

## АНОТАЦІЯ

Лавренюк М. С. Моделі та методи глибинного навчання для задач геопросторового аналізу. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 11 Математика та статистика за спеціальністю 113 Прикладна математика. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2020.

Розвиток науки та її застосування в багатьох практичних галузях базуються на використанні штучного інтелекту. Основними його напрямками є інженерія даних, комп'ютерний аналіз, нечітка логіка, машинне сприйняття, видобуток знань та інші. Методологічну основу методів штучного інтелекту складають математичні методи та інтелектуальні моделі, які знаходяться в постійному розвитку. Особливо активно розвиваються математичні моделі та методи, які базуються на великій кількості даних та інкорпорують їх за допомогою методів глибинного навчання. Серед найважливіших практичних застосувань, в яких активно використовуються методи штучного інтелекту, оснований на глибинному навчанні з використанням великих об'ємів даних, є дослідження сейсмічної активності Землі, екологічний моніторинг навколишнього середовища, виявлення аномальних даних в кібернетичній безпеці, аналіз геопросторових даних та інші.

Одним з важливих аспектів, що зумовили можливість такого розвитку математичних методів глибинного навчання є поява великих об'ємів доступних даних та обчислюваних потужностей. В зв'язку з цим останні роки швидкими темпами розвивається сфера аналізу багатовимірних зашумлених даних великого об'єму. Разом з тим для задачі аналізу багатовимірних зашумлених даних великого об'єму використання методів глибинного навчання в тому вигляді, в якому вони були розроблені для інших загальновідомих задач, неможливе. Наявні публікації та експерименти з використання глибинного

навчання в цій сфері проводились лише для невеликого об'єму даних з рівномірним розподілом у вхідному просторі, що є лише частковим випадком, який неможливо поширити на дані великого об'єму з не рівномірним розподілом у вхідному просторі. Не зважаючи на велику схожість математичної постановки задачі аналізу багатовимірних зашумлених даних та постановок задач для традиційного комп'ютерного аналізу та машинного сприйняття, існують і принципові відмінності між ними.

Найбільш значні та успішні результати в області штучного інтелекту з глибинним навчанням були отримані в роботах закордонних авторів Куніхіко Фукусіми, Яна Лекуна, Йошуа Бенджіо та Джеффри Хінтона, а також в роботах українських авторів О.Г. Івахненка, М.З. Згуровського, І.В. Сергієнка, Н.Д. Панкратової, О.А. Павлова, Н.М. Куусуль та інших. Разом з тим прогрес потужності обчислювальної техніки та поява у вільному доступі великої кількості багатовимірних даних робить актуальним задачу розробки математичних методів та моделей штучного інтелекту з глибинним навчанням для аналізу багатовимірних зашумлених даних великого об'єму в задачах геопросторового аналізу та екологічного моніторингу.

**Метою** дисертаційного дослідження є розробка та вдосконалення математичних методів глибинного навчання, які базуються на згорткових глибинних нейронних мережах та відрізняються ініціалізацією початкових ваг мереж при використанні немаркованих даних на основі розрідженого кодування, що веде до підвищення точності задач геопросторового аналізу.

В дисертації вперше отримані такі нові наукові результати:

1. **Вперше** розроблено математичний метод уніфікації подання багатовимірних зашумлених геопросторових даних, оснований на розрідженому кодуванні вхідних немаркованих даних, який надає можливість побудови єдиної моделі класифікації для великих об'ємів вхідних даних, що дозволяє отримати вищу точність класифікації.
2. **Удосконалено** метод глибинного навчання на основі згорткових нейронних мереж, що на відміну від існуючих, ініціалізують початкові

ваги не випадковими значеннями, а навчаються виокремлювати ознаки з великих обсягів немаркованих часових рядів багатовимірних даних та забезпечують суттєве підвищення загальної точності задач класифікації.

3. **Вперше** розроблено метод фільтрації отриманих карт класифікацій геопросторових даних для збільшення їх точності, на основі об'єктного підходу, на відміну від загальноприйнятих методів, що базуються на принципі ковзного вікна, який дозволяє зберегти форму об'єктів на карті.
4. **Отримали подальший розвиток** запропоновані методи класифікації багатовимірних зашумлених геопросторових даних шляхом реалізації у вигляді потоку виконання з використанням хмарної платформи Amazon, що дозволило зменшити час обробки інформації за рахунок ефективного доступу до даних та розпаралелювання.

