

УДК 528.85/.87

Интеркалибровка разновременных многозональных космических снимков для экологического мониторинга (на примере исследований зоны влияния аварии на ЧАЭС)

В. И. Лялько, А. И. Сахацкий, А. Я. Ходоровский

Центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України, Київ

Надійшла до редакції 11.02.97

Екологічний моніторинг в зоні впливу аварії на ЧАЕС виконується з використанням багатозональних космічних знімків, які одержані з різних космічних апаратів, за допомогою різної знімальної апаратури, у різні роки та при різних умовах зйомки. Для коректного зіставлення знімків була розроблена методика їх інтеркалібровки на основі використання природних еталонних об'єктів. Різниця спектральних яскравостей двох різночасових відкаліброваних космознімків використовувалась для оцінки зміни екологічного стану району досліджень.

ВВЕДЕНИЕ

Экологический мониторинг окружающей среды основывается на сопоставлении материалов многозональной космической съемки, выполненной в разные годы, с различных спутников, разной съемочной аппаратурой, при разных природных условиях (угол наклона солнечных лучей, расстояние от Земли до Солнца, прозрачность атмосферы и т. д.). Различия в условиях съемки не позволяют проводить корректное сопоставление спектральных яркостей и вегетационных индексов изучаемых объектов без предварительного учета влияния указанных выше факторов на спектральные яркости объектов.

Вопросы учета влияния различных природных факторов на спектральные яркости и проведение коррекции многозональных космоснимков для их сопоставления неоднократно рассматривались в научной литературе (Guyot et al., 1994; Hill et al., 1991; Junior, 1996). В основном коррекция снимков проводилась при определении вегетационных индексов. Без проведения коррекции, расчет величины вегетационных индексов может привести к существенным погрешностям (Junior, 1996). Обычно при коррекции снимков пытаются учесть влияние отдельных факторов, которые могут привести к

изменению спектральных яркостей космоснимков. Однако, для экологического мониторинга достаточно учесть влияние суммы различных факторов. Такой подход рассматривается ниже и называется интеркалібровкой снимков. Интеркалібровка представляет собой приведение спектральных яркостей сопоставляемых снимков к одному из них, выбранному в качестве базового (или эталонного). Выбор базового снимка проводится на основе содержания решаемой задачи и качества сравниваемых снимков.

Интеркалібровка разновременных снимков позволяет осуществить их сопоставление путем получения нового изображения, представляющего собой разность спектральных яркостей в отдельных зонах электромагнитного спектра. Можно ожидать, что на этом изображении четко проявятся все изменения в характере растительности, вызванные воздействием токсикантов, и которые не всегда четко видны при визуальном сопоставлении снимков.

МЕТОДИКА РАБОТ

Для корректного сопоставления спектральных яркостей изучаемых объектов на снимках разных лет

используются искусственные эталоны. При отсутствии искусственных эталонов для интеркалибровки космических снимков мы предлагаем использовать природные объекты, оптические свойства которых остаются практически неизменными на протяжении большей части года. Близкий подход был использован в работах Ji Changyuan, D'Souza Giles (1991), Casacchia, et. al. (1994).

Выбор эталонных объектов является наиболее ответственной и сложной операцией, от корректности выполнения которой зависят результаты всех дальнейших исследований. В каждом конкретном районе эталонные объекты выбираются по существующим условиям. Выбранные объекты обязательно подвергаются тестированию с целью определения их пригодности в качестве эталонов. Основными критериями для отбраковки намечаемых эталонных объектов являются постоянство их спектральных яркостей в пределах одного сезона года при однотипных погодных условиях и соответствие их спектральных яркостей тем, которые характерны для данного вида объектов.

Априори к таким объектам могут быть отнесены водная поверхность, крупные промышленные сооружения, пески пляжей, выходы скальных пород и некоторые другие. Необходимо не менее 4—5 видов эталонных объектов, а количество эталонных участков по каждому объекту не менее 7—10 для получения статистически достоверных результатов. Выбранные объекты должны охватывать весь диапазон изменений интенсивности спектральных яркостей, от самых темных до наиболее светлых.

С целью обработки результатов измерений целесообразно использовать корреляционный анализ.

Проведенные эксперименты показали, что корреляционная связь между спектральными яркостями сопоставляемых снимков надежно описывается линейной регрессионной зависимостью вида

$$D_n = C_{sc} D + C_{sh},$$

где D и D_n — исходное и приведенное к уровню опорного снимка значения спектральных яркостей соответственно, C_{sc} и C_{sh} — коэффициенты масштабирования и сдвига соответственно, учитывающие различия в прозрачности атмосферы, условиях освещенности и т. д.

