Картирование изменений растительного покрова Киевской агломерации на основе долговременных временных рядов многоспектральных космических снимков Landsat

С.А. Станкевич, И.А. Пестова

Научный центр аэрокосмических исследований Земли ИГН НАН Украины, г. Киев E-mail: ipestova@casre.kiev.ua

Представлены результаты картирования изменений растительного покрова Киевской агломерации с использованием данных дистанционного зондирования. Проанализированы временные ряды многоспектральных спутниковых снимков Landsat за период с 1992 по 2011 гг. Более 40 мультиспектральных изображений, удовлетворяющих требования исследований, отобрано для дальнейшего анализа. Все они находятся в пределах вегетационного периода большинства видов растений, представленных в агломерации. После радиометрической калибровки получены пороговые значения нормализованного разностного вегетационного индекса (NDVI) и построена маска растительности с их использованием. В качестве основного показателя, характеризующего растительный покров, выбран индекс листовой поверхности LAI. Выделены следующие основные классы растительного покрова для Киевской агломерации: хвойные и лиственные леса, сельскохозяйственные угодья, луга и пастбища, участки с разряженной растительностью. Для каждого из классов применены регрессионные зависимости NDVI-LAI и построены карты распределений LAI исследуемой территории. Результаты анализа характеристик временных рядов LAI – трендов и периодических компонент свидетельствуют о систематическом сокращении количества растительности Киевской агломерации.

Ключевые слова: многоспектральные космические снимки, долговременные временные ряды, анализ состояния растительности, урбанизированные территории, вегетационные индексы.

Введение

Увеличивающиеся темпы урбанизации приводят к поглощению природных ландшафтов, к потере углерода растительных экосистем, что способствует деградации и эрозии почвы, ослаблению и уязвимости растительности (Дідух, Альошкіна, 2012). Поэтому оперативный мониторинг изменений растительного покрова урбанизированных территорий очень важен для разработки эффективных мер по охране окружающей среды в городах.

Коммунальными службами украинских городов ежегодно проводится предписанная правилами инвентаризация (Наказ "Про затвердження правил...", 2006), а оценка состояния растительности базируется на подсчетах суммарной площади озелененных территорий в границах населенного пункта. Для оценки влияния растительности на качество жизни в городе используется индекс *UQL* (Urban Quality of Life) (Jensen et al., 2004). Для его расчёта необходимо учитывать количество фотосинтетически активных листьев. Существующие наземные методы измерения этого количества трудоемки, подвержены сильному влиянию погодных условий и зачастую контактные, что приводит к повреждению или уничтожению растительности. Очевидна целесообразность использования методов, основанных на применении данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Исследования по дистанционному изучению и картированию растительности городских территорий проводятся с 1980-х годов (Miller, 1988). Активные работы в этом направлении проводились как на западе (Newman, 1993; Pillmann, Kellner, 2001), так и в странах СНГ (Корец и др., 2006). В Украине данным вопросом занимались такие учёные, как В.И. Лялько, А.И. Сахацкий, А.Т. Азимов, Г.М. Жолобак, З.М Шпортюк и другие (Багатоспектральні методи ДЗЗ..., 2006).

Материалы и методы

Функционирующая с 1984 г. первая в мире спутниковая система среднего пространственного разрешения Landsat (http://landsat.gsfc.nasa.gov/) достаточно хорошо подходит для картирования растительного покрова урбанизированных территорий. Снимки, использованные в нашем исследовании, предоставлены оператором спутниковой системы Landsat – геологической службой США (USGS) (http://earthexplorer.usgs.gov/).

В ходе работы были проанализированы многоспектральные снимки Киевской агломерации, полученные спутниковой системой Landsat (сенсоры ТМ и ЕТМ+) с 1992 по 2011 годы. Более 40 из них (*puc. 1*), удовлетворяющих условиям исследования – фенологические фазы с максимальной продуктивностью, допустимый процент покрытия снимка облаками, – были отобраны для дальнейшего анализа. Все они находятся в пределах вегетационного периода большинства видов растений, представленных в агломерации.



Рис. 1. Распределение отобранных для анализа снимков во времени

Очевидно, что по нерегулярной и довольно редкой сетке наблюдений невозможно достоверно вычленить короткопериодические – внутригодовые, сезонные – составляющие временного ряда, поэтому в работе основное внимание уделялось анализу долговременных трендов (десятки лет) и периодик (единицы лет) динамики растительности. Обработ-

ка нерегулярных временных рядов распределений *LAI* проводилась с помощью спектрального анализа по методу максимальной энтропии (Ulrych, Bishop, 1975) с предварительным выделением и удалением линейного тренда. Необходимые для этого вычислительные процедуры – mese(), maximum entropy spectral estimation и detrend() – реализованы в модуле Signal Processing Toolbox свободно распространяемого математического программного пакета с открытым исходным кодом SciLab (Bunks et al., 2007).

