

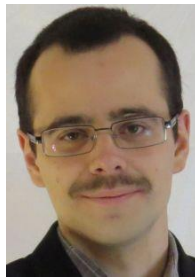
УДК 004.932.2; 004.93'14

## ОБЗОР АЛГОРИТМОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕКТОВ НА СПУТНИКОВЫХ СНИМКАХ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ



**И.И. Фролов**

кандидат технических наук,  
доцент, кафедра ЭВМ, БГУИР



**Д.Ю. Перцев**

кандидат технических наук,  
кафедра ЭВМ, БГУИР



**Д.В. Куприянова**

ассистент, кафедра  
ЭВМ, БГУИР

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь  
E-mail: frolov@bsuir.by

### **И.И. Фролов**

Окончил Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. Доцент кафедры ЭВМ БГУИР. Проводит научные исследования в области машинного обучения и компьютерного зрения, участвует в проектировании и разработке систем технического зрения.

### **Д.Ю. Перцев**

Окончил аспирантуру Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (2016), защитил диссертацию в совете 05.13.01 (2020). Является доцентом кафедры ЭВМ.

### **Д.В. Куприянова**

Окончила магистратуру Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники по специальности 1-40 02 81 «Технологии виртуализации и облачных вычислений» (2019). Поступила в аспирантуру Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (2020). Работает ассистентом и ученым секретарем на кафедре ЭВМ.

**Аннотация.** Обобщены сведения по предварительной обработке спутниковых снимков, используемые основными поставщиками данных, проведен сравнительный анализ алгоритмов определения объектов для последующего практического применения. Проанализированы достоинства и недостатки представленных подходов.

**Ключевые слова:** Спутниковые снимки, GlobCover, DSTL, DeepSat, Алгоритмы определения объектов, Классификация алгоритмов.

### **Введение.**

Системы спутникового наблюдения за поверхностью Земли нашли широкое применение в различных областях жизнедеятельности человека:

- проектирование инфраструктуры для «умных» городов (например, для оценки трафика на дорогах);
- прогноз погоды и метеонаблюдения;
- сельское хозяйство: оценка эффективности использования земель, оценка их состава.

В то же время, развитие технологий и их быстрое внедрение в практику привело к постоянно увеличивающемуся объему данных, которые необходимо анализировать и обрабатывать. Так, например, архив миссий Коперника Европейского космического агентства составляет приблизительно 8 ПБ и продолжает увеличиваться, архив Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды составляет около 180 петабайт данных о погоде и, в перспективе, ожидается увеличение до 1 петабайта в день [1].

### **Формирование и подготовка спутниковых данных.**

Основой современных систем наблюдения является применение спектрометров, которые, в зависимости от технических характеристик, фиксируют спектральное отражения в некотором

диапазоне длин волн. Например, Open Geospatial Consortium в CDB Multi-Spectral Imagery Extension [2], предлагает к сохранению длины волн, представленные в таблице 1.

Таблица 1. Спектральные каналы, представленные Open Geospatial Consortium CDB

Спектральный канал	Номинальная длина волны	Номинальная частота
NIR	0.74 – 1.0 микрометров	405 – 300 THz
SWIR1	1.5 – 1.8 микрометров	200 – 165 THz
SWIR2	2.0 – 2.5 микрометров	150 – 120 THz

В зависимости от целей применения, сформированные данные могут храниться в «сыром» виде либо подвергнуться дополнительной обработке. Например, проект GlobCover [3] в обобщенном виде включает следующие этапы предварительной обработки [4] (рисунок 1):

- геометрическая коррекция (устраняет кривизну земной поверхности, гарантирует, что пиксели / элементы изображения находятся в правильном и точном положении на поверхности земли) [5, 6];
- выявление областей, которые проще выявить, анализируя определенные спектральные каналы (например, высокую облачность, определение участков суши и водной поверхности);
- атмосферная коррекция (устраняет влияние различных газов, аэрозолей, молекул воды и др., находящихся в атмосфере, на спектральное распределение электромагнитного излучения) [7].