Коэффициент определенности рассмотренной регрессионной зависимости должен быть не ниже 0.85—0.9 для надежной интеркалибровки снимков.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОВЕДЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Разработка методики интеркалибровки и ее практическое использование были выполнены в процес-

се изучения изменений экологической ситуации в районе влияния аварии на Чернобыльской АЭС. Исходными материалами послужили многозональные космические снимки, сделанные с ИСЗ «Космос», «Ресурс», SPOT и «Landsat» с 1980 по 1995 гг. В качестве эталонных объектов использовались: водная поверхность, песок, участок полотна железной дороги, отдельные участки промзоны ЧАЭС. В пределах каждого из выделенных типов объектов первоначально было сделано от 20 до 200 замеров спектральных яркостей. Анализ проведенных замеров показал, что внутри первоначальных эталонных объектов лишь на отдельных участках на протяжении ряда лет сохраняются относительно постоянными и взаимоскоррелированными значения спектральных яркостей в оптическом диапазоне. Около 20—25 % от первоначального количества замеров было отбраковано как не соответствующие указанным выше критериям. Корреляционный анализ спектральных яркостей исследуемых объектов на космических снимках разных лет, например, снимков SPOT 06.05.1986 г. и 23.08.1995 г., показал, что для красной зоны зависимость между спектральными яркостями снимков надежно описывается уравнением (рис. 1)

$$D_{86} = 0.459D_{95} + 11.56, \quad r = 0.947,$$

где D_{95} — спектральные яркости космоснимка SPOT 23.08.1995 г., D_{86} — спектральные яркости космоснимка SPOT 06.05.1986 г., приведенные к спектральным яркостям космоснимка SPOT

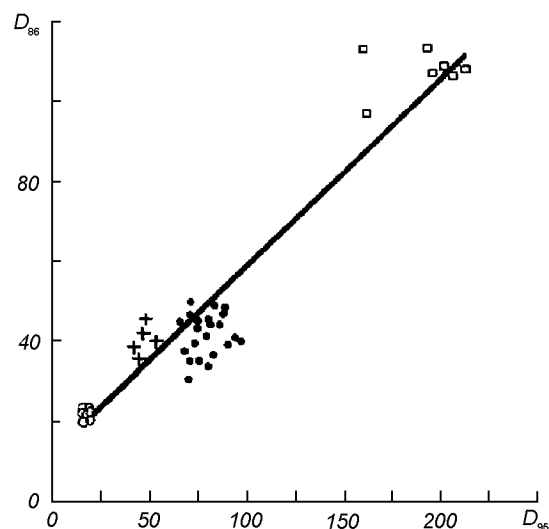


Рис. 1. Корреляция между спектральными яркостями D_{86} и D_{95} эталонных объектов на снимках SPOT 06.05.1986 г. и 23.08.1995 г. Красная зона ($\lambda\lambda$ 610—680 нм). Кружки — вода пруда охладителя ЧАЭС; крестики — участки железной дороги; точки — участки техногенных объектов ЧАЭС; квадраты — песок пляжей реки Припять