Для приведения в единую систему физических показателей результатов съемки были выполнены предварительные калибровка, а также радиометрическая и атмосферная коррекция. Для устранения участков, занимаемых облаками, использовался программный модуль ACCA (*puc. 2*) (Irish, 2000), подключенный к геоинформационной системе Quantum GIS (QGIS) (<u>http://www.qgis.org/ru/site/</u>). Снимки были взаимно геореференцированы с пиксельной точностью и обрезаны.



Рис. 2. Использование модуля АССА для устранения облачности

Для анализа растительности и отделения от неё других природных и искусственных объектов использовалось пространственное распределение нормализованного разностного вегетационного индекса *NDVI* (Normalized Difference Vegetation Index).

По специально синтезированному для каждого сезона (в результате интерактивного анализа территории) пороговому решающему правилу пространственные распределения NDVI были разделены на 2 класса: "растительность" (Vegetation) и "нерастительность" (Non-Vegetation). Дерево решений показано на *рис. 3*.



Рис. 3. Дерево решений классификации пространственного распределения NDVI

Показателем, характеризующим количество растительности, был выбран индекс листовой поверхности *LAI* (Leaf Area Index).

В настоящем исследовании состояние растительности никак не учитывалось, хотя в дальнейшем предполагается оценивать его регрессией по наклону спектральной характеристики отражения в области красного края растительности 610-670 нм. Это позволит получить интегрированный показатель оценивания растительности (Попов та ін., 2008), учитывающий не только её количество, но и качество, что достаточно важно при расчёте показателей наподобие *UQL*.

Из-за отличий в регрессионной зависимости *LAI* от *NDVI* для различных растительных биотопов предварительно была проведена их классификация в пределах территории исследования методом максимального правдоподобия и выделены следующие основные классы для Киевской агломерации: хвойные и лиственные леса, сельскохозяйственные угодья, луга и пастбища, участки с разряженной растительностью. Получение более детальной классификации требует большего количества данных наземной заверки и снимков высокого пространственного разрешения.



Рис. 4. Регрессионная зависимость LAI(NDVI) для основных классов растительных биотопов

Для каждого из классов растительных биотопов были применены известные регрессионные зависимости (Myneni, 1997) в формате таблиц соответствия *LUT* (Look-Up

Table) (Tang et al., 2004), полученные по разработанному в NASA Goddard Space Flight Center методу (<u>http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod15.pdf</u>), и построены карты распределений *LAI* исследуемой территории. Поскольку таблицы соответствия *LUT* не описываются явной формулой, использованная зависимость *LAI(NDVI)* приводится на *рис. 4* графически.

Точность картирования заверялась по данным наземных наблюдений зеленых насаждений на территории Киева.

Порядок расчета индекса *LAI* территории исследования, включающий описанные выше этапы, поясняется *puc. 5*.



Рис. 5. Порядок определения индекса листовой поверхности

Описанная операция последовательно применялась ко всем отобранным снимкам, в результате чего был сформирован долговременный временной ряд пространственного распределения *LAI* территории исследования для последующего анализа.

Анализ временных рядов

Задачей анализа временных рядов является выявление характерных особенностей эволюции (динамики) временного ряда, которая обязательно имеет функциональную зависимость от различных факторов воздействия на систему. Динамика временного ряда содержит несколько компонентов, которые представляют собой проявления различного воздействия на систему и являются составляющими временного ряда (Суслов и др., 2005):

 тренд – общий характер эволюции временного ряда, направление его изменения, сохраняется в течение длительного промежутка времени или в течение всего анализируемого промежутка;

 циклические колебания – более быстрая смена динамики ряда, для которой характерны фазы повышения и понижения;

 сезонные колебания – изменения динамики, связанные с природными циклическими процессами (смена времени суток, времени года); случайные флуктуации – бессистемные колебания временного ряда высокой частоты и малой амплитуды, связанные с постоянным воздействием на систему различных событий и процессов;

 выбросы – скачкообразные мощные и кратковременные изменения динамики временного ряда, которые значительно отклоняют значение исследуемого параметра от общей закономерности распределения временного ряда.

