

Державна установа "Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі
Інституту геологічних наук Національної академії наук України"

Державна установа "Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі
Інституту геологічних наук Національної академії наук України"

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

УДК 528.854.4:519.237.5:004.02(043)

СВІДЕНЮК МИХАЙЛО ОЛЕГОВИЧ

ДИСЕРТАЦІЯ

МЕТОДИКА КОМПЛЕКСУВАННЯ ДАНИХ РАДІОЛОКАЦІЙНОГО ТА
ОПТИЧНОГО ЗНІМАННЯ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ
ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ

172 – Телекомунікації та радіотехніка

17 – Електроніка та телекомунікації

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Свіденюк М. О.

Науковий керівник Станкевич Сергій Арсенійович, доктор технічних наук, професор

Київ – 2021

АНОТАЦІЯ

Свіденюк М.О. Методика комплексування даних радіолокаційного та оптичного знімання для визначення фізичних параметрів земної поверхні

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 – «Телекомунікації та радіотехніка». Державна установа «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України», м. Київ, 2021.

В сучасному світі, актуальні наукові, соціоекономічні та екологічні задачі, важливі для суспільства та навколишнього середовища, вимагають залучення матеріалів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) для їх оперативного та ефективного рішення. Тому, сучасна парадигма використання даних ДЗЗ передбачає поступовий перехід від попередньо оброблених та каліброваних даних до інформаційних продуктів вищих рівнів, придатних до безпосереднього аналізу спеціалістами в тематичних галузях, а не з геоінформатики – analysis-ready data (ARD). Прикладами ARD є просторові розподіли фізичних характеристик земної поверхні, недоступних до прямих вимірювань – температури повітря, вологості ґрунту, біомаси рослинності, ризику надзвичайних подій тощо.

Сучасна мережа ДЗЗ складається з великої кількості аерокосмічних апаратів та являє собою складну синергетичну систему. Для таких систем, характерним є отримання інформації про один і той самий феномен (процес, об'єкт, подію) по декільком каналам. Тому проблема полягає в тому, щоб визначити, по яких каналах передаються найбільш достовірні дані і як забезпечити їх оптимальне або раціональне комплексування. Загалом, синергетична концепція комплексування даних застосовується для оцінки характеристик об'єктів та процесів за наявної сукупності даних. В даному дослідженні, при комплексуванні даних невідома характеристика розглядається як випадкова величина, відображенням закону розподілу якої є оптичний та радіолокаційний сигнали. Для здійснення її кількісної оцінки, всі наявні дані вивчаються в сукупності і обробляються як вхідні статистичні змінні. Обробка здійснюється за правилами математичної статистики.

В цьому дослідженні основну увагу приділено точному та достовірному визначенні абсолютної вологості ґрунту, що визначається як вологість у відношенні до маси сухого матеріалу ($W_{обч}$, %). Але, оскільки $W_{обч}$ є мінливою та залежить від умов ґрунтового-повітряного середовища, достовірне отримання $W_{обч}$ потребує кількісного оцінювання додаткових фізичних параметрів. Зокрема, в рамках дослідження здійснено обчислення коефіцієнтів зворотного розсіювання (σ), діелектричної проникності (ϵ), шорсткості (s), температури ґрунту (T_n) та земних покривів (T_{disc}), параметрів рослинного покриву та різних геометричних параметрів земної поверхні.

Мета дослідження полягала у підвищенні точності визначення фізичних параметрів земної поверхні, перш за все – вологості ґрунту, шляхом створення нової методики комплексування радіолокаційних та оптичних супутникових даних. Для цього було удосконалено методи цифрової обробки оптичних та радарних супутникових зображень, обчислено додаткові фізичні параметри земної поверхні, а також проведено наземні підсупутникові вимірювання.

Таким чином, радіолокаційні супутникові дані C-SAR (довжина хвилі $\lambda_{C-SAR} = 5,56$ см) Sentinel-1 High-Resolution Ground Range Detected (GRDH) з просторовою розрізненістю 10 м були використані для обчислення ϵ . Радарні зображення, що містять дані у форматі дискретних цілочисельних значень (DN_{SAR}), були оброблені у відкритому програмному середовищі Sentinel Application Platform (SNAP). Обробка складалася з оновлення метаданих, конвертації DN_{SAR} в σ горизонтальної (VH, σ_{VH}) та вертикальної (VV, σ_{VV}) поляризації, а також географічної прив'язки. Середовище SNAP дозволяє отримувати супровідні дані до продуктів S1. Тому, також були згенеровані зображення кутів візування ϑ та θ .

