


PROCEEDINGS



**2nd National Workshop
with International Participation on
EU “Copernicus” Programme**

Organised by: Geo Polymorphic Cloud - Copernicus Relays
Space Research and Technology Institute at Bulgarian Academy of Sciences - Copernicus Academy
Cluster for Aerospace Technology, Research and Applications (CASTRA)

Supported by:

Bulgarian Industrial Association

The European Union's Caroline Herschel Framework Partnership Agreement on Copernicus User Uptake (FP-CUP)

PROCEEDINGS

Editor

Lachezar Filchev

Technical Editor

Tsveta Srebrova

Cover Design

GeoPolymorphic Cloud

Reports' Reviewers

Eugenia Roumenina

Lachezar Filchev

Lyubka Pashova

Petar Dimitrov

This Collection contains reports presented orally, or in the form of posters during the IInd WORKSHOP WITH INTERNATIONAL PARTICIPATION ON THE EU "COPERNICUS" PROGRAMME – COPE4BG, which was held in October 2020, Sofia, Bulgaria.

The Collection includes reports which were sent within the due term and were drafted in accordance with the preliminarily announced instructions.

The reports and the accompanying abstracts are published in one of the two working languages of the Conference after the authors' choice.

Disclaimer: The seminar is organized within the FPCUP, Action No. 2018-1-86 "Copernicus Awareness Raising Programme for Bulgaria - COPE4BG" with implementing partners SRTI-BAS, CASTRA and Geo Polymorphic Cloud. The FPCUP project is financed by the European Commission under the FPA No. 275/G/GRO/COPE/17/10042. The contents of the publication do not represent the official views of the European Commission nor do they constitute a commitment of any kind on its behalf.



cope4bg2020.copernicus.bg



office@copernicus.bg



The Book of Proceedings is distributed under Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 2.0 Generic License.

CONTENTS

Emilia Georgieva, Dimiter Syrakov, Roumen Nedkov, Dimiter Atanassov, Maria Dimitrova, Tatiana Spassova, Blagorodka Veleva, Maria Prodanova, Hristina Kirova, Nadya Neykova, Rozeta Neykova, Elena Hristova, Deyan Gochev, Plamen Trenchev, Anton Petrov, Mariana Zaharinova SATELLITE INFORMATION DOWNSCALED TO URBAN AIR QUALITY IN BULGARIA – RESULTS FROM THE SIDUAQ PROJECT.	5
Iva Ivanova, Nataliya Stankova, Mariana Zaharinova SEASONAL MONITORING OF DURANKULAK LAKE USING SENTINEL 2 DATA.	16
Hristo Nikolov, Mila Atanasova, Valentina Protopopova APPLICATION OF SATELLITE SAR DATA TO DETECT DEFORMATIONS OF THE EARTH'S CRUST AFTER EARTHQUAKES.	25
Mila Atanasova, Hristo Nikolov MONITORING OF LANDSLIDE PROCESSES ON THE NORTHERN BLACK SEA OF BULGARIA USING DATA FROM THE COPERNICUS PROGRAM.	38
Marieta Dimitrova USE OF SATELLITE DATA BY THE COPERNICUS PROGRAM FOR ASSESSMENT OF MODELED WIND FIELD FROM ATMOSPHERIC WEATHER PREDICTION MODELS FOR THE BLACK SEA.	53
Zlatomir Dimitrov APPLICATION OF MEAN STATISTICS DERIVED FROM SENTINEL-1 TIME SERIES ON FOREST – EXAMINE FOREST TYPE AND CORRELATION WITH BIOMASS LAYERS.	61

СЪДЪРЖАНИЕ

Емилия Георгиева, Димитър Сираков, Румен Недков, Димитър Атанасов, Мария Димитрова, Татяна Спасова, Благорodka Велева, Мария Проданова, Христина Кирова, Надя Нейкова, Розета Нейкова, Елена Христова, Деян Гочев, Пламен Тренчев, Антон Петров, Мариана Захаринова ИЗПОЛЗВАНЕ НА САТЕЛИТНА ИНФОРМАЦИЯ ЗА КАЧЕСТВОТО НА АТМОСФЕРНИЯ ВЪЗДУХ В ГРАДСКА СРЕДА В БЪЛГАРИЯ – РЕЗУЛТАТИ ОТ ПРОЕКТА SIDUAQ.	5
Ива Иванова, Наталия Станкова, Мариана Захаринова СЕЗОНЕН МОНИТОРИНГ НА ЕЗЕРОТО ДУРАНКУЛАК, С ИЗПОЛЗВАНЕТО НА ДАННИ ОТ СЕНТИНЕЛ 2.	16
Христо Николов, Мила Атанасова, Валентина Протопопова ПРИЛОЖЕНИЕ НА САТЕЛИТНИ SAR ДАННИ ЗА УСТАНОВЯВАНЕ ДЕФОРМАЦИИ НА ЗЕМНАТА КОРА СЛЕД ЗЕМЕТРЕСЕНИЯ.	25
Мила Атанасова, Христо Николов МОНИТОРИНГ НА СВЛАЧИЩНИ ПРОЦЕСИ ПО СЕВЕРНОТО ЧЕРНОМОРИЕ НА БЪЛГАРИЯ, ИЗПОЛЗВАЙКИ ДАННИ ОТ ПРОГРАМА КОПЕРНИК.	38
Мариета Димитрова ПРИЛОЖЕНИЕ НА СПЪТНИКОВИ ДАННИ ОТ ПРОГРАМА „КОПЕРНИК“ ЗА ОЦЕНКА НА ВЯТЪРА ОТ АТМОСФЕРНИТЕ ПРОГНОСТИЧНИ МОДЕЛИ ЗА ЧЕРНО МОРЕ.	53
Златомир Димитров ПРИЛОЖЕНИЕ НА СРЕДНИ СТОЙНОСТИ НА ВРЕМЕВА СЕРИЯ ОТ SENTINEL-1 В ГОРИ В ПЛАНИНСКИ ТЕРИТОРИИ – ОПРЕДЕЛЯНЕ ВИДА НА ГОРАТА И СТАТИСТИЧЕСКА КОРЕЛАЦИЯ СЪС СЛОЕВЕ БИОМАСА (GLOBBIOMASS, CSI-BIOMASS, TCD).	61

Satellite information downscaled to urban air quality in Bulgaria – results from the SIDUAQ project

Emilia Georgieva¹, Dimiter Syrakov¹, **Roumen Nedkov²**, Dimiter Atanassov¹, Maria Dimitrova², Tatiana Spassova¹, Blagorodka Veleva¹, Maria Prodanova¹, Hristina Kirova¹, Nadya Neykova¹, Rozeta Neykova¹, Elena Hristova¹, Deyan Gochev², Plamen Trenchev², Anton Petrov¹, Mariana Zaharinova²

¹National Institute of Meteorology and Hydrology, Sofia, Bulgaria

²Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria
e-mail: emilia.georgieva@meteo.bg

Keywords: remote sensing, dispersion models, data assimilation, AOD to PM conversion

Abstract: The ESA funded project SIDUAQ made it possible, for the first time in Bulgaria, to use satellite data on atmospheric chemistry for improvement of air pollution modelling at national and local scale, and to use TROPOMI-S5p data for elaboration of maps for particulate matter (PM) concentrations at ground-level. We discuss the effect of satellite data assimilation in the Bulgarian Chemical Weather Forecasting System (BgCWFS) on different pollutants concentrations based on simulations for one summer and one winter months. We present results from downscaling of BgCWFS results for the territory of Bulgaria (9 km spatial resolution) down to city of Plovdiv (250 m resolution) by means of the Local Air Quality Modelling System (LAQMS). The performance of the models is evaluated based on comparison to observational data and to models from the Copernicus CAMS service. The results of models for converting TROPOMI –S5p aerosol data to PM concentrations over Bulgaria are also outlined.

Използване на сателитна информация за качеството на атмосферния въздух в градска среда в България – резултати от проекта SIDUAQ

Емилия Георгиева¹, Димитър Сираков¹, **Румен Недков²**, Димитър Атанасов¹, Мария Димитрова², Татяна Спасова¹, Благорodka Велева¹, Мария Проданова¹, Христина Кирова¹, Надя Нейкова¹, Розета Нейкова¹, Елена Христова¹, Делян Гочев², Пламен Тренчев², Антон Петров¹, Марияна Захарина²

¹Национален институт по метеорология и хидрология, София, България

²Институт за космически изследвания и технологии – БАН, София, България
e-mail: emilia.georgieva@meteo.bg

Ключови думи: дистанционни наблюдения, дисперсионни модели, усвояване на данни, аерозол

Резюме: Проектът SIDUAQ, финансиран от ЕКА, даде възможност за първи път в България сателитни данни за атмосферна химия да се използват за подобряване на моделни системи за качество на атмосферния въздух (КАВ) в национален и локален мащаб, както и за създаване на карти за разпределението на фините прахови частици (ФПЧ) в България по аерозолни данни от TROPOMI –S5p. Дискутира се ефекта от усвояване на сателитни данни в Българската система за прогноза на химическото време (BgCWFS) върху приземните концентрации на различни замърсители на база пресмятания за един зимен и един летен месец. Представени са резултати от свеждане на изходните данни от BgCWFS (хоризонтална резолюция 9 км) към локално ниво за района на град Пловдив (250 м резолюция) посредством дисперсионната локална система LAQMS. Моделните резултати са оценени на база сравнения с наблюдения и сравнения с резултати от модели на системата Коперник – CAMS. Показани са и резултати от модели за конвертиране на аерозолни данни от TROPOMI –S5p към приземни концентрации на ФПЧ в България.