Как правило, при анализе временных рядов дистанционных данных выявляются и описываются тренды и периодические составляющие. Линейные тренды описываются средними значениями за весь период анализа и средними приростами за определенный период. Периодические составляющие описываются частотой возникновения периодических колебаний, их вкладом в исследуемый процесс, характеризующийся приростом функции (параметра исследуемого процесса) каждого периода, на которые приходится колебания и характерным периодом, на который приходится наиболее значительное колебание.

Для анализа временных рядов дистанционных данных был разработан расчетный скрипт в вычислительной среде SciLab (Urroz, 2001). Реализация в нем анализа временных рядов дает возможность использования не строго периодических снимков, характерных именно для дистанционных данных вследствие воздействия погодных явлений, в первую очередь облачности.

Результаты

Результаты анализа полученного временного ряда *LAI* представлены в виде пространственных распределений на *рис. 6* и выражают среднее значение за период наблюдений, среднегодовой прирост, а также периодические составляющие динамики растительного покрова (Станкевич, Пестова, 2013).

Усреднённые по территории Киевской агломерации показатели составили: среднее значение 0,2986, среднегодовой прирост –0,3125 %, годовая периодическая компонента 3,5518 ‰, наиболее значимая периодическая компонента 43,4 месяца.

Исследование проводилось по всей территории агломерации, в которой растительный покров занимает не более 40% общей площади, остальное – акватории, селитебные и промышленные территории (включая транспортную систему) с нулевым значением *LAI*. Это обуславливает низкое общее среднее значение *LAI* для агломерации. Для основных классов растительных биотопов полученные средние значения *LAI* (*maбл. 1*) соответствуют нормальным величинам для умеренной климатической зоны с учетом техногенного влияния мегаполиса.



Рис. 6. Среднее значение LAI за период наблюдений - (а); среднегодовой прирост LAI - (б); вклад периодической компоненты - (в)

Таблица 1. Наблюдаемые долговременные средние значения LAI основ	зных
растительных биотопов территории исследования	

Класс растительных биотопов	Среднее значение LAI
Лиственные	1,0912
Хвойные	0,6122
Сельскохозяйственные угодья	0,7309
Луга и пастбища	0,5451

Отрицательный ежегодный прирост количества растительности связан не только с уменьшением её общей площади, обусловленным застройкой территорий, но и с недостаточно экологически обоснованными подходами к ведению лесного и городского хозяйства: сплошной вырубкой с выращиванием наиболее продуктивных пород, изъятием опалой листвы, ежегодным посыпанием тротуаров солью в зимний период.

Анализ периодических сезонных изменений позволяет отличать вечнозеленые растения от листопадных, что является дополнительным эффективным классификационным признаком (Станкевич и др., 2013).

Агроэкосистемы (пахотные земли, огороды, домашние сады и др.), которые попадают в ареал мегаполиса, из-за особого режима использования не вписываются в общую картину изменения растительности, поэтому при оценивании именно урбанизированных территорий их целесообразно исключать из анализа.

Выводы

Анализ долговременных временных рядов является эффективным и полезным инструментом исследования растительности урбанизированных территорий. Этот инструмент может быть рекомендован для использования городскими службами при планировании и оценке мероприятий по озеленению городских территорий для повышения качества жизни в городе.

В результате анализа долговременных изменений растительного покрова Киевской агломерации выявлен систематический тренд сокращения количества растительности, что требует принятия соответствующих научно обоснованных мер по сохранению растительных экосистем.

Дальнейшие исследования целесообразно сосредоточить на разработке универсального интегрированного показателя, включающего как количественные, так и качественные характеристики растительности. Также необходимо увеличение количества тестовых заверочных участков, расширение площадей валидации получаемых данных в пределах Киевской агломерации. Целесообразно использование при валидации снимков высокого пространственного разрешения и применение более информативных данных, в том числе гиперспектральных и спектрополяризационных.

Благодарность

Данное исследование поддержано Национальной академией наук Украины, проектные гранты № 0113U001885 и № 0112U000703.