Обчислення ϵ було здійснено на основі Integral Equation Model (IEM) зі сталим відношенням горизонтального радіусу кореляції ($l=4$) до середньоквадратичного відхилення s . У якості вхідних даних було використано σ_{VH} , σ_{VV} та θ , обчислені для продуктів S1 GRDH. Оскільки IEM є недосконалою, вона призводить до розриву функції ϵ при деяких комбінаціях вхідних даних. Тому було зроблено ряд удосконалень. По-перше, накладено умову $\epsilon_{VH} \approx \epsilon_{VV}$, оскільки при вимірюванні

фізичного параметру різними способами (наприклад C-SAR VH/VV) значення не має принципово відрізнятися. По-друге, оскільки s також є невідомою величиною, діапазон допустимих значень параметру було встановлено в межах $0,01 \text{ см} < s < \frac{\lambda_{C-SAR}}{2}$ см. По-третє, на основі попередніх досліджень діелектричних властивостей ґрунту, встановлено обмеження $2 < \varepsilon < 45$, оскільки оригінальна модель ІЕМ допускає $\varepsilon \rightarrow \infty$. Побудову карт розподілів діелектричної проникності ε та шорсткості s було здійснено на основі результатів оберненого моделювання ε у всьому можливому діапазоні значень σ_{VH} та σ_{VV} . Додатково було здійснено корекцію ε шляхом врахування дестабілізуючих ефектів фізико-хімічних особливостей ґрунтового середовища. З цією метою було використано результати наземних, квазісинхронних із зондуванням S1, підсупутникових вимірювань кислотності (pH_n) та температури T_n .

Для обчислення T_{disc} , використовувалися багатоспектральні супутникові зображення в видимому/ближньому інфрачервоному (Visible/Near Infrared, VNIR) та тепловому інфрачервоному (Thermal Infrared) діапазонах. В першому потоці обчислень, дані VNIR, що постачаються супутниками PlanetScope PS2.SD (просторова розрізненність 3,7 м), були використані для обчислення Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). В подальшому NDVI був використаний для визначення коефіцієнтів теплового випромінювання (ε_V), окремо для рослинних та нерослинних покривів, з залученням даних зі спектральної бібліотеки ECOSTRESS.

В другому потоці обчислень, здійснювалася обробка даних TIR, зареєстрованих в форматі дискретних цілочисельних значень (DN_{TIR}). А саме, для цього були використані дані сенсорів Landsat-7 (L7) Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), Landsat-8 (L8) Thermal Infrared Sensor (TIRS), та Earth Observing System (EOS) Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). Дані TIR мають просторову розрізненність 60, 100 та 1000 м відповідно. За калібрувальними коефіцієнтами було здійснено конвертування DN_{TIR} в спектральну щільність енергетичної яскравості на сенсорі (L_0), а потім – в спектральну щільність енергетичної яскравості земної поверхні (L_0) через атмосферну корекцію.

Одержані значення ε_V та L_0 були використані для обчислення $T_{дист}$ за оберненою формулою Планка для «сірого» тіла. Оскільки оптичні та радарні сенсори проводять знімання несинхронно (різниця складає приблизно 4 години), $T_{дист}$ було перемасштабовано в часі до значень температури в час знімання $S1$ (T_M).

З метою врахування впливу рельєфу місцевості на зворотне розсіяння радіолокаційного сигналу були обчислені геометричні параметри земної поверхні. До результуючої моделі комплексування супутникових даних увійшли параметр локальних девіацій радіолокаційного сигналу (g), взаємна орієнтація елемента рельєфу по відношенню до сенсора (f_0) та нормалізований рельєф місцевості (φ). Додатково, для обчислення геометричних параметрів, було використано цифрову модель місцевості (ЦММ) Advanced Land Observation Satellite (ALOS) Global Digital Surface Model (GDSM) AW3D30.

