Мусковит	Итого:
Неопределенный	65,63	26,48	10,33	29,18	14,05	35,26	24,25	44,30
Алунит	7,13	35,02	13,07	13,41	2,86	4,48	6,30	10,35
Бадингтонит	2,03	1,57	36,72	1,93	0,82	3,70	1,00	1,87
Каолин	4,72	16,97	36,67	40,14	4,36	15,71	9,97	10,37
Кальцит	6,77	2,11	0,90	2,82	62,52	1,68	4,48	10,60
Силикат	3,36	2,16	0,88	2,77	1,39	36,71	1,11	4,33
Мусковит	10,36	15,68	1,44	9,76	14,00	2,46	52,88	18,18
Итого:	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Класс	Коммиссия (%)	Оmissия (%)	Точность производителя	Точность пользователя
Неопределенный	28,88	34,37	65,63	71,12
Алунит	58,38	64,98	35,02	41,62
Бадингтонит	93,70	63,28	36,72	6,30
Каолин	71,62	59,86	40,14	28,38
Кальцит	43,19	37,48	62,52	56,81
Силикат	55,60	63,29	36,71	44,40
Мусковит	50,05	47,12	52,88	49,95

Примечание: синим отмечена корреляция между прогнозными данными WorldView-3 и AVIRIS.

Табл. 4. Матрица ошибок и дополнительная статистика сравнения орбитальных данных WorldView-3 (вертикальная ось) с данными спектрометра AVIRIS (горизонтальная ось). Точность 55,90%, коэффициент Каппа 0,3902

Класс	Неопределенный	Алунит	Бадингтонит	Каолин	Кальцит	Силикат	Мусковит	Итого:
Неопределенный								
Алунит		47,64	14,58	18,94	3,33	6,92	8,32	17,67
Бадингтонит		2,14	40,95	2,72	0,95	5,72	1,32	2,29
Каолин		23,08	40,89	56,68	5,07	24,26	13,16	20,67
Кальцит		2,88	1,00	3,98	72,24	2,60	5,91	18,74
Силикат		2,93	0,98	3,91	1,52	56,71	1,47	6,94
Мусковит		21,33	1,60	13,77	16,29	3,79	69,81	33,69
Итого:		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Класс	Комиссия (%)	Омиссия (%)	Точность производителя	Точность пользователя
Неопределенный				
Алунит	37,81	52,36	47,64	62,19
Бадингтонит	86,86	59,05	40,95	13,14
Каолин	63,68	43,32	56,68	36,32
Кальцит	18,05	27,26	72,74	81,95
Силикат	29,26	43,29	56,71	70,74
Мусковит	31,24	30,19	69,81	68,76

Примечание: синим отмечена корреляция между прогнозными данными WorldView-3 и AVIRIS.

Табл. 5. Матрица ошибок и дополнительная статистика сравнения орбитальных данных WorldView-3 (вертикальная ось) с данными спектрометра AVIRIS (горизонтальная ось). Неклассифицируемые пиксели удалены. Точность 62,23%, коэффициент Каппа 0,5122

поглощения бадингтонита в районе 2,11 мкм. Результаты также схожи с прогнозными.

Удаление неклассифицируемых пикселей повышает общую точность до 62,23%, а коэффициент Каппа — до 0,51 (табл. 5). Диагонали матрицы неточностей заметно улучшаются, ошибки комиссии и омиссии уточняются для конкретных минералов. В ходе моделирования отмечено, что бадингтонит, каолинит и силикаты чаще остальных картируются как другие минералы. Тем не менее реальные ошибки комиссии и омиссии больше, чем предсказывала модель.

Другие подходы и продукты

Хотя WorldView-3 — мультиспектральный спутник, мы сравнили его эффективность с эффективностью гиперспектрального

сенсора AVIRIS при минералогическом картировании прямым методом. Сделано это, чтобы провести границу применимости. Данное исследование показало, например, что благодаря хорошо подобранным параметрам каналов коротковолнового ИК-диапазона WorldView-3 позволяет картировать некоторые минералы по их спектральным сигнатурам. Есть и другие методы, подходящие для мультиспектрального анализа, при помощи которых можно получить уникальные и полезные картографические продукты. Некоторые приведенные здесь примеры иллюстрируют такие методы.