Практична цінність дисертаційної роботи полягає в тому, що: розроблені та вдосконалені математичні методи штучного інтелекту з глибинним навчанням для аналізу багатовимірних зашумлених геопросторових даних реалізовано у формі потоку виконання на хмарній платформі Amazon. Запропоновані методи використано при виконанні науково-дослідної роботи 2933-ф «Моделі та методи кібернетичного захисту інформаційних систем на основі інтелектуального аналізу даних і машинного навчання» (№ держреєстрації 0116U604874) Фізико-технічного інституту НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського» та в рамках спільного проекту МОН-НАНУ «Моделі та методи глибинного навчання для задач геопросторового аналізу в інтересах сільського господарства» (№ держреєстрації 0117U007234) для побудови карт земного покриву на основі оптичних та радарних геопросторових даних. Розроблені математичні методи використані при виконанні міжнародного проекту Європейського космічного агентства «Демонстрація можливостей Sentinel-2 для потреб сільського господарства» (№ держреєстрації 0116U001987) та проекту «Побудова карт класифікації сільськогосподарських

культур для території України на основі злиття радарних та оптичних даних» при виконанні гранту Google Earth Engine Research Awards корпорації Google. Результати роботи впроваджені в ТОВ ЕОС ДАТА АНАЛІТИКС Україна при виконанні програми Світового банку за фінансової підтримки ЄС TF072938 «Підтримка прозорого управління земельними ресурсами в Україні».

У дисертаційній роботі проаналізовано математичні методи штучного інтелекту для класифікації багатовимірних геопросторових зашумлених даних великого об'єму. Приведено загальну схему для традиційного процесу класифікації візуальної інформації. Показано, що традиційні методи класифікації, які базуються на математичних методах машинного навчання неглибокої архітектури, потребують експертних знань для виділення ознак і таким чином результат класифікації та її точність значною мірою залежать від якості виокремлених експертом ознак. Натомість, методи глибинного навчання здійснюють автоматичне виокремлення ознак з вхідних даних та перевершують в термінах загальної точності традиційні методи машинного навчання з неглибокою архітектурою в задачах аналізу геопросторових даних – ідентифікації доріг, будинків та класифікації типів земного покриття. Детально розглянуті існуючі математичні методи постобробки для карт класифікації. Описано математичні методи, які використовуються для оцінки точності методів машинного навчання.

Показано, що в попередніх дослідженнях всі застосування методів машинного навчання для задачі класифікації багатовимірних даних великого об'єму здійснювались лише за умови, що розподіл даних у вхідному просторі – рівномірний. Проте для великих обсягів даних забезпечення даної умови може бути здійснене лише виключенням з аналізу великої кількості доступних даних, які не задовольняють дану умову, що призводить до зниження точності вихідної карти класифікації та суперечить принципу глибинного навчання – використовувати всі доступні дані.

Для розв'язання вищенаведених проблем у дисертаційній роботі запропоновано ієрархічну декомпозицію задачі класифікації геопросторових

багатовимірних зашумлених даних великого об'єму на окремі більш прості задачі: задачу уніфікації подання вхідних багатовимірних даних, задачу адаптації методів глибинного навчання (нейронних мереж) для роботи з часовими рядами багатовимірних зашумлених даних великого об'єму та задачу фільтрації отриманих карт класифікацій для зменшення шуму на них та збільшення їх точності. Описано математичну постановку кожної з задач, що розглянуті в дисертаційній роботі, та проаналізовано її відмінності від існуючих математичних моделей.

В дисертаційній роботі отримано ряд нових наукових результатів, серед яких **вперше** запропоновано математичний метод для інтелектуальної обробки геопросторової інформації, а саме класифікації багатовимірних зашумлених даних великого об'єму. Запропонований метод, на відміну від розв'язання задачі класифікації за допомогою використання методів машинного навчання з вчителем, складається з двох частин. Перша частина базується на автоматичному виділенні ознак з величезної кількості немаркованих даних на основі навчання без вчителя за допомогою розрідженого кодування. Друга частина складається з донавчання повної нейронної мережі з використанням маркованих даних за допомогою методів навчання з вчителем. На основі запропонованого підходу розроблено метод уніфікації подання геопросторових багатовимірних зашумлених даних великого об'єму у вхідному просторі. Це дозволило використовувати інформацію з усіх наявних даних, не зменшуючи її інформативності, без виділення ознак експертом з даних великого об'єму, що мають нерівномірний розподіл у вхідному просторі. За результатами проведеного дослідження ефективності уніфікації подання вхідних даних та ієрархічного підходу до класифікації багатовимірних даних великого об'єму встановлено, що запропонований підхід вперше дозволив отримувати класифікацію багатовимірних зашумлених геопросторових даних великого об'єму за досліджуваний рік, маючи навчальні дані лише за попередній рік, загальна точність якої вище 85%.