Introduction

Air quality issues in urban areas in Bulgaria continue to be of big concern, as EU limit values for particulate matter concentrations are often exceeded, despite the measures for reduction the emissions of pollutants. Better understanding of air pollution problems is the key for effective measures. Recognizing that air pollution is a complex problem linked to various processes over different spatial and temporal scales, requiring multi-disciplinary approach with application of different tools, the project SIDUAQ was carried out by a team composed of two partners with complementary expertise. The National Institute of Meteorology and Hydrology (NIMH) has a long-year experience in development and applications of numerical air quality modelling systems at national and urban scale. The Space Research and Technology Institute at the Bulgarian Academy of Sciences (SRTI-BAS) is the leading institution in Bulgaria in the field of remote sensing of the Earth and regional and global monitoring of the environment and security.

Within SIDUAQ [1, <http://space.bas.bg/SIDUAQ/>] we investigated the possibility of using satellite retrieved data on atmospheric chemistry for improving the capabilities of air quality modelling systems for surface concentrations of key pollutants at national and local level, for analysing air pollution problems in Bulgaria, and for exploring the spatial distribution of pollutants at ground-level based on data from TROPOMI-S5p. The results from the analysis of regional and local pollution over Bulgaria based on multi-year GOME2 and recent TROPOMI-S5p data were presented and discussed in [2,3].

Here we focus on the results related to air quality modelling with satellite data assimilation and on results related to converting TROPOMI-S5p aerosol data to surface particulate matter concentrations over Bulgaria.

Results from air quality modelling with the upgraded system BgCWFS

The operational chemical weather forecast system BgCWFS [4, 5] based on the meteorological model WRF [6] and the chemical transport model CMAQ [7], was set-up to assimilate GOME-2 (MetOP A,B,C) data for aerosol optical depth (AOD) and the columnar NO₂ (VCD_NO₂) and SO₂ (VCD_SO₂) over 3 nested domains – Europe with horizontal resolution 81 km, Balkan Peninsula (27 km) and domain Bulgaria (9 km). Data at the time of satellite overpass hour (set to 09:00 UTC) were used. BgCWFS is running operationally at NIMH since 2012. The system provides 72h forecast for key pollutants – ozone, nitrogen dioxide and particulate matter over the 3 mentioned domains, plus another two domains – Sofia region (3 km) and Sofia city (1 km).

For SIDUAQ the system was modified for: a) calculation of AOD and vertical column densities of NO₂ and SO₂; b) assimilation of GOME-2 data; c) interface for links to local air quality management system for Plovdiv (LAQMS); d) post-processing of output to facilitate model validation. Five different schemes were investigated for estimation of aerosol extinction coefficients and AOD [8], with the algorithm FlexAOD [9] selected for further use. The assimilation of satellite retrieved data is made for the three nested domains (Europe- Balkan Peninsula, Bulgaria) and to our knowledge, represents a novelty, as in the literature satellite data algorithms applied for one domain can be found. Another novelty is the simultaneous assimilation of AOD, VCD_NO₂ and VCD_SO₂.

To investigate the effects of satellite data assimilation, BgCWFS was run in two versions: *mod* (without satellite data assimilation), and *sat* (with assimilation of satellite data). Simulations for two periods of one month – August 2017 and February 2019 were carried out in off-line mode of BgCWFS, with output on hourly basis for each version of the system.

The performance of BgCWFS in the two versions was studied using different approaches: a) analysis of (*sat-mod*) differences on hourly and monthly basis for different model domains; b) comparison to observed concentrations at regular air quality (AQ) stations in Bulgaria; c) comparison to AOD at AERONET stations; d) comparison to results of third party advanced modelling systems, or model inter-comparison. These models include the EMEP-MS-CW [10] used regularly by the European Environmental Agency for annual assessment of the air quality and transboundary pollution in Europe, the operational Copernicus regional air quality system CAMS-ENS [11], and the global operational Copernicus model providing also atmospheric chemistry data CAMS-ECMWF [12]. We will discuss below part of these extensive analysis.

Differences (*sat-mod*). The spatial distribution of pollutants was analyzed for the difference between the BgCWFS outputs with assimilation of satellite data (*sat*) and without satellite data assimilation (*mod*). A common behavior was found for the pollutants PM₁₀, NO₂, SO₂, and O₃ in the three model domains. At the time of satellite overpass hour (Hs fixed to 09:00 UTC) a disturbance in the fields appears resampling area source of pollution. These disturbances have different shapes that evolve in time due to atmospheric transport and transformations. The values of the differences decrease with time and became small or disappear by the end of the day (for ozone they remain to the next day).

More details can be found in [13]. Fig.1 shows, as example, the difference (AODsat-AODmod) in domain Balkan Peninsula at different time intervals on a selected day. More maps can be found at the dedicated web page <http://meteorology.meteo.bg/siduaq/about.html>.

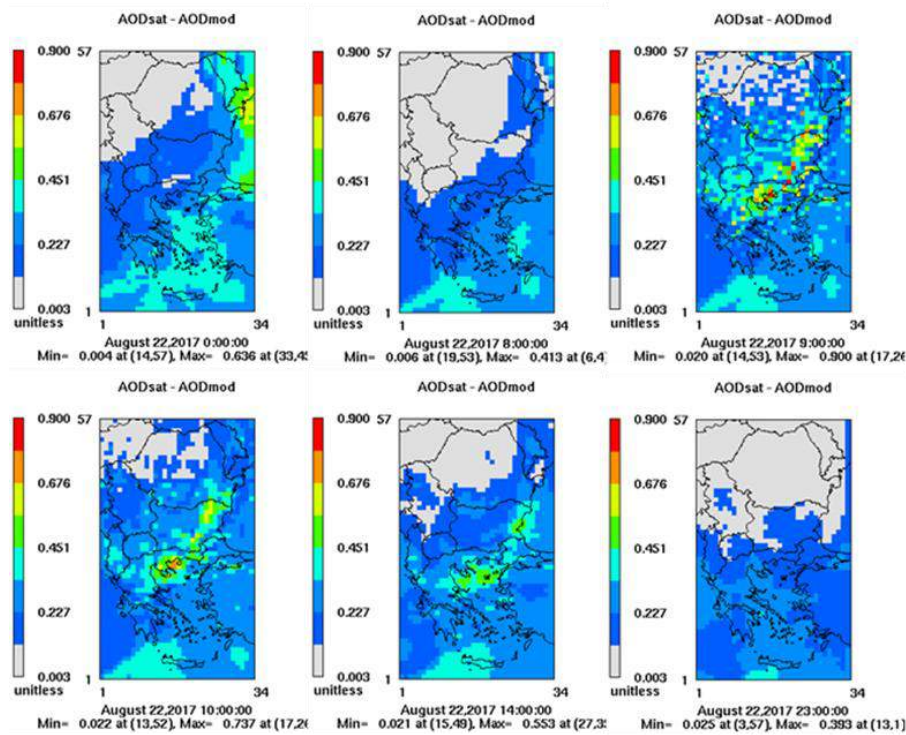


Fig. 1. Time evolution of the AOD difference (*sat-mod*) on 22.08.2017 at h=0, 8, 9(Hs), 10, 14, 23, in model domain Balkan Peninsula

The domain mean values of the differences (*sat-mod*) of surface and columnar parameters are shown in Fig.2 for domain Balkan Peninsula. The values are monthly means for the summer and the winter months. The assimilation of satellite data lead to an increase in all domain mean parameters, except for NO₂ and respectively VCD_NO₂. The increase in the summer month is in general higher than the increase in the winter month. One of the reason is in the higher availability of satellite data in summer. For SO₂ (VCD_SO₂) the effect in the winter month is more pronounced, and is probably linked to higher share of emission sources from energy production.

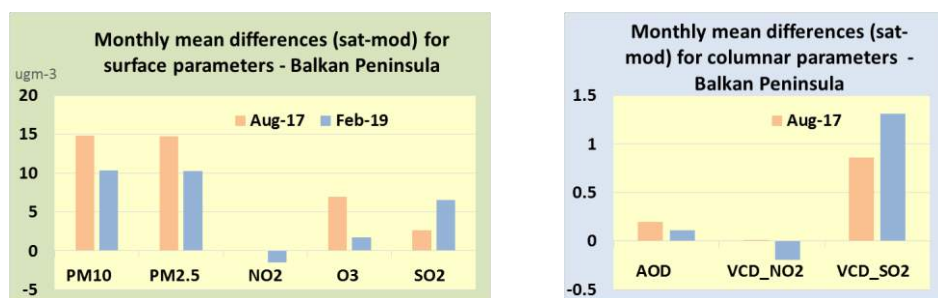


Fig. 2. Monthly differences (*sat-mod*) in domain mean parameters for domain Balkan Peninsula, left – surface parameters (units are $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$), right – columnar parameters (units for VCD are $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$)

Comparison to surface observations. Data from about 34 AQ stations in Bulgaria were used to test the performance of the two versions of BgCWFS obtained for domain Bulgaria. Stations with more than 75% data availability were included, for PM_{2.5} the stations with sufficient data were 8 for the summer month and only 4 for the winter month. The comparison of the monthly mean values (Fig.3) indicates clear improvement of *sat* model results for PM₁₀, PM_{2.5} and SO₂. The normalised mean bias for PM₁₀ is reduced by the *sat* results by more than 30%.The notable underestimation of NO₂, suggested also by the domain mean values, points to deficits in the emissions data in BgCWFS.

