

ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАТИВНОСТЬ СНИМКОВ КА «МЕТЕОР-М» № 1

К.А. Боярчук, М.В. Туманов
(ОАО «НИИЭМ»)

Л.В. Милосердова
(ГОУ ВПО «РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина»)

Рассматриваются вопросы информативности изображений, полученных с помощью дистанционного зондирования Земли, при геологическом дешифрировании. Для оценки геологической информативности использовались снимки низкого, среднего и высокого разрешения.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, геологическое дешифрирование, геологическая информативность, линеаментный анализ, разрешение космических снимков.

Дистанционные методы применяются везде, где средствами картографии изображаются объекты и процессы, происходящие в природе. Преимущество аэрокосмических методов заключается в том, что благодаря естественной генерализации, картируемые тела предстают перед наблюдателем в их естественных границах и соотношениях. При этом информация, содержащаяся в изображениях поверхности Земли, многократно преобразуется, перекодируется, видоизменяется. Эти изменения происходят как при технологическом процессе предварительной подготовки её для пользователя, так и при тематической (геологической) интерпретации. Представление об информативности изображений при этом оказывается принципиально различным.

За почти сорокалетнюю историю использования космических изображений в науке и народном хозяйстве ведущей тенденцией совершенствования регистрирующих систем является расширение спектрального диапазона съёмки, повышение их разрешения (спектрального, радиационного и пространственного) и увеличение числа спектральных каналов. Считается, что таким способом увеличивается информативность данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), что предъявляет повышенные требования к обработке данных. Однако при тематическом применении космических изображений достигается совершенно иной, часто противоположный эффект.

Геологи работают в разных масштабах: от микроскопического до глобального. И на каждом масштабном уровне они получают информацию о различных свойствах объекта исследования,

формируя целостную картину-модель. Для изучения геологических объектов различных иерархических уровней на каждом из них требуются исследования в своих масштабах, напрямую связанных с генерализацией изображения. Для упрощения работы генерализацию зачастую увеличивают, увеличивая размер пикселя на растровых изображениях, «огрубляя» изображение. Однако при этом информативность изменяется отнюдь не так, как это происходит при применении изображений малого разрешения.

Термин информативность понимается по-разному. Если мы говорим об информативности сообщения (в случае геологического дешифрирования космических снимков – в изображении), то по К. Шеннону [1] под информативностью изображений следует понимать снятую неопределённость наших знаний о геологическом строении территории. Геологическая информативность, в этом смысле, есть характеристика не сообщения, а соотношения между сообщением и его потребителем. Одно и то же спутниковое изображение будет содержать разное количество информации для разных исследователей – в зависимости от задач исследования, их предшествующих знаний, от уровня понимания этого сообщения и интереса к нему. Только в этом понимании и можно говорить об информативности космических изображений применительно к тематическому дешифрированию. В другом подходе, алфавитном, согласно Колмогорову [2], носителями информации являются любые последовательности символов. Информативность последовательности символов не зависит от содержания сообщения. Именно о такой информативности говорят при увеличении

скорости и объема передачи информации в технических системах, повышении разрешения изображений и увеличении числа спектральных диапазонов. При этом при решении одних задач передача информации должна происходить с минимальными искажениями, максимально экономным путем (свертывание), а в других задачах её преобразуют, искажают, проводя различные виды коррекции. При Шенноновском же подходе информация безжалостно сокращается, в неё добавляются дополнительные (априорные) данные, она существенно перекодируется, и иногда в результирующем материале с трудом можно отыскать исходные данные изображения.

Таким образом, обработка (преобразование) информации – это процесс изменения формы представления информации или ее содержания. Обработка информации всегда осуществляется с какой-либо целью, в нашем случае – для распознавания по изображениям геологического строения территории. Процессы изменения формы представления информации в геологических исследованиях заключаются в её декодировании (в нашем случае – геологическом дешифрировании). Изменение содержания информации включает в себя различные процедуры, в процессе которых изображение превращается в схему или карту геологического дешифрирования.