**Вдосконалено** ансамблевий метод глибинного навчання на основі

нейронних мереж прямого поширення та ансамблевий метод класифікації на основі одновимірних і двовимірних згорткових нейронних мереж шляхом ініціалізації початкових ваг за допомогою виокремлення ознак з великих обсягів доступних немаркованих часових рядів багатовимірних зашумлених даних. Запропоновано системний підхід до структурної та параметричної ідентифікації класифікаторів неглибокої архітектури для класифікації багатовимірних зашумлених даних великого об'єму. Продемонстровано перевагу ансамблю нейронних мереж прямого поширення над методами random forest та SVM в задачі класифікації багатовимірних зашумлених даних для території Англії, та перевагу над всіма доступними в Google Earth Engine методами класифікації для території Київської області. Також порівняльний аналіз ефективності використання запропонованого методу та інших методів, що були надані науковими установами з різних країн, засвідчив перевагу даного методу для чотирьох з п'яти досліджуваних територій: Бразилії, Аргентини, Росії та України. Продемонстровано, що запропонований підхід на основі ансамблю згорткових нейронних мереж в термінах загальної точності перевершив random forest та ансамбль багатосарових перцептронів на 5.9% та на 1.9%, відповідно.

**Вперше** розроблено математичний об'єктний метод фільтрації для карти класифікації багатовимірних зашумлених геопросторових даних для зменшення наявного на ній шуму та збільшення загальної її точності. Даний метод відрізняється від відомих до цього підходів, що базувались на пошуку згорткового перетворення, за рахунок використання більш складного математичного перетворення, що враховує семантику карти класифікації на основі об'єктного підходу, комбінації логічних і морфологічних операцій, а не лише локальні ознаки. Застосовано розроблений метод до фільтрації карти класифікації багатовимірних зашумлених даних для території Київської області за 2017 рік. За отриманими результатами встановлено, що запропонований метод дозволяє отримати загальну точність на 0.6% вище порівняно з загальноприйнятими методами фільтрації шуму та дозволяє зберегти форми

об'єктів і меж між ними. Розроблено математичний метод постобробки для карти класифікації багатовимірних зашумлених при наявності векторних полігонів.

У роботі **отримали подальший розвиток** запропоновані методи класифікації багатовимірних зашумлених геопросторових даних шляхом реалізації у вигляді потоку виконання з використанням хмарної платформи Amazon. Розроблено та реалізовано процедуру доступу до досліджуваної території на кожному з файлів для ефективної роботи з часовими рядами геопросторових даних.

На основі розроблених методів та моделей глибинного навчання проведено побудову карт класифікацій типів земного покриву високого розрізнення для території України за 2016 – 2018 роки та для території Англії за 2016 та 2017 роки. В результаті, для областей України досліджено зв'язок між індексом сталого розвитку і площею оброблювальних земель та між ступенем гармонізації і площею оброблювальних земель. Встановлено можливість використання розроблених методів глибинного навчання для оцінки та моделювання ступеня гармонізації для областей України.

За матеріалами дисертації **опубліковано** 63 роботи, з яких 21 – це статті у журналах і збірниках наукових праць, що входять до переліку фахових видань затверджених МОН України за спеціальністю дисертації або у періодичних виданнях іноземних держав (3 з них без співавторів, а 12 включені до міжнародної наукометричної бази SCOPUS), та 42 – публікації у матеріалах конференцій (у тому числі, міжнародних), загальна кількість цитувань в SCOPUS – 628, SCOPUS h-index рівний 11, кількість цитувань в google scholar – 1216, та google scholar h-index рівний 14.

