

УДК 711.55:504.5:528.85

КАРТИРОВАНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ УРБАНИЗИРОВАННЫХ ТЕРРИТОРИЙ ПО МАТЕРИАЛАМ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ КОСМОСЪЕМКИ

*Попов М.А.¹, Лукин В.В.², Станкевич С.А.¹, Зряхов М.С.², Лищенко Л.П.¹,
Подорван В.Н.¹, Кривенко С.С.²*

¹ *Научный центр аэрокосмических исследований Земли ИГН НАН Украины, Киев, Украина*

² *Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Харьков, Украина
E-mail: trorov@casre.kiev.ua, luhin@ai.kharkov.com*

Рассмотрены несколько аспектов обработки данных гиперспектральной космосъемки с целью выявления загрязнений и получения соответствующих карт местности для урбанизированных территорий. Во-первых, рассматриваются вопросы оптимального выбора подмножества спектральных каналов гиперспектрального изображения. Показано, что нет необходимости обрабатывать все спектральные каналы, обычно достаточно использовать не более 10-30 из них, которые являются наиболее информативными. Введен новый критерий информативности, который учитывает одновременно такие фундаментальные свойства гиперспектральных изображений, как пространственное разрешение, взаимную спектральную энтропию и отношение "сигнал-шум". Во-вторых, разработаны и адаптированы к задаче выявления геохимических загрязнений ряд алгоритмов обработки и анализа гиперспектральных изображений. Проведено тестирование предложенной цепочки обработки на гиперспектральном космоснимке EO-1/Hyperion центральной части Киева. Получена карта оценок геохимических загрязнений этой территории. В-третьих, описан новый способ эффективного сжатия гиперспектральных данных с потерями, оставляющий их качество приемлемым для дальнейшей обработки.

Ключевые слова: урбанизированные территории, геохимические загрязнения, гиперспектральная космосъемка, информативность.

ВВЕДЕНИЕ

Загрязнение окружающей среды является серьезной проблемой современных городов и урбанизированных территорий. Основными источниками загрязнений являются угарный и углекислый газы, окислы серы, азота, углеводороды, соединения фтора, калия, синтетические органические вещества, промышленная пыль и тяжелые металлы. В городах происходит непосредственное загрязнение дорожных покрытий и открытых грунтов, водоёмов и водотоков жидкими и твёрдыми отходами производства, которые имеют тенденцию к накоплению в пониженных участках местности. При этом наблюдается ярко выраженная пространственная дифференциация плотности поля загрязнений. Поле загрязнений определяется структурой природопользования местами выбросов загрязняющих веществ и путями миграции в зависимости от того, как природный ландшафт их принимает. Это сказывается на дальнейшей трансформации пятен загрязняющих веществ. Атмосферные осадки способствуют загрязнению зон аэрации и грунтовых вод.

Концентрация загрязнений внутри урбанизированных территорий зависит от литолого-фациального состава пород и структуры приповерхностных водоносных горизонтов. В результате в местах длительного и интенсивного промышленного загрязнения формируются значительные техногенные геохимические аномалии.

1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Данные о пространственном распределении загрязнений урбанизированной территории накапливаются и анализируются средствами муниципальной геоинформационной системы (МГИС), которая включает информационные слои природных условий города (тип ландшафта, рельеф местности, роза ветров, и др.), источников и потоков загрязняющих веществ, общей экологической ситуации [1]. В МГИС сравнительно просто решаются вопросы интеграции разнородных геопространственных данных, их автоматизированной обработки и актуализации, что позволяет оперативно планировать и контролировать мероприятия по охране и рациональному использованию природной среды города.

МГИС Киева содержит экологическую карту города, геологическую, геоэкологическую и тектоническую карты-схемы, транспортную схему, а также сведения о пространственном распределении техногенной нагрузки на городские территории. На рис.1 представлена карта геохимических загрязнений Киева, полученная по материалам наземных измерений [2] с нанесённым контуром гиперспектрального космического снимка EO-1/Hyperion, который использовался для дальнейшей обработки.