При дешифрировании космических изображений различного разрешения можно сравнивать следующие свойства информации:

1. Достоверность. Считается, что информация достоверна, если она отражает истинное положение дел. В этом смысле любое космическое изображение в отличие от геологических карт, которые являются результатом обобщений, иногда произвольных, всегда достоверно. Однако достоверны лишь спектральные яркости каждой точки изображения и их градиенты, относящиеся к моменту съемки. Любая информация имеет свойство устаревать, т. е. перестает отражать истинное положение дел. Однако, если в характеристиках изображения отражается искомый геологический объект, существующий независимо от смен времен года и других мимолетных изменений ландшафта, то такое «устаревание» информации не ухудшает его свойства, а иногда улучшает, что бывает обусловлено меньшим антропогенным воздействием на ландшафт.

2. Полнота. Считается, что информация полна, если её достаточно для понимания ситуации и принятия решений. Как неполная, так и избыточная информация сдерживает принятие решений

или может повлечь ошибки, потому что избыточная информация превращается в шум.

3. Точность. Определяется степенью близости информации к реальному состоянию или положению объекта. Эта характеристика также не однозначна, как представляется на первый взгляд, потому что на космических изображениях мы видим линии и пятна, определяемые большими или меньшими градиентами спектральной яркости, однако, геологической информативность несут не они, а те компоненты и границы элементов ландшафта, которые мы распознаем в этих линиях и пятнах. Причем те из них, которые соотносятся с известными исследователю целевыми геологическими объектами, не несут дополнительной информации, а те, о которых он лишь догадывается – обусловлены исследователем. Исследователь находит на изображении подтверждение модели геологического строения, которое сформировано у него как идеальный мысленный образ. Хотя и существует некое реальное положение или состояние объекта в недрах, оно никому неизвестно.

4. Ценность. Зависит от того, насколько информация важна для решения задачи, а также от того, насколько в дальнейшем она найдёт применение в каких-либо видах деятельности человека. Этот критерий не зависит от разрешения изображений.

5. Своевременность. Эта характеристика важна при прогнозе катастрофических событий, т. е. в очень локальной и специфической области геологических исследований.

6. Краткость. Применительно к космическим изображениям, чем больше разрешение изображения, тем оно менее кратко.

7. Доступность. При увеличении разрешения изображения снижается доступность информации ввиду необходимости значительных компьютерных мощностей для её обработки.

Обычно до тематического дешифрирования данных ДЗЗ необходимо провести предварительную обработку космических снимков, которая, как правило, включает в себя геометрические, радиометрические и другие преобразования для коррекции соответствующих типов искажений. Геометрические искажения возникают благодаря как свойствам земной поверхности – неровностям рельефа и кривизне Земли, так и характеристикам КА – точности стабилизации, типу и высоте орбиты. В последнее время принято проводить геометрическую коррекцию космических снимков с помощью типовых моделей камер

спутников в виде обобщенных аппроксимирующих функций RPC. Геометрическая точность может быть повышена при использовании наземных точек привязки [3].

Радиометрические искажения связаны с изменениями условий освещенности во время проведения съемки, влиянием атмосферных явлений, а также аппаратными ошибками. Радиометрическая точность играет большую роль при решении задач, критичных к ошибкам в значениях спектральных характеристик объектов на местности. Операции по предварительной обработке космических снимков имеют стандартизованные алгоритмы коррекции ошибок и могут быть автоматизированы.

Задачи общегеографического и тематического дешифрирования разнообразны как по видам работ, так и по возможностям их компьютеризации. К настоящему времени удалось справиться с компьютерным дешифрированием для решения многих оперативных задач контроля пожарной опасности, разливов рек, аграрных и лесохозяйственных работ, разнообразных работ, связанных с мониторингом окружающей среды. Значительную часть этих задач удалось формализовать благодаря подспутниковым экспериментам и определению эталонных объектов и характерных значений спектральных яркостей и других характеристик картируемых явлений.

В настоящее время имеется необозримый архив, и постоянно пополняется обширный арсенал космических изображений и методов их преобразования и дешифрирования, которые благодаря развитию компьютерных технологий делаются все более доступными широкому пользователю.

