

Краткое сообщение

УДК 630*57

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-2-210-218

Применение алгоритма Random Forest для анализа динамики таежно-тундровых лесных экосистем

С.В. Коптев^{1,2}, д-р с.-х. наук, доц., гл. науч. сотр.; ResearcherID: [ABD-5497-2021](https://orcid.org/0000-0002-5402-1953),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5402-1953>

Хасан Алабдуллахалхасно¹, аспирант; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0854-550X>

¹Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; s.koptev@narfu.ru, 199213000hfa@gmail.com

²Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия, 163062; s.koptev@narfu.ru

Поступила в редакцию 19.09.24 / Одобрена после рецензирования 12.12.24 / Принята к печати 13.12.24

Аннотация. Приведены результаты изучения динамики таежно-тундровых лесных экосистем Архангельской области на основе материалов дистанционного зондирования Земли и применения классификации изображений с использованием алгоритма случайного леса (Random Forest). Изменение доли лесных, нелесных и не покрытых лесом площадей в районе исследования отмечено в лесном реестре. По итогам работы показано значительное увеличение территории лесов с 2016 по 2023 гг. – на 10,28 % за счет сокращения не покрытых лесом площадей и нелесных земель. Эта динамика обусловлена процессами успешного естественного восстановления лесов, а также их продвижением на север с захватом площадей в связи с изменением климата. Оценка точности автоматизированной классификации спутниковых изображений с использованием алгоритма случайного леса путем сравнения с эталонными данными с применением таких критериев, как общая точность и коэффициент Каппа (степень соответствия оценок модели фактическим данным), подтвердила надежность полученных результатов. В качестве эталонных показателей брали материалы таксационных выделительных баз данных, данных пробных площадей – стационарных и государственной инвентаризации лесов. Перед началом полевых работ были изучены картографические базы данных и подобраны пробные площади. С опорой на экспериментальные данные по исследуемому району создано большое количество полигонов, отражающих разнообразие лесных насаждений и нелесных территорий, для обучения алгоритма классификации спутниковых изображений. Обработка снимков, включая поправки, мозаику, геопроекцию и возврат, выполнялась с использованием SNAP (Sentinel Application Platform) – программы с открытым исходным кодом. Проанализированы 100 точек в различных лесорастительных условиях в районе исследования. Изучение динамики лесных экосистем на основе материалов дистанционного зондирования Земли и применение классификации изображений с использованием алгоритма случайного леса позволят повысить точность оценки ресурсного и экологического потенциалов насаждений северо-таежных и притундровых лесов Архангельской области.

Ключевые слова: динамика лесных экосистем, северо-таежные леса, притундровые леса, дистанционное зондирование, алгоритм случайного леса

Благодарности: Публикация подготовлена по результатам НИР, выполненных в рамках госзадания ФБУ «СевНИИЛХ» на проведение прикладных научных исследований

в сфере деятельности Федерального агентства лесного хозяйства (регистрационный номер темы: 123022800118–4).

Для цитирования: Коптев С.В., Алабдуллахалхасно Хасан. Применение алгоритма Random Forest для анализа динамики таежно-тундровых лесных экосистем // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 2. С. 210–218. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-2-210-218>

Brief report

Applying the Random Forest Algorithm to Analyze the Dynamics of Taiga-Tundra Forest Ecosystems

Sergey V. Koptev^{1,2✉}, Doctor of Agriculture, Assoc. Prof., Chief Research Scientist; ResearcherID: [ABD-5497-2021](https://orcid.org/0000-0002-5402-1953), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5402-1953>

Hasan Alabdullahalhasno¹, Postgraduate Student; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0854-550X>

¹Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; s.koptev@narfu.ru[✉], 199213000hfa@gmail.com

²Northern Research Institute of Forestry, ul. Nikitova, 13, Arkhangelsk, 163062, Russian Federation; s.koptev@narfu.ru[✉]

Received on September 19, 2024 / Approved after reviewing on December 12, 2024 / Accepted on December 13, 2024

