

УДК 528.85/.87(15)

С.Л. Кравцов

## АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И НАПРАВЛЕНИЙ РАЗВИТИЯ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

*Излагаются основные подходы и ограничения существующих методов обработки изображений дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Описываются основные тенденции разработки новых методов обработки изображений ДЗЗ.*

### Введение

В последние несколько десятилетий отрасль ДЗЗ стремительно развивается – разрабатывается программное обеспечение, увеличивается количество действующих на орбите спутников и стран-операторов такими спутниками, а изображения ДЗЗ находят все более широкое применение. Это обусловлено тем, что их использование позволяет сократить затраты в самых различных областях человеческой деятельности: сельском, лесном и водном хозяйствах, мониторинге чрезвычайных ситуаций, охране и использовании природных ресурсов, градостроительстве, геологии и т. д.

В настоящее время возможности и доступность компьютерной техники, а также профессиональных программных комплексов для обработки изображений ДЗЗ возросли настолько, что сделали возможным рассредоточенное использование изображений ДЗЗ с применением всего арсенала методов обработки специалистами прикладных областей (геологами, топографами, работниками сельского и лесного хозяйств, охраны окружающей среды и т. д.), а не только специалистами по обработке изображений ДЗЗ в немногочисленных центрах.

Вместе с тем наблюдается следующее противоречие: с одной стороны, количество разрабатываемых методов обработки изображений ДЗЗ уже столь велико, что становится труднообозримым; с другой стороны, количество новых методов обработки изображений ДЗЗ, получивших признание (и реализованных в профессиональных программных комплексах), очень незначительно; с третьей стороны, наблюдается схожесть между профессиональными программными комплексами как по реализованным в них этапам обработки, так и непосредственно по методам обработки изображений ДЗЗ. В этой связи возникает необходимость осмысления состояния и основных тенденций в области методов обработки изображений ДЗЗ.

### 1. Методы обработки изображений ДЗЗ. Анализ состояния

Существует два основных подхода к обработке изображений ДЗЗ: пространственный и спектральный. При пространственном подходе, как правило, каждому пространственному разрешению и каждому приложению соответствуют свои методы обработки. При спектральном же подходе методы обработки в целом не зависят от пространственного разрешения, количества спектральных каналов изображений, а самое главное – от приложения [1]. Это позволяет сосредоточиться не на создании методов обработки и программного комплекса для каждого приложения, а на разработке непосредственно самих приложений.

Переход от односпектральных к много- (первый многоспектральный сенсор MSS был установлен на спутнике Landsat 1, запущенном в 1972 г.) и гиперспектральным сенсорам (первый коммерческий гиперспектральный сенсор Hyperion был установлен на спутнике EO 1, запущенном в 2000 г.) привел к тому, что спектральный подход стал доминирующим и был реализован во всех наиболее распространенных коммерческих (ERDAS Imagine, ER Mapper, ENVI, TNTmips), а также некоммерческом (GRASS, свободно доступном через сеть Интернет в исходных кодах) программных комплексах по обработке изображений ДЗЗ.

Спектральный подход основан на использовании *методов математической статистики, а также спектральных свойств материалов* и содержит два этапа обработки изображений ДЗЗ: улучшение изображений ДЗЗ для повышения адекватности извлечения информации и непосредственно извлечение информации. Первый этап включает следующие основные направления обработки изображений ДЗЗ: радиометрическое, пространственное и спектральное улучшение, геометрическую коррекцию, улучшение пространственного разрешения и составление мозаики; второй этап – классификацию изображений, анализ гиперспектральных изображений и обнаружение изменений поверхности Земли.

В основе многих методов обработки изображений ДЗЗ лежит предположение о нормальном законе распределения значений признаков. Действительно, значения признаков каждого пикселя изображения характеризуют отражательную и рассеивающую способность материалов поверхности Земли. Они по-разному, случайным образом, отражают и рассеивают солнечное излучение, так что значения признаков каждого пикселя представляют собой сумму случайных величин. Из теории же вероятностей известно, что сумма независимых одинаково распределенных случайных величин имеет нормальный (Гаусса) закон распределения при условии, что слагаемые вносят равномерный вклад в сумму (центральная предельная теорема) [2, 3]. Существуют обобщения центральной предельной теоремы на сумму зависимых случайных величин, на сумму случайных величин с разными законами распределения и т. д. Таким образом, есть основания полагать, что в общем случае значения признаков пикселей классов распределены по нормальному закону.