Самые существенные характеристики космических изображений для геологических исследований – это уровень их генерализации, обусловленный обзорностью (разрешением) и зоной (зонами) спектра (спектров), которые наряду с сезоном и временем съемки предопределяют тематическую информативность изображений для последующей обработки и геологического дешифрирования.

Параметры изображений и их области применения зависят также от характеристик аппаратуры, помещенной на съемочную платформу соответствующих КА ДЗЗ, среди которых можно выделить КА низкого, среднего и высокого уровня обзорности. Основными характерными отличиями являются их разрешающая способность, размер полосы захвата территории и оперативность глобального покрытия [4].

В табл. 1 приведено сравнение основных характеристик таких систем.

Характерным КА ДЗЗ низкого разрешения является КА «Метеор-М» № 1, который входит в состав космического комплекса гидрометеорологического и океанографического обеспечения «Метеор-3М». КА «Метеор-М» № 1 предназначен для оперативного получения глобальной гидрометеорологической информации в целях прогноза погоды, контроля озонового слоя и радиационной обстановки в околоземном космическом пространстве [5]. Многозональное сканирующее устройство малого разрешения (МСУ-МР) является частью полезной нагрузки данного КА и предназначено для широкозахватной трассовой съемки с получением изображений облачности и земной поверхности в видимом и ИК-участках спектра с разрешением не хуже 1 км в надире.

В настоящее время для тематического (в том числе геологического) дешифрирования широко применяются изображения:

– КА ДЗЗ американской программы Landsat, позволяющие проводить видовую мультиспектральную съемку земной поверхности среднего разрешения, широко используются для решения целого ряда как практических задач, так и научно-методических исследований в области ДЗЗ;

– японского спутника ALOS. Основными назначениями данных являются картография, наблюдения за использованием природных ресурсов, а также проведение научных исследований [6].

В табл. 2 приведены основные сравнительные характеристики съемочных камер КА различного вида обзорности «Метеор-М» № 1, Landsat-7 и ALOS.

Рассмотрим информационные возможности изображений с этих аппаратов применительно к центральному району Африки, которые представляют собой наименее изученные территории. Именно в этих районах возможно получение наибольшего количества новой информации. Информативность изображений рассмотрим с точки зрения нефтегазогеологического дешифрирования, так как именно этот вид дешифрирования является для этих территории наиболее ценным.

Рассмотрим, например, как отражается геологическое строение на изображениях с различным разрешением плохо изученного нефтегазоносного района, расположенного в центре Африки – в Южном Судане. Размер этого участка примерно 1500 × 1200 км.

Таблица 1

Сравнение систем различного уровня обзорности

| Характеристика | Системы | | |
|---|--------------------|---------------------|---------------------|
| | Низкого разрешения | Среднего разрешения | Высокого разрешения |
| Пространственное разрешение, м | >70 | 10 – 70 | 0,5 – 10 |
| Ширина полосы съемки, км | >250 | 50 – 200 | 10 – 70 |
| Периодичность глобального покрытия, дни | 1 – 3 | 15 – 30 | >30 |

Таблица 2

Сравнительные характеристики съемочных камер «Метеор-М» №1, Landsat-7, ALOS

| Характеристика | «Метеор-М» № 1 (МСУ-МР) | Landsat-7 (ETM+) | ALOS (PRISM) |
|--|----------------------------|---------------------|-----------------|
| Спектральный диапазон, мкм | 0,5 – 12,5 | 0,52 – 0,90 | 0,52 – 0,77 |
| Полоса захвата, км | 2800 | 185 | 35 |
| Пространственное разрешение, м | 1000 | 15 | 2,5 |
| Радиометрическое разрешение, бит на пиксел | 10 | 8 | 8 |
| Периодичность съемки, дни | 0,5 | 16 | 46 |
| Основное назначение | Гидрометеорология | Картография | Картография |
| Дата запуска | 17.09.2009 | 15.04.1999 | 24.01.2004 |