Зокрема, параметр g характеризує неоднорідність підстилаючої поверхні при зондуванні під кутом візування, та обчислюється з використанням σ_{VH} , σ_{VV} та θ . Параметр f_0 дозволяє описати взаємну орієнтацію напрямку спостереження радара та лінії нормалі земної поверхні, і обчислюється з використанням нахилу та експозиції елемента рельєфу, а також кута візування та курсового кута сенсора. Нормалізацію рельєфу було здійснено на основі ортогональної увігнутості земної поверхні, для більш точного виявлення локальних понижень.

Параметри, обчислені з використанням супутникових даних (регресори) та результатів наземних завіркових вимірювань W_n (регресанд) були використані для відновлення $W_{обч}$ на основі багатовимірного регресійного аналізу. Суттєву нелінійність моделі було враховано шляхом застосування емпірично визначених нелінійних перетворень вхідних регресорів та їх комбінуванням. В результаті регресійного аналізу виявлено значний статистичний зв'язок між W_n та регресорами (коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,87$). Встановлена точність визначення вологості (RMSE = 3,6 %, MAE = 2,9 %) є цілком прийнятною для кількісного моніторингу вологості ґрунту. Багатовимірною лінеаризованою регресійною моделлю була використана для побудови карти просторового розподілу вологості ґрунту.

За результатами аналізу інформативності компонент регресійної моделі, за допомогою Principal Component Analysis (PCA), виявлено, що 90 % повної інформативності забезпечується шістьма першими головними компонентами. Серед регресорів, розподіл інформативності є відносно рівномірним: їх інформативність коливається в діапазоні 6,2-16,5 %. Найбільш інформативними є s скомбінована з N_V (~16,5 %) та σ_{VH} скомбінований з T_m (~13,1 %).

Наукова новизна

Вперше розроблено нову методику комплексування багатоспектральних оптичних та двополяризаційних радарних супутникових даних для обчислення фізичних параметрів земної поверхні, перш за все – вологості ґрунтів. На відміну від існуючих, розроблена методика використовує складну лінеаризовану багатовимірну регресійну модель з мінімізацією абсолютних відхилень, оригінальний підхід до визначення температури ґрунту в разі несинхронного оптичного і радіолокаційного знімання, та додатково враховує геометричні неоднорідності земної поверхні і локальні девіації радіолокаційного відбиття.

Вперше запропоновано нову лінеаризовану багатовимірну регресійну модель з мінімізацією абсолютних відхилень, яка на відміну від існуючих, враховує низку фізичних параметрів, таких як коефіцієнти зворотного розсіювання, діелектрична проникність, шорсткість, температура земної поверхні, параметрів рослинного покриву, та додаткових геометричних параметрів, таких як висота, нахил, експозиція та ортогональна увігнутість рельєфу, локальні девіації радіолокаційного сигналу та взаємна орієнтація елемента рельєфу по відношенню до сенсора.

Удосконалено відомий метод обчислення відносної діелектричної проникності земної поверхні за даними двополяризаційного радіолокаційного знімання на основі калібрування моделі ІЕМ. Метод удосконалено шляхом введення алгоритму автоматизованого обчислення шорсткості ґрунту. Також запропоновано критерії фільтрації двополяризаційних радарних зображень на основі діапазону допустимих значень діелектричної проникності та шорсткості ґрунту, який дозволяє виявляти випадки зриву моделі визначення діелектричної проникності ще до проведення розрахунків.

Подальшого розвитку зазнав метод визначення температури земної поверхні з використанням багатоспектральних оптичних супутникових даних знімання у видимому, ближньому та тепловому інфрачервоних діапазонах. Зокрема, застосовано перерахунок температури, одержаної дистанційно, до температури в момент радіолокаційного знімання.

Практична значущість

За результатами підсупутникових наземних вимірювань розроблена методика забезпечує достатню достовірність (коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,87$) та менші, у порівнянні з існуючими методиками, величини похибок ($RMSE = 3,6\%$), що дозволяє рекомендувати її до застосування в рівнинних лісостепових та степових фізико-географічних умовах України.

Ключові слова: супутникові дані, комплексування даних, регресійний аналіз, фізичні параметри, вологість ґрунту, коефіцієнт зворотного розсіювання, діелектрична проникність, температура земної поверхні

ABSTRACT

Svideniuk M.O. Radar and optical data fusion technique for land surface physical parameters restoration.