Abstract. The article presents the results of studying the dynamics of taiga-tundra forest ecosystems in the Arkhangelsk Region based on the Earth remote sensing data and the application of image classification using the Random Forest algorithm. The change in the proportion of forested, non-forested and unforested areas in the study area is noted in the forest register. The results of the study show a significant increase in forest area between 2016 and 2023 (by 10.28 %) due to a reduction in non-forested areas and unstocked forest lands. This dynamics is due to the processes of successful natural restoration of non-forest covered areas, as well as their advancement northward taking-up lands due to climate change. The evaluation of the accuracy of automated classification of satellite images using the Random Forest algorithm by comparing them with reference data using criteria such as overall accuracy and the Kappa coefficient (the degree of correspondence between the model estimates and the actual data) has confirmed the reliability of the results obtained. The benchmarks have been taken from inventory databases, stationary sample plot data and the state forest inventory data. Before starting field work, cartographic databases have been studied and sample plots have been selected. Based on experimental data for the study area, a large number of polygons have been created, reflecting the diversity of forest stands and non-forest areas, to train the algorithm for classifying satellite images. Image processing, including corrections, mosaics, geoprojection and return, has been performed using SNAP (Sentinel Application Platform), an open source program. 100 points in various forest vegetation conditions in the study area have been analyzed. Studying the dynamics of forest ecosystems based on the Earth remote sensing data and the application of image classification using the Random Forest algorithm will improve the accuracy of assessing the resource and environmental potential of northern taiga and tundra forests of the Arkhangelsk Region.

Keywords: dynamics of forest ecosystems, northern taiga forests, tundra forests, remote sensing, Random Forest algorithm



Acknowledgements: The publication was prepared based on the results of the research carried out within the framework of the state assignment of the State Budgetary Institution “Northern Research Institute of Forestry” for applied scientific research in the field of the Federal Forestry Agency activities (topic registration no. 123022800118–4).

For citation: Koptev S.V., Alabdullahalhasno H. Applying the Random Forest Algorithm to Analyze the Dynamics of Taiga-Tundra Forest Ecosystems. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 2, pp. 210–218. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-2-210-218>

Введение

Леса являются одним из наиболее важных возобновляемых природных ресурсов, источником производственного сырья, продуктов питания, а также способствуют биоразнообразию. Состояние лесов считают индикатором уровня развития экосистемы [5, 21]. Вырубка деревьев, климатические изменения – наиболее распространенные источники существенных трансформаций в лесном покрове, которые наблюдаются в настоящее время в мировом масштабе [8]. Основная причина сокращения биоразнообразия, сдвигов в глобальном углеродном цикле связана с изменениями в землепользовании [10, 27]. Климат северной тайги и притундровых лесов характеризуется экстремально холодной зимой, коротким и относительно прохладным летом. Северо-таежные и притундровые леса играют большую роль в регулировании глобального климата, защищая материковую часть от северных ветров, а также вносят значительный вклад в углеродный баланс. Эти леса вследствие малой экономической доступности и высоких защитных категорий также являются резервуаром биологического разнообразия, представляют собой уникальную и глобально ценную экосистему, неотъемлемую часть природной среды России [1]. Получение точной и постоянно обновляемой информации об изменениях площади лесного покрова важно для устойчивого управления лесными экосистемами [16, 20, 23]. Поэтому возникает необходимость регулярного мониторинга лесных территорий с анализом их изменений и создания комплексной и точной динамической базы данных о них.

Источником таких данных могут служить полевые лесоустроительные работы, стационарные исследования лесных экосистем, однако в этом случае изменения в лесах фиксируются периодически и на локальном уровне, подобные мероприятия также являются очень дорогостоящими и трудоемкими [6, 14].

Дистанционное зондирование – хороший инструмент мониторинга изменений в лесном покрове, поскольку позволяет быстро и эффективно оценивать динамику лесов, как на региональном, так и на глобальном уровнях, через определенные промежутки времени [12]. Это дает возможность учитывать изменения лесных экосистем при разработке адаптационных мер и плана лесохозяйственных мероприятий. Дистанционные методы радикально преобразовали концепцию сбора информации о лесных объектах, формулируя адекватное представление о пространственной динамике временных трансформаций в лесных экосистемах [11]. Методы дистанционного зондирования с использованием мультиспектральных спутниковых изображений нашли широкое применение, были признаны надежным способом оценки динамики растительного покрова, землепользования и ее отражения на картах благодаря высокой точности с позиций пространственного, спектрального и временного разрешений [4, 13, 19].