**Ключові слова:** математичні методи машинного навчання, глибинне навчання, класифікація, нейронна мережа, розріджене кодування, виділення ознак з немаркованих даних, фільтрація, геопросторові дані.

## SUMMARY

Lavreniuk M. Deep learning models and methods for geospatial analysis tasks. – Qualifying scientific work, the manuscript.

PhD thesis in the field of knowledge 11 Mathematics and Statistics in specialty 113 Applied mathematics. – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 2020.

The development of science and its application in many practical fields are based on the artificial intelligence usage. Data engineering, computer analysis, fuzzy logic, machine perception, data mining and other are its main areas of interest. The methodological basis of the artificial intelligence methods are mathematical methods and intellectual models that are in constant development. Mathematical models and methods that are based on a large amount of data and incorporate them through deep learning methods are particularly active develop. Among the most important practical applications that use artificial intelligence based on deep learning using large amounts of data are studies of Earth's seismic activity, environmental monitoring, anomaly detection in cybersecurity, geospatial data analysis, and more.

One of the important aspects that has led to the mathematical deep learning methods development is the emergence of large volumes of available data and the computational power. Due to this, the field of big volume of multidimensional noise data analysis has been rapidly evolving in recent years. However, usage of the deep learning methods as they were designed for other well-known tasks is impossible for the task of big volume of multidimensional noise data analysis. Available publications and experiments on the deep learning usage in this field were conducted only for a small amount of data with uniform distribution in the input space, which is only a partial case that cannot be extended to the large volume of data with uneven distribution in the input space. Despite the great similarity between the mathematical formulation of the multidimensional noisy data analysis task and the formulation for traditional computer analysis and machine perception tasks, there are fundamental



differences between them.

The most significant and successful results in the field of artificial intelligence with deep learning were obtained in the works of foreign authors Kuniyuki Fukushima, Yann LeCun, Yoshua Bengio and Geoffrey Hinton, as well as in the works of Ukrainian authors O.G. Ivakhnenko, M.S. Zgurovsky, I.V. Sergienko, N.D. Pankratova, O.A. Pavlov, N.M. Kussul and others. However, the progress in computational resources and the emergence of the free accessed large volumes of multidimensional data make it actual to develop mathematical methods and models of artificial intelligence with deep learning to analyze large volumes of multidimensional noisy data in geospatial analysis and environmental monitoring.

**The aim** of the thesis is to develop and improve mathematical methods of deep learning, which are based on convolutional deep neural networks and differ in the initialization of the initial weights of networks with unlabeled data utilization based on sparse coding, which leads to improving accuracy in geospatial analysis tasks.

In the dissertation the following new scientific results were first received:

1. **For the first time** a mathematical method for unifying multidimensional noisy geospatial data has been developed based on the sparse input unlabeled data encoding that provides the possibility to build a single classification model for large volumes of input data, that allows to obtain higher classification accuracy.

2. Deep learning method based on convolutional neural networks **has been improved**, which, unlike the existing ones, not randomly initialize initial weights, but learn features extraction from the large volumes of unlabeled multidimensional noisy time series of data and provide significant enhancements of the overall classification accuracy.

3. **For the first time** filtration method for obtained classification maps of geospatial data has been developed for increasing their accuracy, based on object approach, in contrast to commonly accepted methods based on the sliding window principle, that allows to save the shape of objects on the map.

4. Proposed methods for noisy multidimensional geospatial data classifying **have had further development** through the implementation as a workflow using

Amazon cloud based platform, which reduced data processing time through efficient data access and parallelization.

The practical significance of thesis results is the developed and improved mathematical artificial intelligence methods with deep learning for the multidimensional noisy geospatial data analysis which are implemented as a workflow on the Amazon cloud platform. Proposed methods have been used within the scientific-research work 2933-f "Models and methods for information systems cybernetic protection based on the intelligent data analysis and machine learning" (state registration №0116U604874) Institute of Physics and Technology of National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" and in the framework of the joint project of the Ministry of Education and Science and the National Academy of Sciences of Ukraine "Deep learning models and methods for geospatial analysis tasks in the interests of agriculture" (state registration №0117U007234) for the land cover mapping based on optical and radar geospatial data. The developed mathematical methods have been used within the international project of the European Space Agency "Demonstration of the Sentinel-2 possibilities for the agriculture needs" (state registration №0116U001987) and within the project "Large scale crop mapping in Ukraine using SAR and optical data fusion" within the Google Earth Engine Research Awards grant from the Google corporation. The results of the work were implemented in the EOS DATA ANALYTICS Ukraine in the World Bank program supported by the EU TF072938 "Supporting transparent land governance in Ukraine".