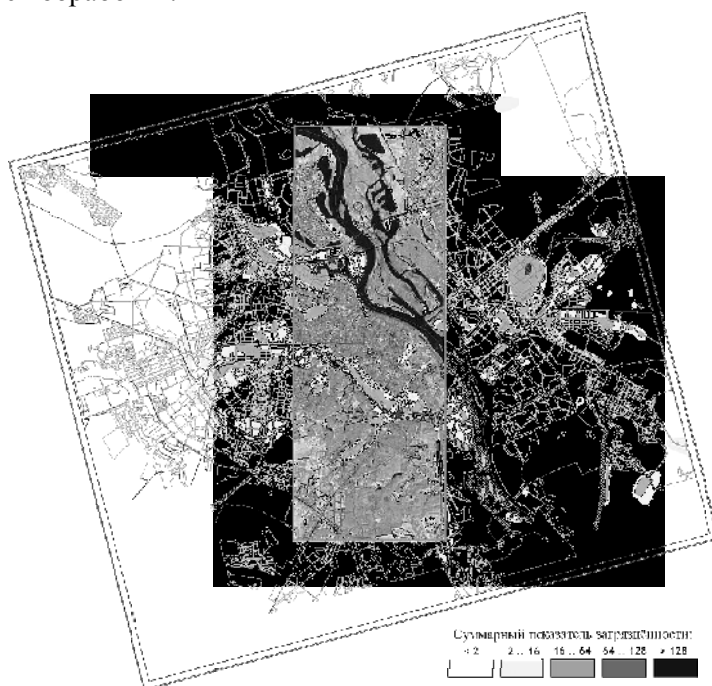


Рис.1. Карта геохимических загрязнений территории Киева. (Звёздочками на обозначены места наземных замеров гиперспектральной космосъёмки)

2. ИНФОРМАТИВНОСТЬ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНОЙ КОСМОСЪЁМКИ

Космическая съёмка в настоящее время является эффективным средством мониторинга урбанизированных территорий. Её преимуществами выступают оперативность и относительная малозатратность, особенно при картировании больших площадей. Однако извлечение информации об экологическом состоянии территории из данных обычной космосъёмки затруднено или вообще невозможно, поскольку основными признаками являются тонкие отличия в спектрах земных покровов. Поэтому экологический мониторинг и выявление загрязнений урбанизированных территорий нуждаются в использовании данных гиперспектральной съёмки. Гиперспектральная съёмка обеспечивает высокую информативность как раз относительно тонких спектральных отличий.

Вместе с тем, при решении конкретных задач данные гиперспектральной космосъёмки, как правило, являются информационно избыточными, поэтому извлечение из них полезной информации – довольно непростая проблема. Её решение начинается с оценивания информативности и оптимального выбора подмножества спектральных каналов гиперспектрального изображения для последующего анализа. Информативность произвольного подмножества спектральных каналов гиперспектрального изображения определяется их спектральными, пространственными и энергетическими возможностями выявления объектов. В нашей работе полная информативность $C(\lambda)$ включает информационную дивергенцию Кульбака-Лейблера $D(\lambda)$, эквивалентное пространственное разрешение гиперспектрального изображения $r(\lambda)$ и эквивалентное отношение “сигнал-шум” $\psi(\lambda)$ [3]:

$$C(\lambda) = \frac{D(\lambda)}{4r^2(\lambda)} \cdot \log_2[1 + \psi(\lambda)] . \quad (1)$$

Здесь $D(\lambda)$ описывает спектральные, $r(\lambda)$ – пространственные и $\psi(\lambda)$ – энергетические возможности выявления объектов.

Информативность гиперспектрального изображения не может быть оценена абстрактно в отрыве от решения конкретной задачи. В этом смысле информативность принципиально отличается от информационной ёмкости по Шеннону. Адекватная оценка информативности помогает решить задачу минимальными средствами – при значительном сокращении объёма обработки без потери качества. Также обработка гиперспектральных изображений с учётом информативности может повысить информационную ценность результатов.