Литература

- 1. Корец М.А., Рыжкова В.А., Барталев С.А. Оценка состояния растительного покрова в зоне воздействия промышленных предприятий с использованием данных ENVISAT-MERIS и SPOT-Vegetation // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2006. Т.2. № 3. С. 330-334.
- 2. *Кочубей С.М., Кобец Н.И., Шадчина Т.М.* Спектральные свойства растений как основа методов дистанционной диагностики. – Киев: Наукова думка, 1990. 136 с.
- Станкевич С.А., Козлова А.А., Грисбах Р. Определение характеристик фенологического развития растительных сообществ по снимкам RapidEye // Abstracts of 13th Ukrainian Conference on Space Research. Eupatoria: Space Research Institute, 2013. P. 191.
- Станкевич С.А., Пестова И.А. Долговременные ряды спутниковых изображений как инструмент анализа количественных изменений растительного покрова // Abstracts of 13th Ukrainian Conference on Space Research. Eupatoria: Space Research Institute, 2013. P. 170.
- 5. Суслов В.И., Ибрагимов Н.М., Талышева Л.П., Цыплаков А.А. Эконометрия. Новосибирск: Изд. СО РАН, 2005. 744 с.
- 6. Багатоспектральні методи Д33 в задачах природокористування / За ред. В.І. Лялько і М.О. Попова. Київ: Наукова думка, 2006. 360 с.
- 7. *Дідух Я.П., Альошкіна У.М.* Біотопи міста Києва // Нац. ун-т "Києво-Могилян. акад.". Київ: НаУКМА, 2012. 163 с.

- 8. Наказ Міністерства будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства України "Про затвердження Правил утримання зелених насаджень у населених пунктах України" 10.04.2006. №. 105
- 9. Попов М.О., Станкевич С.А., Козлова А.О., Маркова І.О. До оперативного оцінювання забезпеченості міських територій зеленими насадженнями із застосуванням багатоспектральних аерокосмічних знімків // Науковий вісник Національного аграрного університету. Вип.128. Київ: НАУУ, 2008. С. 299-301.
- 10. Bunks C., Delebecque F., Le Vey G., Steer S. Signal Processing with SciLab. Rocquencourt: INRIA, 2007. 205 p.
- 11. Irish R. Landsat-7 automatic cloud cover assessment // Proceedings of SPIE, 2000. Vol. 4049. P. 348-355.
- 12. Jensen R., Gatrell J., Boulton J., Harper B. Using remote sensing and geographic information systems to study urban quality of life and urban forest amenities // Ecology and Society, 2004. Vol. 9. No. 5. A.5.
- 13. *Miller R.W.* Urban Forestry: Planning and Managing Urban Greenspaces.– Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1988. 404 p.
- 14. *Myneni R.B., Nemani R.R., Running S.W.* Estimation of global leaf area index and absorbed PAR using radiative transfer model // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 1997. Vol. 35. No. 6. P. 1380-1393.
- 15. *Newman A.P.* Monitoring urban forest canopy cover using satellite imagery // Environmental Monitoring and Assessment, 1993. Vol.26. No.2-3. P.175-176.
- 16. *Pillmann W., Kellner K.* Monitoring of green urban spaces and sealed surface areas // Proceedings of the 2nd International Symposium "Remote Sensing of Urban Areas". Regensburg: University of Regensburg, 2001. CD.
- Tang S., Zhu Q., Zhou Y., Xie D., Yang S., Bu Q.A. Large Scale LAI Inversion Algorithm // Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS'04. Anchorage: IEEE International, 2004. Vol. 7. P. 4498-4500.
- 18. Ulrych T.J., Bishop T.N. Maximum entropy spectral analysis and autoregressive decomposition // Reviews of geophysics and space physics. 1975. Vol. 13. No. 1. P. 183-200.
- 19. Urroz G.E. Time Series and Spatial Data Analysis with SciLab. Logan: InfoClearinghouse, 2001. 64 p.

Vegetation cover changes mapping within Kiev metropolis agglomeration using long-term time series of Landsat multispectral satellite imagery

S.A. Stankevich, I.A. Piestova

Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth (CASRE), Institute of Geological Science, National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine E-mail: ipestova@casre.kiev.ua, pestovai@ukr.net

The results of vegetation cover changes mapping within Kiev metropolis agglomeration using remote sensing data are presented. Kiev metropolis agglomeration imagery, obtained by Landsat satellite system from 1992 to 2011, was analyzed. More than 40 multispectral images, satisfying the research requirements, were selected for detailed analysis. All are within the growing season for many plants inside Kiev metropolis agglomeration. After the radiometric calibration the thresholds of normalized-difference vegetation index (NDVI) were obtained and vegetation mask was built using them. Leaf area index LAI is selected as the main quantitative indicator of vegetation cover. The following basic classes for Kiev metropolitan habitats were detected and mapped: coniferous and deciduous forests, arable lands, meadows and pastures, lands with sparse vegetation. For each of the classes, the NDVI-LAI regression dependence was applied and LAI spatial distribution of study area was built. The parameters of LAI long-term time series analysis – trends and periodic components - show a systematic reduction in the vegetation amount within Kiev metropolitan area.

Keywords: multispectral satellite imagery, long-term time series analysis, vegetation state, urban areas, vegetation indices.