**Методы геометрической коррекции** используются для устранения геометрических искажений, существующих между изображениями или изображением и картой.

**Метод аффинных преобразований** используется для устранения систематических ошибок, одинаковых для всех пикселей изображения, при необходимости преобразовать растровую версию карты (или уже скорректированное изображение) из исходной в новую картографическую проекцию, а также при геометрической коррекции полученного в наدير изображения ДЗЗ небольшой области с незначительным изменением рельефа местности [1]. **Метод проективных преобразований** используется для исправления полученных не в наدير изображений ДЗЗ небольшой области при относительно плоском рельефе местности. **Метод полиномиальных преобразований** может исправить не только линейные (как и указанные ранее методы), но и нелинейные геометрические искажения на изображении. Полином второй степени используется для исправления радиальных искажений, обусловленных формой линзы камеры или Земли (для спутниковых изображений больших областей). Полином третьей степени используется для коррекции искаженных авиационных изображений, сосканированных порванных карт и радарных изображений. Полином четвертой степени используется для коррекции очень искаженных авиационных изображений [4].

**Метод триангуляции** применяется для исправления полученных от различных источников и с различающимися масштабами сканированных карт (при составлении мозаики), а также искажений на изображениях ДЗЗ для областей со значительным изменением рельефа местности. **Метод рациональных полиномов** устраняет искажения, вызванные рельефом местности, а также геометрией получения изображения [5]. Созданное в результате изображение имеет геометрию, подобную карте.

**Методы улучшения пространственного разрешения** объединяют высокочастотную пространственную информацию (геометрические детали) панхроматического изображения с высоким пространственным разрешением и спектральную информацию многоспектрального изображения с низким пространственным разрешением с целью получения многоспектрального изображения с высоким пространственным разрешением [6, 7].

Спектральные искажения являются наиболее значительной проблемой улучшения пространственного разрешения и проявляются в виде снижения контраста между каналами видимой и ближней инфракрасной областей спектра (например, на границе растительность – почва). Введенные Томасом Вальдом и другими авторами статистические меры оценки качества улучшения пространственного разрешения (смещение средних значений, различие дисперсий, коэффициент корреляции и т. д.) основаны на учете различий значений яркости пикселей результирующего и справочного многоспектральных изображений [4, 8, 9].

Количество возможных квазиоптимальных методов улучшения пространственного разрешения для изображения размером  $100 \times 100 = 10\,000$  пикселей с радиометрическим разрешением 8 бит (256 градаций), удовлетворяющих допустимому уровню различий 5 % (25 градаций: истинное значение  $\pm 12$  градаций), составляет [2]

$$\frac{(l \cdot M \cdot N)!}{(M \cdot N - \eta)! \cdot \eta!} = \frac{30000!}{29975! \cdot 25!} \approx 5,4 \times 10^{86}, \quad (1)$$

где  $l$  – количество каналов результирующего многоспектрального изображения (для методов Броуи и преобразования RGB–IHS оно равно 3);  $M$ ,  $N$  – количество пикселей изображения по вертикали и горизонтали соответственно;  $\eta$  – допустимый уровень различий (в градациях яркости).

Количество же возможных квазиоптимальных методов улучшения пространственного разрешения для изображения размером  $100 \times 100 = 10000$  пикселей при радиометрическом разрешении 11 бит (1024 градаций), удовлетворяющих допустимому уровню различий 5 % (205 градаций), составляет

$$\frac{(l \cdot M \cdot N)!}{(M \cdot N - \eta)! \cdot \eta!} = \frac{30000!}{29795! \cdot 205!} \approx 1,2 \times 10^{531}. \quad (2)$$

Таким образом, теоретически возможно разработать колоссальное количество методов, обеспечивающих близкое к оптимальному качество улучшения пространственного разрешения. Действительно, к настоящему времени уже разработаны сотни методов [9] улучшения пространственного разрешения изображений и количество разработанных методов продолжает расти. Вместе с тем многие авторы вводят собственные меры оценки качества улучшения пространственного разрешения, поскольку, находясь в рамках статистических мер, доказать преимущество нового метода в лучшем случае затруднительно.