Материалы *низкого разрешения глобального и континентального уровней генерализации* позволяют исследовать критерии нефтегазоносности, связанные с осадочными бассейнами и нефтегазоносными провинциями в целом. Их используют для уточнения границ нефтегазоносных провинций, осадочных и нефтегазоносных бассейнов, определения положения трансконтинентальных и трансрегиональных линейных элементов (разломов), территорий с единым геоморфологическим строением, обусловленным соответствующим тектоническим строением (щиты, антеклизы, синеклизы, тектонические ступени), участков с различными типами новейших тектонических движений. Результат дешифрирования, как правило, носит оценочный характер, позволяющий понять роль и место исследуемой территории в контексте других тектонических структур (рис. 1). Так, на рис. 1, а показана геологическая карта нефтегазоносности Южного Судана (нефтегазоносные бассейны Мужлад и Мелут), на рис. 1, б – космическое изображение с КА «Метеор-М» № 1, а на рис. 1, в – результат его геологического дешифрирования. Отчетливо вид-

но, что дешифрирование позволяет не только уточнить, но и принципиально изменить представление о структуре района, особенно в части его разломно-блокового строения.

По материалам *среднего разрешения регионального и локального уровней генерализации*, как правило, устанавливаются детали границ осадочных бассейнов, их структурный план и блоковое строение. Эти же материалы позволяют детализировать внутреннее строение нефтегазоносных провинций, выявлять закономерности пространственного распределения известных залежей по площади и разрезу, выявлять особенности строения слагающих бассейнов тектонических структур второго порядка – сводов, валов, авлакогенов, впадин. Возможно выявление наиболее приподнятых блоков, а в их пределах – основных разрывных нарушений, контролирующих размещение цепей локальных структур и блоковую фрагментацию зон нефтегазоаккумуляции, а также возможность оценить движения новейшего и современного тектонического этапа, влияющего на перераспределение углеводородов в недрах (рис. 2).

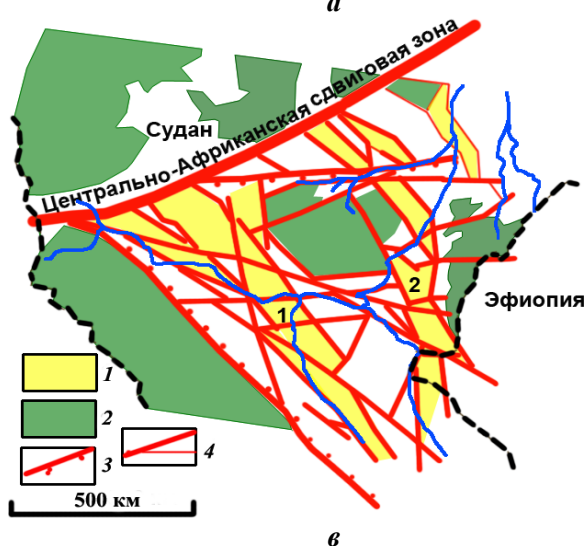
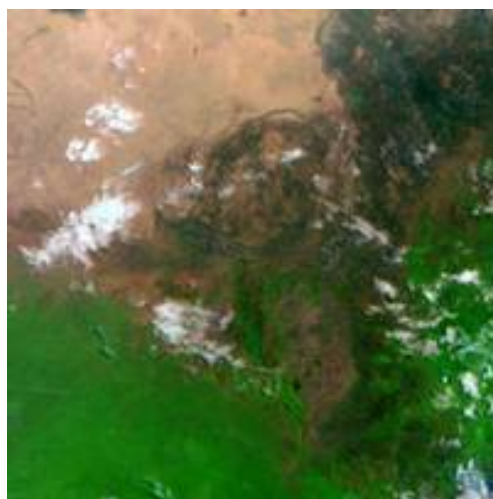
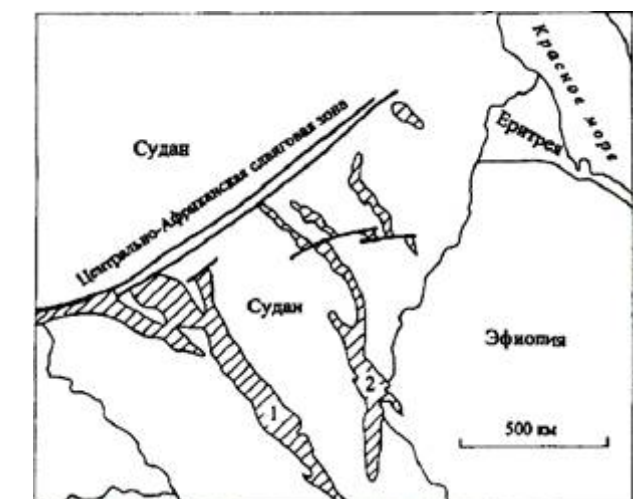