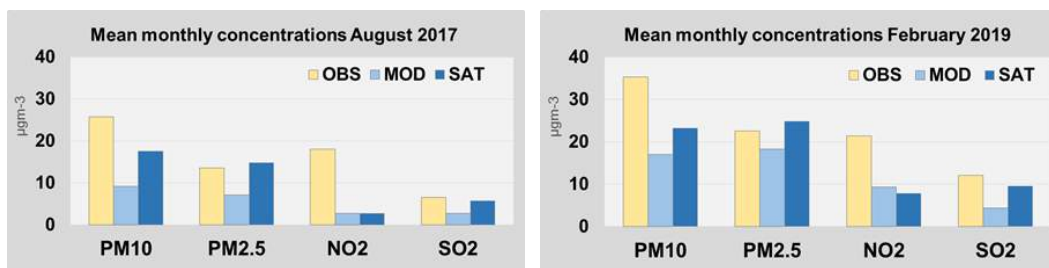


Fig. 3. Mean monthly concentrations (μgm^{-3}) of OBS, and *mod* and *sat* of BgCWFS results for August 2017 (left) and February 2019 (right)

Comparison to CAMS-ECMWF This model inter-comparison was useful in analyzing the spatial distribution of vertical column densities, as these parameters are not measured. Domain mean columnar parameters differ by BgCWFS and CAMS-ECMWF, notably for columnar SO₂, Fig.4. Possible reason is linked to different emissions input. We recall, however, that at surface level the modelled values by BgCWFS with satellite data assimilation (*sat*) are more closed to observational ones. The lower domain mean values for VCD_NO₂ indicate again that the emission sources related to nitrogen oxides, used in BgCWFS, need to be revised.

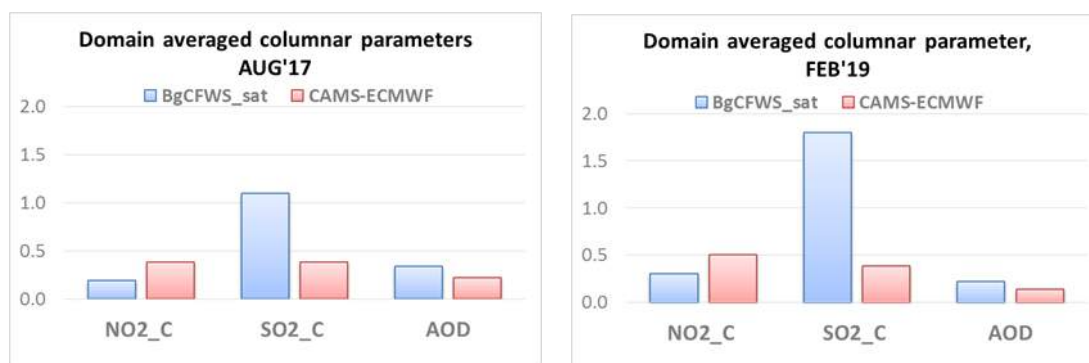


Fig. 4. Monthly mean values of columnar parameters averaged in domain Bulgaria, left – for August 2017; right - for February 2019

More results from the model inter-comparison for particulate matter can be found in [14].

Results from air quality modelling with the upgraded system LAQMS for Plovdiv

The Local Air Quality Management System of the city of Plovdiv (LAQMS), was developed at NIMH and is being working operationally since 2004 [15]. The system has 4 main modules: meteorological pre-processor, emission modules, dispersion modules, and interface for appropriate presentation of modelling results (Expert Module). All these modules were upgraded within the project SIDUAQ for including satellite retrieved data on air pollution down to urban scale, but also for incorporating more precise data for local scale emission sources on fine scale air pollution simulations. The simulations are performed by a combination of emission module for specific group of sources (household heating, traffic, industrial, and all) and two dispersion models complementary to each other – Poltran (an Eulerian type) and AUSTAL2000 (a Lagrangian type, [16]). A characteristic feature of LAQMS is the possibility to calculate the concentrations caused by different emission sources in the city, and from outside. In this way it allows to assess the impact of the different groups of emission sources on the air quality and to take the most appropriate action for air quality improvement.

LAQMS was set-up for 2 domains: domain “Plovdiv region” (horizontal resolution 1kmx1km) and domain “Plovdiv city” (horizontal resolution 250x250m), Fig.5. The systems was linked with the output of BgCWFS. The output of BgCWFS for the two domains consisted in 24 meteorological parameters at surface level and 8 pollutants. For some meteorological parameters 3D data using the 11 lowest vertical levels of BgCWFS were extracted. Using the meteorological pre-processor of LAQMS the hourly data from BgCWFS were reformatted and interpolated to the computational grids of LAQMS. The value of the parameter at a point of the computational grid is obtained as a linear interpolation from the four points of the BgCWFS grid between which the point of the computational grid falls.

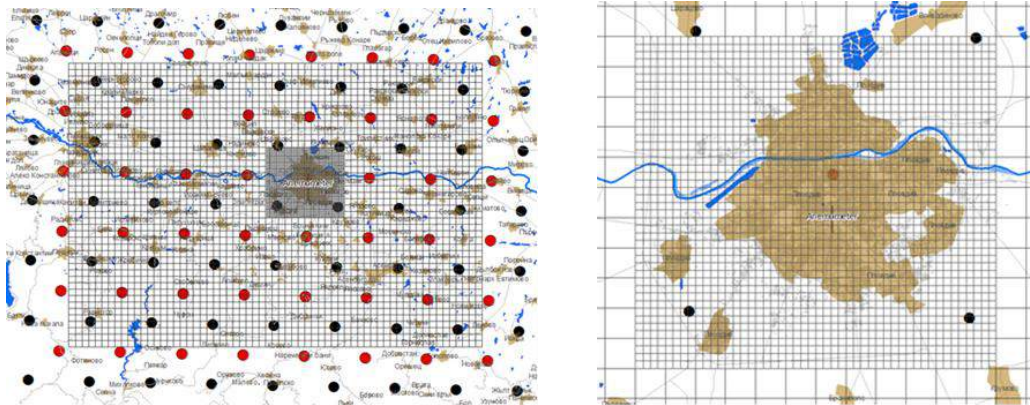


Fig. 5. The computational grids for Plovdiv: domain “region” (left) and domain “city” (right)
 black dots: BgCWFS’s grids points for wind components data, red dots: BgCWFS’s grids points for other meteorological & pollutants variables, shaded areas – settlements

Upgrade of the emissions in LAQMS. The emission module of LAQMS was significantly modified applying a “bottom-up” approach for emissions inventory in ArcGIS environment. This approach is a novelty in urban air pollution modelling in Bulgaria. The emissions from the traffic and the household heating were compiled based on data from traffic camera and answers in 450 questionnaires on type of heating distributed in the city of Plovdiv. Fig.6 shows as example the emissions of PM10 from household heating and road traffic.

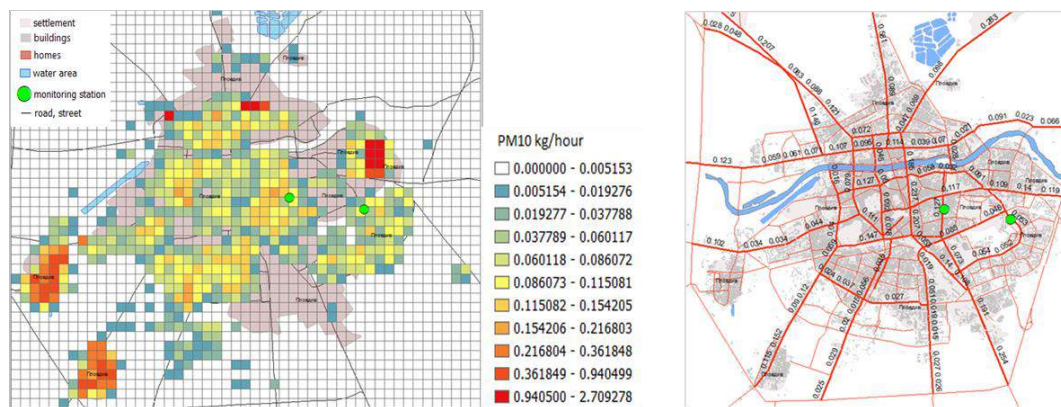


Fig. 6. Emission of PM10 (kg/h) left: from the residential heating, right: from the segments of the road network in the city of Plovdiv

Comparison to surface observations in Plovdiv. The LAQMS model results were compared to data from the two automatic monitoring stations in the city – Kamenitza station (urban background type) and Trakia station (traffic station). Fig.7 and Fig.8 show observed and modelled monthly mean PM10 concentrations for the two months, respectively for each station.