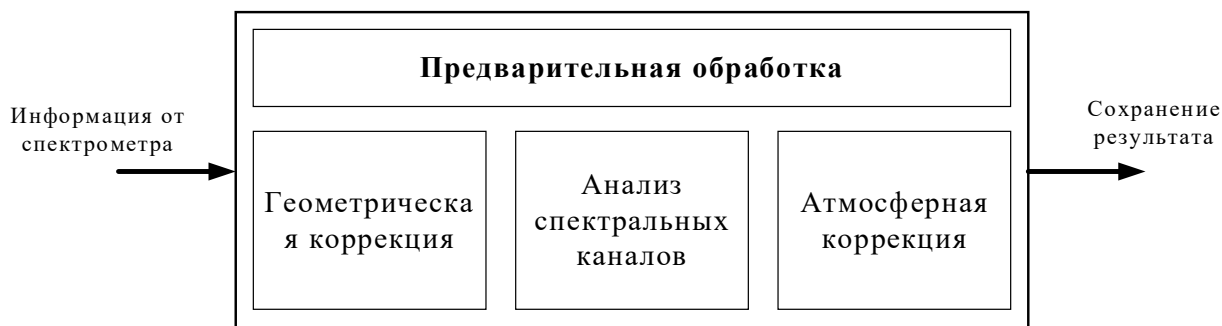


Рисунок 1. Этапы предварительной обработки спутниковых данных в проекте GlobCover

### Открытые проекты, используемые для классификации данных.

Основными провайдерами услуг, предоставляющими мультиспектральные спутниковые снимки с минимальной предварительной обработкой, являются:

- проект GlobCover [3], использующий данные, полученные с применением сенсора MERIS [8];
- проект, организованный Defence Science & Technology Laboratory в рамках компании по поиску новых подходов к классификации и анализу спутниковых снимков [9]. Для получения тестовых данных использовался сенсор WorldView 3 [10]. Однако следует учитывать, что авторы существенно сократили объем предоставляемых данных – одним панхроматическим каналом, 4 из видимого и 4 из ближнего ИК диапазонов, 8 SWIR каналов;
- проект DeepSat SAT-4, SAT-6 [11], использующий данные Национальной программы обработки изображений сельского хозяйства (NAIP) США. В рамках данного проекта авторы подготовили тестовые наборы изображений, размером 28x28 пикселей и содержащие 4 спектральных канала – красный, синий, зеленый и ближний ИК;
- проект Google Earth Engine [12] предоставляет доступ к данным, полученным с применением таких спутников, как Landsat [13], Sentinel [14] и других.

### Классификация алгоритмов определения объектов на спутниковых снимках

Несмотря на множество проектов, использующих сенсоры с различными техническими характеристиками, подходы к определению объектов в видимой части спектра сводятся к применению одного из следующих (рисунок 2) [15]:

- методы на основе сопоставления с шаблоном (англ., template matching-based methods);
- методы, основанные на знаниях (англ., knowledge-based methods);
- анализ изображений на основе объектов (англ., OBIA-based methods);
- методы на основе машинного обучения (англ., machine learning-based methods), в т.ч. методы на основе глубоких нейронных сетей (англ., deep-learning neural network methods).



Рисунок 2. Классификация алгоритмов определения объектов на спутниковых снимках

Методы на основе сопоставления с шаблоном являются одним из простейших и старых методов, включающих два шага (рисунок 3):

- создание шаблона для каждого объекта, который необходимо распознать.
- оценка схожести шаблона с изображением с учетом всех возможных аффинных преобразований. Чаще всего в качестве оценки схожести упоминаются следующие метрики: сумма абсолютных разностей (SAD), сумма квадратов разностей (SSD), нормализованная взаимная корреляция (NCC) и евклидово расстояние (ED).

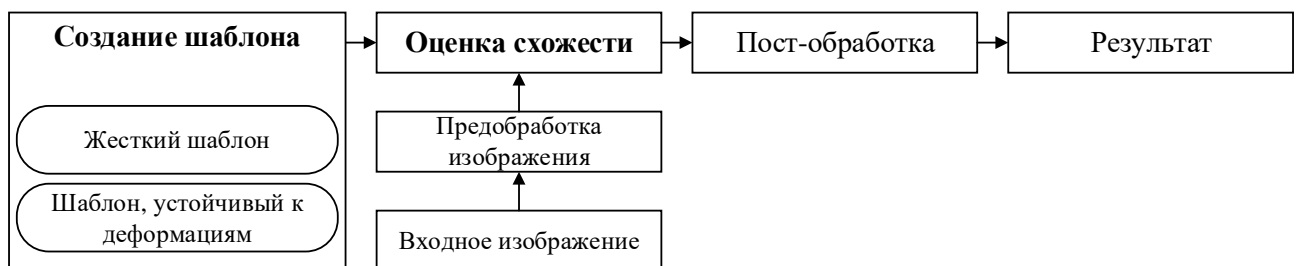


Рисунок 3. Последовательность действий в методах на основе сопоставления с шаблоном