Для характеристики процессов в лесах с помощью методов дистанционного зондирования существует несколько подходов, которые включают в себя определение различий в разновременных изображениях, их регрессию, анализ направления изменений, сравнение показателей растительного покрова, вегетативных индексов растительности, сопоставление перечисленных данных после классификации, когда изображения, относящиеся к разным датам, относят либо к наблюдаемым, либо к неуправляемым, а затем сравнивают результаты для 2 снимков с установлением доли изменений компонентов [28]. Методы классификации космических изображений включают ненаправленную и направленную классификации, которые подразделяются на явления и категории через знание их местоположения или сведения об их спектральных отражениях [17].

Успех любой классификации спутниковых снимков, гарантирующий получение надежных результатов, зависит от различных факторов, основным из которых является выбор подходящей процедуры классификации [22]. Управляемые классификаторы широко используются, поскольку в данном случае они более мощные и точные [7]. Управляемая классификация включает в себя ряд алгоритмов, в т. ч. алгоритмы вычисления опорных векторов, нейронные сети и алгоритм случайного леса (Random Forest) [3].

Цель работы – оценить состояние и динамику северо-таежных и притундровых лесов сухопутной территории Арктики Архангельской области с использованием алгоритма случайного леса для спутниковых снимков.

Объекты и методы исследования

Район исследования расположен на территории Архангельской области на границе северо-таежных и притундровых лесов (рис. 1).

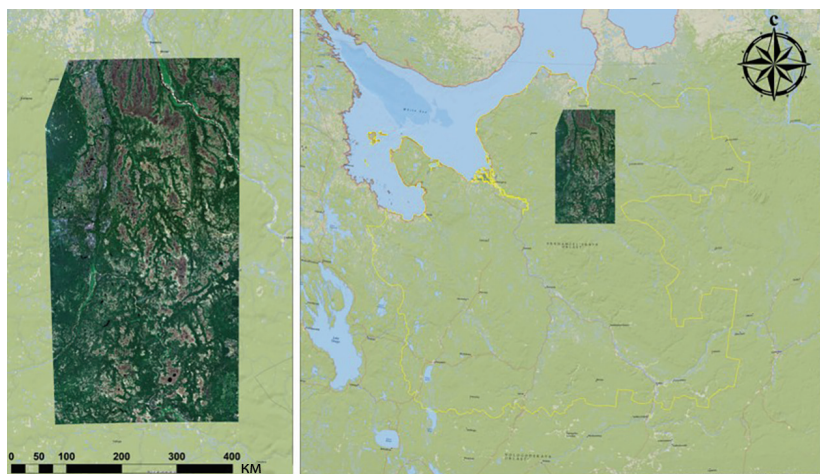


Рис. 1. Район исследования на территории Архангельской области

Fig. 1. The study area in the territory of the Arkhangelsk Region

Исследование проводилось с 2016 по 2023 гг. с использованием данных дистанционного зондирования Земли, материалов, полученных на пробных площадях, из таксационных по выделным баз данных и на пробных площадях государственной инвентаризации лесов.

Взяты данные со спутника Sentinel-2. Эти данные обеспечивают значительное улучшение спектрального покрытия, пространственно-

го разрешения и временной частоты по сравнению с данными спутника Landsat. Sentinel-2 представляет особый интерес для картирования растительности из-за наличия 2 новых полос в спектре красного спектра: 705 и 740 нм [13].

Для 2 периодов (2016 и 2023 гг.) были загружены по 2 сцены исследуемой территории, которые попадают в диапазон R064_T38WMS и R064_T38WMT. Рассмотрены изображения за летние месяцы, чтобы избежать влияния облачности и снизить частоту ошибок.

Обработка, включая поправки, мозаику, геопроекцию и возврат, выполнялась с использованием SNAP (Sentinel Application Platform) – программы с открытым исходным кодом, разработанной Европейским космическим агентством (ESA) для изучения спутниковых данных, в т. ч. данных Sentinel-2.

Спутниковые изображения были спроецированы в соответствии с проекционной системой UTM–zone–N38, модифицированной системой Меркатора и возвращены согласно мировой географической системе координат WGS–1984. Изображение переклассифицировано для всех спектральных диапазонов с использованием инструмента повторной выборки по спектру, т. к. алгоритм случайного леса в SNAP требует такой процедуры для достижения однородности характеристик и их готовности к обработке и анализу.