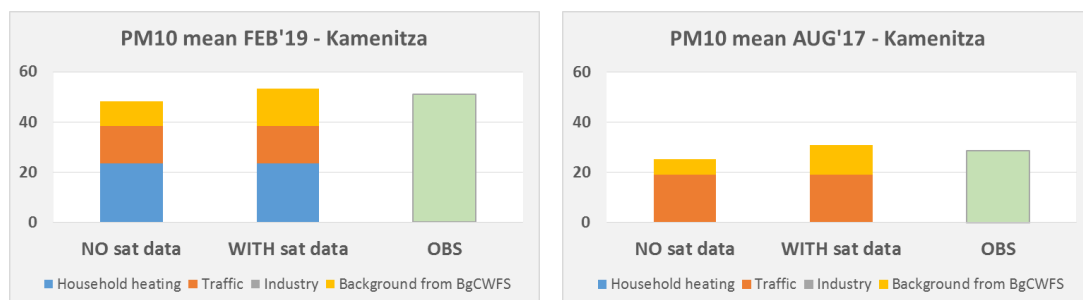


Fig. 7. PM10 concentrations ($\mu\text{g}\text{m}^{-3}$) at Kamenitza station; left – mean for February 2019; right – mean for August 2017; OBS- observed PM10, the modelled values LAQMS+BgCWFS are without (No sat data) and with satellite data assimilation (With sat data); The colors indicate the contribution of different sources to the total modelled PM10

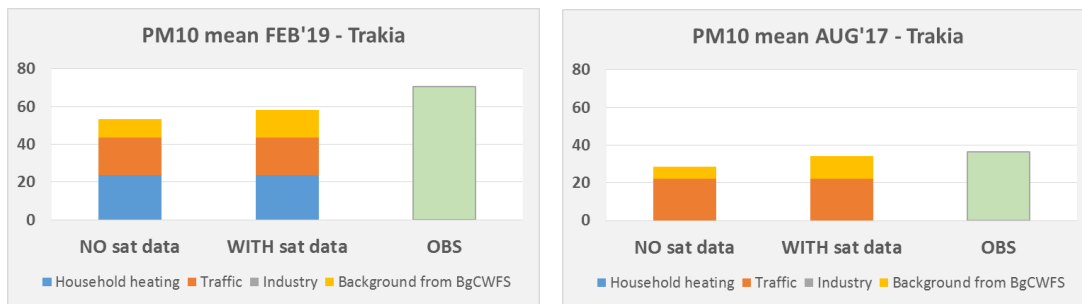


Fig. 8. PM10 concentrations ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) at Trakia station; details as in Fig. 7

The LAQMS results provide the PM10 concentrations due to various emission sources – household heating, traffic, industry, and the background concentrations, provided by BgCWFS. As seen in Figs. 7, 8 the contribution of the household heating to PM10 concentrations is significant in the winter month at both stations, on average it is about 45%. The contribution of the traffic is more evident at Trakia station, especially in the summer month, when it contributes with 78% to the monthly mean PM10 concentrations. The effect of the satellite data assimilation is seen in the contribution of the “background” provided by BgCWFS. This contribution is on average 36% for the summer month, and 25% for the winter month.

In the “satellite” case, the background concentrations are by 50% higher for February 2019 and by 95% higher for August 2017 with respect to “no satellite” case. The relatively big difference in the contribution of the background concentrations in “no satellite” and “satellite” cases indicates the important of the satellite data inclusion in the systems BgCWFS and LAQMS. In fact, the relative error between model and observation, averaged for the two stations and two months, was reduced from modulus value 16% in case without satellite data assimilation to modulus value 9.6% in case with satellite data assimilation.

More results from the simulations with LAQMS can be found on a dedicated web page, <http://meteorology.meteo.bg/siduaq/about.html>.

Upgrade of the Expert Module of LAQMS. The output of the LAQMS system is on hourly basis – hourly maps of pollutant concentrations. On the other hand, most of the air quality standards are defined on daily, monthly, seasonal or yearly basis. The “row” hourly information is not very convenient to use by the air quality decision makers. The task of the Expert module of LAQMS is to post-process the hourly concentrations into values more meaningful for local AQ experts. A notable feature of the LAQMS and its Expert module is their possibility to simulate separately the dispersion of pollutants, emitted by different group emission sources - household heating, traffic, industry. Fig.9 shows, as example, screenshots of the Expert module for mean monthly PM10 concentrations in the city in February 2019 caused by the residential heating, and by the traffic in the city.

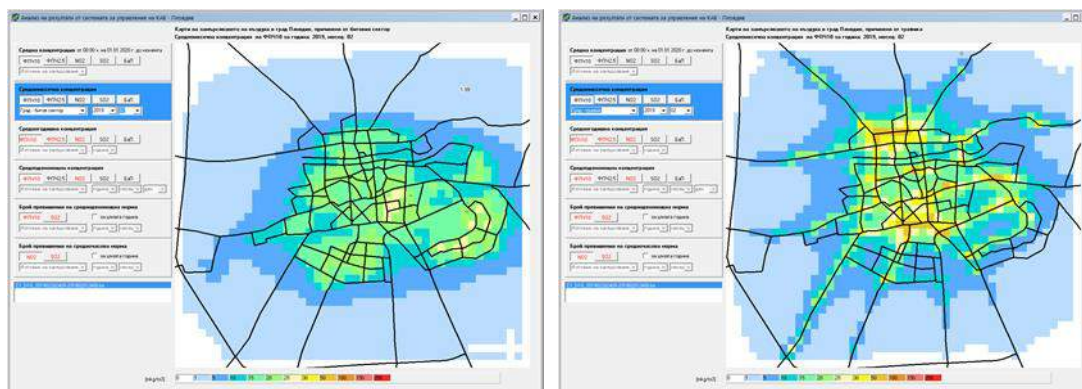


Fig. 9. Mean monthly PM10 surface concentration for Feb 2019; left: from residential heating, right: from the traffic

Inferring PM10, PM2.5 at ground level from TROPOMI-S5p

Collection and processing of TROPOMI-S5p data and data observed at the ground. Fig.10 shows the algorithm for collecting TROPOMI-S5p level 2 AAI data in two different wavelengths – 340–388 nm and 380–354 for the territory of Bulgaria (BG).

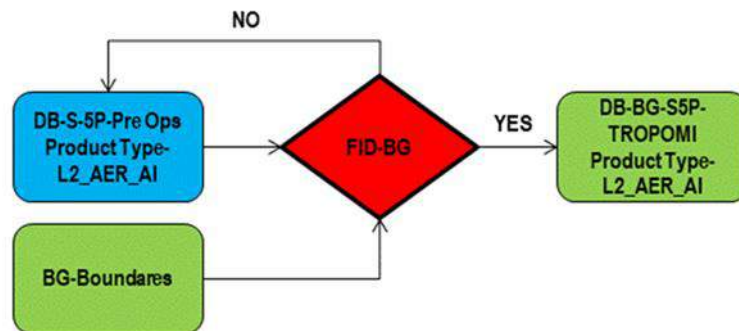


Fig. 10. Algorithm for collecting AAI data from TROPOMI S5p for the territory of BG

DB-S-5P-Pre Ops Product Type-L2_AER_AI –this is the Source Product Type-L2_AER_AI file, available from [17]

FID-BG – controls if L2_AER_AI – files are available for the territory of BG

SDB-AAI-BG Product Type-L2_AER_AI is the created Data Base with L2_AER_AI – files for the territory of BG.

A database was created with all files containing AAI data over Bulgaria for the period from July 2018 to December 2019. The next step in the processing of these data is the conversion from AAI to AOD. The algorithm, shown in Fig.11, is based on empirical relationship [18]. A toolbox model was elaborated in ArcGIS environment for the automatized conversion of the database files from AAI to AOD for the territory of Bulgaria (**SDB-AAI-BG** to **SDB-AOD-BG**).

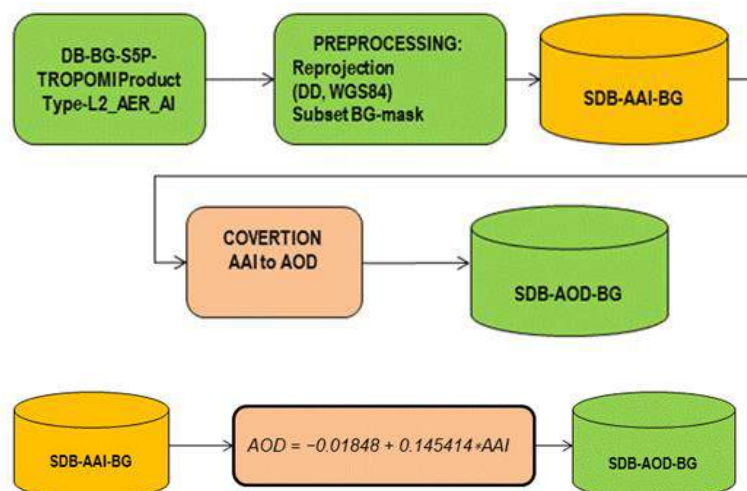


Fig. 11. Algorithm for conversion of AAI to AOD for files for the territory of BG (SDB-AAI-BG to SDB-AOD-BG, DD – Decimal Degree, SDB-AAI-BG – Sub Data Base of AAI for territory of Bulgaria, SDB-AOD-BG - Sub Data Base of AOD for territory of Bulgaria

The data for PM10 and PM2.5 observed at automatic monitoring stations (AMS), maintained by the national Executive Environmental Agency, were downloaded from [19] and processed for extract data at the time of the satellite overpass (the hour closest to the satellite overpass time is used).

Models for converting AOD to PM10 and PM2.5 at ground-level. Different models for AOD to PM10 and PM2.5 conversion were created in a toolbox in ArcGIS, see Fig. 12.