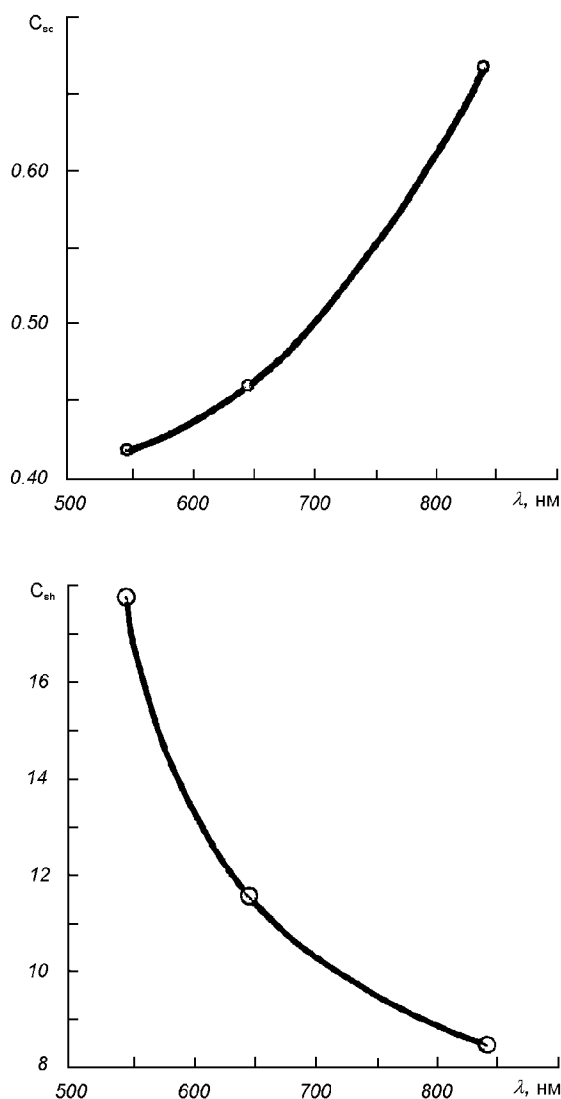


Рис. 2. Зависимость между коэффициентами масштабирования (C_{sc}) и сдвига (C_{sh}) от длины волны. Коэффициенты взяты из уравнения линейной регрессии при приведении спектральных яркостей ландшафтов снимка SPOT 23.08.1995 г. к эталонному (базовому) снимку SPOT 06.05.1986 г.

06.05.1986 г., r — коэффициент определенности рассмотренной регрессионной зависимости.

Коэффициенты масштабирования (C_{sh}) и сдвига (C_{sc}) закономерно изменяются с изменением длины волны электромагнитного излучения (рис. 2).

С увеличением длины волны в оптическом диапазоне коэффициент масштабирования закономерно увеличивается. Эта зависимость хорошо аппроксимируется полиномом второй степени:

$$y = 0.96 - 0.0022x + 2.19x^2$$

Коэффициент сдвига с увеличением длины волны

закономерно уменьшается и аппроксимируется кубическим сплайном:

$$y = 0.785 \cdot 10^{-6} (x - 545)^3 + 0.1778(645 - x) + 0.10775(x - 45).$$

Аналогичные зависимости получены и для других пар снимков.

Анализ полученных уравнений для разных пар снимков показал, что коэффициенты масштабирования для красной и ближней ИК-зон спектра близки между собой и заметно отличаются для зеленой зоны. Коэффициенты сдвига характеризуются большим размахом значений.

С целью визуального анализа изменений экологической ситуации за период с 1984 по 1995 гг. были построены новые изображения, представляющие собой разность яркостей в красной зоне спектра двух коррелированных снимков (рис. 3). Построенные изображения позволили выявить различные изменения, прошедшие на исследуемой территории за это время. Анализ изменений основан на данных, которые свидетельствуют о том, что спектральные яркости отражают процессы улучшения или ухудшения экологической обстановки в пределах отдельных ландшафтов (Lyalko et al., 1996).

Области, занятые отрицательными значениями разностей спектральных яркостей характеризуются, как правило, улучшением экологической обстановки, т. е. радионуклиды оказали здесь стимулирующее воздействие на растительность. Положительные значения разностей спектральных яркостей присущи участкам, где радионуклиды оказали угнетающее воздействие на растительность. Нулевые значения разностей характерны для областей со стабильной экологической обстановкой. Изменение спектральных яркостей на величину до 20 единиц связано с природными изменениями. Изменения более чем на 20 единиц могут быть вызваны как влиянием радионуклидов, так и антропогенным воздействием на ландшафты (вырубка лесов, строительство дамб и т. п.).

Экологическое состояние окружающей среды в первые дни после аварии видно на изображении, представляющем разность спектральных яркостей ландшафтов в доаварийный период («Landsat», 16.04.1984 г.) и в момент, когда завершались активные выбросы из взорвавшегося реактора (SPOT, 06.05.1986 г.). На изображении видно, что все виды растительности, включая и наиболее чувствительные к воздействию радиации сосновые леса, еще не претерпели площадных изменений. Только в районе ЧАЭС, где сосновые леса получили летальные дозы облучения, отмечается их локальное пожелтение. Слабые изменения растительности зафиксиро-