Основные исследования в данном подходе сконцентрированы в подходах к созданию шаблона:

- сопоставление с жестким шаблоном (англ., rigid template matching), предполагающие создание шаблонов для обнаружения конкретных объектов с простым внешним видом и небольшими вариациями (например, дороги и здания) [16-18]. Основными недостатками метода являются зависимость от масштабирования, угла поворота, чувствительна к точке, откуда велась съемка;

– сопоставление с устойчивым к деформациям шаблоном (англ., deformable template matching), предполагающие создание шаблонов для обнаружения произвольных объектов со сложным внешним видом (например, самолеты, корабли и др.) [19-22]. Основными недостатками данных подходов являются необходимость наличия дополнительной информации о форме объекта, относительно высокая вычислительная сложность.

В методах определения объектов, основанных на знаниях (рисунок 4), основной сложностью является формирование знаний и правил об объекте, в соответствии с которыми в дальнейшем будет определяться, о каком объекте идет речь. В целом, анализ статей показывает 2 основных подхода к формированию знаний:

- знания о геометрической форме и радиометрических свойствах [23];
- знания о контексте (например, отбрасывание тени от высоких объектов) [24-25].

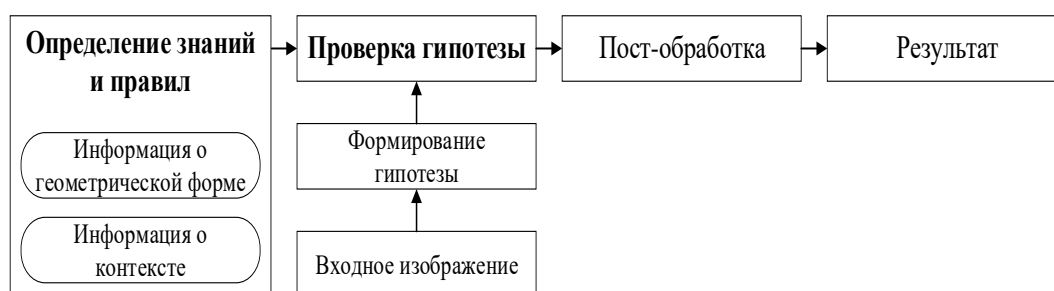


Рисунок 4. Последовательность действий в методах определения объектов, основанных на знаниях

Анализ изображений на основе объектов [26-28] – один из подходов, разработанный для преодоления ограничений подходов, основанных на анализе классических изображений, и применении знаний о спектральной, текстурной и контекстной информации (объектах). Алгоритмы, основанные на данном подходе, включают следующие этапы обработки (рисунок 5):

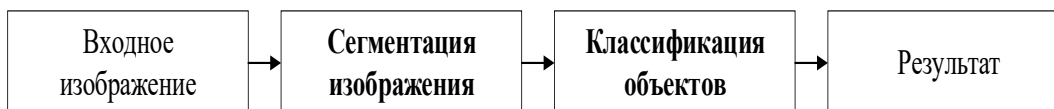


Рисунок 5. Последовательность действий в подходах, анализирующих изображение как совокупность объектов

– сегментация изображений на однородные множества, размеры которых основаны на заранее определенных параметрах, таких как компактность, форма и масштаб, полученных на основе реальных знаний об особенностях, которые нужно идентифицировать;

– классификация объектов на основе одного или нескольких статистических свойств содержащихся пикселей.

Развитие методов машинного обучения и, особенно, развитие классификаторов и способов представления признаков привело к существенному прогрессу в области детекции объектов на спутниковых снимках. Обобщенная схема работы метода представлена на рисунке 6 [29-32].

Методы на основе глубоких нейронных сетей [33-36] нашли широкое применение при обработке естественных фотографий и видеопотока и являются одними из наиболее перспективных. Однако существенной проблемой в данной области является найти качественно подготовленный достаточно большой тестовый набор для обучения глубокой нейронной сети.