In the thesis mathematic artificial intelligence methods for large volume of geospatial multidimensional noisy data classification have been analyzed. The general scheme is given for the traditional accepted visual information classification process. It was shown that traditional mathematical classification methods, which are based on the shallow architecture machine learning methods, require expert knowledge for the feature extraction, and thus the result of the classification and its accuracy highly depend on the quality of the extracted by expert features. Instead of that mathematical deep learning methods automatically extract features from the

input data and outperform in the terms of overall accuracy the traditional shallow architecture machine learning methods in the geospatial data analysis tasks – identification of roads, houses and land cover mapping. Existing mathematical post-processing methods for classification maps were considered in details. Mathematical approaches which used for machine learning methods accuracy assessment were described.

It is shown that in the previous researches all the applications of machine learning methods for the large volume of multidimensional data classification task were carried out only on condition that the data distribution in the input space is uniform. However, for the large volume of data, the providing of this condition can only be done by excluding from analysis a large amount of available data that does not satisfy this condition, which results in decreasing of the output classification map accuracy and contradicts the deep learning principle – to use all available data.

To solve the aforementioned problems hierarchical decomposition of the large volume of geospatial multidimensional noisy data classification task on several more simple tasks is proposed in the thesis: the task of multidimensional input data representation unification, the task of a deep learning methods (neural networks) adaptation for working with time series of large volume of multidimensional noisy data and the task of received classification maps filtration for noise reduction and increasing their accuracy. The mathematical formulation for each of the tasks considered in the thesis, and its differences from the existing mathematical models is analyzed and described.

A number of new scientific results were obtained in the thesis, among which **for the first time** the mathematical method is proposed for intelligent geospatial information processing, namely large volume of multidimensional noisy data classification. Proposed method, unlike the solution of the classification task by using the supervised machine learning methods, consists of two parts. The first one is based on the automatic feature extraction from a huge number of unlabeled data based on unsupervised learning using a sparse coding. Second one constitutes a complete neural network fine tuning using labeled data based on the supervised methods. On

the basis of proposed approach, the method of the input large volume of geospatial multidimensional noisy data representation unification was developed taking into account day of the year in which study area sensing was carried out. This allowed to use the information from all available data, without decreasing its informativity, without feature extraction from the large volume of data by expert, that has unevenly distribution in input space. According to the results of the study of the input data representation unification efficiency and the hierarchical approach to the large volume of multidimensional data classification, it has been established that the proposed approach for the first time allowed to obtain a classification of large volume of multidimensional noisy geospatial data for the investigated year using the training data for previous year only, the accuracy of which is above 85%.

The ensemble deep learning method based on feedforward neural networks and the ensemble method for classification based on one-dimensional and two-dimensional convolutional neural networks **have been improved** by initializing the initial weights using feature extraction from the large volume of available unlabeled multidimensional noisy data time series. A system approach to shallow architectural classifiers structural and parametric identification is proposed for the large volume of multidimensional noisy data classification. The advantage of the feedforward neural networks ensemble has been demonstrated over the random forest and SVM methods in the multidimensional noisy data classification for the territory of England, and the advantage over all the methods available for classification in the Google Earth Engine for the territory of the Kyiv region. Also, a comparative analysis of the proposed method and other methods, provided by academic institutions from different countries, effectiveness has shown the advantage of this method for four of the five study areas: Brazil, Argentina, Russia and Ukraine. It was demonstrated that the proposed approach based on the ensemble of convolutional neural networks outperformed in terms of overall accuracy random forest and ensemble of multilayer perceptron on 5.9% and on 1.9%, respectively.

**For the first time** a mathematical object method for multidimensional noisy geospatial data classification map filtration has been developed to reduce the existing

on it noise and increase its overall accuracy. This method differs from the known approaches, that were based on the search for convolutional transformation, due to the use of a more complex mathematical transformation that takes into account the semantics of the classification map based on the object approach, combination logical and morphological operations, and not just local features. The developed method for the multidimensional noisy data classification maps filtration has been applied for the territory of Kyiv region for 2017. Based on the obtained results, it is established that the proposed method allows to receive an overall accuracy of 0.6% higher compared to the generally accepted methods of noise filtering and allows to preserve the shape of objects and the boundaries between them. The mathematical post-processing method for the multidimensional noisy data classification map is developed when the vector polygons are available.

