

МЕТОДИКА ЗА САТЕЛИТЕН МОНИТОРИНГ НА ИГЛОЛИСТНИ ГОРИ

Михаела Цветкова, Милен Чанев, Александър Гиков, Лъчезар Филчев

*Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: mtsvetkova@space.bas.bg*

Ключови думи: *Дистанционни методи, сателитни данни, вегетационни индекси, иглолистни гори, ГИС*

Резюме: *В представената методика за аерокосмически мониторинг на иглолистни гори, е представен метод за комбиниране на данни от таксацията на горски територии със сателитни данни. Методиката включва избрани таксационни показатели като възраст, височина, диаметър, пълнота, бонитет и запас на 1 ha, които се комбинират с избрани вегетационни индекси и биофизични параметри, получени от сателита Sentinel-2. Получените данни са обработени с ГИС софтуер. За установяване, както и доказване на връзката между наземните и сателитните данни се предлага статистически корелационен анализ между посочените таксационни показатели и генерираните по сателитни данни вегетационни индекси и биофизични параметри. Методологията е приложена и тествана на част от наземен работен аерокосмически полигон Рила.*

METHODOLOGY FOR SATELLITE MONITORING OF CONIFEROUS FORESTS

Mihaela Tsvetkova, Milen Chanev, Aleksander Gikov, Lachezar Filchev

*Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: mtsvetkova@space.bas.bg*

Keywords: *Remote sensing methods, satellite data, vegetation indices, coniferous forests, GIS*

Abstract: *This methodology for aerospace monitoring of coniferous forests combines data from forest area taxation with satellite imagery. Taxation indicators such as age, height, diameter, canopy density, site quality, and growing stock per hectare, are used in combination with derived vegetation indices and biophysical parameters derived from Sentinel-2 satellite. The spatial data is processed using GIS software. To confirm and demonstrate the relationship between ground and satellite data, a statistical correlation analysis is conducted between the specified taxation indicators and the vegetation indices and biophysical parameters generated from satellite data. The methodology has been applied and tested within a selected Rila ground-based aerospace polygon.*

Въведение

Иглолистните гори представляват ключов елемент от горските екосистеми в умерения климатичен пояс и имат съществено значение за регулирането на въглеродния баланс, биоразнообразието и устойчивото управление на природните ресурси. В условията на засилващи се климатични промени и антропогенен натиск, необходимостта от ефективни методи за тяхното наблюдение и оценка става все по-актуална [1, 2]. Традиционните теренни инвентаризации, въпреки своята надеждност, са ограничени поради високата си трудоемкост, високи разходи и ограничено пространствено покритие. Това поражда нуждата от прилагането на дистанционни методи и интеграцията им с географски информационни системи (ГИС) за разработване на мащабируеми и икономически ефективни подходи за мониторинг.

През последните години сателитните системи, и по-специално Sentinel-2, се наложиха като надежден източник на мултиспектрални данни с висока пространствена, спектрална и времева резолюция, подходящи за мониторинг на горски екосистеми [3]. Благодарение на своите 13 спектрални канала, Sentinel-2 предоставя възможност за извличане на широк набор

от вегетационни индекси, които отразяват ключови параметри като биомаса, индекс на листна площ (LAI), съдържание на влага и фотосинтетична активност [4, 5].

В комбинация с наземни лесотаксационни данни, тези индекси създават основа за разработване на емпирични и статистически модели за оценка на структурни и биофизични параметри на горите [6].

Методологичните подходи, основани на статистически анализи – включително корелационни и регресионни методи дават възможност за количествено определяне на връзките между спектралните характеристики и таксационните показатели [7, 8]. Допълнителна стойност носи използването на ГИС за пространствено обобщаване на данни по подотдели, което позволява интегриране на хетерогенни информационни източници и подпомага пространствения анализ и моделиране [9, 10].

Цели на изследването

Основната цел на настоящата статия е да представи методика за сателитен мониторинг на иглолистни гори, базирана на интегрирането на мултиспектрални данни от сателита Sentinel-2 с лесотаксационна информация от горска инвентаризация. В рамките на изследването се поставят следните задачи:

1. Да се извлекат и анализират ключови вегетационни индекси и биофизични параметри, чувствителни към състоянието и структурата на иглолистните насаждения.
2. Да се интегрират дистанционни данни с таксационни показатели на ниво подотдел в рамките на наземен работен аерокосмически полигон Рила.