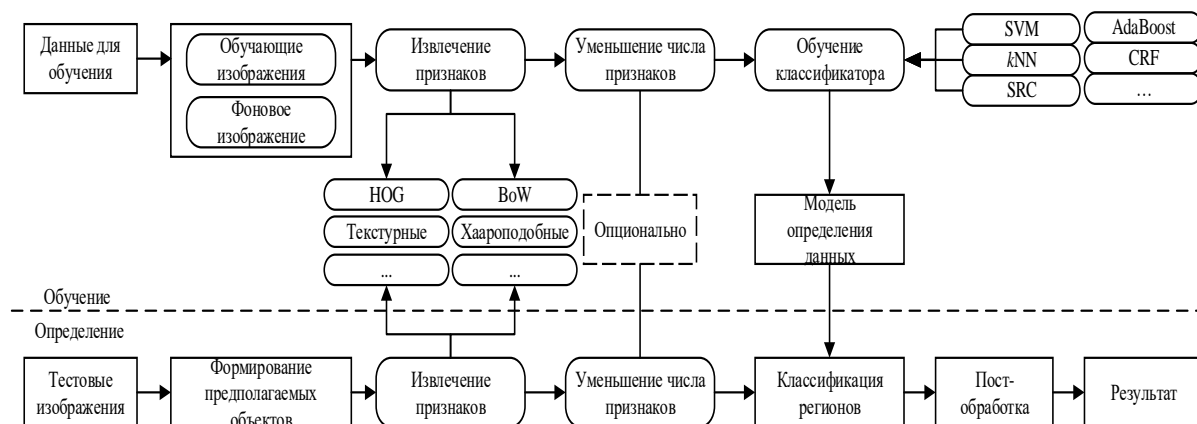


Рисунок 6. Последовательность действий в методах, основанных на машинном обучении

Применение таких традиционных тестовых данных, как Microsoft Common Objects in Context, PASCAL Visual Object Classes при обработке спутниковых снимков осложнено из-за разного угла съемки в представленных тестовых наборах и спутниковых снимках. Одним из немногих полностью подготовленных тестовых наборов, на котором планируется осуществлять дальнейшие исследования в рамках аспирантуры, является тестовый набор DIOR [37].

Таблица 2. Сравнительный анализ алгоритмов определения и классификации объектов

Подходы к определению и классификации объектов	Достоинства	Недостатки
Методы на основе сопоставления с шаблоном	- простой алгоритм при работе с жесткими шаблонами	- жесткие шаблоны чувствительны к масштабу и поворотам - шаблоны, устойчивые к деформации, вычислительно сложные, требуют дополнительной информации об объектах
Методы, основанные на знаниях	- быстрое действие определения объекта (сводится к простой проверке некоторого множества правил)	- сложно сформировать качественные правила без ложного срабатывания
Анализ изображений на основе объектов	- высокоэффективен	- отсутствует универсальное решение для полной автоматизации процесса - субъективность правил классификации
Методы на основе машинного обучения	- возможность автоматического определения модели объекта - масштабируемость - высокая точность	- зависимость результата от выборки, на которой осуществляется обучение

### Заключение.

Рассмотрены и классифицированы разные подходы к определению и классификации объектов на спутниковых снимках Земной поверхности, выявлены их достоинства и недостатки. Обобщенная информация сведена в таблицу 2, на основе которой можно сделать вывод, что подходы с применением алгоритмов машинного обучения, а также глубокие нейронные сети несмотря на некоторые недостатки по состоянию на 2021 год являются наиболее перспективными для последующего применения на практике.