Композиты по многоспектральным отношениям долгое время используются для выделения формы спектральных сигнатур по мультиспектральным данным. Они сокращают воздействие на классификацию затенения,

тени и шума. Для WorldView-3 коэффициенты контрастности в видимом и ближнем ИК-диапазоне в сочетании с соотношением каналов S3/S5 (1,66/2,20 мкм) дают возможности, сравнимые с цветными композитами Landsat, в том числе по соотношению 5 и 7 (1,65 и 2,20 мкм) каналов коротковолнового диапазона Thematic Mapper, но пространственное разрешение у них лучше. Хорошо подобранные каналы WorldView-3 коротковолнового ИК-диапазона также создают широкий спектр возможностей для геологического картирования основных интересующих материалов по соотношениям каналов. Например, соотношения коротковолновых ИК-каналов S5/S6 (2,16/2,20 мкм) и S7/S6 (2,26 /2,20 мкм) используются вместе для подчеркивания особенностей спектрального поглощения в районе 2,2 мкм. Соотношение каналов S7/S8 (2,26/2,33 мкм) и S7/S6 (2,26/2,20 мкм) выявляет распространение материалов с особенностями поглощения в районе 2,33 мкм и формирует спектральный градиент для таких материалов, как алузит. Сочетание S5/S6, S7/S6 и S7/S8 (RGB) в цветном композите позволяет картировать,

например, мусковит (светло-красный), алузит и связанные с ним минералы (светло-зеленый) и карбонаты (синий) (рис. 9а). Оранжевая область в середине правой части отражает распределение гидротермальных силикатов. Чтобы найти разные минералы или специфические материалы, определить или маскировать растительность, водные объекты, можно создать другие соотношения как видимого и ИК, так и коротковолновых ИК-каналов.

Цветные композиты из трех спектральных каналов в цветовом пространстве RGB – это простые трехканальные цветные изображения, которые создают на основе известных отражательных свойств интересующих материалов. Определить ключевые материалы можно стратегически, подбирая каналы для отображения в RGB, основываясь на спектральных особенностях и характеристиках интересующих материалов. Используя каналы, подчеркивающие особенности поглощения, можно создать цветной композит, в котором выбранный материал/материалы будет показан заранее выбранным цветом/палитрой. Вертикальные цветные линии на рис. 9б показывают каналы RGB, использованные

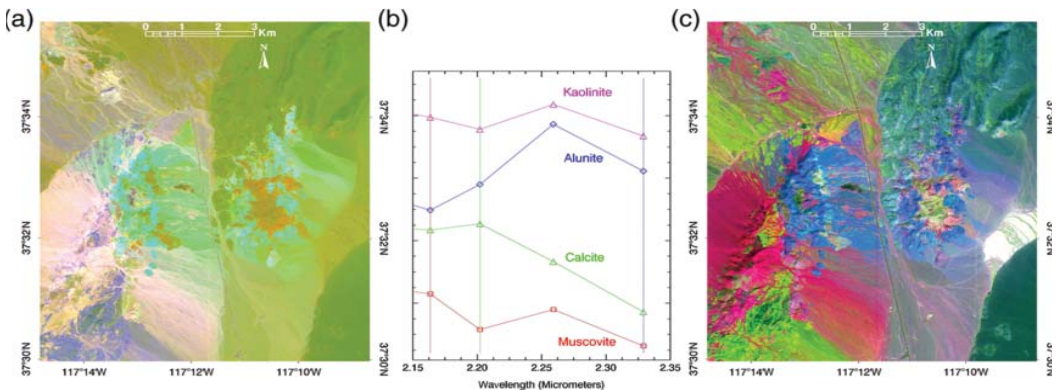


Рис. 9. а) Спектральные соотношения НИК-каналов WorldView-3: S5/S6, S7/S6, S7/S8 (2,16/2,20 мкм, 2,26/2,20 мкм, 2,26/2,33 мкм) в качестве RGB; б) репрезентативные спектры WorldView-3; в) цветной композит коротковолновых ИК-каналов S5, S6, и S8 (2,16; 2,20; 2,33 мкм) в качестве RGB. Насыщенность цветов правого изображения повысили путем декорреляционного растяжения (оттенки не изменены). Цветные вертикальные линии на спектральной диаграмме (б) показывают каналы, видимые как RGB на композите в). Спектральные диаграммы используют для разработки соотношений цветов и создания цветных композитов, чтобы показать интересные материалы заранее выбранными цветами