Информативность (1) определяет целевую функцию для оптимального выбора подмножества спектральных каналов гиперспектрального изображения. Цель оптимального выбора каналов – получение максимума полезной информации для текущей задачи:

$$\lambda^* : C(\lambda) \rightarrow \max . \quad (2)$$

При известных спектральных характеристиках объектов (2) – задача безусловной дискретной оптимизации [4]. Основными составляющими процедуры безусловной глобальной оптимизации являются локальные оптимизаторы, обеспечивающие нахождение локальных экстремумов и глобальное решающее правило, выбирающее лучший из них [5]. В качестве механизмов локальной оптимизации могут выступать поисковые методы, метод возможных направлений,

метод ветвей и границ и т. д. [6]. В данной работе для оптимального выбора спектральных каналов используются множественный случайный старт псевдоградиентного поиска на регулярной решётке в пространстве подмножеств спектральных каналов гиперспектрального изображения [7]. Рис.2 иллюстрирует ход псевдоградиентного поиска квазиоптимального подмножества спектральных каналов гиперспектрального изображения ЕО-1/Hyperion при выявлении загрязнений территории Киева. Для последующей обработки было отобрано 16 спектральных каналов, обеспечивающих информативность более 6 бит на пиксел гиперспектрального изображения.



Рис.2. Определение квазиоптимального по информативности подмножества спектральных каналов гиперспектрального изображения ЕО-1/Hyperion (Киев, 01.09.2002).

Практический опыт обработки гиперспектральных изображений свидетельствует, что для большинства практических приложений достаточно 10-30 специально отобранных спектральных каналов [8].

3. КАРТИРОВАНИЕ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

Выполнена оценка суммарного геохимического загрязнения почв тяжелыми металлами и токсичными материалами по материалам гиперспектральной съёмки. Использовался калиброванный гиперспектральной космоснимок ЕО-1/Hyperion центральной части Киева, полученный 01.09.2002 (рис.4а). Предварительная “слепая” оценка шумов гиперспектрального изображения [9] позволила отобрать для дальнейшей обработки 160 спектральных каналов Hyperion из 242.

Для решения задачи картирования геохимических загрязнений необходима классификация типов земных покровов территории исследования, которая может быть проведена по самому рабочему космоснимку.

Недостатком большинства известных реализаций алгоритмов классификации гиперспектральных космоснимков является подверженность влиянию стохастических вариаций радиометрических характеристик объектов съёмки, неизбежно присутствующих на гиперспектральных цифровых изображениях. Более устойчивую классификацию гиперспектральных изображений обеспечивает алгоритм классификации, учитывающий фундаментальные топологические характеристики спектров объектов [10]. Статистическим аналогом данного алгоритма являются робастные методы непараметрической статистики.

Этот алгоритм реализован в демонстрационном программном обеспечении классификации гиперспектральных цифровых космоснимков ClassGeo [11]. Интерфейс головного модуля демонстрационного программного обеспечения показан на рис.3.