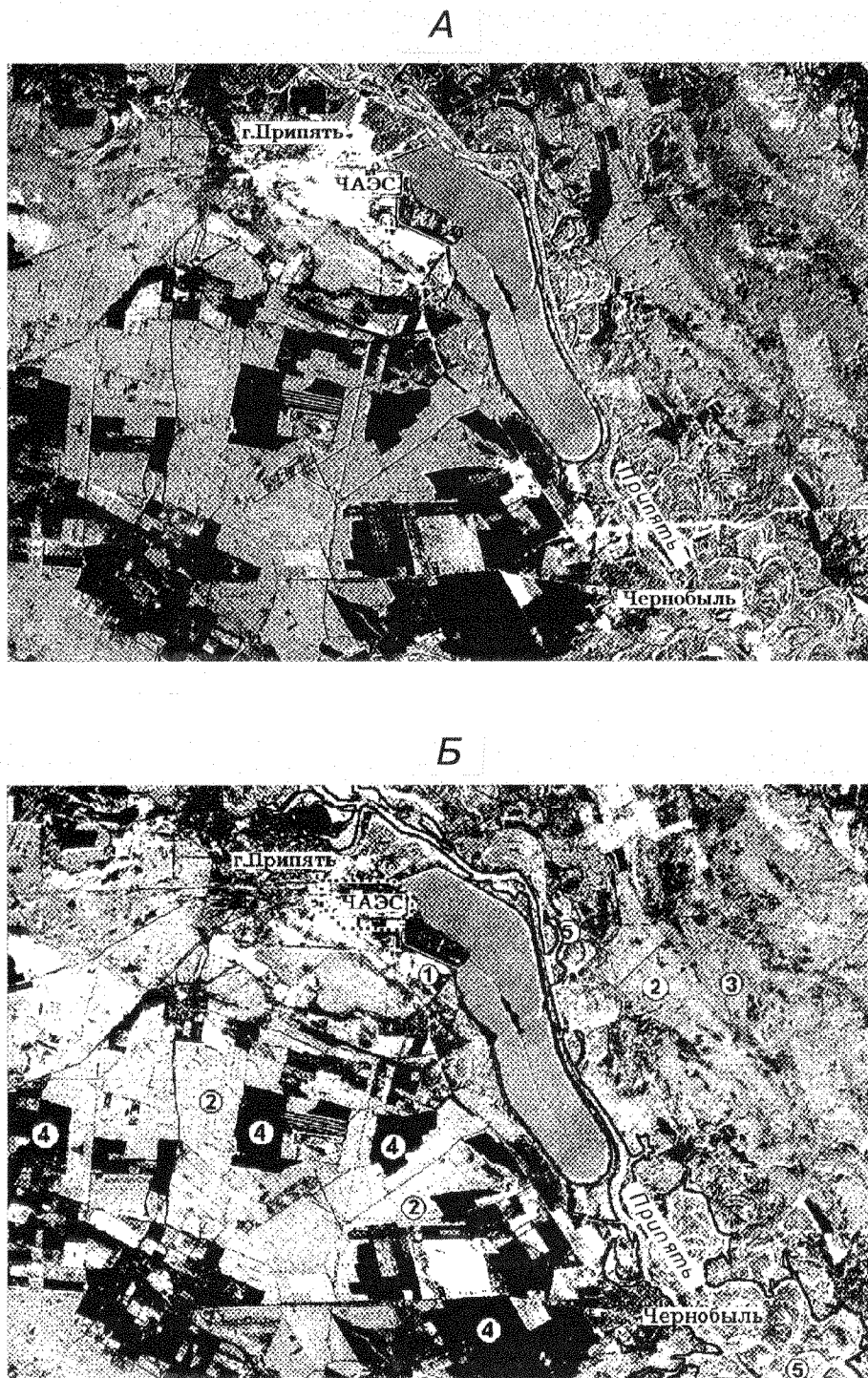


Рис. 3. Фрагменты изображений, отражающие величины разностей спектральных яркостей в красной зоне космоснимков: А — «Landsat» 29.05.1988 г. и SPOT 06.05.1986 г. Б — SPOT 23.08.1995 г. и SPOT 06.05.1986 г. (1 — «рыжий» лес, 2 — сосновый лес, 3 — лиственный лес, 4 — залежные земли, 5 — пойменные луга, точки — граница ЧАЭС). Повышение яркости фототона растительных покровов свидетельствует об ухудшении экологической обстановки

ваны в пределах г. Припять.

Экологическая ситуация на третий год после аварии видна на изображении, представляющем разность между снимками SPOT 06.05.1986 г. и «Landsat» 29.05.1988 г. (рис. 3). Судя по изображению, сосновые леса повсеместно заметно изменены, они приобрели пятнистую текстуру. К югу от ЧАЭС наибольшим изменениям подверглись северные окраины лесов. Слабо изменены лиственные леса. Четко отличается погибший «рыжий» лес, особенно те его участки, где проведено раскорчевывание и сплошное снятие грунта. Заметно ухудшилось состояние древесной растительности в пределах г. Припять.

Влияние радиации на состояние травянистой растительности не зафиксировано.