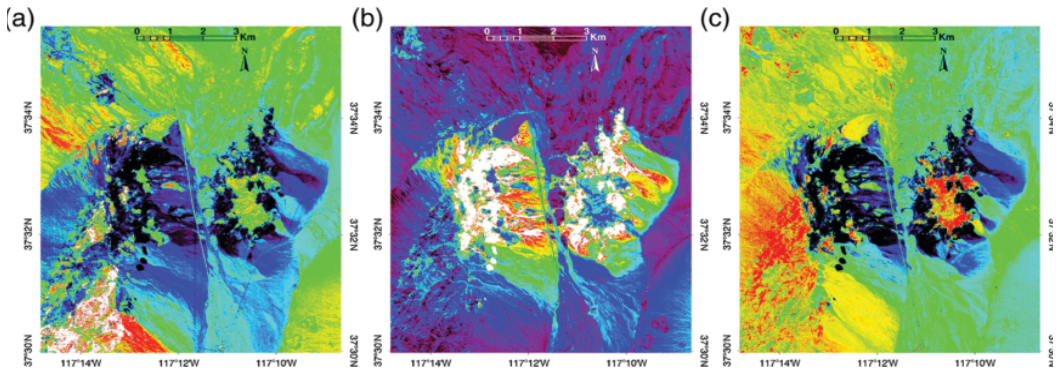


Рис. 10. Отдельные минералогические индексы для КИК-диапазона, рассчитанные по реальным данным WorldView-3 data. а) Карбонатный индекс WorldView-3 (здесь определен как $[S6/(S7+S8)]$ или $2,20 \text{ мкм} / (2,26 \text{ мкм} + 2,33 \text{ мкм})$; выходы карбонатов показаны красным или белым; б) Индекс алуинит/каолинит/пиррофиллит (определен Национальной геологической службой США как относительная глубина изображения (relative band depth — RBD) по соотношению каналов ASTER ($S4+S6$)/ $S5$, здесь адаптированы для КИК-каналов WorldView-3 как $(S5+S7)/S6$ или $[1,66 \text{ мкм} + 2,20 \text{ мкм} / 2,16 \text{ мкм}]$; участки распространения этих минералов белые на зеленом фоне; в) AL-OH group composition index [определен Австралийским агентством по науке по каналам ASTER: $(S5+S7)/S6$, адаптирован для КИК-каналов WorldView-3 как $(S5+S7)/S6$ или $(2,16 \text{ мкм} + 2,26 \text{ мкм}) / 2,20 \text{ мкм}$]; синий соответствует каолиниту или богатым алюминием слюдам (мусковит, иллит, паразонит, пиррофиллит, бейделлит); красный — обедненным алюминием, но богатым кремнием белым слюдам (фенгит) или монтмориллониту.

для создания цветного композита КИК-каналов спутника WorldView-3 — S5, S6 и S8 (2,16; 2,20; 2,33 мкм) (рис. 9в). Насыщенность цветов повысили путем декорреляционного растяжения. Мусковит стал красным из-за сильного отражения в канале S5 (2,16 мкм), малой доли синего и зеленого из-за поглощения в канале S6 (2,20 мкм) и слабого отражения в S8 (2,33 мкм). Каолинит лиловый из-за большого вклада канала S5 (2,16 мкм) и влияния синего и зеленого каналов S8 (2,33 мкм) и S6 (2,20 мкм) соответственно. Карбонаты (кальцит) на рис. 9в желто-зеленые благодаря сильному отражению в каналах S5 (2,16 мкм) и S6 (2,20 мкм) и слабому – в S8 (2,33 мкм), что вызвано поглощением в районе 2,33 мкм. Алуинит синий из-за сильного отражения в районе 2,33 мкм в сочетании со слабым отражением в каналах S5 (2,16 мкм) и S6 (2,20 мкм). Чтобы выделить другие материалы, спектральные формы и особенности поглощения, можно создать другие композиты.