### Список литературы

- [1] Skoda, P. Knowledge Discovery in Big Data from Astronomy and Earth Observation: Astrogeoinformatics / P. Skoda. – Elsevier, 2020. – 472 p.
- [2] CDB Multi-Spectral Imagery Extension [Electronic Resource] / Open Geospatial Consortium. – Mode of access: <https://docs.opengeospatial.org/is/17-080r2/17-080r2.html>. Date of access: 27.02.2021.
- [3] GlobCover [Electronic Resource] / ESA. – Mode of access: [http://due.esrin.esa.int/page\\_globcover.php](http://due.esrin.esa.int/page_globcover.php). Date of access: 27.02.2021.
- [4] GLOBCOVER 2009. Products Description and Validation Report [Electronic Resource] / ESA. – Mode of access: [http://due.esrin.esa.int/files/GLOBCOVER2009\\_Validation\\_Report\\_2.2.pdf](http://due.esrin.esa.int/files/GLOBCOVER2009_Validation_Report_2.2.pdf). Date of access: 27.02.2021.
- [5] Chintan P. Dave. A Survey on Geometric Correction of Satellite Imagery / Chintan P. Dave, Rahul Joshi, S. S. Srivastava // International Journal of Computer Applications. – 2015. – Volume 116. – Number 12. – P. 24-27. DOI: 10.5120/20389-2655.
- [6] Geometric correction [Electronic Resource] / STARS Project. – Mode of access: <https://www.stars-project.org/en/knowledgeportal/magazine/image-analysis/automated-image-processing-workflow/geometric-correction>. Date of access: 27.02.2021.
- [7] Atmospheric correction [Electronic Resource] / STARS Project. – Mode of access: <https://www.stars-project.org/en/knowledgeportal/magazine/image-analysis/automated-image-processing-workflow/atmospheric-correction>. Date of access: 27.02.2021.
- [8] MERIS [Electronic Resource] / ESA. – Mode of access: <https://earth.esa.int/web/sppa/mission-performance/esa-missions/envisat/meris/sensor-description>. Date of access: 27.02.2021.
- [9] Dstl Satellite Imagery Feature Detection [Electronic Resource] / Kaggle. – Mode of access: <https://www.kaggle.com/c/dstl-satellite-imagery-feature-detection/overview>. Date of access: 27.02.2021.
- [10] WorldView-3 [Electronic Resource] / DigitalGlobe. – Mode of access: <http://content.satimagingcorp.com.s3.amazonaws.com/media/pdf/WorldView-3-PDF-Download.pdf>. Date of access: 27.02.2021.
- [11] SAT-4 and SAT-6 airborne datasets [Electronic Resource] / Louisiana State University. – Mode of access: <http://csc.lsu.edu/~saikat/deepsat>. Date of access: 27.02.2021.
- [12] Google Earth Engine [Electronic Resource] / Google. – Mode of access: <https://earthengine.google.com>. Date of access: 27.02.2021.
- [13] Landsat Missions [Electronic Resource] / U.S. Geological Survey. – Mode of access: <https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat>. Date of access: 27.02.2021.
- [14] Sentinel Online [Electronic Resource] / ESA. – Mode of access: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/home>. Date of access: 27.02.2021.
- [15] Cheng, G. A survey on object detection in optical remote sensing images / G. Cheng, Junwei Han // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2016. – Volume 117. – P.11-28.
- [16] Stankov, K. Detection of Buildings in Multispectral Very High Spatial Resolution Images Using the Percentage Occupancy Hit-or-Miss Transform / K. Stankov, Dong-Chen He // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2014. – Volume 7. – Issue 10. – P. 4069 - 4080. DOI: 10.1109/JSTARS.2014.2308301.
- [17] Weber, J. Spatial and spectral morphological template matching / J. Weber, S. Lefèvre // Image and Vision Computing. – 2012. – Volume 30. – Issue 12. – P. 934-945.
- [18] Chaudhuri, D. Semi-Automated Road Detection From High Resolution Satellite Images by Directional Morphological Enhancement and Segmentation Techniques / Chaudhuri D., Kushwaha N., Samal A. // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. – 2012. – Volume 5. – Issue 5. – P. 1538-1544.
- [19] Lin, Y. Rotation-invariant object detection in remote sensing images based on radial-gradient angle / Lin, Y., He, H., Yin, Z., Chen, F. // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. – 2015. – Volume 12. – Issue 4. – P. 746-750.
- [20] Liu, G. Interactive geospatial object extraction in high resolution remote sensing images using shape-based global minimization active contour model / Liu, G., Sun, X., Fu, K., Wang, H. // Pattern Recognition Letters. – 2013. – Volume 34. – Issue 10. – P.1186-1195.
- [21] Tao, C. Airport detection from large IKONOS images using clustered SIFT keypoints and region information / Tao, C., Tan, Y., Cai, H., Tian, J. // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. – 2011. – Volume 8. – Issue 1. – P.128-132.
- [22] Leninisha, S. Water flow based geometric active deformable model for road network / Leninisha, S., Vani, K. // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2015. – Volume 102. – P.140-147.
- [23] Weidner, U. Towards automatic building extraction from high-resolution digital elevation models / Weidner,