Материали и методи

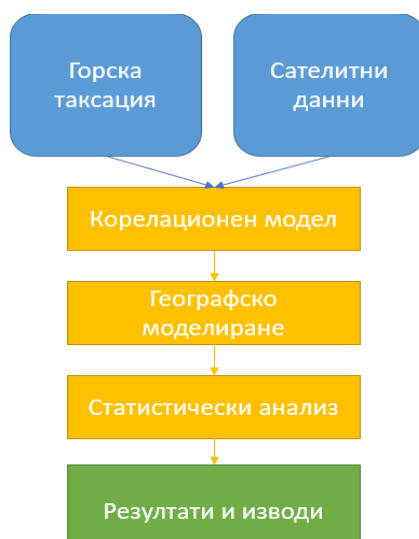
1. Обект на изследване

За целите на настоящото изследване като опитна територия беше част от наземен работен аерокосмически полигон Рила. Той се характеризира с преобладаващи иглолистни насаждения от обикновен смърч (*Picea abies*), които са сред най-старите естествени смърчови гори в Европа. Тези особености превръщат територията в ценен полигон за разработване и тестване на методики за дистанционен мониторинг.

На база предоставените от Дирекцията на НП „Рила“ лесоустройствени проекти и векторни данни бяха идентифицирани 82 подотдела, попадащи в границите на резервата. След първоначален анализ от изследването бяха изключени подотдели, които не са от интерес.

2. Дистанционни данни

Като основен източник на спектрална информация бяха използвани мултиспектрални изображения от Sentinel-2 L2A, осигуряващи 13 спектрални канала с пространствена разделителна способност от 10, 20 и 60 m. Изборът на Sentinel-2 се обосновава с неговата висока спектрална разделителна способност, сравнително висока времева разделителна способност, свободен достъп до данните и доказана ефективност в горски мониторинг [4]. Конкретно, беше изтеглено изображение от 27 август 2017 г. [11], характеризиращо се с ниска облачност (под 20%) [12]. Схема на предложената методика е представена на фигура 1.



Фиг. 1. Схема на методиката за сателитен мониторинг на иглолистни гори

3. Предварителна обработка на изображенията

Обработката включваше няколко стъпки:

1. Преоразмеряване на всички спектрални ленти до 10 m резолюция за осигуряване на пространствена съгласуваност;
2. Извличане на подрегион – ограничаване на сцената до границите на избрани горски пототдели в рамките на наземен работен аерокосмически полигон Рила, използвайки предоставените векторни данни;
3. Изчисляване на индекси – генериране на 24 спектрални вегетационни индекса и 3 биофизични параметъра представени на Таблица 2 и 3. Индексите бяха изчислени чрез комбинация от син, червен, NIR и SWIR канали, като обхващат различни характеристики на растителността – съдържание на хлорофил (Canopy Chlorophyll Content Index), влага (Normalized Difference Moisture Index), биомаса (Enhanced Vegetation Index, Simple Ratio) и др. [7, 8, 13].

Изчисленията бяха извършени чрез платформата Sentinel Hub EO Browser и растерен калкулатор в средата на QGIS 3.34 [14]. Резултатите бяха експортирани във формат GeoTIFF.

Таблица 1. Биофизични параметри генерирани по данни от спътника Sentinel-2

No	Bph. Par.	Formulae	Reference
1	LAI	SNAP Biophysical Processor	[15]
2	FAPAR		
3	FCover		