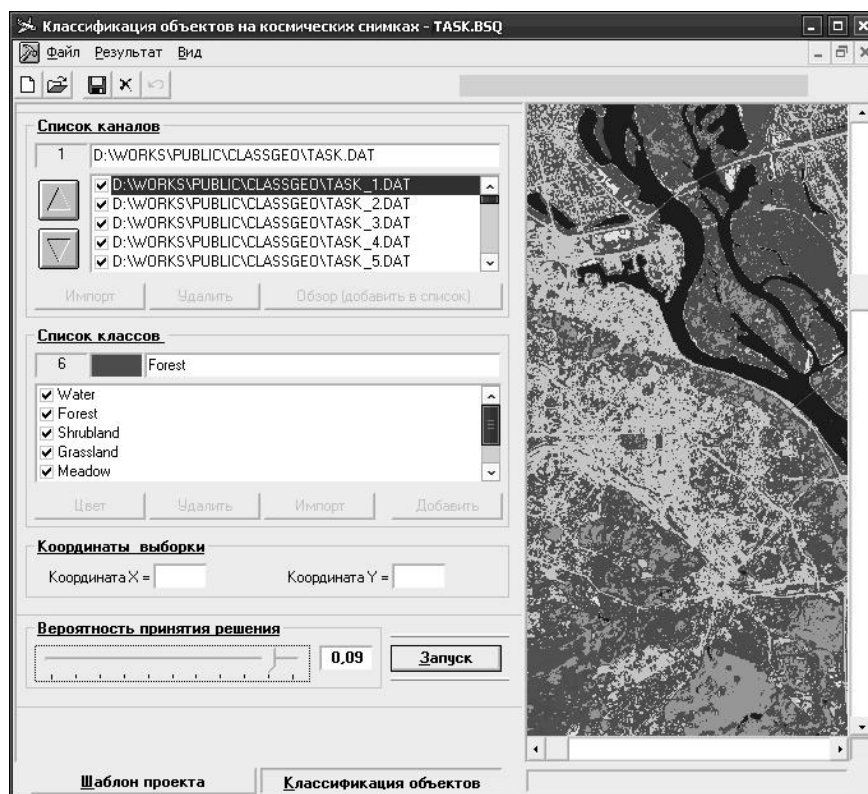


Рис.3. Пользовательский интерфейс демонстрационного программного обеспечения классификации гиперспектральных цифровых космоснимков.

С использованием указанного программного обеспечения проведена предварительная ландшафтно-функциональная классификация урбанизированной территории по данному гиперспектральному снимку. По спектрально-текстурным признакам [12] были выделены основные типы застройки, зелёные зоны, водные поверхности (рис.4б). Предварительная классификация была необходима для последующего детального анализа геохимических загрязнений в пределах класса

открытых естественных земель. Однако близким по спектрально-текстурным характеристикам оказался класс открытых площадок с искусственным покрытием, что потребовало дополнительной постклассификации на основе объектно-ориентированного анализа изображения для разделения этих классов (рис.4в).