Изменения в экологии окружающей среды, которые произошли к настоящему времени фиксируются на изображении, представляющем собой разность снимков SPOT 06.05.1986 г. и SPOT 23.08.1995 г. (рис. 3). Анализ изображения показывает, что повсеместно техногенные радионуклиды оказывают отрицательное воздействие на сосновые леса и только местами наблюдается улучшение экологической обстановки.

В лиственных лесах окружающая обстановка не претерпела заметных изменений. Наиболее устойчивыми к действию радионуклидов оказалась травянистая растительность. Заметно чище стала вода в пруду-охладителе ЧАЭС.

Четко выделились новые техногенные объекты, возникшие после 1986 г., в том числе и те, которые не всегда уверенно проявляются на исходных снимках, прежде всего дамбы, которые должны предотвращать снос радионуклидами в реку Припять.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предлагаемая методика интеркалибровки снимков позволяет использовать многозональные космические снимки разных лет, сделанные с различных спутников для проведения экологического мониторинга территорий с целью выявления как техногенных изменений, так и воздействия на растительность различных токсикантов, в том числе и радионуклидов.

В настоящее время предложенная методика интеркалибровки совершенствуется с целью сопоставления многозональных снимков, сделанных различными сканерами, установленными на спутниках «Landsat» и SPOT, а также многозональных фотографических и сканерных снимков различного

разрешения.

Разностные снимки позволяют визуализировать воздействие токсикантов, в частности радионуклидов, на растительность. При этом проявляются особенности площадного распространения и интенсивности воздействия токсикантов на растительность, которые не видны на исходных снимках.

- Casacchia R., Picchiotti A., Salvatori R. Multitemporal spectral analysis of Venice Lagoon features from Landsat-5 TM // Proc. 10th Them. Conf. Geol. Remote Sens. «Explorat., Environ., and, Eng.» (San Antonio, Tex., 9—12 May, 1994). — Ann Arbor (Mich), 1994.—Vol. 2.—10/44-II/53.
- Guyot G., Gu X.-F. Effect of Radiometric Corrections on NDVI-Determination from SPOT-HRV and Landsat TM Data Remote Sens. Environment 49, 1994.—P. 169—180.
- Hill J. H., Sturm B. Radiometric correction multitemporal Thematic Mapper data for use in agriculture land-cover classification and vegetation monitoring // Int. Remote Sens.—1991.—P. 1471—1491.
- Ji Changyuan, D'Souza Giles. Atmospheric correction of SPOT imagery using coniferous woodland as a standard reference reflector. Spatial Data 2000 // Proc. Jt Conf. Photogramm. Soc., Remote Sens. Soc., Amer. Soc. Photogramm. and Remote Sens., Oxford, 17th—20th Sept., 1991. — London, 1991.—P. 134—138.
- Junior J. Z. Atmospheric correction of satellite images in a tropical region // Proc. XYIII International Cong. Photogrammetry and Remote Sensing.: Commission VII (ISPRS). — Vienna, 1996.—Vol. 31, part B7.—P. 831—834.
- Lyalko V. I., Sakhatsky A. I., Hodorovsky A. J., et al. Estimation of heavy metal and radionuclide Contamination of the Soils and vegetation within the Chernobyl Danger Zone Using Remote sensing Data // Proc. XYIII Cong. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing.: Commission VII. — Vienna, 1996.—Vol. 31, part B7.—P. 454—459.
- Vermont E., Kaufman Y. I. Absolute of AVHRR visible and near-infrared channels using ocean and cloud views // Int. J. Remote Sens.—1995.—16, N 13.—P. 2317—2340.
- Weichert H., Pilarski M., Schmidt K., et al. Applications of Multitemporal and Multisensoral Remote Sensing Data for Monitoring aspects in the East German opencast Lignite Mining and Post Mining Landscapes // Proc. XYIII International Cong. for Photogrammetry and Remote Sensing.: Commission VII (ISPRS). — Vienna, 1996.—Vol. 31, part B7.—P. 768—774.

INTERCALIBRATION OF MULTITEMPORAL MULTISPECTRAL SPACE IMAGES FOR THE ECOLOGICAL MONITORING (BY THE EXAMPLE OF THE CHERNOBYL DISASTER AREA)

V. I. Lial'ko, A. I. Sakhatskii, A. Ja. Khodorovskii

The ecological monitoring in the Chernobyl disaster area is based on the use of multiband space images, which have been acquired from, different satellites with various sensors, in the course of several years, under different imaging conditions. The method of image intercalibration using natural test objects has been developed for correct comparison of multitemporal images. The differences of reflectance spectra between some calibrated images was used for the assessment of changes in the ecological situation.