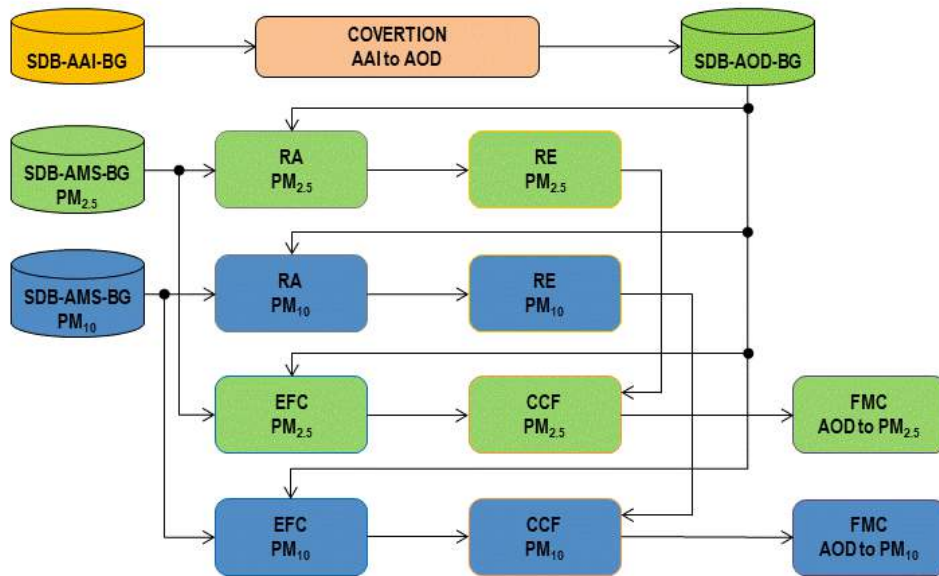


Fig. 12. Block diagram of different models for AOD to PM10 and PM2.5 conversion

The abbreviations refer to:

SDB-AMS-BG PM_{2.5} – SubDataBase with measurements of PM_{2.5} by AMS in BG

SDB-AMS-BG PM₁₀ – SubData Base with measurements of PM₁₀ by AMS in BG

RA PM_{2.5} – Regression Analysis between AOD and PM_{2.5} using SDB-AMS-BG PM_{2.5} and SDB-AOD-BG

RA PM₁₀ – Regression Analysis between AOD and PM₁₀ using SDB-AMS-BG PM₁₀ and SDB-AOD-BG

RE PM_{2.5} – Regression Equation after AOD and PM_{2.5} using SDB-AMS-BG PM_{2.5} and SDB-AOD-BG

RE PM₁₀ – Regression Equation after AOD and PM₁₀ using SDB-AMS-BG PM₁₀ and SDB-AOD-BG

EFC PM_{2.5} – Equation Function Calculation using minimizing of Discrete Function Measurement (DFM) from SDB-AMS-BG PM_{2.5} and Polynomial Function(PF)

EFC PM₁₀ – Equation Function Calculation using minimizing of Discrete Function Measurement (DFM) from SDB-AMS-BG PM₁₀ and Polynomial Function (PF)

CCF PM_{2.5} – Comparison Calculation Function and Regression Equation. Testing of the models and choice for the final model.

CCF PM₁₀ – Comparison Calculation Function and Regression Equation. Testing of the models and choice for the final model.

FMC AOD to PM_{2.5} – Final Model Calculation AOD to PM_{2.5}

FMC AOD to PM₁₀ – Final Model Calculation AOD to PM₁₀.

The criteria for selection of **FMC AOD to PM₁₀ / to PM_{2.5}** / is maximal correlation between the values of the Discrete Function Measurement (DFM) and the respective Model Calculation AOD to PM₁₀ / PM_{2.5}.

$$(1) \quad DFM_{2.5} = \{PM_{2.5}(t_i, \omega_m, \varphi_m)\}$$

$$(2) \quad DFM_{10} = \{PM_{10}(t_i, \omega_m, \varphi_m)\}$$

$$(3) \quad PF_{2.5} = \alpha_0 + \alpha_1 * AOD(t_i, \omega_m, \varphi_m) + \dots + \alpha_k * AOD^k(t_i, \omega_m, \varphi_m)$$

$$(4) \quad PF_{10} = \beta_0 + \beta_1 * AOD(t_i, \omega_m, \varphi_m) + \dots + \beta_k * AOD^k(t_i, \omega_m, \varphi_m)$$

The values of the coefficients $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_k$ and $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ in the expressions (3) and (4) for $PF_{2.5}$ and PF_{10} are obtained from the calculation of the two systems of linear equations with respectively k unknown $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_k$ and $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$. The two systems of linear equations are obtained after the minimization of the Difference Functions $\Delta_{2.5}(\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_k)$ and $\Delta_{10}(\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k)$.

$$(5) \quad MIN \{ \Delta_{2.5}(\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_k) \} = \sum_{i=1}^N \{ DFM_{2.5} - PF_{2.5} \}$$

$$(6) \quad MIN \{ \Delta_{10}(\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k) \} = \sum_{i=1}^N \{ DFM_{10} - PF_{10} \}$$

where:

- ω_m, φ_m are the coordinates of AMS (longitude, latitude in Decimal Degree (DD));
- $\alpha_0 = 25.5696, \alpha_1 = -158.886, \alpha_2 = 323.464$;
- $\beta_0 = 67.89, \beta_1 = -289.86, \beta_2 = 488.08$;
- t_i is the UTC end of time interval for scanning the territory of Bulgaria from S-5P TROPOMI

Upon substitution with the values for the coefficients, the following empiric equations are formed for the AOD to PM2.5 and AOD to PM10 conversion:

$$(7) \quad PM_{2.5}(t_i) = 25.5696 - 158.886 * AOD(t_i) + 323.464 * AOD^2(t_i)$$

$$(8) \quad PM_{10}(t_i) = 67.89 - 289.86 * AOD(t_i) + 488.08 * AOD^2(t_i)$$

Fig. 13 shows the **FMC for AOD to PM2.5 and PM10**.

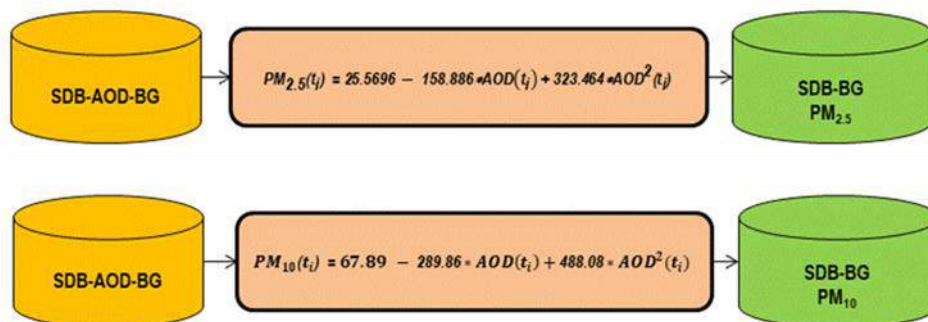


Fig. 13. Conversion model of AOD to PM2.5 and to PM10

The models for AOD to PM10 and PM2.5 calculation were embedded in the ArcGIS toolbox. The comparison between AOD retrieved PM values and observed PM concentrations at AMS was carried out using two of the developed models:

- Empirical polynomial discrete function of 2-nd order (PF); and
- Statistical one (non-linear regression of 2-nd order (STF).

Bi-linear interpolation in space is used for matching to TROPOMI –S5p points and AMS locations. Further, satellite data retrieved by S5P-TROPOMI were not used in case the presence of cloud cover for the territory of Bulgaria was greater than 10%.

Based on the collected data during the period 2018-2020, the correlation coefficient and the errors between the values of PM10 and PM2.5 measured by AMS and those obtained from different models after AOD conversion of data by S5P-TROPOMI were calculated. The correlation coefficient of the sample data for PM2.5 is $R = 0.873 - 0.875$, and for PM10 is $R = 0.863 - 0.866$. The error for PM2.5 is $\pm 8 \mu\text{g m}^{-3}$, for PM10 it is $\pm 10 \mu\text{g m}^{-3}$ with insignificant changes for the two conversion models PF and STF.

Maps for PM10 and PM2.5. Using the developed techniques and models various maps for the spatial distribution of PM10 and PM2.5 in Bulgaria were produced. Fig.14 and Fig.15 show, as example the maps for one summer and one winter day.