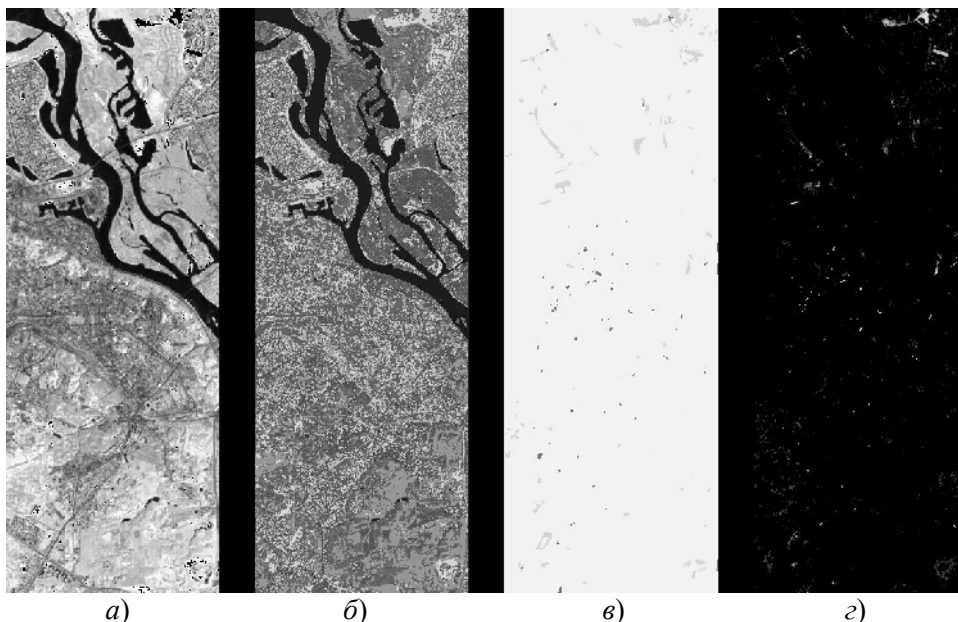


Рис.4. Оценка загрязнений территории Киева для класса “открытые естественные земли”: *а* – исходный гиперспектральный космоснимок EO-1/Hyperion (1 сентября 2002, 160 спектральных каналов, пространственное разрешение 30 м); *б* – классификация земных покровов по снимку (10 классов); *в* – постклассификация для выделения класса “открытые естественные земли”; *г* – пространственное распределение загрязнений для класса “открытые естественные земли”.

Выделенные открытые естественные земли занимают в пределах Киева очень незначительные площади, встречаются небольшими фрагментами и соответствуют на местности пустырям, строительным площадкам, пойменным пескам, песчаным пляжам. Для выявления геохимических загрязнений на территории Киева использовались два заверочных участка в промышленных зонах города, которые по данным наземных геохимических исследований имеют аномально высокие концентрации тяжёлых металлов в почве, и несколько эталонных участков с минимальным загрязнением в парковой и пляжной зонах. Количественно степень загрязнения оценивалась в пределах класса “открытые естественные земли” с помощью спектрально-топологического алгоритма [13] с оптимизацией (2) и байесовского решающего правила. На рис.4г степень загрязнения отображается непрерывной шкалой от тёмного (загрязнение практически отсутствует) к светлому (загрязнение максимальное).

Полученные результаты подтверждают данные наземных геохимических исследований (рис.5). Участки с наиболее интенсивным загрязнением (в пределах от 0.3 до 0.7) приурочены к Куреневско-Петровской и Лыбедской промышленным

зонам, а также к мусорными свалками и пойме реки на пересечении с автомагистралями. Одиночные пиксели, которые встречаются в центральной части города, имеет меньшие значения интенсивности загрязнения, и, как правило, соответствует временным строительным площадкам.

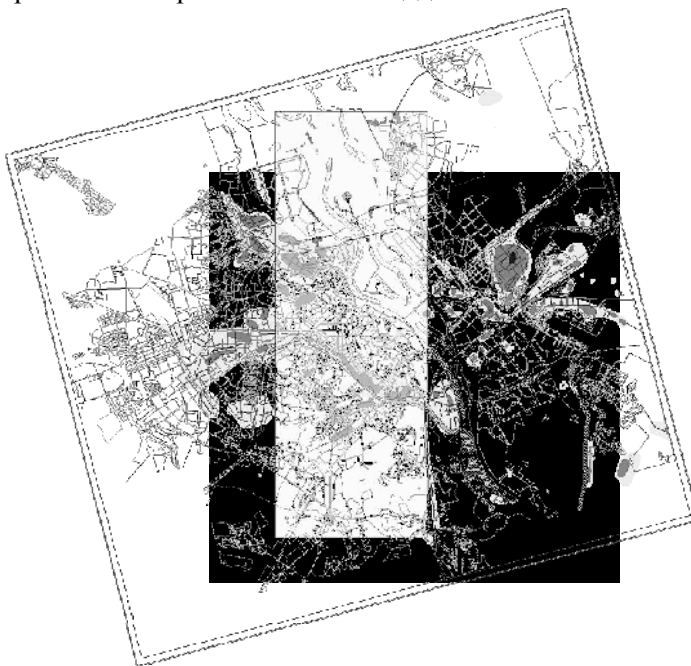


Рис.5. Сопоставление результатов наземных геохимических исследований и оценки загрязнений территории Киева по гиперспектральному изображению для класса “открытые естественные земли”.

Таким образом, для выявления техногенных загрязнений урбанизированных территорий нет необходимости обрабатывать все каналы гиперспектральных изображений. Обычно достаточно использовать не более 10-30 спектральных каналов, которые являются наиболее информативными. Преимущества разработанного подхода – повышение достоверности выявления загрязнений при одновременном существенном сокращении требуемого объема вычислений.