Таблица 2. Вегетационни индекси генерирани по данни от спътника Sentinel-2

No	VIs	Formulae	Reference
1	NDVI	$(B8 - B4) / (B8 + B4)$	[16]
2	NDWI	$(B8 - B12) / (B8 + B12)$	[17]
3	NDVIG	$(B6 - B3) / (B6 + B3)$	[18]
4	NMDI	$(B8a - (B11 - B12)) / (B8a + (B11 + B12))$	[19]
5	OSAVI	$(B8 - B4) / (B8 + B4 + 0.16)$	[20]
6	DVI	$B8 - B4$	[21]
7	EVI	$2.5 * (B8 - B4) / (B8 + 6 * B4 - 7.5 * B2 + 1)$	[7]
8	EVI2	$2.5 * (B8 - B4) / (B8 + 2.4 * B4 + 1)$	[22]
9	Clrededge	$B7 / B5 - 1$	[23]
10	TCARI	$3 * [(B5 - B4) - 0.2 * (B5 - B3) * (B5 / B4)]$	[13]
11	GCVI	$B8 / B3 - 1$	[23]
12	GNDVI	$(B9 - B3) / (B9 + B3)$	[24]
13	GDVI	$B8 - B3$	[23]
14	NDRE1	$(B6 - B5) / (B6 + B5)$	[25]
15	NDRE2	$(B7 - B5) / (B7 + B5)$	[25]
16	CCCI	$NDRE1 / OSAVI$	[26]
17	WDRVI	$(0.1 * B9 - B5) / (0.1 * B9 + B5)$	[27]
18	NDMI	$(B8 - B11) / (B8 + B11)$	[28]
19	FCI1	$B4 * B5$	[8]
20	FCI2	$B4 * B8$	[8]
21	GLI	$(B3 - B4) + (B3 - B2) / (2 * B3) + B4 + B2$	[29]
22	SAVI	$1.5 * (B8 - B4) / (B8 + B4 + 0.5)$	[30]
23	NDCI	$B5 - B4 / B5 + B4$	[31]
24	SR	$B8 / B4$	[32]

4. Извличане на стойности по подотдели

С помощта на функцията zonal statistics в ГИС софтуера QGIS за всеки от избраните подотдели се извличат стойности на индексите и биофизичните параметри.

Тези статистики позволяват както оценка на централната тенденция, така и на вътрешната вариабилност на индексиранията стойности в рамките на подотделите.

5. Таксационни данни

Интегрираните лесотаксационни показатели включват: възраст, височина, диаметър, пълнота, бонитет, запас на 1 ha и общ запас на подотдела. Те бяха съчетани със спектралните данни в обща база данни.

6. Статистическа обработка

Корелационният анализ беше проведен в MS Excel с използване на коефициента на Пирсон (r) за оценка на линейните зависимости между вегетационните индекси и таксационните параметри. Резултатите бяха визуализирани чрез scatter plot, който представлява графично представяне на връзката между две числови променливи. Тази връзка се илюстрира с точки, като всяка точка представлява конкретна стойност от променливите. Позицията на всяка точка на хоризонталната (ос x) и вертикалната (ос y) ос показва стойностите за конкретна точка от данните. Тези инструменти се използват за разкриване на връзки, тенденции и корелации в данните. Например, те могат да обяснят как промените в една променлива влияят върху друга.

Резултати

1. Общи зависимости

Корелационният анализ между 24-те спектрални вегетационни индекса и 3-те биофизични параметъра от Sentinel-2, от една страна, и лесотаксационните показатели от горската инвентаризация, от друга, разкрива наличието на статистически значими връзки. Най-високи стойности на коефициента на Пирсон (r) бяха отчетени за параметрите височина, диаметър и запас на 1 ha, което показва, че тези характеристики са особено чувствителни към вариациите в спектралните отразителни свойства на насажденията.

2. Индекси, свързани с биомаса и запас

Индексите EVI и SR, които са утвърдени като показатели за фотосинтетична активност и продуктивност [7, 33], показаха умерена до силна корелация със запаса на 1 ha ($r = 0.46$ и $r = 0.52$ съответно). Това съответства на резултатите на Zhang et al. (2016) [34], според които комбинацията от EVI и структурни данни от LiDAR подобрява точността при моделиране на биомаса.

Подобно, NDMI, чувствителен към съдържанието на влага в биомасата [17], също демонстрира положителна зависимост със запаса ($r = 0.42$). Тази зависимост потвърждава връзката между водното съдържание на растителността и продуктивността на иглолистните насаждения. Подобни резултати са докладвани и от Mielczek, K. & Verrelst, J. (2023) [35], които установяват, че NDMI и други индекси, базирани на SWIR диапазона, показват силна корелация с надземната биомаса и запаса при смърчови гори в Централна Европа. Според авторите, влагата в тъканите играе решаваща роля за поддържането на фотосинтетичната активност и растежа, което прави водните индекси надежден индикатор за оценка на продуктивността на горите.

3. Индекси, свързани с хлорофил и фотосинтеза

Хлорофилно-базираните индекси като CCCI и NDRE2 показаха най-силна връзка с височината и диаметъра на дърветата ($r = 0.48$ и $r = 0.44$). Това потвърждава, че физиологичното състояние на листната маса е тясно обвързано с растежа на насажденията [13, 23].