Еще одной проблемой оценки метода с точки зрения качества улучшения пространственного разрешения является отсутствие в общем случае *справочных изображений* с более высоким пространственным разрешением. Поэтому исходные панхроматическое изображение с пространственным разрешением  $HR$  и многоспектральное изображение с пространственным разрешением  $LR$  передискретизируются к более низким пространственным разрешениям  $LR$  и  $\nu R$  соответственно. Затем панхроматическое изображение с пространственным разрешением  $LR$  и многоспектральное изображение с пространственным разрешением  $\nu R$  обрабатываются и получается результирующее многоспектральное изображение с пространственным разрешением  $LR$ , которое можно сравнить с исходным многоспектральным изображением. Это уменьшает проблему справочных изображений. Считается, что оценка качества в пространственном разрешении  $LR$  близка к оценке качества в пространственном разрешении  $HR$ . Однако это нельзя утверждать с абсолютной достоверностью. Качество в более высоком пространственном разрешении может быть лучше или хуже в зависимости от вводимой высокочастотной пространственной информации, и трудно предсказать изменение качества относительно пространственного разрешения [7].

**Классификация** лежит в основе обработки изображений ДЗЗ. Она представляет собой основанный на значениях признаков процесс сортировки пикселей изображения в конечное количество классов.

*Классификация без обучения* используется для создания основного множества классов, после чего может применяться классификация с обучением для их уточнения [4]. В классификации без обучения (также называемой кластеризацией), как правило, отсутствует дополнительная информация, используемая при назначении пикселей на кластеры. Кроме того, отсутствуют специфические известные классы и даже их количество неизвестно. В этой ситуации метод кластеризации должен формировать кластеры таким образом, чтобы одновременно минимизировать рассеяние значений признаков внутри кластеров (внутреннее рассеяние) и мак-

симизировать рассеяние значений признаков между кластерами (внешнее рассеяние) среди всех возможных разделений пикселей на кластеры [10]. Эти два критерия не противоречат друг другу, поскольку их сумма постоянна, а минимизация первого эквивалентна максимизации второго, и наоборот. Однако в действительности ситуация более сложная. Сложность заключается в реализации: должно быть вычислено и произведено сравнение внутреннего и внешнего рассеяния значений признаков для всех возможных разделений пикселей на  $K$  кластеров. Количество же разделений, например, для изображения размером  $100 \times 100 = 10\,000$  пикселей и пяти кластеров составляет [2]

$$\frac{(M \cdot N)!}{(M \cdot N - K)! \cdot K!} = \frac{10000!}{5! \cdot 9995!} \approx 8,3 \times 10^{17}, \quad (3)$$

где  $K$  – количество кластеров.

В связи с этим разработаны требующие меньших вычислительных затрат методы, которые вместо оптимального решения находят субоптимальное. Наибольшее распространение в коммерческих и некоммерческих программных комплексах по обработке изображений ДЗЗ получили методы кластеризации  $K$ -средних и ISODATA.

*Классификацию с обучением* используют тогда, когда необходимо идентифицировать с более высокой точностью, чем позволяет классификация без обучения, относительно небольшое количество вполне определенных классов [4]. Каждый пиксель изображения классифицируется отдельно согласно подобию (в соответствии с некоторым решающим правилом) его значений признаков и средних значений признаков классов. Количество возможных разделений (и соответственно методов (вариантов методов) классификации) изображения размером  $100 \times 100 = 10\,000$  пикселей на пять классов составляет  $\approx 8,3 \times 10^{17}$ .

Вместе с тем при справедливости предположения о нормальном законе распределения значений признаков классов решающие правила максимального правдоподобия и Байеса обеспечивают наиболее высокую точность классификации, чем другие решающие правила [3, 4]. Действительно, в [4] указывается, что нейронные сети не оправдали возлагавшихся на них надежд. При этом, несмотря на то что предположение о нормальном законе распределения в каждом конкретном случае не выполняется, оно имеет под собой основание (рассмотренное выше). Уместность же применения других законов распределения должна быть доказана.

*Методы обнаружения изменений* А. Милн, основываясь на степени сложности и вычислительных затратах, разделил на четыре группы [1]: линейные (разности, отношения); классификационные (постклассификационного сравнения, разновременной классификации, векторного анализа); преобразованных данных (разности: главных компонент, компонент метода «колпак с кисточкой», вегетационных индексов); иные (регрессионного анализа, статистических испытаний, экспертных систем).