4. СЖАТИЕ ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Однако объем получаемых гиперспектральных данных, как правило, остаётся ещё очень большим. В связи с этим широко используются методы сжатия аэрокосмических изображений. Наилучшие из известных методов сжатия без потерь не способны обеспечить сжатие больше, чем в 3-4 раза [14, 15], что во многих практических случаях явно недостаточно. В то же время известны методы сжатия с потерями, которые, в принципе, способны обеспечить сжатие в десятки и даже больше сотни раз [16, 17]. Однако вносимые при этом искажения могут приводить к безвозвратной потере полезной информации. Поэтому целесообразно использовать такое сжатие с потерями, при котором качество предоставляемых данных остаётся приемлемо высоким [18].

В данной работе качество сжатия данных оценивалось по критерию вероятности правильной классификации [19]. При этом решение о допустимой величине сжатия принималось автоматически на основе обеспечения значения метрики PSNR-HVS-M, равного примерно 40 дБ [20]. Рис.6 иллюстрирует возможности сжатия гиперспектрального изображения EO-1/Hyperion без визуально заметных искажений. При использовании кодера AGU достигнута степень сжатия порядка 10 (для изображений в каждом из каналов, обрабатываемых отдельно), а при сжатии специализированным кодером AGU-M коэффициент сжатия возрастает до примерно 16. Вероятность правильной классификации при этом для сжатых данных практически не изменилось.

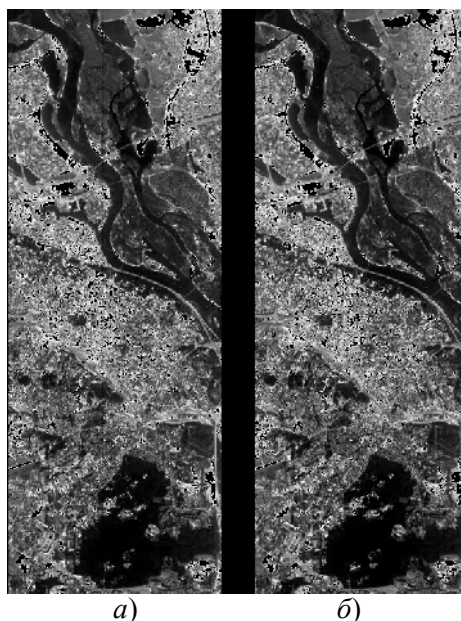


Рис.6. 10-й канал гиперспектрального изображения EO-1/Hyperion (Киев, 01.09.2002) до (а) и после (б) сжатия с потерями кодером AGU в 9,6 раза

ВЫВОДЫ

Полученные результаты, хотя и являются предварительными, хорошо коррелируют с имеющимися наземными данными по геохимическому загрязнению почвогрунтов Киева. Разработанная методика обработки гиперспектральных изображений применима к оценке только территорий класса “открытые естественные земли” и не может быть механически распространена на другие классы земных покровов. Подобные исследования можно проводить для ландшафтов с естественными растительными покровами с близкими биотопными и фитометрическими характеристиками (одинаковые виды древесных пород и травостоя, почти равные проективное покрытие и лиственный индекс, сомкнутость, возраст, похожие условия обитания).