При изучении динамики лесных экосистем важно установить тенденцию перехода нелесных и не покрытых лесом площадей в лесные и покрытые лесом, а также обратную тенденцию, которые зависят от типа лесорастительных условий, полноты реализации лесохозяйственных мероприятий и их адаптации к климатическим изменениям.

Классификация спутниковых изображений является важнейшим элементом в области дистанционного зондирования и наблюдения за поверхностью Земли. Нами использована управляемая классификация, в частности – алгоритм случайного леса как эффективный инструмент быстрой и точной классификации данных [3, 15].

По сравнению с другими алгоритмами классификации: CART (Classification and Regression Trees – дерево решений), SVM (Support Vector Machine – метод опорных векторов), kNN (k-Nearest Neighbors – метод ближайших соседей) и MLC (Maximum Likelihood Classification – учет дисперсии и ковариации классов) – этот метод показал лучшие результаты по итогам многих исследований [25, 29] и представляет собой контролируемый непараметрический способ классификации с использованием машинного обучения. Его суть заключается в создании деревьев решений, где каждое дерево оценивает класс, к которому принадлежит отдельный пиксель спутникового изображения [15, 26]. Способность этого алгоритма обрабатывать большие наборы данных и объединять множество спектральных, пространственных и временных характеристик делает его хорошим инструментом для обнаружения даже незначительных изменений в лесных экосистемах [18, 24, 30]. Оценку точности классификации проводили с использованием коэффициента Каппа, отражающего степень соответствия классифицированных данных фактическим и находящегося в пределах от 0 до 1 [9].

В данной работе исследуемая территория была разделена на 2 категории: в 1-ю вошли покрытые лесом площади, во 2-ю – не покрытые и нелесные земли, в т. ч. водоемы, болота, постройки и сельскохозяйственные угодья.

Результаты исследования и их обсуждение

С помощью модуля Spatial Analyst в системе Arc GIS методом случайной генерации создано 100 точек оценки точности классификации (рис. 2).

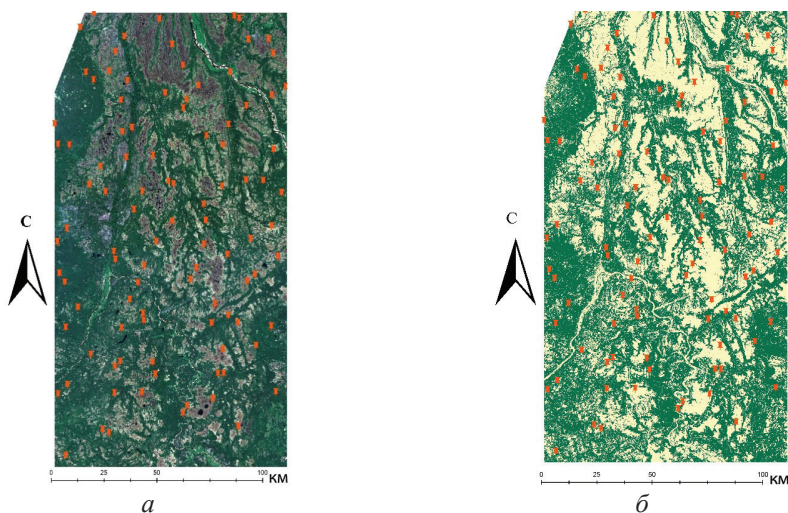


Рис. 2. Классификационные карты с контрольными точками:
а – спутниковое изображение; *б* – классификационная карта

Fig. 2. The classification maps with control points: *a* – satellite image; *b* – classification map

На рис. 3 показана классификация изображений со спутника Sentinel-2 за исследованные годы с использованием алгоритма случайного леса. Результаты классификации и анализа динамики позволили выявить, что за 8 лет произошли изменения в соотношении лесных и нелесных площадей.