*Метод разности* – простой, надежный, легкий в интерпретации, требующий невысоких вычислительных затрат и наиболее широко используемый [11]. *Метод отношения* особенно полезен при анализе нескольких разновременных изображений, так как он менее чувствителен, чем метод разности, к изменениям, не связанным с поверхностью Земли: сезонным, атмосферных условий, угла солнца (освещения), а также мультипликативному шуму радарных изображений. Методы разности, отношения и разности вегетационных индексов часто используются для создания маски областей изменений поверхности Земли. Затем другие методы используют эту маску для ограничения анализа такими областями.

*Метод постклассификационного сравнения* уменьшает влияние сезонных и атмосферных различий разновременных изображений. Благодаря этому метод обладает преимуществом по отношению к другим методам, когда разновременные изображения имеют существенные изменения в растительности, не связанные с изменениями поверхности Земли, например, когда исследуются изменения в области с лиственной растительностью и одно из изображений получено с зелеными листьями, а другое – с пожелтевшими или опавшими [1]. *Метод разновременной классификации* значительно уменьшает ошибки обнаружения изменений по сравнению с методом постклассификационного сравнения.

*Метод разности главных компонент* позволяет выявить тонкие различия разновременных изображений, которые были затенены высоким исходным контрастом. Метод особенно целесообразен при анализе нескольких разновременных изображений, потому что минимизирует различия из-за мультипликативных факторов – атмосферных условий и углов солнца. *Метод разности компонент «колпак с кисточкой»* уменьшает множество спектральных каналов разновременных изображений до двух-трех существенных для обнаружения изменений. *Метод разности вегетационных индексов* нашел применение в связанных с исследованием растительности приложениях.

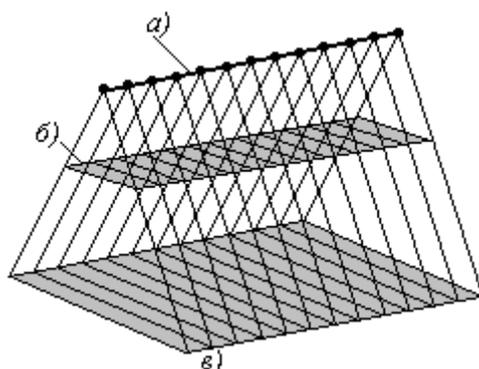
*Метод регрессии* уменьшает влияние геометрии получения разновременных изображений, различий атмосферных условий и угла солнца. *Метод статистических испытаний* значительно снижает влияние погрешности пространственного совмещения разновременных изображений.

## 2. Новые методы обработки изображений ДЗЗ. Анализ направлений развития

В настоящее время прогресс в обработке изображений ДЗЗ, находящий отражение в коммерческих и некоммерческих программных комплексах, обеспечивается разработкой ориентированных на конкретный сенсор методов, индексов материалов и их свойств, линейных преобразований, повышающих адекватность получаемых результатов сервис-функций, а также методов обработки гиперспектральных изображений.

### **Ориентация на конкретный сенсор**

*Ортокоррекция изображения с использованием математической модели сенсора.* Спутниковые изображения создаются, как правило, в виде групп линий поперечного сканирования, получаемых при движении платформы сенсора по орбите (рис.) [4, 12]. В результате различные части изображения получаются из различных местоположений сенсора. Чтобы строго описать преобразование координат изображения (строк и столбцов) к координатам поверхности Земли (широте, долготе и высоте), разрабатываются математические модели сенсоров (которые могут быть чрезвычайно большими и сложными), учитывающие все их физические элементы. Например, математическая модель сенсора Ikonos XS излагается на 183 страницах.



Формирование спутникового изображения в виде групп линий поперечного сканирования:  
а) движение платформы сенсора; б) линии сканирования на изображении; в) поверхность Земли

*Улучшение пространственного разрешения.* Для уменьшения спектральных искажений в результирующем многоспектральном изображении разработано множество стратегий, каждая из которых предназначена для определенного метода улучшения пространственного разрешения или сочетания сенсоров исходных изображений. Так, для метода преобразования RGB–IHS общая стратегия заключается в приведении панхроматического изображения к динамическому диапазону канала интенсивности перед заменой; расширении динамических диапазонов каналов насыщенности и цветового тона перед обратным преобразованием IHS в RGB или динамических диапазонов отдельных каналов интенсивности, насыщенности или цветового тона по отношению к определенным сочетаниям исходных изображений [9]. Для метода главных компонент предлагается расширить динамические диапазоны главных компонент.