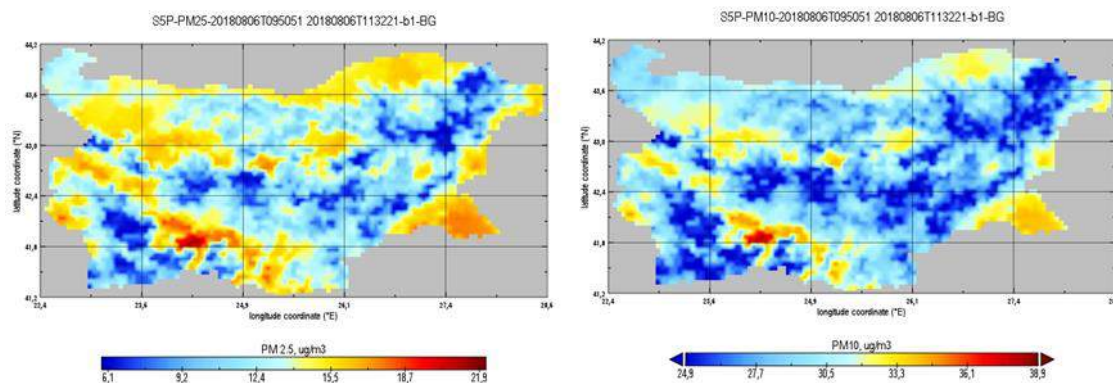


Fig. 14. PM2.5 (left) and PM10 (right) concentrations ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) on 06.08.2018, overpass time 09:50:51-11:32:21 UTC, b1-band: 380 to 340 nm. Note different scales

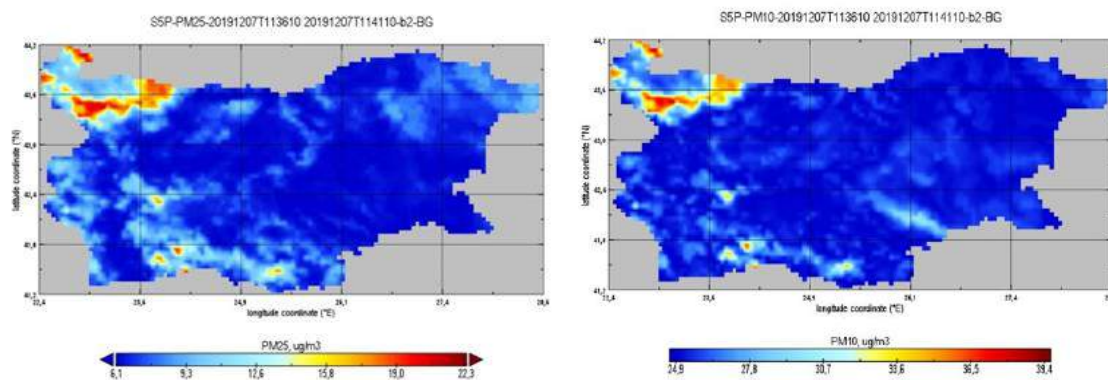


Fig. 15. PM2.5 (left) and PM10 (right) concentrations ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) on 07.12.2019, overpass time 11:36:10-11:41:10 UTC, b2-band: 388 to 354 nm. Note different scales

A very important advantage of the applied techniques is the fact that PM surface concentrations can be obtained over the whole territory of the country with the resolution of TROPOMI data (7 km x 3.5 km). Thus, they could be used to complement standard AQ monitoring data and indicate possible AQ problems where standard measurements are missing. However, the satellite retrieved PM concentrations refer only to the time of the satellite overpass, and data availability in case of clouds can be limited. Thus, long-term data sets are required to provide a basis for reliable AQ assessment using satellite retrieved aerosol data.

Conclusions

SIDUAQ activities addressed, for the first time in Bulgaria, the use of satellite retrieved data on atmospheric chemistry for improvement of air pollution modelling and air quality management at urban scale, for assessment of the spatial distribution of surface particulate matter concentrations, and for analysis of multi-year variability of key pollutants in the country and selected hot-spot areas.

This was achieved by using a combination of various models (meteorological model, chemical transport model, dispersion models, and statistical models), data from different instruments on-board of satellites (GOME-2 and TROPOMI), and ground based air quality observations.

The assimilation of MetOp satellite retrieved data in the Bulgarian Chemical Weather Forecast System and the downscaling of the model output with the Local Air Quality Management System for the city of Plovdiv led to improvement of simulated concentrations of surface pollutants.

The technology created for Plovdiv could be implemented for other Bulgarian cities, making possible more Municipalities in Bulgaria to benefit from the use of satellite air pollution information in the assessment and forecast of key pollutants concentrations. The algorithms can be adapted also to data from other instruments (e.g. TROPOMI-S5p) that have finer spatial resolution and could be used for data assimilation in the smaller domains of BgCWFS (Sofia region, Sofia city).

Acknowledgements

This study was carried out in the framework of the project SIDUAQ, funded by the European Space Agency (ESA) through contract No. 4000124150/18/NL/SC under the PECS (Plan for European Cooperating States). The view expressed herein can in no way be taken to reflect the official opinion of the European Space Agency. Deep gratitude is due to ESA services providing data from GOME-2 instrument on board of MetOp-A, B and C satellites, as well as from TROPOMI-S5p. The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, the Copernicus Atmosphere Monitoring Service and the Meteorological Synthesizing Centre-West of the European Monitoring and Evaluation Programme and Met Norway are acknowledged for providing analysed and forecasted data on meteorological parameters and atmospheric chemistry. The authors are grateful also to US EPA for providing WRF-CMAQ models, and to TNO for the emission inventory at European scale used in BgCWFS. We are also thankful to NASA and AERONET for providing archives of data.

References:

1. Georgieva, E., D. Atanassov, T. Spassova, E. Batchvarova, D. Syrakov, M. Dimitrova, R. Nedkov, B. Veleva, Satellite Information Downscaled to Urban Air Quality in Bulgaria - Project description, *Bulgarian Journal of Meteorology and Hydrology*, 23, No.2, 2019, pp. 47–60.
2. Dimitrova, M., P. Trenchev, E. Georgieva, N. Neykova, R. Neykova, R. Nedkov, D. Gochev, D. Syrakov, B. Veleva, D. Atanassov, T. Spassova, Seasonal changes of aerosol pollutants over Bulgaria, *Proceedings of the 15-th International Scientific Conference Space, Ecology, Safety, SES 2019*, (Print ISSN 2603-3313; online ISSN 2603-3321), 2019, pp. 241–252.
3. Dimitrova, M., P. Trenchev, D. Gochev, Spatial and Seasonal distribution of NO₂ pollution over Bulgaria based on Tropomi measurement, *Proceedings of the 16-th International Scientific Conference Space, Ecology, Safety, SES 2020*, (Print ISSN 2603–3313; online ISSN 2603–332), 2020, pp. 279–282.
4. Syrakov, D., M. Prodanova, K. Slavov, I. Etropolska, K. Ganev, N. Miloshev, T. Ljubenov,, Bulgarian System for Air Pollution Forecast. *Journal of International Scientific Publications Ecology & Safety*,7(1),2013, pp. 325–334.
5. Syrakov, D., M. Prodanova, I. Etropolska, K. Slavov, K. Ganev, N. Miloshev, T. Ljubenov, A Multi- Domain Operational Chemical Weather Forecast System. In: Lirkov I. et al. (eds.) *Large-Scale Scientific Computing*, LNCS 8353, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014, pp. 413–420.
6. Skamarock, W.C., and J.B. Klemp J.B., A time-split non-hydrostatic atmospheric model, *J. Comput. Phys.*, 227, 2008, pp. 3465–3485.
7. Byun, D., and K. L. Schere, Review of the governing equations, computational algorithms, and other components of the Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) modeling system. *Appl. Mech. Rev.*,59, 2006, pp. 51–77.
8. Syrakov, D., M. Prodanova, E. Georgieva, M. Dimitrova, T. Spassova, D. Atanassov, B. Veleva, R. Nedkov, Aerosol optical depth calculations using the Bulgarian Chemical Weather Forecast System, *Bulgarian Journal of Meteorology and Hydrology*, 23, No.2 , 2019, pp. 31–46.
9. Curci, G., FlexAOD: A Chemistry-transport Model Post-processing Tool for A Flexible Calculation of Aerosol Optical Properties, *Proceedings of the 9th International Symposium on Tropospheric Profiling*, L'Aquila, Italy, September 2012, ISBN/EAN: 978-90-815839-4-7, 2012.
10. URL1: https://emep.int/mscw/mscw_moddata.html
11. URL2: <https://www.regional.atmosphere.copernicus.eu/>
12. URL3: <https://apps.ecmwf.int/datasets/data/cams-nrealtime/levtype=sfc/>
13. Syrakov, D., M. Prodanova, E. Georgieva, Satellite data assimilation of air quality parameters in Bulgaria, in Eds G.Gadzhev and N.Dobrinskova, *Proceedings of the 1st International Conference on Environmental Protection and Disaster RISKS*, Az-buki National Publishing House, Sofia, ISBN 978-619-7065-38-1, Part One, 2020, pp. 44–52.
14. Kirova, H., N. Neykova, E. Georgieva, How well do the air quality models EMEP and CAMS reproduce particulate matter surface concentrations in Bulgaria. in Eds G. Gadzhev and N. Dobrinskova, *Proceedings of the 1st International Conference on Environmental Protection and Disaster RISKS*, Az-buki National Publishing House, Sofia, ISBN 978-619-7065-38-1, Part One, 2020, pp. 101–111.
15. Atanassov, D., S. Spassova, D.Grancharova, S. Krastev, T. Yankova, L.Nikolov, M.Chakarova, P.Krasteva, N.Genov, J.Stamenov, E. Dimitrov, Air Pollution Monitoring and Modeling System of the Town of Plovdiv (phase I), *Journal of Environmental Protection and Ecology*, 7, No.2, 2006, pp. 260–268.
16. URL4: <http://www.austal2000.de/en/home.html>
17. URL5: <https://s5phub.copernicus.eu/dhus/#/home>
18. ATBD, 2018: TROPOMI ATBD of the UV Aerosol Index S5P-KNMI-L2-0008-RP issue 1.1, 2018-06-15 – Released <https://sentinel.esa.int/documents/247904/2476257/Sentinel-5P-TROPOMI-ATBD-UV-Aerosol-Index>
19. URL6: <https://discomap.eea.europa.eu/map/fme/AirQualityExport.htm>