Dissertation for the Doctor of Philosophy degree (PhD) with a degree in 172 – «Telecommunications and radio engineering» (17 – «Electronics and telecommunications»). - State Institution «Scientific Centre for Aerospace Research of the Earth of the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine», Kyiv, 2021.

Nowadays, the efficient and appropriate solvation of relevant scientific, socioeconomic and environmental security issues, which are essential for human society and environment require, requires Earth observation (EO) data. Thus, a modern EO data application framework provides a gradual transition from the usage of pre-processed and calibrated data to the implementation of higher-level information products named analysis-ready data (ARD). This kind of data is suitable not only for direct analysis by geoinformatics experts, but also by specialists in thematic industries. For example, the spatial distributions of land surface physical characteristics inaccessible to direct measurements, e.g. air temperature, soil moisture, vegetation biomass, risk of emergency events, etc., can be recognized as the ARD.

The modern remote sensing (RS) network, which is consisted from numerous aircrafts and spacecraft, performs a complex synergetic system. In such kind of systems, information about a single phenomenon (process, object or event) transmits in several channels. Thus, a problem is to determine the channels that transfer the most reliable data and then to provide their optimal or rational fusion. In general, the synergetic data fusion approach is reliable for objects and processes characteristics assessment if a data set is pulled. In this paper, an unknown characteristic was considered as a random value based on the principles of optical and radar signals distributive law. In order to estimate this value, available data was examined as an aggregated dataset and processed as initial statistical variables. The processing was carried out in accordance with statistical theory.

This study focuses on the accurate and reliable estimation of absolute soil moisture that defines in relation to the mass of dry material ($W_{o\delta u}$, %). However, since $W_{o\delta u}$ is very changeable and depends on soil-air environment conditions, its reliable retrieval requires additional physical parameters quantitative evaluation. In particular, this research study includes the estimation of backscattering coefficients (σ), local incidence angles from ellipsoid (ϑ) and projected local incidence angles (θ), permittivity (ε), roughness (s), soil (T_n) and land cover (T_{duc}) temperature, vegetation cover parameters (e. g. NDVI) and other various land surface geometric parameters.

The *aim* of the study was to increase the land surface physical parameters estimation accuracy, especially $W_{o\delta u}$, by creating a new technique for radar and optical data fusion. With this aim in view, we improved the methods of optical and radar satellite images digital processing, calculated the additional land surface physical parameters and provided the field measurements of some of them.

Thus, C-SAR (wavelength $\lambda_{C-SAR}=5,56$ cm) Sentinel-1 A/B (S1) High-Resolution Ground Range Detected (GRDH) products with 10 m spatial resolution were used for ε estimation. The radar images provide the information in discrete integer (DN_{SAR}) format. Therefore, it were processed in open-source Sentinel Application Platform (SNAP) software. The processing consisted of metadata updating, calibration the DN_{SAR} to (σ) received in VH (σ_{VH}) and VV (σ_{VV}) polarizations and dereferencing. The SNAP environment allows to generate additional images from the S1 products. Thus, the images of incidence angles ϑ and θ were also retrieved.

The estimation of ε were provided based on Integral Equation Model (IEM) with the fixed ratio of a horizontal correlation length ($l=4$) to the standard deviation of s . The physical parameters σ_{VH} , σ_{VV} and θ were used as input data estimated for S1 GRDH products. Since the IEM is imperfect, it leads to the ε function rupture for some combinations of the input data. Therefore, a number of improvements were provided. Firstly, the relative equality condition of $\varepsilon_{VH} \approx \varepsilon_{VV}$ was implemented, since the measuring of a single physical parameter with different devices (e.g. C-SAR VV/VH), the result should not differ significantly. Secondly, since s is also unknown variable, the tolerance range was limited

for $0,01 \text{ cm} < s < \frac{\lambda_{C-SAR}}{2} \text{ cm}$, based on radar signal scattering properties. Thirdly, the tolerance range of $2 < \varepsilon < 45$ based on previous soil dielectric properties investigations, since the original IEM allows a function jump that leads to $\varepsilon \rightarrow \infty$. The mapping of ε and s spatial distribution was provided based on the backward simulation of ε in the full range of σ_{VH} and σ_{VV} . Additionally, the correction of ε was provided, by taking into account destabilizing effects of physical and chemical characteristics of the soil medium. For this purpose, the results of field, quasi-synchronous with S1 observations, measurements of acidity (pH_n) and temperature (T_n) were used.