Основная идея метода «колпак с кисточкой» заключается в выборе направления новых осей в спектральном пространстве таким образом, чтобы они имели физическое значение. Значения коэффициентов преобразования метода «колпак с кисточкой» разрабатываются для каждого сенсора индивидуально (табл.) [4, 13]. Из-за эмпирического характера метода значения коэффициентов преобразования зависят от использованного для их получения множества изображений. Однако эта зависимость не критическая – различные множества изображений, давая несколько отличающиеся значения, не затрагивают сущность преобразования как метода исследования растительности.

Значения коэффициентов преобразования метода «колпак с кисточкой» для различных спутниковых сенсоров

Индексы	Каналы изображения					
	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	7-й
<i>Landsat 5 TM</i>						
Яркость	0,2909	0,2493	0,4806	0,5568	0,4438	0,1706
Зелень	-0,2728	-0,2174	-0,5508	0,7221	0,0733	-0,1648
Влажность	0,1446	0,1761	0,3322	0,3396	-0,6210	-0,4186
Дымка	0,8461	-0,0731	-0,4640	-0,0032	-0,0492	0,0119
Пятый	0,0549	-0,0232	0,0339	-0,1937	0,4162	-0,7823
Шестой	0,1186	-0,8069	0,4094	0,0571	-0,0228	0,0220
<i>Landsat 7 ETM+</i>						
Яркость	0,3561	0,3972	0,3904	0,6966	0,2286	0,1596
Зелень	-0,3344	-0,3544	-0,4556	0,6966	-0,0242	-0,2630
Влажность	0,2626	0,2141	0,0926	0,0656	-0,7629	-0,5388
Дымка	0,0805	-0,0498	0,1950	-0,1327	0,5752	-0,7775
Пятый	-0,7252	-0,0202	0,6683	0,0631	-0,1494	-0,0274
Шестой	0,4000	-0,8172	0,3832	0,0602	-0,1095	0,0985
<i>Ikonos XS</i>						
Яркость	0,326	0,509	0,560	0,567	–	–
Зелень	-0,311	-0,356	-0,325	0,819	–	–
Влажность	-0,612	-0,312	0,722	-0,081	–	–
Дымка	-0,650	0,719	-0,243	-0,031	–	–

*Калибровка данных* важна по двум основным причинам [14]: а) ряд методов определения параметров сред и материалов основывается на применении абсолютных значений спектральных каналов; б) использование относительных значений спектральных каналов осложняется тем, что деградация сенсоров в различных спектральных каналах неодинакова. Например, после 4,5 лет орбитального полета деградация чувствительности сенсора Nimbus 7 CZCS в канале голубой области спектра (0,443 мкм) составила 25 %, тогда как в канале красной области спектра она была значительно меньше.

**Индексы материалов и их свойств.** Основное предположение по созданию индексов материалов и их свойств состоит в том, что некоторые математические операции с разными спектральными каналами изображений многоспектральных и гиперспектральных сенсоров могут дать полезную информацию об объеме биомассы растительности, содержании влаги, наличии минералов, снега и т. д. Индексы материалов и их свойств создаются либо как отношения, либо как нормализованная разность спектральных каналов, либо как относительная глубина полосы поглощения (спектральные каналы на краях полосы поглощения в числителе и спектральный канал в минимуме полосы поглощения в знаменателе [15]).

**Линейные преобразования** (главных компонент, «колпак с кисточкой», минимальной доли шума и др.) позволяют выбрать новые направления осей в спектральном пространстве таким образом, чтобы они удовлетворяли некоторому критерию или имели физическое значение. Так, основной идеей преобразования главных компонент является вращение осей спектрального пространства таким образом, чтобы добиться максимальной некоррелированности значений яркости пикселей [3, 4]. С этой целью максимизируется дисперсия – каждая последующая главная компонента объясняет меньший разброс значений яркости, который еще не учтен пре-

дыдущими главными компонентами. *Преобразование минимальной доли шума* создает ортогональные компоненты, отношение сигнал/шум для каждой из которых является максимальным среди всех остальных компонент меньшего порядка, т. е. достигается оптимальный порядок компонент в терминах качества изображения [16].