4. Биофизични параметри

Сред трите биофизични продукта, генерирани чрез SNAP Biophysical Processor, LAI демонстрира най-висока корелация с таксационните показатели – особено с пълнотата ($r = 0.51$) и запаса ($r = 0.47$).

5. Сравнение между подотдели

Разпределението на стойностите по подотдели показва, че насажденията с по-висока възраст и по-голям диаметър имат по-стабилни зависимости със спектралните индекси, докато младите подотдели демонстрират по-висока вариабилност.

Допълнителната стратификация на данните по експозиция показва, че северните склонове показват по-добри статистически резултати, което може да се обясни разликата в микроклиматичните условия.

Заклучение

Тестването на предложената методика за сателитен мониторинг на иглолистни гори показва зависимостта между избрани вегетационни индекси, комплексна картина на тяхното състояние, здраве и продуктивност. Първоначалните корелационни зависимости между спектралните данни получени от сателита Sentinel-2 и таксационните характеристики бяха ниски, което категорично наложи необходимостта от стратифициране на изследваните горски подотдели по изложение – на северни и източни и южни и западни склонове. Този подход се оказа решаващ, тъй като значително подобри статистическата зависимост между индексите и параметрите на гората, подчертавайки критичното влияние на микроклиматичните условия върху спектралното отражение.

Литература:

1. FAO. Global Forest Resources Assessment 2020: Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2020
2. Herold, M., Carter, S., Avitabile, V., Espejo, A. B., Jonckheere, I., Lucas, R. M., McRoberts, R. E., Næsset, E., & Nightingale, J. Challenges and Opportunities in the Use of Remote Sensing for Forest Monitoring. *Remote Sensing*, 14 (4), 937–956, 2022
3. Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., & Bargellini, P. Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36, 2012
4. Zhu, Z., Wulder, M. A., Roy, D. P., Woodcock, C. E., Hansen, M. C., Radeloff, V. C., Healey, S. P., Schaaf, C., Hostert, P., Strobl, P., Pekel, J.-F., Lymburner, L., Pahlevan, N., & Scambos, T. A. Benefits of the Landsat Program to Society. *Remote Sensing of Environment*, 224, 382–393, 2019
5. Sa, R., & Fan, W. Estimation of Forest Parameters in Boreal Artificial Coniferous Forests Using Landsat 8 and Sentinel-2A. *Remote Sensing*, 1514, 3605, 2023
6. Xu, L., Zhang, J., Li, S., & Chen, X. Integration of LiDAR, SAR, and Optical Data for Large-Scale Forest Carbon Stock Estimation. *Forests*, 16(2), 214–229, 2025
7. Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. Overview of the Radiometric and Biophysical Performance of the MODIS Vegetation Indices. *Remote Sensing of Environment*, 83 (1–2), 195–213, 2002
8. Becker, R., Fassnacht, F. E., & Latifi, H. Detection of Forest Structure and Health Using Combined Optical and SAR Data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 142, 1–16, 2018
9. Димитров, А. Автореферат: Използване на дистанционни методи за мониторинг на иглолистни гори в България. София: ЛТУ, 2022
10. Todorova, E., & Zhiyanski, M. Spatial and Temporal Exploration of NDVI, LAI, and SMI in Coniferous Forests: Detecting Changes in Parangalitsa Reserve. *Journal of the Bulgarian Geographical Society*, 52, 59–78, 2025
11. Copernicus Open Access Hub. Sentinel-2 Mission – Level-2A Products. European Space Agency (ESA). Retrieved from: <https://scihub.copernicus.eu>, 2015
12. Jensen, J. R. *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*. 3rd ed., Pearson Education, 2015
13. Haboudane, D., Miller, J. R., Tremblay, N., Zarco-Tejada, P. J., & Dold, C. Integrated Narrow-Band Spectral Indices for Prediction of Crop Chlorophyll Content for Application to Precision Agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 81 (2–3), 416–426, 2002
14. QGIS Development Team. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project, 2024. Available at: <https://qgis.org>
15. European Space Agency (ESA). Sentinel-2 Biophysical Processor – Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD). ESA Sentinel Online, 2021
16. Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Green Wave Effect) of Natural Vegetation. NASA-CR-132982, 1973
17. Gao, B.-C. Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space. *Imaging Spectrometry*, Vol. 2480, pp. 225–236, SPIE, 1995
18. Metternicht, G. Vegetation Indices Derived from High-Resolution Airborne Videography for Precision Crop Management. *International Journal of Remote Sensing*, 24 (14), 2855–2877, 2003. <https://doi.org/10.1080/01431160210163074>
19. Wang, L., & Qu, J. J. NMDI: A Normalized Multi-Band Drought Index for Monitoring Soil and Vegetation Moisture with Satellite Remote Sensing. *Geophysical Research Letters*, 34 (20), 2007. <https://doi.org/10.1029/2007GL031021>
20. Rondeaux, G., Steven, M., & Baret, F. Optimization of Soil-Adjusted Vegetation Indices. *Remote Sensing of Environment*, 55(2), 95–107, 1996. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00186-7](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00186-7)
21. Steven, M. D. The Sensitivity of the OSAVI Vegetation Index to Observational Parameters. *Remote Sensing of Environment*, 63(1), 49–60, 1998. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00114-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00114-4)
22. Daughtry, C. S., Walthall, C. L., Kim, M. S., De Colstoun, E. B., & McMurtrey, J. E. Estimating Corn Leaf Chlorophyll Concentration from Leaf and Canopy Reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 74 (2), 229–239, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00113-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00113-9)