Рис. 1. Нефтегазоносная провинция Южного Судана: *а* – Мел-палеогеновые нефтеносные бассейны Южного Судана: 1 – разломы, 2 – нефтеносные бассейны [7]; *б* – фрагмент космического снимка «Метеор-М» № 1 низкого разрешения. Отчетливо видны контуры сужающегося к востоку гигантского грабена и основные черты его внутренней структуры; *в* – схема геологического дешифрирования космических снимков низкого и среднего разрешения: 1 – нефтеносные бассейны, 2 – докайнозойские породы, 3 – линеаменты (разломы) – границы грабена, 4 – линеаменты (разломы) определяющие внутреннюю структуру грабена

Изученность этой территории геофизическими и буровыми работами, выполненными отдельными фирмами, можно характеризовать как «мозаичную», кроме того, результаты даже проведенных буровых и сейсмических работ оказываются недоступными.

Чтобы оценить нефтегазоносность периферических частей бассейна, важно понимать, каковы истинные очертания бассейна и его границы – тектонические, обусловленные грабенами, или постепенные, связанные с синклиналим прогибанием земной коры. Для решения этой задачи очень подходят космические изображения, позволяющие видеть геологические объекты в их естественных границах.

Условимся считать более информативными те изображения, которые позволят с наибольшей уверенностью и однозначностью, с наименьшими затратами определить границы и внутреннюю структуру региона. Для этого сравним изображения, полученные с разных носителей.

За основу для сравнения возьмем фрагмент изображения, полученного с КА «Метеор-М» № 1 (МСУ – МР) (см. рис. 2), с которым сравнивались мозаика Landsat, отдельный снимок Landsat, снимок ALOS (PRISM), положение которых на изображении с КА «Метеор-М» № 1 показано цветными прямоугольниками. Все изображения приведены к проекции Меркатора.

Даже при предварительном просмотре виден гигантский клин, расширяющийся к востоку и ограниченный с востока р. Нил. С юга клин ограничен линеаментом, выраженным перепадом цветов. С юга изображение окрашено в зеленый цвет, обусловленный лесами, а с севера – бурым и коричневым, обусловленным саванной, в которую превращается эта территория после окончания сезона дождей. В сезон дождей (лето) и вскоре после его окончания (осень) эта территория представляет собой болота и, вероятно, будет также окрашена в зеленый цвет. Здесь расположены бассейны рек Джур, Бахр-эль-Газаль, Лоль и Бахр-эль-Араб.