**Повышающие адекватность результатов обработки сервис-функции.** Наиболее ярким примером такого рода функций является *сервис-функция «область обработки»*, позволяющая ограничить обрабатываемую область изображения. Например, при улучшении пространственного разрешения изображения сервис-функция «область обработки» позволяет исключить из рассмотрения области изменений местности (сбора урожая, сброса листвы деревьями и кустарниками, увеличения или уменьшения площади озер, постройки автострад и т. д.). Это актуально, когда для улучшения пространственного разрешения используются панхроматическое и исходное многоспектральное изображения разных сенсоров. В противном случае в областях изменений местности на результирующем многоспектральном изображении будут наблюдаться значительные спектральные искажения. В частности, структура улиц будет соответствовать состоянию на момент получения панхроматического изображения, а не исходного многоспектрального изображения [8].

При классификации сервис-функция «область обработки» позволяет выделить область на изображении, где точность классификации недостаточно высока. В данной области для повышения точности классификации могут быть повторно выделены обучающие участки, выбрано более подходящее множество признаков (классов) и т. д. [4].

При обнаружении изменений поверхности Земли данная сервис-функция позволяет исключить из анализа несоответствующие области разновременных изображений (например, облака, тени от них), не представляющие интерес области (например, области не леса при обнаружении изменений леса).

**Методы анализа гиперспектральных изображений** в основном сосредоточены на спектральной информации в индивидуальных пикселях [1, 16]. Многие методы анализа были разработаны специально для гиперспектральных изображений. *Методы анализа целого пикселя* (спектрального угла, спектральной корреляции) определяют доминирующий материал в каждом пикселе гиперспектрального изображения на основе подобия между спектром пикселя и спектрами справочных материалов. Данные методы позволяют получить хорошие результаты, если изображение содержит обширные области чрезвычайно чистых материалов, для которых имеются спектры в библиотеке спектров [1, 16]. *Субпиксельные методы* анализа (линейного и частичного смешивания: ортогональной проекции подпространства, ограниченной минимизации энергии и др.) используются для определения относительного содержания справочных материалов в каждом пикселе изображения. В случае хорошего контраста между спектром справочного материала и спектром фона данные методы обнаруживают справочные материалы, относительное содержание которых составляет от 1 до 3 % площади пикселя.

**Количество испытаний**, пожалуй, является главной проблемой доказательства состоятельности новых методов обработки изображений ДЗЗ. Покажем это на примере. Пусть множество изображений классифицировано двумя методами: классическим и новым. В результате точность классификации составила 0,8 и 0,9 соответственно. Необходимо установить, является ли значимым расхождение в точности классификации или его можно объяснить за счет случайных причин. Выдвинем нуль-гипотезу: различия в точности классификации не существует, т. е. оба метода по точности классификации сопоставимы, а расхождения обусловлены случайными причинами. Проверим правдоподобность этой гипотезы, принимая уровень значимости равным  $\alpha = 0,01$  [2]:

$$\alpha \leq 0,5 - \Phi \left( \frac{|p_1 - p_2|}{\sqrt{p_1 \cdot \frac{1-p_1}{n} + p_2 \cdot \frac{1-p_2}{n}}} \right), \quad (4)$$

где  $\Phi(\ )$  – функция Лапласа;  $p_1, p_2$  – точности классификации классического и нового методов соответственно;  $n$  – количество обработанных изображений.

Согласно (4), если количество обработанных изображений (испытаний) составит менее 137, оба метода (классический и новый) в действительности по точности классификации сопоставимы, а расхождение можно считать обусловленным случайными причинами. Таким образом, требуется значительное количество испытаний для доказательства состоятельности новых методов обработки изображений ДЗЗ.