Seasonal monitoring of Durankulak Lake using Sentinel 2 Data

Iva Ivanova, Nataliya Stankova, Mariana Zaharinova

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

Keywords: satellite data, wetlands, monitoring, dynamics

Abstract: Durankulak Lake is part of the European Ecological Network of NATURA2000 and a Ramsare Convention Site for the wetlands. The protected site covers an area of 446.5 ha. It is one of the well-preserved coastal wetlands in Bulgaria with international importance for the protection of over 260 endemic, rare and endangered species of plants and animals. One of the problems of the lake, as well as of many other wetlands in Bulgaria is the excessive reed overgrowth. Regular monitoring is necessary for protection and maintenance of this wetland therefore satellite data have a great advantage. This study monitored the lake for the period - December 2019 - July 2020, including three seasons - winter, spring and summer. Satellite data from Sentinel 2A and Sentinel 2B were used. One satellite image was used for each month. Pre-processing of the satellite data was made and spectral indices were generated. The results obtained show the development and condition of the vegetation in Durankulak Lake. NDVI was generated in order to assess the vegetation in the lake. The orthogonal transformation model called Tasseled Cap Transformation (TCT) has also been used. This is a model for classifying and analyzing the processes related to the dynamics of changes, affecting the main components of the earth's surface: soil, vegetation and water. The results show the development of Durankulak Lake for the period of the observed three seasons, which assess its condition and changes that occur in a short monitored period.

Сезонен мониторинг на езерото Дуранкулак, с използването на данни от Сентинел 2

Ива Иванова, Наталия Станкова, Мариана Захарина

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

Ключови думи: сателитни данни, влажни зони, мониторинг, динамика

Резюме: Езерото Дуранкулак е част от Европейската екологична мрежа на NATURA2000. То е и част от Рамсарската конвенция за влажните зони. Защитеният обект обхваща площ от 446,5 хектара. Това е една от най-добре запазените крайбрежни влажни зони в България с международно значение за опазването на над 260 ендемични, редки и застрашени видове растения и животни. Един от проблемите на езерото, както и на много други влажни зони в България, е прекомерното обрастване на тръстика и намаляване на откритите водни площи. Необходимо е извършването на редовен мониторинг за опазването и поддържането на тази влажна зона. Спътниковите данни имат голямо предимство за това. Настоящото проучване наблюдава езерото за периода от декември 2019 г. до юли 2020 г. Това включва три сезона - зима, пролет и лято. Използвани са спътникови данни от Sentinel 2A и Sentinel 2B. За всеки месец е използвано по едно спътниково изображение, според достъпните налични. Направена е предварителна обработка на спътниковите данни, след което са използвани спектрални индекси. Техните резултати показват развитието и динамиката на езерото Дуранкулак. Индексът NDVI е използван за оценка на растителността в езерото. Използван е и модел на ортогонална трансформация, наречен Tasseled Cap Transformation (TCT). Това е модел за класифициране и анализ на процесите, свързани с динамиката на промените, засягащи основните компоненти на земната повърхност: почва, растителност и вода. Резултатите показват развитието на езерото Дуранкулак за периода от наблюдаваните три сезона, което оценя състоянието му и промените, които се случват за кратък наблюдаван период.

Introduction

Durankulak Lake is part of the European Ecological Network of NATURA2000. It is a Ramsare Convention Site. The protected site covers an area of 446.5 ha. It is one of the well-preserved coastal wetlands in Bulgaria with international importance for the protection of over 260 endemic, rare and endangered species of plants and animals.

Durankulak Lake Protected area is situated in the northeastern part of Bulgaria, about 6 km from the Bulgarian-Romanian border and 15 km north of the town of Shabla. It was announced by Order No. 123 / 21.02.1980 of the Committee for Protection of the Natural Environment. It has a management plan developed by the Ministry of Environment and Water in 2002. Importance of the area [1]:

- Since the lake is located on the Via Pontica migration route and close to the Danube delta, it is one of the most important stations for birds on the Bulgarian Black Sea coast;
- Every year the wetland maintains internationally significant numbers of wintering water birds. The place provides refuge to 7 globally endangered bird species. Together with the Shabla Lake Complex, Durankulak Lake forms the largest modern wintering ground for the globally endangered species of red-breasted goose (*Branta ruficollis*) and part of one of the three places in Europe with the highest concentrations of the great white-fronted goose (*Anser albifrons*).



Fig. 1. Location of Durankulak Lake, Sentinel 2, 2019

Important habitat types for birds in Durankulak Lake which are the subject of the present study are [1]:

- Open water areas in the Large water body of the protected area;
- Open water areas in Kartaliisko (Orlovo) marsh;
- Reed massifs / water vegetation (Fig. 2).

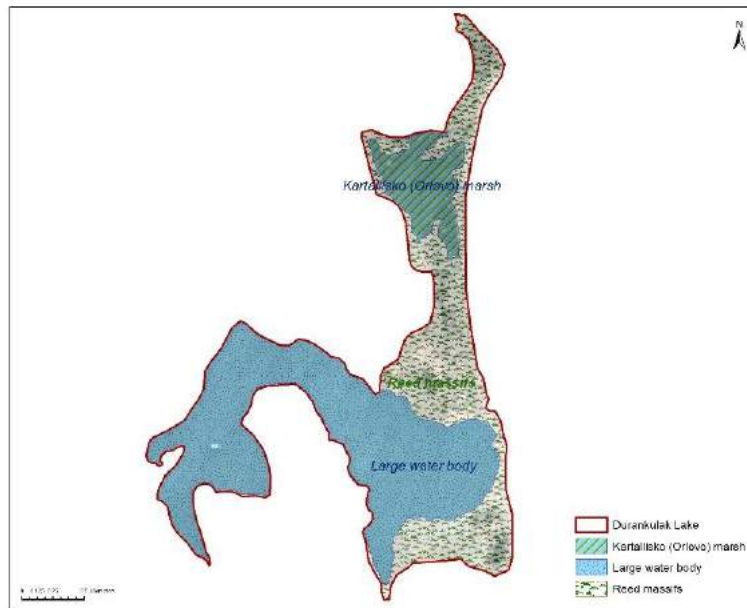


Fig. 2. Important habitat types map in Durankulak Lake Protected area

The table below shows the bird species that inhabit the respective habitats.

Table 1. Important bird habitat types in Durankulak Lake

Habitats	Character of residence		
	<i>Nesting</i>	<i>Migration</i>	<i>Wintering</i>
Open water areas in the large water body of the Durankulak Lake		<i>Ph. pygmeus</i> <i>Chlidonas sp</i>	<i>Branta ruficollis</i> <i>Anser albifrons</i> <i>Ph. pygmeus</i> <i>Cygnus olor</i> <i>Cygnus cygnus</i> <i>An. platyrhynchos</i>
Open water areas in Kartaliisko (Orlovo) marsh		<i>Ph. pygmeus</i> <i>P. onocrotalus</i> <i>Aythya nyroca</i> <i>Chlidonias sp.</i>	<i>Branta ruficollis</i> <i>Anser albifrons</i> <i>Ph. pygmeus</i> <i>Cygnus olor</i> <i>Cygnus cygnus</i> <i>An. platyrhynchos</i>
Reed massifs / water vegetation /	<i>Ixobrychus minutus</i> <i>Botaurus stellaris</i> <i>Aythya nyroca</i> <i>Circus aeruginosus</i> <i>Porzana porzana</i> <i>Porzana parva</i> <i>Porzana pusilla</i> <i>Acr. agricola</i> <i>Acr. scirpaceus</i> <i>Emb. schoeniclus</i>	<i>Ph. pygmeus</i> <i>Botaurus stellaris</i> <i>Egretta alba</i> <i>Ardea cinerea</i> <i>Ardea purpurea</i> <i>Circus aeruginosus</i> <i>Circus cyaneus</i> <i>Porzana porzana</i> <i>Porzana parva</i> <i>Porzana pusilla</i>	<i>Phalacrocorax pygmeus</i> <i>Botaurus stellaris</i>

The analysis and comparison of the literature data and the results of the latest hydro chemical and hydro biological studies in the large water body of the protected area and in the Kartaliisko marsh clearly show the eutrophic to hypertrophic nature of the studied water objects. Natural succession has accelerated significantly over the last 30 years from anthropogenic activities. The natural balance in Durankulak Lake and in the Kartaliisko Marsh has been disturbed and shifted to an accelerated eutrophication process. Urgent restoration measures are needed to restore the stability of the aquatic ecosystem and avoid its rapid degradation. The main threats affect some of the most vulnerable bird species (Table 1) [2].

Some species of birds that nest in the lake (*Aythya nyroca*, *Botaurus stellaris*, etc.) depend on the small open water areas and channels among the reed massifs, and the spills in the periphery of the waterfowl massifs (as nesting and feeding sites). Increased eutrophication leads to clogging and overgrowth of these channels and open water areas, and a decrease in water level to the absence of spills. Populations of all nesting birds in the wetland are concerned about the excessive presence of humans and grazing livestock.

Remote sensing methods are a good approach for establishing the current state and season dynamics of the lake.