Multispectral optical EO data in Visible/Near Infrared (VNIR) and Thermal Infrared (TIR) ranges were used in order to estimate T_{duc} . In the first estimation data-flow, PlanetScope PS2.SD (PS2.SD) (spatial resolution 3.7 m) VNIR data were used to calculate the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). After that, NDVI were used for the thermal emissivity (ε_V) estimation, separately for vegetated and non-vegetated surfaces, by implementation of the ECOSTRESS spectral library.

In the second estimation data-flow, discrete integer (DN_{TIR}) TIR data were processed. In particular, Landsat-7 (L7) Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+), Landsat-8 (L8) Thermal Infrared Sensor (TIRS), and Earth Observing System (EOS) Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data, with 60 m, 100 m and 100m spatial resolution respectively, were used. Firstly, DN_{TIR} were converted to radiance (L) by using the calibration coefficients. Secondly, the ground radiance (L_0) were estimated based on atmospheric correction.

As a result, ε_V and L_0 were used to calculate T_{duc} by using the inverse Planck's equation for «grey» bodies. Since the radar and optical sensors provide non-synchronous observations (the difference is 4 hours approximately), T_{duc} were scaled in time to temperature during the S1 observation (T_M).

In order to take into account land topography effects on the radar signal backscattering, geometric land surface parameters were calculated. The resultant model of the optical and radar data fusion included the radar signal local fluctuations (g), the mutual orientation of the relief element to the C-SAR (f_0) and normalized terrain relief (φ). Additionally, to

calculate the geometric parameters, a digital terrain elevation data (DTED) Advanced Land Observation Satellite (ALOS) Global Digital Surface Model (GDSM) AW3D30 were used.

In particular, g characterizes the land surface heterogeneity during the sensor observations at the incidence angle, and can be calculated using σ_{VH} , σ_{VV} and θ . The $f\theta$ describes the mutual orientation of the C-SAR observation direction and the land surface normal line, and calculated by using not only the relief slope and exposure, but also the sensor incidence and heading angles. The relief normalization was carried out by using the orthogonal concave of the sloping land surface for more accurate detection of the relief local topographic low.

The parameters estimated by using EO-data (predictors) and results of W_n field measurements (regressand) was used for $W_{\sigma\theta}$ estimation based on multidimensional regression analysis. The significant nonlinearity of the model was taken into account by empirically defined nonlinear transformations of initial regressors and their combinations. As a result of the regression analysis, a representative statistical dependence between W_n and regressors ($R^2 = 0,87$) were found. The revealed magnitude errors (RMSE = 3,6%, MAE = 2,9 %) are quite acceptable for the soil moisture quantitative monitoring. The multidimensional linearized regression model was used to build the soil moisture spatial distribution maps.

Based on the results of the regression model components informational value analysis, by using Principal Component Analysis (PCA), it was revealed that six first principal components provide the 90% of the total information capacity. In general, the information capacity between the regressors was evenly distributed: their informational value ranged from ~6,2 % to 16,5 %. The most meaningful components were the s combined with N_V (~16,5 %) and σ_{VH} combined with T_m (~13,1 %).

Scientific novelty

The *first developed* technique for multispectral optical and double polarization radar satellite data fusion for the land surface physical parameters, soil moisture especially, estimation. Unlike existing approaches, the developed technique uses the complex linearized multidimensional regression model with absolute deviations minimization, the original approach for the land surface temperature estimation for non-synchronous radar and

optical observations, and additionally relies on the radar signal local fluctuations and relief heterogeneity.

The *first proposed* the linearized multidimensional regression model with absolute deviations minimization. Unlike existing models, the developed model relies on the number of physical parameters, e.g. backscattering coefficients, permittivity, roughness, land cover temperature, vegetation cover parameters, and additional geometric parameters, e.g. the relief elevation, slope, aspect and orthogonal concave, radar signal local fluctuations and mutual orientation of the relief element to a sensor.