### Заключение

В настоящее время спектральный подход является доминирующим и реализован во всех наиболее распространенных коммерческих, а также некоммерческом программных комплексах по обработке изображений ДЗЗ. Спектральный подход к обработке изображений ДЗЗ включает в себя ряд этапов, каждый из которых содержит некоторое множество методов. Среди них при некоторых предположениях существует оптимальный (или квазиоптимальный – при невозможности по тем или иным причинам достижения оптимальности). Другими словами, оставаясь в рамках существующих предположений, нельзя разработать новые универсально оптимальные (или универсально квазиоптимальные) методы обработки изображений ДЗЗ, которые бы обеспечили более высокую точность результатов, чем существующие методы. Действительно, наблюдается схожесть между программными комплексами как по реализованным в них этапам, так и непосредственно по методам обработки изображений ДЗЗ. При этом методы, которые при некоторых предположениях обеспечивают оптимальность результата, входят в состав всех без исключения коммерческих и некоммерческого программных комплексов (например, решающее правило максимального правдоподобия классификации с обучением). В настоящее время прогресс в обработке изображений ДЗЗ, находящий отражение в коммерческих и некоммерческом программных комплексах, обеспечивается разработкой ориентируемых на конкретный сенсор методов, индексов материалов и их свойств, линейных преобразований, повышающих адекватность получаемых результатов сервис-функций, а также методов обработки гиперспектральных изображений.

### Список литературы

1. Кравцов, С.Л. Обработка изображений дистанционного зондирования Земли. Анализ методов / С.Л. Кравцов. – Минск : ОИПИ НАН Беларуси, 2008. – 256 с.
2. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей : учеб. для студентов вузов / Е.С. Вентцель. – 10-е изд. – М. : Академия, 2005. – 576 с.
3. Кашкин, В.Б. Дистанционное зондирование Земли из космоса. Цифровая обработка изображений : учеб. пособие / В.Б. Кашкин, А.И. Сухинин. – М. : Логос, 2001. – 264 с.
4. ERDAS field guide. Seventh edition, revised and expanded. – USA, Atlanta : Leica Geosystems GIS & Mapping, 2003. – 698 p.
5. Jacobsen, K. Geometric potential of Ikonos and QuickBird-images / K. Jacobsen // Photogrammetric weeks '03. – Stuttgart, 2003. – P. 101–110.
6. Carter, D.B. Analysis of multiresolution data fusion techniques / D.B. Carter. – Blacksburg : Virginia polytechnic institute and state university, 1998. – 54 p.
7. Meenakshisundaram, V. Quality assessment of Ikonos and Quickbird fused images for urban mapping / V. Meenakshisundaram. – Canada, Calgary : Department of geomatics engineering, 2005. – 118 p.
8. Liu, J.G. Evaluation of Landsat-7 ETM+ panchromatic band for image fusion with multispectral bands / J.G. Liu // Natural resources research. – 2000. – Vol. 9, № 4. – P. 269–276.
9. Zhang, Y. Understanding image fusion / Y. Zhang // Photogrammetric engineering & remote sensing. – 2004. – Vol. 70, № 6. – P. 657–661.
10. Вудс, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Вудс, Р. Гонсалес ; пер. с англ. – М. : Техносфера, 2006. – 1072 с.
11. Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review / P.R. Coppin [et al.] // International journal of remote sensing. – 2004. – Vol. 25, № 9. – P. 1565–1596.
12. Orthorectification using rational polynomials with TNTmips. – USA, Lincoln : Micro-Images Inc, 2006. – 16 p.

13. Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 7 at-satellite reflectance / C. Huang [et al.] // International journal of remote sensing. – 2002. – Vol. 23, № 8. – P. 1741–1748.
14. Беляев, Б.И. Оптическое дистанционное зондирование / Б.И. Беляев, Л.В. Катковский. – Минск : БГУ, 2006. – 455 с.
15. Lau, I.C. Regolith-landform and mineralogical mapping of the White Dam Prospect, eastern Otago Domain, South Australia, using integrated remote sensing and spectral techniques / I.C. Lau. – Australia, Adelaide : Adelaide University, 2004. – 457 p.
16. Randall, B. Smith. Analyzing hyperspectral images / B. Smith, Randall. – USA, Lincoln : MicroImages Inc, 2006. – 40 p.

Поступила 05.08.08

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

**S.L. Krautsou**

**ANALYSIS OF THE CURRENT STATE  
AND THE BASIC TRENDS OF DEVELOPMENT  
OF REMOTE SENSING IMAGE PROCESSING METHODS**

Improvement tendencies of remote sensing images are described. Basic approaches and limitations of the existing methods of remote sensing image processing are reviewed. Trends on the new remote sensing image processing methods and algorithms are presented.