Долгое время индексы для картирования спектральных характеристик мультиспек-

тральных данных по разным материалам использовались для определения растительности (например, NDVI). Они также активно применялись для геологического/минералогического картирования по сенсору ASTER, спектральные каналы которого в коротковолновом ИК-диапазоне схожи с WorldView-3, но имеют меньшее пространственное разрешение (30 м). Минералогические индексы дают более комплексные изображения, чем простые RGB-композиции или композиты по соотношениям каналов. Они разработаны, чтобы показывать параметры распространенности отдельных минералов или их групп. Существует множество комбинаций, часть показан на рис. 10, чтобы продемонстрировать возможности WorldView-3.

Альтернативные методы обработки и анализа показали богатство спектральной информации, доступной в коротковолновых ИК-каналах WorldView-3. Они показали, что данные одинаково хорошо поддаются минералогическому анализу при помощи разных алгоритмов и методов, разработанных для анализа мультиспектральных данных. В дополнение

к уникальным КИК-каналам WorldView-3 дает несопоставимые возможности для смешанного анализа видимого ИК- и КИК-диапазонов, для повышения разрешения до 0,31 м за счет панхроматического канала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

WorldView-3 — это производительный коммерческий мультиспектральный спутниковый сенсор с впечатляющей комбинацией каналов с высоким разрешением и ключевыми каналами в коротковолновом ИК-диапазоне. Проведенное ранее моделирование с использованием данных AVIRIS на район Куприт, Невада, показало, что WorldView-3 сможет определять и картировать методами сопоставления спектров ряд минералов, основываясь на их спектральных свойствах в коротковолновом ИК-диапазоне. Минералогические карты MTMF, построенные в ходе моделирования, показали примерно такое же распространение и проявление минералов, что и карты, созданные по данным 86 каналов коротковолнового ИК-диапазона AVIRIS. Статистическая обработка матриц неточностей с принятием AVIRIS за наземные контрольные данные выявила тем не менее типичные для мультиспектральной съемки недостатки (путаница в схожих минералах), обусловленные меньшим по сравнению с AVIRIS спектральным разрешением, недостаточным для ключевых спектральных свойств минералов. Принимая во внимание, что WorldView-3 не гиперспектральный сенсор, прогнозные результаты минералогического картирования по WorldView-3 были многообещающими и описали возможности WorldView-3 как нового сенсора для картирования геологических преобразований — лучшего, чем любой другой коммерческий мультиспектральный сенсор, находящийся сейчас на орбите.

Последующее минералогическое картирование по реальным данным WorldView-3

на район Куприт с применением тех же алгоритмов и методов показывает, что сенсор WorldView-3 работает так, как показал прогноз. Извлеченные спектры схожи с модельными, расхождение менее 5%. Хорошо различимые в данных реального WorldView-3 особенности спектров ключевых минералов были успешно использованы для картирования по алгоритму MTMF характера и распространения минеральных ассоциаций в районе Куприт. В числе картированных минералов каолинит, алунит, баддингтонит, мусковит, кальцит и гидротермальные силикаты. В целом реальные данные WorldView-3 в КИК-диапазоне хорошо соответствуют прогнозу минералогического картирования; 8 хорошо подобранных каналов и разрешение 7,5 м дают исчерпывающие возможности, недоступные другим космическим мультиспектральным системам.

В дополнение к прямым методам минералогического картирования, описанным при моделировании данных WorldView-3 и валидации реальных данных КИК-диапазона, уникальный набор спектральных каналов дает возможности картирования в коротковолновом ИК-диапазоне, сходные с возможностями ASTER, но при значительно большем пространственном разрешении. Наряду с методами прямого минералогического картирования и другими алгоритмами для получения результатов, несопоставимых с продуктами запущенных коммерческих сенсоров, можно использовать такие подходы, как многоспектральные отношения, цветные композиты из трех спектральных каналов в цветовом пространстве RGB и минералогические индексы. КИК-каналы ASTER сейчас не функционируют, и WorldView-3 — единственный спутник на орбите, обладающий несколькими, расположенными почти неразрывно, каналами КИК-диапазона. Очевидно, WorldView-3 создаст более продвинутые возможности для поддержки задач геологического и другого поверхностного картирования.