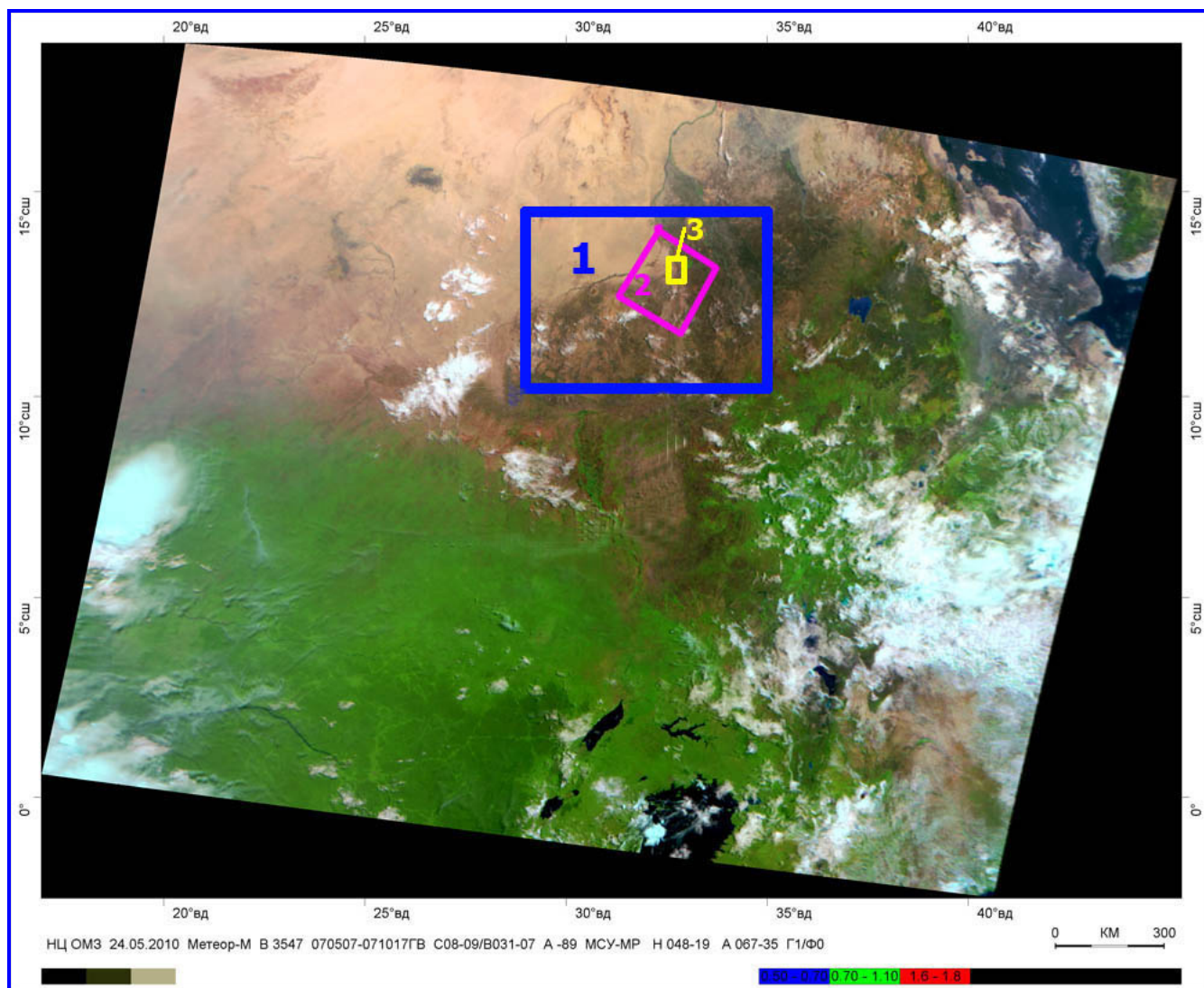


Рис. 2. Фрагмент снимка с КА «Метеор-М» № 1 (МСУ-МР) и расположение на нем детальных изображений: 1 – мозаика Landsat; 2 – снимок Landsat; 3 – снимок ALOS (PRISM)

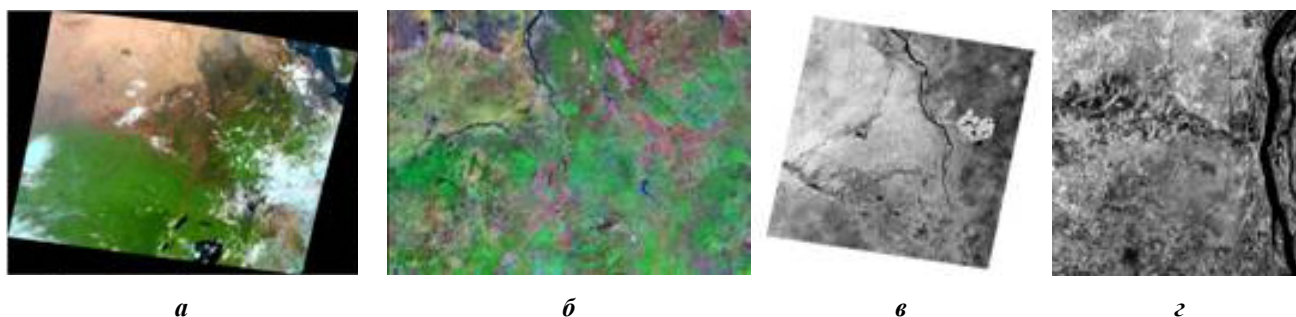


Рис. 3. Сравнимые изображения: а – КА «Метеор-М» № 1; б – мозаика Landsat-7; в – снимок Landsat -7; г – снимок ALOS (PRISM)