References

1. Korets M.A., Ryzhkova V.A., Bartalev C.A., Otsenka sostoyaniya rastitel'nogo pokrova v zone vozdeistviya promyshlennykh predpriyatii s ispol'zovaniem dannykh ENVISAT-MERIS i SPOT-Vegetation (Evaluation of vegetation in the area affected by industries using data from ENVISAT-MERIS and SPOT-Vegetation), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2006, Vol.2, No. 3, pp. 330-334.

- 2. Kochubei S.M., Kobets N.I., Shadchina T.M. *Spektral'nye svoistva rastenii kak osnova metodov distantsionnoi diagnostiki* (Spectral properties of plants as the basis of remote diagnostics methods), Kiev: Naukova dumka, 1990, 136 p.
- 3. Stankevich S.A., Kozlova A.A., Grisbakh R., Opredelenie kharakteristik fenologicheskogo razvitiya rastitel'nykh soobshchestv po snimkam RapidEye (Characterization of phenological development of plant communities by RapidEye imagery), *Abstracts of 13th Ukrainian Conference on Space Research*, Eupatoria: Space Research Institute, 2013, 191 p.
- 4. Stankevich S.A., Pestova I.A. Dolgovremennye ryady sputnikovykh izobrazhenii kak instrument analiza kolichestvennykh izmenenii rastitel'nogo pokrova (Long time series of satellite imagery as a tool for quantitative analysis of vegetation changes), *Abstracts of 13th Ukrainian Conference on Space Research*, Eupatoria: Space Research Institute, 2013, 170 p.
- 5. Suslov V.I., Ibragimov N.M., Talysheva L.P., Tsyplakov A.A., *Ekonometriya* (Econometrics), Novosibirsk: Izd. SO RAN, 2005, 744 p.
- 6. Ljal'ko V.I., Popov M.O., *Bagatospektral'ni metody DZZ v zadachah pryrodokorystuvannja* (Multispectral remote sensing in nature management), Kiev: Naukova dumka, 2006, 360 p.
- 7. Diduh Ja.P., Al'oshkina U.M., Biotopy mista Kyjeva (Biotopes of Kiev city), Kyi'v: NaUKMA, 2012, 163 p.
- 8. Minbud Ukrai'ny, 10.04.2006, No. 105.
- Popov M.O., Stankevych S.A., Kozlova A.O., Markova I.O., Do operatyvnogo ocinjuvannja zabezpechenosti mis'kyh terytorij zelenymy nasadzhennjamy iz zastosuvannjam bagatospektral'nyh aerokosmichnyh znimkiv (In addition for evaluating the operational providing greenery of urban areas using multispectral aerospace images), *Naukovyj visnyk Nacional'nogo agrarnogo universytetu*, Vol. 128, Kiev: NAUU, 2008, pp. 299-301.
- 10. Bunks C., Delebecque F., Le Vey G., Steer S. Signal Processing with SciLab, Rocquencourt: INRIA, 2007, 205 p.
- 11. Irish R. Landsat-7 automatic cloud cover assessment, Proceedings of SPIE, 2000, Vol. 4049, pp. 348-355.
- 12. Jensen R., Gatrell J., Boulton J., Harper B. Using remote sensing and geographic information systems to study urban quality of life and urban forest amenities, *Ecology and Society*, 2004, Vol.9, No.5, A.5.
- 13. Miller R.W. Urban Forestry: Planning and Managing Urban Greenspaces, Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1988, 404 p.
- 14. Myneni R.B., Nemani R.R., Running S.W. Estimation of global leaf area index and absorbed PAR using radiative transfer model, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 1997, Vol. 35, No. 6, pp.1380-1393.
- 15. Newman A.P. Monitoring urban forest canopy cover using satellite imagery, Environmental Monitoring and Assessment, 1993, Vol. 26, No. 2-3, pp. 175-176.
- 16. Pillmann W., Kellner K. Monitoring of green urban spaces and sealed surface areas, *Proceedings of the 2nd International Symposium "Remote Sensing of Urban Areas"*, Regensburg: University of Regensburg, 2001, CD.
- 17. Tang S., Zhu Q., Zhou Y., Xie D., Yang S., Bu Q.A. Large Scale LAI Inversion Algorithm, *Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS'04*, Anchorage: IEEE International, 2004, Vol. 7, pp. 4498-4500.
- 18. Ulrych T.J., Bishop T.N. Maximum entropy spectral analysis and autoregressive decomposition // Reviews of geophysics and space physics, 1975, Vol. 13, No. 1, pp. 183-200.
- 19. Urroz G.E. Time Series and Spatial Data Analysis with SciLab, Logan: InfoClearinghouse, 2001, 64 p.