- U., Förstner, W. // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 1995. – Volume 50. – Issue 4. – P.38-49.
- [24] Ok, A.O. Automated detection of arbitrarily shaped buildings in complex environments from monocular VHR optical satellite imagery / Ok, A.O., Senaras, C., Yuksel, B. // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2013. – Volume 51. – Issue 3. – P.1701-1717.
- [25] Akçay, H.G. Building detection using directional spatial constraints / Akçay, H.G., Aksoy, S. // IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. – 2010. – P.1932-1935.
- [26] Contreras, D. Monitoring recovery after earthquakes through the integration of remote sensing, GIS, and ground observations: the case of L'Aquila (Italy) / Contreras, D., Blaschke, T., Tiede, D., Jilge, M. // Cartography and Geographic Information Science. – 2016. – Volume 43. – Issue 2. – P.115-133.
- [27] Hussain, M. Change detection from remotely sensed images: From pixel-based to object-based approaches / Hussain, M., Chen, D., Cheng, A., Wei, H., Stanley, D. // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2013. – Volume 80. – P.91-106.
- [28] Li, X. Identification of forested landslides using LiDAR data, object-based image analysis, and machine learning algorithms / Li, X., Cheng, X., Chen, W., Chen, G., Liu, S. // Remote Sensing. – Volume 7. – Issue 8. – P.9705-9726.
- [29] Liu, L. Airplane detection based on rotation invariant and sparse coding in remote sensing images / Liu, L., Shi, Z. // Optik. – 2014. – Volume 125. – Issue 18. – P.5327-5333.
- [30] Li, E. Robust Rooftop Extraction From Visible Band Images Using Higher Order CRF / Li, E., Femiani, J., Xu, S., Zhang, X., Wonka, P. // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2015. – Volume 53, Issue 8. – P.4483-4495.
- [31] Yao, X. A coarse-to-fine model for airport detection from remote sensing images using target-oriented visual saliency and CRF / Yao, X., Han, J., Guo, L., Bu, S., Liu, Z. // Neurocomputing. – 2015. – Volume 164. – P.162-172.
- [32] Zhang, W. A generic discriminative part-based model for geospatial object detection in optical remote sensing images / Zhang, W., Sun, X., Wang, H., Fu, K. // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2015. – Volume 99. – P.30-44.
- [33] Cheng, G. Learning Rotation-Invariant and Fisher Discriminative Convolutional Neural Networks for Object Detection / Cheng, G., Han, J., Zhou, P., Xu, D. // IEEE Transactions on Image Processing. – 2019. – Volume 28. – Issue 1. – P.265-278.
- [34] Li, K. Rotation-Insensitive and Context-Augmented Object Detection in Remote Sensing Images / Li, K., Cheng, G., Bu, S., You, X. // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2018. – Volume 56. – Issue 4. – P.2337-2348.
- [35] Long, Y. Accurate Object Localization in Remote Sensing Images Based on Convolutional Neural Networks / Long, Y., Gong, Y., Xiao, Z., Liu, Q. // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2017. – Volume 55. – Issue 5. – P.2486-2498.
- [36] Tang, T. Vehicle Detection in Aerial Images Based on Region Convolutional Neural Networks and Hard Negative Example Mining / Tang, T., Zhou, S., Deng, Z., Zou, H., Lei, L. // Sensors. – Volume 17. – Issue 2. – P.336.
- [37] Li, K. Object detection in optical remote sensing images: A survey and a new benchmark / K.Li, [et. al.] // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2020. – Volume 159. – P.296-307.

## **REVIEW OF ALGORITHMS FOR OBJECT DETECTION ON SATELLITE IMAGES OF THE EARTH**

**I. FROLOV**

*PhD, Computer Science  
Department, BSUIR*

**D. PERTSAU**

*PhD, Computer Science  
Department, BSUIR*

**D. KUPRYIANAVA**

*Assistant, Computer Science  
Department, BSUIR*

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Republic of Belarus*

*E-mail: frolov@bsuir.by*

**Abstract.** Information about satellite images pre-processing were generalized. In addition, we introduced a comparative analysis of object detection algorithms used for subsequent practical application. The advantages and disadvantages of the presented approaches are analyzed.

**Keywords:** Satellite images, GlobCover, DSTL, DeepSat, Algorithms for object detection, Classification of object detection algorithms.