Список литературы

1. Проблемы создания региональных геоинформационных комплексов и опыт решения прикладных задач на основе аэрокосмической информации / Под ред. В.В. Лебедева. – М.: Наука, 2002. – 240 с.
2. Зарицкий А.И. Геохимические аспекты состояния геологической среды Киевской промышленно-городской агломерации / А.И. Зарицкий, Н.Н. Лысяный, А.Я. Абрамис, Н.Г. Лютая // Геологический журнал. – 1991. – № 2. – С.28-38.
3. Станкевич С.А. Кількісне оцінювання інформативності гіперспектральних аерокосмічних знімків при вирішенні тематичних задач дистанційного зондування Землі / С.А. Станкевич // Доповіді НАН України. – 2006. – № 10. – С.136-139.
4. Jones D.R. A taxonomy of global optimization methods based on response surfaces / D.R. Jones // Journal of Global Optimization. – 2001. – Vol.21. – P.345-383.
5. Local Search in Combinatorial Optimization / Ed. by E.H.L. Aarts, J.K. Lenstra. – Chichester: Wiley, 1997. – 512 p.
6. Nocedal J. Numerical Optimization / J. Nocedal, S.J. Wright. – Berlin: Springer, 1999. – 656 p.
7. Станкевич С.А. Оптимизация состава спектральных каналов гиперспектральных аэрокосмических изображений при решении тематических задач дистанционного зондирования Земли / С.А. Станкевич // Космічна наука і технологія. – 2007. – Т.13, № 2. – С.25-28.
8. Лукин В.В. Методы обработки и сжатия гиперспектральных изображений дистанционного зондирования / В.В. Лукин, Н.Н. Пономаренко, М.С. Зряхов, С.С. Кривенко, А.А. Зеленский, М.А. Попов, С.А. Станкевич, С.П. Ковальчук, О.В. Титаренко // Збірник наукових праць 8 Міжнародної науково-практичної конференції “Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях”. – Рибаче, 2009. – С.112-122.
9. Ponomarenko N.N. A method for blind estimation of spatially correlated noise characteristics / N.N. Ponomarenko, V.V. Lukin, K.O. Egiastian, J.T. Astola // Proceedings of SPIE. – 2010. – Vol.7532. – P.3208-10.
10. Станкевич С.А. Алгоритм статистичної класифікації об’єктів дистанційного спостереження за їх спектрально-топологічними характеристиками / С.А. Станкевич // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2006. – № 7. – С.38-40.
11. Попов М.А. Программно-технологический подход в задаче классификации земных покровов на основе гиперспектральных космических снимков / М.А. Попов, С.А. Станкевич, В.Н. Подорван // Матеріали Першої наукової конференції “Науки про Землю та космос – суспільству”. – К., 2007. – CD-ROM.
12. Попов М.А. Робастная классификация земных покровов с использованием гиперспектральных аэрокосмических снимков / М.А. Попов, С.А. Станкевич, В.Н. Подорван, О.В. Шолоник // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції “Сучасні проблеми створення і ефективного використання єдиного геоінформаційного простору України при підготовці і прийнятті управлінських рішень”. – К., 2007. – С.94-96.
13. Popov M.A. Mapping of technogenic contaminations of urban area using hyperspectral imagery / M.A. Popov, S.A. Stankevich, L.P. Lischenko, V.N. Podorvan // Thesis of Polish-Ukrainian Workshop on Space Applications. – Warsaw, 2007. – CD-ROM.
14. Kaarna A. Compression of spectral images // Vision Systems: Segmentation and Pattern Recognition / Ed. by G. Ohinata, A. Dutta. – Vienna: I-Tech, 2007. – P.269-298.
15. Yu G. Image compression systems on board satellites / G. Yu, T. Vladimirova, M.N. Sweeting // Acta Astronautica. – 2009. – Vol.64. – P.988-1005.
16. Ponomarenko N.N. Automatic approaches to on-land/on-board filtering and lossy compression of AVIRIS images / N.N. Ponomarenko, V.V. Lukin, M.S. Zriakhov, A. Kaarna, J. Astola // Proceedings of IGARSS. – Vol.III. – Boston, 2008. – P.254-257.