In the thesis proposed methods for noisy multidimensional geospatial data classifying **have had further development** through the implementation as a workflow using Amazon cloud based platform. The procedure for study area access on each of the files was developed and implemented for effective work with time series of geospatial data.

High resolution land cover maps for the territory of Ukraine for 2016-2018 and for the territory of England for 2016 and 2017 years have been constructed based on the developed deep learning methods and models. As a result, it was investigated the connection between the sustainable development index and the area of cultivated land, and between the degree of harmonization and the area of cultivated land for the Ukraine regions. The possibility of using developed deep learning methods for the assessment and modeling of the degree of harmonization for the Ukraine regions has been established.

According to the thesis materials, 63 papers **were published**, 21 of which were articles in journals and scientific paper collections included in the list of professional editions that approved by MES of Ukraine in the specialty of the dissertation or in foreign countries periodicals (3 of them without co-authors and 12 included in the international scientific metric database SCOPUS), and 42 – publications in

conference proceedings (including international ones), the total number of citations in SCOPUS – 628, SCOPUS h-index equals 11, the number of citations in google scholar – 1216, and google scholar h-index equals 14.

**Key words:** mathematical machine learning methods, deep learning, classification, neural network, sparse coding, feature extraction from unlabeled data, filtration, geospatial data.

List of main publications of the applicant:

1. Лавренюк, М. С. "Метод об'єктної фільтрації карт класифікації земного покриву на основі морфологічних ознак." Індуктивне моделювання складних систем, 9 (2017): 138-148.

2. Лавренюк, М. С. "Метод детектування меж на карті класифікації на основі модифікованого алгоритму Собеля." Радіоелектронні і комп'ютерні системи, 84.4 (2017): 17-27.

3. Лавренюк, М. С. "Метод об'єктної постобробки карт класифікації з урахуванням специфіки кожного класу." Авиационно-космическая техника и технология, 145.1 (2018): 80-91.

4. Лавренюк, М. С., Новіков О. М. "Огляд методів машинного навчання для класифікації великих обсягів супутникових даних." Системні дослідження та інформаційні технології 1 (2018): 52-71.

Здобувачем проведено аналіз існуючих сучасних методів машинного навчання, проаналізовано особливості та результати їх застосування для класифікації типів земного покриву за геопросторовими даними та визначено основні переваги методів глибинного навчання над традиційними підходами.

5. Скакун, С. В., et al. "Класифікація сільськогосподарських посівів з використанням часових рядів супутникових даних." Індуктивне моделювання складних систем 6 (2014): 157-166.

Здобувачем запропоновано застосування ансамблю нейронних мереж прямого поширення для задачі класифікації оптичних геопросторових даних високого розрізнення для території Київської області.

6. Lukin, Vladimir, et al. "Despeckling of Multitemporal Sentinel SAR Images

and Its Impact on Agricultural Area Classification." *Recent Advances and Applications in Remote Sensing*. IntechOpen, (2018): 21-40.

Здобувачем запропоновано застосування ансамблю нейронних мереж прямого поширення для задачі класифікації радарних геопросторових даних.

7. Skakun, Sergii, et al. "Efficiency assessment of multitemporal C-band Radarsat-2 intensity and Landsat-8 surface reflectance satellite imagery for crop classification in Ukraine." *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 9.8 (2016): 3712-3719. (Scopus)

Здобувачем запропоновано застосування ансамблю нейронних мереж прямого поширення для задачі класифікації оптичних та радарних геопросторових даних високого розрізнення для території Київської області.

8. Kussul, Nataliia, et al. "Deep Learning Classification of Land Cover and Crop Types Using Remote Sensing Data." *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 14.5 (2017): 778-782. (Scopus)

Здобувачем запропоновано застосування методу глибинного навчання на основі ансамблю згорткових нейронних мереж для задачі класифікації геопросторових даних високого розрізнення для території Київської області.