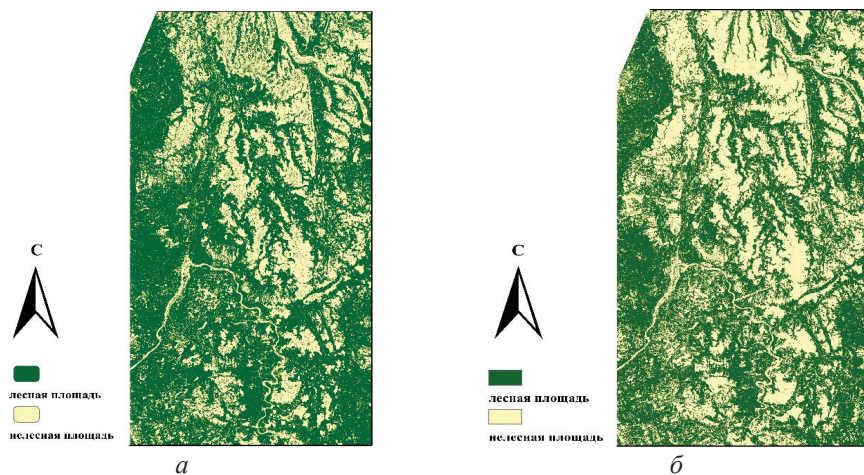


Рис. 3. Классификация спутниковых изображений с использованием алгоритма случайного леса: *а* – 2023 г.; *б* – 2016 г.

Fig. 3. The classification of satellite images using the Random Forest algorithm:
a – 2023; *b* – 2016

В таблице отражено процентное соотношение каждой категории за период исследования. Покрытая лесом площадь в 2016 г. составила 54,27 % от изученной территории, а в 2023 г. достигла 64,55 %, нелесных или не покрытых лесом площадей в 2016 г. было 45,73 %, а в 2023 г. – 35,45 %.

Изменение площадей классифицированных категорий, %, за период исследования
The change in the areas of classified categories, %, over the study period

Год	Площадь земель	
	покрытых лесом	не покрытых лесом / нелесных
2016	54,27	45,73
2023	64,55	35,45
Изменение	10,28	–10,28

Этот результат согласуется с данными государственного лесного реестра, согласно которому площадь лесов Архангельской области на 2021 г. по сравнению с началом 2007 г. увеличилась на 1375,5 тыс. га [2].

Рост лесных площадей объясняется проведением лесовосстановительных работ, направленных на поддержку естественного возобновления, и изменениями климата, которые в наибольшей степени проявляются в северных широтах.

Это подтверждает, что алгоритм случайного леса эффективен при анализе спутниковых снимков благодаря высокой точности классификации информации, способности обрабатывать сложные данные больших объемов, а также справляться с отсутствующими или искаженными показателями. Алгоритм также проявляет гибкость при работе с различными типами спектральных данных и позволяет интерпретировать результаты через вычисление важности переменных, что повышает точность определения изменений.

Заключение

В последние десятилетия достигнут значительный прогресс в области классификации спутниковых изображений, в основном благодаря появлению и использованию в этой сфере передовых алгоритмов. Так, алгоритм случайного леса показал изменения лесных и нелесных площадей в районе северо-таежных и притундровых лесов.

Выявлено увеличение покрытой лесом площади в изучаемом районе с 2016 по 2023 г. при высокой точности классификации для всех используемых индикаторов. Это подтверждает возможность использования названного алгоритма в масштабных исследованиях динамики лесных экосистем.

Такие положительные изменения распространения лесов можно объяснить эффективными мероприятиями по восстановлению древостоев, климатическими сдвигами, способствующими расширению ареала лесов в северном направлении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Ильинцев А.С., Шамонтьев И.Г., Третьяков С.В. Современная динамика лесопользования в бореальных лесах России (на примере Архангельской области) // Лесотехн. журн. 2021. Т. 11, № 3(43). С. 45–62.

Ilintsev A.S., Shamontyev I.G., Tretyakov S.V. Modern Dynamics of Forest Use in the Boreal Forests of Russia (For Example of the Arkhangelsk Region). *Lesotekhnicheskij zhurnal* = Forestry Engineering Journal, 2021, vol. 11, no. 3(43), pp. 45–62. (In Russ.).

<https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.3/4>

2. Состояние и охрана окружающей среды Архангельской области за 2021 год: докл. / Центр природопользования и охраны окружающей среды. Архангельск, 2022. 13 с.