Северный линеймент обусловлен прямолинейным руслом р. Хор Абу Хаббл в районе дельты, загибающейся к югу. С севера от него коричневый тон сменяется на желтый, обусловленный, вероятно, сменой саванн

пустынями. На этом изображении территория отчетливо выделяется коричневым треугольником с четкими краями, что свидетельствует вероятно о разломной природе обусловившей его геологической структуры.

При более внимательном рассмотрении внутри треугольника видна его структура, которую рассмотрим далее (рис. 3, а). Изображение с КА «Метеор-М» № 1 (МСУ-МР) было сделано 24.05.2010 в 10 часов 11 минут по московскому времени (в этом районе часовой пояс тот же, что и в Москве). Обработка включала радиометрическую коррекцию, приведение к картографической проекции Меркатора и синтез 1 (0,5 – 0,7 мкм); 2 (0,7 – 1,1 мкм); и 3 (1,6 – 1,8 мкм) каналов. Его разрешение – 1 км. Снимок практически одномоментен и, следовательно, достоверно отражает сцену.

Мозаика Landsat покрывает площадь N-36-10 номенклатурного листа масштаба 1: 200 000. Разрешение на местности изображений этой мозаики 10 м, т. е. фрагмент предыдущей площади. Сенсор ETM, изображение получено синтезом диапазонов 70, 40, 20. В составе мозаики участвует 31 снимок, самый ранний из которых получен 12 сентября 1990 г., а самый поздний – 11 ноября 2001 г.

В процессе создания мозаики изображения индивидуальных снимков выравнивались, усреднялись по спектральной яркости, т. е. искажались. Поэтому мозаика менее достоверно отражает сцену, чем снимок с КА «Метеора-М» № 1.

При беглом взгляде на картинку видно русло р. Хор Абу Хаббл, которое здесь не кажется таким прямолинейным. Фотоизображение с севера и юга от реки отличается, но не так значительно, как на изображении с КА «Метеор-М» № 1. Западная сторона треугольника, ограниченная р. Нил в северной части, видна хорошо, а на юге практически незаметна. Южная часть треугольника не попадает на номенклатурный лист и далее будет рассмотрена в составной картинке из фрагментов четырех номенклатурных листов.

Рассмотрение частей мозаики в увеличенном виде позволяет распознать её внутреннюю структуру и надежно определять какими именно ландшафтными особенностями обусловлены границы, выделенные на изображении с КА «Метеора-М» № 1 (но не позволяют выделить сами границы).

Один из ключевых фрагментов этой территории – дельта р. Хор Абу Хаббл, где река, как видно на изображении, теряет прямолинейный облик, изгибаясь к югу, а сохраняет прямолинейность линеамент благодаря северной границе её дельты. Сама дельта имеет резко различное строение. В её южной части выделяется кольцевая структура, предположительно сопоставляемая с растущей антиклинальной складкой – самой благоприятной нефтегазоносной структурой (см. рис. 3, б) из всех возможных.

Сравнив информативность изображения с КА «Метеор-М» № 1 и мозаики приходится признать, что изображения с КА «Метеор-М» № 1 более информативны по достоверности, полноте, доступности и краткости.

На рис. 3, в приведен снимок Landsat-7, сделанный 12 февраля 2004 г. Этот снимок одномоментен, следовательно, более достоверен, чем мозаика. Из-за фрагментарности изображения восточное окончание северного линеамента здесь полностью теряет свой прямой облик, выгибаясь к северу. На этом фрагменте также теряет свои прямолинейные очертания восточная сторона треугольника р. Нил. Т. е. здесь потеряно одно из самых главных преимуществ космических изображений – их обзорность, и связанные с ней генерализация и интеграция.