17. Tang X. Three-dimensional wavelet-based compression of hyperspectral images / X. Tang, W.A. Pearlman // *Hyperspectral Data Compression* / Ed. by G. Notta, F. Rizzo, J.A. Storer. – N.Y.: Springer, 2006. – P.273-308.
18. Lukin V.V. Processing of multichannel rs data for environment monitoring / V.V. Lukin // *Proceedings of NATO Advanced Research Workshop on Geographical Information Processing and Visual Analytics for Environmental Security*. – Trento, 2009. – P.129-138.
19. Lukin V.V. Compression and classification of noisy multichannel remote sensing images / V.V. Lukin, N.N. Ponomarenko, A.A. Zelensky, A.A. Kurekin, K. Lever // *Proceedings of XIV SPIE Conference on Image and Signal Processing for Remote Sensing*. – Cardiff, 2008. – P.7109-12.
20. Ponomarenko N.N. Visual Quality of Lossy Compressed Images / N.N. Ponomarenko, S.S. Krivenko, V.V. Lukin, K.O. Egiazarian // *Proceedings of CADSM2009*. – Svalyava, 2009. – P.137-142.

Попов М.О. Картування техногенних забруднень урбанізованих територій за матеріалами гіперспектральної космосъемки / М.О. Попов, В.В. Лукін, С.А. Станкевич, М.С. Зряхов, Л.П. Лищенко, В.М. Подорван, С.С. Кривенко // *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Географія*. – 2010. – Т.23 (62). – № 2 – С. 222-241.

Розглянуто кілька аспектів обробки даних гіперспектральної космосъемки з метою виявлення забруднень і одержання відповідних карт місцевості для урбанізованих територій. По-перше, розглядаються питання оптимального вибору підмножини спектральних каналів гіперспектрального зображення. Показано, що немає необхідності обробляти всі спектральні канали, звичайно досить використовувати не більш 10-30 з них, які є найбільш інформативними. Введено новий критерій інформативності, який враховує водночас такі фундаментальні властивості гіперспектральних зображень, як просторова розрізненість, взаємна спектральна ентропія та відношення "сигнал-шум". По-друге, розроблено та адаптовано до задачі виявлення геохімічних забруднень ряд алгоритмів обробки та аналізу гіперспектральних зображень. Проведено тестування запропонованого ланцюжка обробки на гіперспектральному космоснімку EO-1/Hyperion центральної частини Києва. Одержано карту оцінок геохімічних забруднень цієї території. По-третє, описано новий спосіб ефективного стиснення гіперспектральних даних із втратами, який залишає їхню якість прийнятною для подальшої обробки.

Ключові слова: урбанізовані території, геохімічні забруднення, гіперспектральна космосъемка, інформативність.

Popov M.A. Urbanized territories technogenic contaminations mapping using the hyperspectral imaging data / M.A. Popov, V.V. Lukin, S.A. Stankevich, M.S. Zriakhov, L.P. Lischenko, V.N. Podorvan, S.S. Krivenko // *Scientific Notes of Taurida National V. Vernadsky University. – Series: Geography*. – 2010. – Vol. 23 (62). – № 2 – P. 222-241.

Some aspects of data processing hyperspectral imaging for the purpose of revealing of contaminations and reception of corresponding district maps for the urbanized territories are considered. At first, questions of an optimal selection of a subset of spectral bands of the hyperspectral imagery are considered. It is shown that there is no necessity to process all spectral bands, it is usually enough to use no more than 10-30 ones which are the most informative. The new criterion for informativity is entered. This criterion considers simultaneously such fundamental properties of hyperspectral imagery, as the spatial resolution, mutual spectral entropy and signal-to-noise ratio. Secondly, few algorithms for the processing and analysis of hyperspectral imagery are developed and adapted for the geochemical contaminations detection. Testing of the offered processing flowchart on the EO-1/Hyperion hyperspectral image of the central part of Kiev is conducted. The map of estimations of geochemical contaminations of this territory is received. Thirdly, the new method for the effective lossy compression of hyperspectral data is described. This method abandoning the data quality acceptable to the further processing.

Keywords: urbanized territories, geochemical contaminations, hyperspectral imaging, informativity.

Поступила в редакцію 07.04.2010 г.