The State and Protection of the Environment in the Arkhangelsk Region for 2021: Report. The Centre for Nature Management and Environmental Protection, 2022, Arkhangelsk. 13 p. (In Russ.).

3. Тоскунина В.Э. Проблемы лесного комплекса Архангельской области и пути их решения // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2008. Вып. 3(3). С. 29–31.

Toskunina V.E. Problems of Timber Complex in the Arkhangelsk Region and Ways of Their Solution. *Ekonomicheskie i sotsial'nye peremeny: fakty, tendentsii, prognoz* = Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast, 2008, iss. 3(3), pp. 29–31. (In Russ.).

4. Abdo W. Al-Din. *Introduction to Remote Sensing and its Applications*. University of Dammam, College of Architecture and Planning, 2014. 473 p.

5. *Arab Organization for Agricultural Development. Study of Modern Technologies Used in Developed Countries in the Field of Forest Conservation and Development*. Khar-toum, League of Arab States, 1998. 147 p.

6. Barakat A., Khellouk R., El Jazouli A., Touhami F., Nadem S. Monitoring of Forest Cover Dynamics in Eastern Area of Béni-Mellal Province Using ASTER and Sentinel-2A Multispectral Data. *Geology, Ecology and Landscapes*, 2018, vol. 2, iss. 3, pp. 203–215. <https://doi.org/10.1080/24749508.2018.1452478>

7. Du P., Samat A., Waske B., Liu S., Li Z. Random Forest and Rotation Forest for Fully Polarized SAR Image Classification Using Polarimetric and Spatial Features. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, vol. 105, pp. 38–53. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.03.002>

8. *FAO. The State of the World's Forests 2022: Forest Pathways for Green Recovery and Building Inclusive, Resilient, and Sustainable Economies*. Italy, Rome, FAO, 2022. 166 p. <https://doi.org/10.4060/cb9360en>

9. Feizizadeh B., Darabi S., Blaschke T., Lakes T. QADI as a New Method and Alternative to Kappa for Accuracy Assessment of Remote Sensing-Based Image Classification. *Sensors*, 2022, vol. 22, no. 12, art. no. 4506. <https://doi.org/10.3390/s22124506>

10. Foley J.A., DeFries R., Asner G.P., Barford C., Bonan G., Carpenter S.R., Chapin S., Coe M.T., Daily G.C., Gibbs H.K., Helkowski J.H., Holloway T., Howard E.A., Kucharik C.J., Monfreda C., Patz J.A., Prentice I.C., Ramankutty N., Snyder P.K. Global Consequences of Land Use. *Science*, 2005. vol. 309, iss. 5734, pp. 570–574. <https://doi.org/10.1126/science.1111772>

11. Gebeyehu M.N. Remote Sensing and GIS Application in Agriculture and Natural Resource Management. *International Journal of Environmental Sciences and Natural Resources*, 2019, vol. 19, iss. 2, art. no. 556009. <https://doi.org/10.19080/IJESNR.2019.19.556009>

12. Kalinaki K., Malik O.A., Lai D.T.C. FCD-AttResU-Net: An Improved Forest Change Detection in Sentinel-2 Satellite Images Using Attention Residual U-Net. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2023, vol. 122, art. no. 103453. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103453>

13. Karra K., Kontgis C., Statman-Weil Z., Mazzariello J., Mathis M., Brumby S.P. Global Land Use / Land Cover with Sentinel 2 and Deep Learning. *2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS*. Belgium, Brussels, 2021, pp. 4704–4707. <https://doi.org/10.1109/IGARSS47720.2021.9553499>

14. Kayiranga A., Kurban A., Ndayisaba F., Nahayo L., Karamage F., Ablekim A., Li H., Ilniyaz O. Monitoring Forest Cover Change and Fragmentation Using Remote Sensing and Landscape Metrics in Nyungwe-Kibira Park. *Journal of Geoscience and Environmental Protection*, 2016, vol. 4, no. 11, pp. 13–33. <https://doi.org/10.4236/gep.2016.411003>

15. Kuenzer C., Bluemel A., Gebhardt S., Quoc T.V., Dech S. Remote Sensing of Mangrove Ecosystems: A Review. *Remote Sensing*, 2011, vol. 3, no. 5, pp. 878–928. <https://doi.org/10.3390/rs3050878>