A well-known method for the land surface permittivity estimation was *improved* by using the dual polarization radar sensing based on the IEM calibration. Additionally, the model was improved by the computer assisted soil roughness estimation algorithm implementation. In addition, the theoretical criteria for the function rupture detection were proposed based on the soil permittivity and roughness tolerance ranges. The theoretical criteria for the double polarization radar images filtering were also proposed based on the permittivity and roughness tolerance ranges, which can identify the model disruption cases before estimations.

The well-known method for the land surface temperature estimation, by using visible, near and thermal infrared multispectral optical data, based on Planck's law was *improved*. In particular, the temperature obtained remotely was recalculated to a temperature at the time of radar sensing.

Practical implications

Based on the results of the soil physical parameters measurement, the developed technique provides a sufficient reliability ($R^2 = 0,87$) and magnitude errors (RMSE = 3,6%), which are smaller compared to existing techniques. The obtained accuracy allows recommending the technique for application within the plain forest-steppe and steppe physic-geographical conditions of Ukraine.

Key words: EO-data, data fusion, regression analysis, physical parameters, soil moisture, backscattering coefficient, permittivity, land surface temperature

Список публікацій за темою дисертації

Публікації у монографіях

1. Popov, M., Stankevich, S., Kozlova, A., Piestova, I., Lubskiy, M., Titarenko, O., Svideniuk, M., Andreiev, A., Lysenko, A., Singh, S. K. (2021). Long-Term Satellite Data Time Series Analysis for Land Degradation Mapping to Support Sustainable Land Management in Ukraine. *Geo-Intelligence for Sustainable Development*, 165–189. https://doi.org/10.1007/978-981-16-4768-0_11 (Особистий внесок: обробка серії багатоспектральних супутникових даних, контекстна класифікація багатоспектральних супутникових зображень; оцінка точності класифікації).

2. Станкевич С.А., Дудар Т.В., Свіденюк М.О. (2017) Дослідження динаміки деградації земель у зоні спостережень ПУЕК дистанційними методами // Комплексний геоекологічний моніторинг зони впливу Ташлицької гідроакумулюючої електростанції та Олександрівського водосховища: 1998-2016 роки. За ред. Г.В. Лисиченка. К.: Наукова думка, 360 с. (Особистий внесок: обробка багатоспектральних супутникових даних, обчислення вегетаційних індексів, ерозії ґрунтів, деградації рослинного покриву та деградації земель).

Матеріали, опубліковані в періодичних виданнях:

3. Popov, M., Michaelides, S., Stankevich, S., Kozlova, A., Piestova, I., Lubskiy, M., Titarenko, O., Svideniuk, M., Andreiev, A., Ivanov, S. (2021). Assessing long-term land cover changes in watershed by spatiotemporal fusion of classifications based on probability propagation: The case of Dniester river basin. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 22, 100477. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100477>. (Особистий внесок: обробка багатоспектральних супутникових даних, контекстна класифікація супутникових зображень, оцінка точності класифікації).

4. Свіденюк, М.О. (2021) Методика визначення фізичних параметрів земної поверхні за результатами комплексування супутникових даних оптичного та радіолокаційного знімання. *Український журнал дистанційного зондування Землі*, 8(3), 4-24. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2021.8.3.197>

5. Stankevich, S., Svideniuk, M., Lysenko, A. (2021). Land surface roughness parameter retrieval by inverse simulation of dual-polarization radar backscattering. *Applied*

Questions of Mathematical Modelling, 4(2.1), 9. <https://doi.org/10.32782/KNTU2618-0340/2021.4.2.1.22>. (Особистий внесок: обробка двополяризаційних радарних даних, обчислення діелектричної проникності).

6. Eddahby, L., Popov, M. A., Stankevich, S. A., Kozlova, A. A., Svideniuk, M. O., Mezzane, D., Lukyanchuk, I., Larabi, A., Ibouh, H. (2019). Assessing vegetation structural changes in oasis agro-ecosystems using Sentinel-2 image time series: case study for Drâa-Tafilalet region Morocco. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-4/W12, 69-73. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W12-69-2019>. (Особистий внесок: обробка багатоспектральних оптичних супутникових даних, обчислення LAI).