23. Gitelson, A. A., Gritz, Y., & Merzlyak, M. N. Relationships Between Leaf Chlorophyll Content and Spectral Reflectance and Algorithms for Non-Destructive Chlorophyll Assessment in Higher Plant Leaves. *Journal of Plant Physiology*, 160 (3), 271–282, 2003. <https://doi.org/10.1078/0176-1617-00887>
24. Buschmann, C., & Nagel, E. In Vivo Spectroscopy and Internal Optics of Leaves as Basis for Remote Sensing of Vegetation. *International Journal of Remote Sensing*, 14 (4), 711–722, 1993. <https://doi.org/10.1080/01431169308904370>
25. Gitelson, A., & Merzlyak, M. N. Spectral Reflectance Changes Associated with Autumn Senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. Leaves. *Journal of Plant Physiology*, 143 (3), 286–292, 1994
26. Barnes, E. M., Clarke, T. R., Richards, S. E., Colaizzi, P. D., Haberland, J., Kostrzewski, M., Waller, P., Choi, C., Riley, E., Thompson, T., Lascano, R. J., Li, H., Moran, M. S. Coincident Detection of Crop Water Stress, Nitrogen Status and Canopy Density Using Ground-Based Multispectral Data. *Proc. 5th Int. Conf. on Precision Agriculture*, Bloomington, MN, USA, 2000
27. Gitelson, A. A. Wide Dynamic Range Vegetation Index for Remote Quantification of Biophysical Characteristics of Vegetation. *Journal of Plant Physiology*, 161 (2), 165–173, 2004. <https://doi.org/10.1078/0176-1617-01176>
28. Gao, B.-C. NDWI—A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space. *Remote Sensing of Environment*, 58, 257–266, 1996. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00067-3)
29. Louhaichi, M., Borman, M., & Johnson, D. Spatially Located Platform and Aerial Photography for Documentation of Grazing Impacts on Wheat. *Geocarto International*, 16 (1), 65–70, 2001. <https://doi.org/10.1080/10106040108542184>
30. Huete, A. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25 (3), 295–309, 1988. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)
31. Mishra, S., & Mishra, D. R. Normalized Difference Chlorophyll Index: A Novel Model for Remote Estimation of Chlorophyll-a Concentration in Turbid Productive Waters. *Remote Sensing of Environment*, 117, 394–406, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.016>
32. Jordan, C. F. Derivation of Leaf-Area Index from Quality of Light on the Forest Floor. *Ecology*, 50 (4), 663–666, 1969. <https://doi.org/10.2307/1936256>
33. Tucker, C. J. Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127–150, 1979. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)
34. Zhang, K., Thapa, B., Ross, M., & Gann, D. Remote Sensing of Seasonal Changes and Disturbances in Mangrove Forest: A Case Study from South Florida. *Ecosphere*, 7 (6), e01366, 2016. <https://doi.org/10.1002/ecs2.1366>
35. Méliczek, K., & Verrelst, J. Evaluating Moisture-Sensitive Spectral Indices for Monitoring Forest Productivity and Biomass Using Sentinel-2 Data. *Remote Sensing of Environment*, 297, 113769, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113769>