16. Kumar D. Monitoring Forest Cover Changes Using Remote Sensing and GIS: A Global Prospective. *Research Journal of Environmental Sciences*, 2011, vol. 5, iss. 2, pp. 105–123. <https://doi.org/10.3923/rjes.2011.105.123>

17. Lu D., Weng Q. A Survey of Image Classification Methods and Techniques for Improving Classification Performance. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, vol. 28, iss. 5, pp. 823–870. <https://doi.org/10.1080/01431160600746456>
18. Mangkhaseum Jr.S., Hanazawa A. Validation of Random Forest Algorithm to Monitor Land Cover Classification and Change Detection Using Remote Sensing Data in Google Earth Engine. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering: Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems*, 2022, vol. 12177, art. no. 121772L. <https://doi.org/10.1117/12.2626085>
19. Mastrosora S., Crespi M., Congedo L., Munafò M. Land Consumption Classification Using Sentinel 1 Data: A Systematic Review. *Land*, 2023, vol. 12, no. 4, art. no. 932. <https://doi.org/10.3390/land12040932>
20. Mohajane M., Essahlaoui A., Oudija F., El Hafyani M., Teodoro A.C. Mapping Forest Species in the Central Middle Atlas of Morocco (Azrou Forest) through Remote Sensing Techniques. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2017, vol. 6, no. 9, art. no. 275. <https://doi.org/10.3390/ijgi6090275>
21. Mohammad H., Al-Bilbisi H., Abu Sammour H. Detection and Analysis of Vegetation Changes Using Spectral Botanical Indicators. *Journal of Humanities and Social Sciences*, 2018, vol. 45, no. 1, pp. 83–97
22. Niemeyer J., Rottensteiner F., Soergel U. Contextual Classification of Lidar Data and Building Object Detection in Urban Areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, vol. 87, pp. 152–165. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.11.001>
23. Panigrahy R.K., Kale M.P., Dutta U., Mishra A., Banerjee B., Singh S. Forest Cover Change Detection of Western Ghats of Maharashtra Using Satellite Remote Sensing Based Visual Interpretation Technique. *Current Science*, 2010, vol. 98, no. 5, pp. 657–664.
24. Petrovska I., Dimov L. Accuracy Assessment of Unsupervised Land Cover Classification. *Scientific Journal of Civil Engineering*, 2020, vol. 9, iss. 2, pp. 83–88. <https://doi.org/10.55302/sjce2092083p>
25. Praticò S., Solano F., Di Fazio S., Modica G. Machine Learning Classification of Mediterranean Forest Habitats in Google Earth Engine Based on Seasonal Sentinel-2 Time-Series and Input Image Composition Optimization. *Remote Sensing*, 2021, vol. 13, no. 4, art. no. 586. <https://doi.org/10.3390/rs13040586>
26. Rodriguez-Galiano V.F., Ghimire B., Rogan J., Chica-Olmo M., Rigol-Sanchez J.P. An Assessment of the Effectiveness of a Random Forest Classifier for Land-Cover Classification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2012, vol. 67, pp. 93–104. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2011.11.002>
27. Turner II B.L., Lambin E.F., Reenberg A. The Emergence of Land Change Science for Global Environmental Change and Sustainability. *PNAS*, 2007, vol. 104, no. 52, pp. 20666–20671. <https://doi.org/10.1073/pnas.0704119104>
28. Vanjare A., Omkar S.N., Senthilnath J. Satellite Image Processing for Land Use and Land Cover Mapping. *International Journal of Image, Graphics and Signal Processing (IJIGSP)*, 2014, vol. 6, no. 10, pp. 18–28. <https://doi.org/10.5815/ijigsp.2014.10.03>
29. Wang Y., Chen X. The Use of Random Forest to Identify Climate and Human Interference on Vegetation NDVI Changes in Southwest China. *EGU General Assembly 2023*. Austria, Vienna, 2023, art. no. EGU23-2315. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-2315>
30. Zhou Y. Research on Forest Resource Change Detection Based on Decision Tree Algorithm. *2022 International Conference on Artificial Intelligence and Autonomous Robot Systems (AIARS)*. United Kingdom, Bristol, 2022, pp. 363–367. <https://doi.org/10.1109/AIARS57204.2022.00088>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи

Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article