7. Piestova, I.O., Lubskyi, M. S., Svideniuk, M. O., Golubov, S. I., Laptiev, O. A. (2019). Urban thermal micro-mapping using satellite imagery and ground-truth measurements: Kyiv city area case study. *Ukrainskyi Zhurnal Dystantsiinoho Zonduvannia Zemli*, 21, 40-48, <https://doi.org/10.36023/ujsr.2019.21.149>. (Особистий внесок: проведення наземних підсупутникових вимірювань температури земних покривів, обробка багатоспектральних супутникових зображень, обчислення температури земних покривів).

8. Rebati, N., Bouchenafa, N., Oulbachir, K., Svideniuk, M. (2018). Remote sensing and ground based assessment of land cover parameters distribution in the catchment area of Wadi el K'sob M'sila (Algeria). *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 27, 3. <https://doi.org/10.15421/111872>. (Особистий внесок: обробка багатоспектральних оптичних супутникових даних, обчислення вологості ґрунтів, обчислення та картування водозбірних областей річок).

9. Дудар, Т. В., Свіденюк, М. О., Щербей, В. Я. (2017). Використання топографічних даних та радіолокаційної зйомки для оцінки стану зсувонебезпечних ділянок. *Екологічна безпека та природокористування. Збірник наукових праць*, 23(1-2), 28-35. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2017.1>. (Особистий внесок: оцифрування картографічних матеріалів ґрунтів та горизонтів ґрунтових вод, дешифрування та картування ділянок зсувів ґрунтових товщ).

Патент

10. Спосіб підвищення просторової розрізненості розподілу температури земної поверхні, одержаного дистанційно. Попов, М.О., Станкевич, С.А., Пестова, І.О., Лубський, М.С., Свіденюк, М.О., Закусило, О.П. : пат. 122086 Україна : МПК G06K9/36, G06K9/40, G06K9/00, H04N5/33, G01J5/00, G06T5/50, G06T5/00. № а 2018 09483; заявл. 20.09.2018; опубл. 10.09.2020, Бюл. №17. (*Особистий внесок*: проведення наземних підсупутникових вимірювань температури земних покривів; обробка багатоспектральних супутникових зображень; обчислення температури земних покривів)

Апробація матеріалів дисертації

11. Kozlova, A., Stankevich, S., Svideniuk, M., Andreiev, A. (2021, May 24–28) Quantitative Assessment of Forest Disturbance with C-Band SAR Data for Decision Making Support in Forest Management [Paper presentation]. ISDMCI 2021, Kherson. https://doi.org/10.1007/978-3-030-82014-5_37. (in print) (*Особистий внесок*: обчислення параметрів за даними AWD3D; побудова моделі обчислення LAI; оцінка точності регресійної моделі обчислення LAI).

12. Piestova, I., Dugin, S., Orlenko, T. and Svideniuk, M. (2020, November 10-13) Assessing and forecasting landslide hazards of the Right Bank of the Kanev reservoir based on radar remote sensing data with corner reflectors using [Paper presentation]. *Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*, Kyiv, 20, 1-5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202056082> (*Особистий внесок*: встановлення кутових відбивачів в момент прольоту радіолокаційної системи штучного супутника Sentinel-1; обробка радарних супутникових даних Sentinel-1 GRDH).

13. Kozlova, A., Piestova, I., Patrusheva, L., Lubsky, M., Nikulina, A., Svideniuk, M. (2019, May 13-16). Estimation of the seasonal leaf area index in urban oak forests using Sentinel-2 time series data [Paper presentation]. *Geoinformatics 2019: Theoretical and Applied Aspects*, Kyiv, 5. doi:10.3997/2214-4609.201902134 (*Особистий внесок*: обробка багатоспектральних супутникових даних; побудова моделі обчислення LAI; оцінка точності регресійної моделі обчислення LAI).

14. Андреев, А. А., Пестова, И. А., Свиденюк, М. О., Суханов, К. Ю., Титаренко, О. В. (2019, 10 квітня). Методика построения прецизионных цифровых моделей местности на основе данных спутниковой радарной интерферометрии с использованием ГИС [Матеріали доповіді]. *Застосування космічних та геоінформаційних систем в інтересах національної безпеки та оборони*, Київ, 14-18. URL: <http://esri.ua/docs/nw45.pdf> (Особистий внесок: інтерферометрія радарних даних ВВ поляризації; побудова моделі рельєфу за результатами інтерферометрії).