9. Shelestov, Andrii, et al. "Exploring Google Earth Engine Platform for Big Data Processing: Classification of Multi-Temporal Satellite Imagery for Crop Mapping." *Frontiers in Earth Science* 5.17 (2017): 1-10. (Scopus)

Здобувачем проведено порівняння запропонованого методу на основі нейронних мереж прямого поширення та методів машинного навчання, що реалізовані в хмарній платформі Google Earth Engine, для Київської області.

10. Lavreniuk, M. S., et al. "Large-scale classification of land cover using retrospective satellite data." *Cybernetics and Systems Analysis* 52.1 (2016): 127-138. (Scopus)

Здобувачем проведено експериментальне дослідження використання методу класифікації на основі ансамблю нейронних мереж прямого поширення для задачі класифікації типів земного покриття для території України.

11. Waldner, François, et al. "Towards a set of agrosystem-specific cropland

mapping methods to address the global cropland diversity." *International Journal of Remote Sensing* 37.14 (2016): 3196-3231. (Scopus)

Здобувачем проведено експериментальне порівняння запропонованого методу класифікації на основі ансамблю нейронних мереж прямого поширення для задачі побудови маски сільськогосподарських земель та методів машинного навчання, що були розроблені в інших наукових установах.

12. Manakos, Ioannis, et al. "Comparison of Global and Continental Land Cover Products for Selected Study Areas in South Central and Eastern European Region." *Remote Sensing* 10.12 (2018): 1-21. (Scopus)

Здобувачем досліджено різні методи валідації карт класифікації типів земного покриву.

13. Waldner, François, et al. "Roadside collection of training data for cropland mapping is viable when environmental and management gradients are surveyed." *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 80 (2019): 82-93. (Scopus)

Здобувачем досліджено залежність точності карти класифікації від вибору методу збору навчальних даних.

14. Waldner, François, et al. "Conflation of expert and crowd reference data to validate global binary thematic maps." *Remote sensing of environment* 221 (2019): 235-246. (Scopus)

Здобувачем досліджено залежність точності карти класифікації від вибору методу збору навчальних даних.

15. Kussul, Nataliia, et al. "Parcel-Based Crop Classification in Ukraine Using Landsat-8 Data and Sentinel-1A Data." *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 9.6 (2016): 2500-2508. (Scopus)

Здобувачем запропоновано метод фільтрацій карт класифікацій з використанням наявних векторних меж полів з можливістю, при необхідності, розділення їх на декілька полів.

16. Куусуль, Н. М., et al. "Ретроспективна регіональна карта земного покриву для України: методологія побудови та аналіз результатів." *Космічна*



наука і технологія 21.3 (2015): 31-39.

Здобувачем побудовані ретроспективні карти типів земного покриття для всієї території України з використанням ансамблю нейронних мереж.

17. Kussul, Nataliya N., et al. "Land Cover Changes Analysis Based on Deep Machine Learning Technique." *Journal of Automation and Information Sciences* 48.5 (2016): 42-54. (Scopus)

Здобувачем досліджено зміни земного покриття для областей України з використанням карт класифікацій типів земного покриття.

18. Kussul, Nataliia, et al. "Crop inventory at regional scale in Ukraine: developing in season and end of season crop maps with multi-temporal optical and SAR satellite imagery." *European Journal of Remote Sensing* 51.1 (2018): 627-636. (Scopus)

Здобувачем побудовано карти порушення сівозмін на основі карт класифікацій типів земного покриття.

19. Куссуль, Н. М., et al. "Супутниковий агромоніторинг в Україні (перспективи участі в європейських програмах)." *Вісник НАН України* 2 (2016): 96-102.

Здобувачем побудовано карти порушення сівозмін на основі карт класифікацій типів земного покриття.

20. Шелестов, А. Ю., Бутко, І. М., Лавренюк, М. С., Яйлимов, Б. Я., & Колотій, А. В. "Регресійний аналіз показників розвитку рослинництва в регіонах України за статистичними і супутниковими даними." *Індуктивне моделювання складних систем* 7 (2015): 282-290.

Здобувачем проаналізовано можливість моделювання економічних показників на основі карт класифікацій типів земного покриття.

21. Kussul, Nataliia, et al. "A workflow for Sustainable Development Goals indicators assessment based on high-resolution satellite data." *International Journal of Digital Earth* (2019): 1-13. (Scopus)

Здобувачем запропоновано використовувати карти класифікації типів земного покриття для обчислення індикаторів цілей сталого розвитку.