Еще в большей степени этот эффект виден на изображении высокого разрешения (ALOS-PRISM) (см. рис. 3, г), полученного 12 октября 2008 г. Изображение сделано в диапазоне 0,52 – 0,73 мкм, разрешение снимка – 2,5 м. Изображение захватывает центральную часть дельты р. Хор Абу Хаббл. Здесь проходит центральная протока дельты, которая является северной дугой, ограничивающей вышеупомянутую кольцевую структуру, сопоставляемую с растущей антиклинальной складкой. На таком малом фрагменте невозможно увидеть кольцо в целом. Здесь наблюдается аномалия речной долины: по направлению к устью долина сначала становится шире и выраженнее, а потом снова сужается. Обычно это свидетельствует о современных или новейших тектонических поднятиях на этом локальном участке, что подтверждает постепенно растущую здесь антиклинальную складку, и дополнительно свидетельствует о благоприятности этой территории для прогноза нефтегазоносности. Снимок покрывает также фрагмент западного ограничения треугольника – р. Нил. Естественно, что на таком маленьком фрагменте невозможно определить его принадлежность к общей линейной системе.

Таким образом, с уменьшением обзорности изображения его информативность для решения задач регионального и континентального масштаба уменьшается. Мозаика изображений не намного улучшает дешифрируемость тектонического строения. При этом проявляются недостатки изображения – разновременность и приведение к средним характеристикам изображения, которые уменьшают его достоверность.

Следовательно, благодаря генерализации и интеграции на изображениях со средним и малым разрешением удастся более отчетливо видеть изучаемые объекты в их естественных контурах и соотношениях

с другими объектами, а не воссоздавать их умозрительно с помощью логических или графических обобщений. При этом «загрубление» изображения и приведение его к требуемому масштабу не равносильно изначально обзорному изображению. Поэтому изображения среднего и малого разрешения, позволяя по-новому рассматривать геологическое строение территорий, не потеряли своего значения в обширном арсенале космических снимков.

В результате геологического дешифрирования происходит системный анализ и обработка информации, при этом на результирующих материалах утрачивается большая часть имеющейся на изображении информации, но возникает новая.

Литература

1. Шеннон К.Э. Работы по теории информации и кибернетике: пер. с англ. / К.Э. Шеннон; под ред. Р.Л. Добрушина, О.Б. Лупанова. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1963. – 830 с.
2. Колмогоров А.Н. Три подхода к определению понятия «количество информации» / А.Н. Колмогоров // Про-

блемы передачи информации. – М.: Наука, 1965. – Т. 1. – № 1. – С. 3 – 11.

3. Болсуновский М.А. Геометрическая коррекция данных со спутника QUICKBIRD [Электронный ресурс] / М.А. Болсуновский // Сайт компании «СОВЗОНД». – М., 2006. – Режим доступа: <http://www.sovzond.ru/dzz/publications/542/3072.html>, свободный.

4. Дистанционное зондирование Земли как часть современной информационной системы / К.А. Боярчук, М.В. Туманов // Вопросы электромеханики. Труды НПП ВНИИЭМ. – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2009. – Т. 113. – № 6. – С. 33 – 36.

5. Космический комплекс гидрометеорологического и океанографического обеспечения «Метеор-3М» с космическим аппаратом «Метеор-М» № 1: справочные материалы – М.: ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2008. – 144 с.

6. Возможности картографической стереокамеры PRISM спутника ДЗЗ ALOS / М.А. Болсуновский, А.В. Беленов // Геопрофи: электронный журнал по геодезии, картографии и навигации. – М., 2006. – № 6. – С. 28 – 31.

7. Некоторые особенности тектонического положения и развития мезозойско-кайнозойского осадочного бассейна Муджлад Южного Судана / Е.А. Долгинов, Ф.С. Фарах // Известия ВУЗов. Геология и разведка. – М., 2008. – № 3. – С. 9 – 13.

Поступила в редакцию 01.11.2010

Кирилл Александрович Боярчук, д-р физ.-мат. наук, генеральный директор, т. 994-51-10.

Михаил Владимирович Туманов, аспирант, начальник Центра.

E-mail: niiem@istranet.ru.

Людмила Вадимовна Милосердова, канд. геол.-минер. наук, доцент, т. 468-15-88.