15. Popov, M., Stankevich, S., Kozlova, A., Piestova, I., Lubskiy, M., Svideniuk, M., Titarenko, O., Andreiev, A., Hermaniuk, V. (2019, October 1-2). Land Cover Classification Using Spatio-Temporal Decision-Level Fusion Based on Probability Propagation [Paper presentation]. *Suchasni informatsiini tekhnologii upravlinnia ekolohichnoiu bezpekoiu pryrodokorystuvanniam, zakhodamy v nadzvychainykh sytuatsiakh*, Київ, 66-68. https://itgip.org/wp-content/uploads/2019/10/1_Книга_сайт.pdf. (Особистий внесок: контекстна класифікація багатоспектральних супутникових зображень, оцінка точності класифікації).

16. Pigulevskiy, P.I., Stankevich, S.A., Svideniuk, M.O. (2018, November 12-15). Geo-environmental condition assessment of Kryvbas industrial area using satellite radar interferometry [Paper presentation]. *Innovative Technologies in Science and Education. European Experience*, Helsinki, Finland, 381-385. CD-ROM (Особистий внесок: інтерферометрія багаточасової серії радарних даних; обчислення функції когерентності результатами інтерферометрії; побудова цифрових моделей рельєфу).

17. Пигулевский П.И., Станкевич С.А., Свиденюк М.О., Свистун В.К. (2018, 23-24 листопада). Использование радарной интерферометрии для оценки гидрогеологического состояния Кривбаса [Матеріали доповіді]. *Сучасні технології розробки рудних родовищ. Еколого-економічні наслідки діяльності підприємств ГМК*, Кривий Ріг, 138-139. CD-ROM (Особистий внесок: інтерферометрія радарних даних ВВ поляризації, обчислення функції когерентності).

18. Пестова І.О., Лубський М.С., Свіденюк М.О., Голубов С.І. (2018, 18-19 вересня). Теплове мікрокартування міської території за результатами аналізу довготривалих часових серій інфрачервоних супутникових зображень [Матеріали

доповіді]. *GEO-UA 2018: Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки*, Київ, 70-72. (Особистий внесок: обчислення температури земних покривів з використанням супутникових даних в видимому та тепловому спектральних діапазонах).

19. Дудар, Т.В., Станкевич, С.А., Свіденюк, М.О., Щербаченко, В.А. (2017, 22-25 грудня) Оцінка стану ґрунтово-рослинного покриву в зоні довготривалого впливу Південноукраїнської АЕС [Матеріали доповіді]. *ЕКОГЕОФОРУМ 2017: Актуальні проблеми та інновації*, Івано-Франківськ, 276-278. URL: https://sci.ldubgd.edu.ua/bitstream/123456789/3886/1/materialy_ekogeoforum2017_0.pdf (Особистий внесок: обробка багатоспектральних супутникових зображень цифрової моделі місцевості; обчислення вегетаційних індексів; обчислення та побудова карт ерозії ґрунтів, деградації рослинного покриву та деградації земель).

20. Пигулевский, П.И., Свистун, В.К., Станкевич, С.А., Свиденюк, М.О., Кирилюк, О.С. (2017, 11-14 жовтня). Использование геоэлектрических данных и радиолокационных космических снимков при изучении неотектонических процессов в южной части Кривбасса. *Моніторинг небезпечних геологічних процесів та екологічного стану довкілля*, Київ, CD-ROM. (Особистий внесок: обчислення функції когерентності радіолокаційного сигналу за результатами інтерферометрії).

21. Stankevich, S.A., Titarenko, O.V, Svideniuk, M.O. (2019, December 12-14). Landslide susceptibility mapping using GIS-based weight-of-evidence modelling in Central Georgian regions [Paper presentation]. *Natural Disasters in Georgia: Monitoring, Prevention, Mitigation*, Tbilisi, 187-190. (Особистий внесок: обробка багатоспектральних оптичних даних, обчислення фізичних та геометричних параметрів земної поверхні).