Data and Methods

Satellite data from the Sentinel 2A and Sentinel 2B satellite platform of the European Space Agency's Copernicus programme were used for the present study [3, 4]. Input data for the period - December 2019 to July 2020 are shown in Table 2.

Table 2. Input data

Year	Satellite	Date
2019	Sentinel 2A	09/12
2020	Sentinel 2B	02/02
2020	Sentinel 2B	28/03
2020	Sentinel 2A	07/04
2020	Sentinel 2A	27/04
2020	Sentinel 2A	26/06
2020	Sentinel 2A	16/07

Satellite image processing includes:

Primary processing of satellite data:

- Creation of composite images, necessary for further processing and analysis;
- Vectorization of the protected area and the main types of habitats in the lake (according to NATURA 2000 data);
- Crop the protected area for each of the satellite images;
- Calculation of water areas in the lake.

Secondary processing of satellite data:

- NDVI calculation. Based on the input composite images from Sentinel 2, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) was generated [5, 6, 7]. NDVI in addition to the vegetation assessment and for the accurate identification of reed massive in the Durankulak Lake was used:

$$(1) \quad NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}}$$

ρ_{NIR} = the spectral reflectance measurements acquired in the near infrared band

ρ_{RED} = the spectral reflectance measurements acquired in the red band

- For a precise assessment of the dynamics of the seasonal state of Durankulak Lake, a model of TCT (Tasseled Cap Transformation) images were obtained as results for implementation of the proposed approach. After the TCT model, the decomposition of each of the Tasseled Cap components – Brightness (BR), Greenness (GR) and Wetness (W) was made, based on which the spatial distribution graphs for each of the components were plotted [8];
- A spatial distribution of the three components of the earth's surface was made. It is shown in the form of graphs by months (for the data from the satellite Sentinel 2). They are obtained from the model for the orthogonal transformation [8, 9].

Results

- Satellite images of Durankulak Lake for the period December 2019 – July 2020.

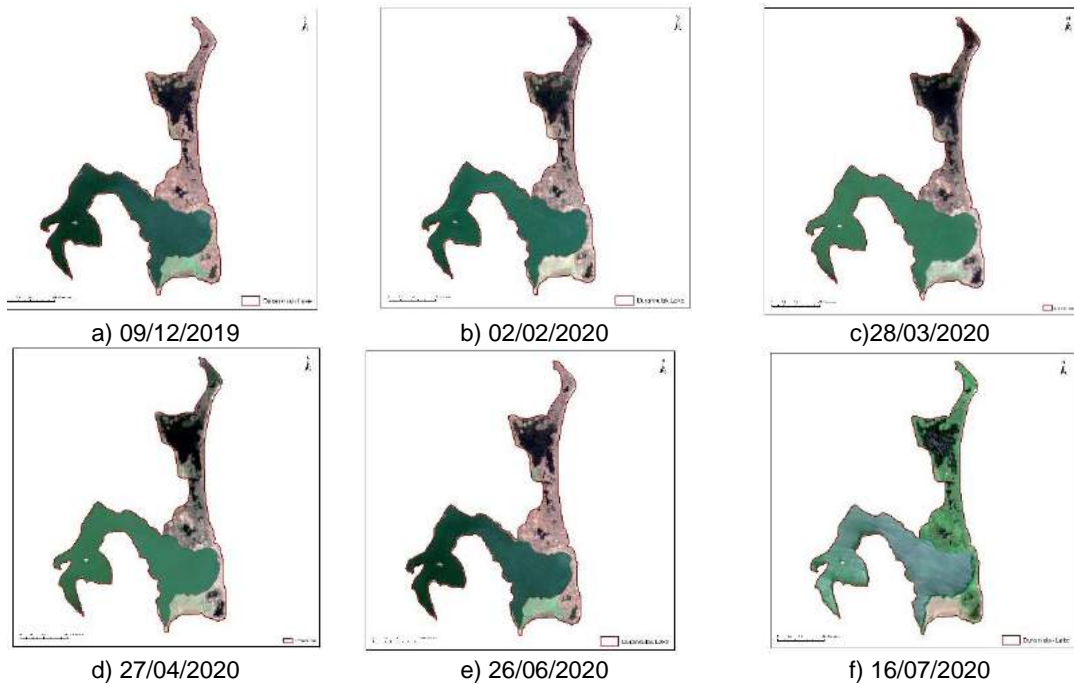


Fig. 3. Satellite images of Durankulak Lake, Sentinel 2

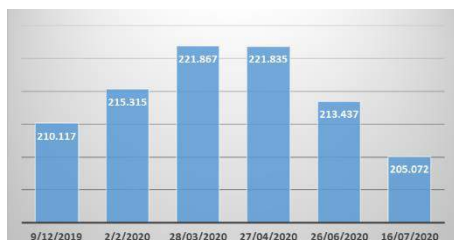
The real state of Durankulak Lake from the satellite images (Sentinel 2) are shown on the figures above. The images are in the visible spectral bands, which serve for subsequent assessments and analyzes of the site.

- Assessment of water areas in Durankulak Lake

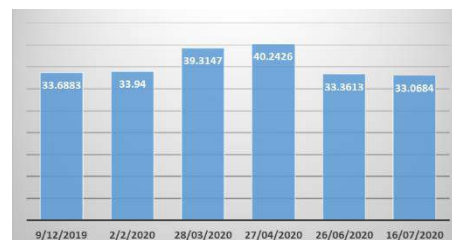
An assessment of the areas of the two open water bodies in Durankulak Lake was made - the Large water body and the Kartaliisko marsh. The assessment after precise vectorization of the water areas was made. The table below shows their areas for the observed months, and the results are shown in the following graphs (Fig. 4).

Table 3. Areas of the open water bodies in Durankulak Lake

Date	Large water body	Kartaliisko (Orlovo) marsh
09/12/2019	210.117 ha	33.6883 ha
02/02/2020	215.315 ha	33.94 ha
28/03/2020	221.867 ha	39.3147 ha
27/04/2020	221.835 ha	40.2426 ha
26/06/2020	213.437 ha	33.3613 ha
16/07/2020	205.072 ha	33.0684 ha



a) Large water body areas



b) Kartaliisko marsh areas

Fig. 4. Areas of open water bodies in Durankulak Lake

The figures above show that the areas of both water bodies in the protected zone begin to increase in March, remaining the same in April. Respectively, the Large water body area in March is 221,867 ha, in April it remains almost the same. The Kartaliisko marsh area increases from December 2019, where it is 33,688 ha to 40,242 ha in April. In the following months (June and July) there is a decrease in the area of both open water bodies. Respectively, for these months the area of the Large water body decreases to 205,072 ha per month, and the Kartaliisko marsh to 33,068 ha. Accordingly, the reduction of water areas leads to the gradual development of vegetation in them, represented mainly by reeds.

- NDVI;
NDVI in Durankulak Lake is calculated on the basis of composite satellite images. The results are shown in the figures below:

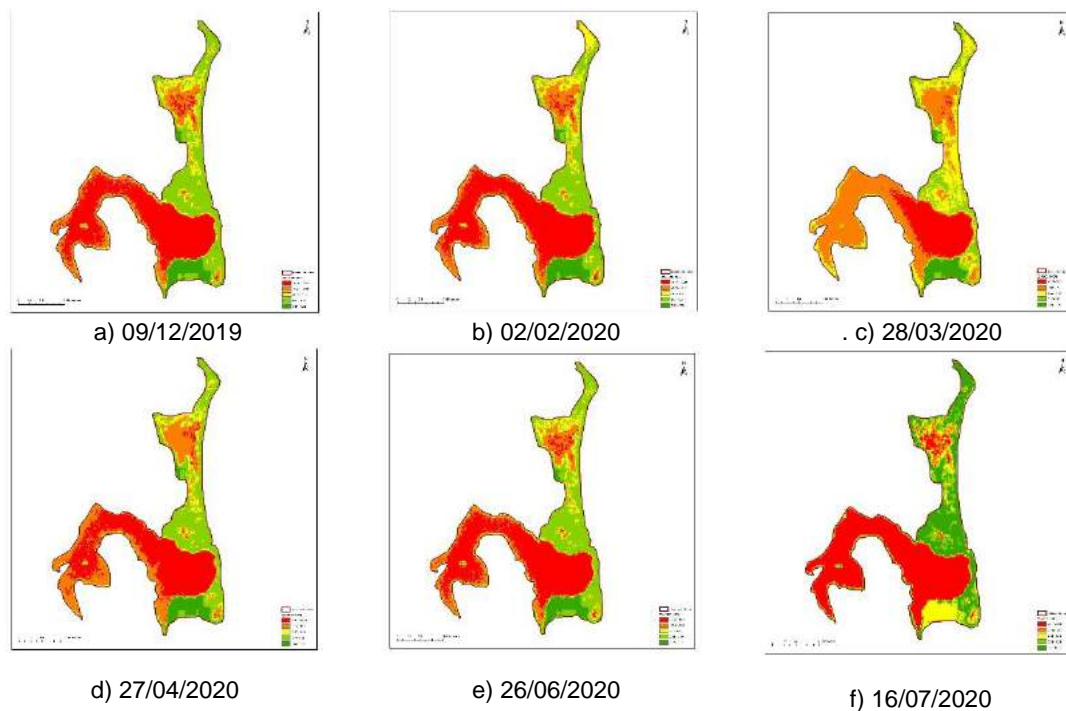
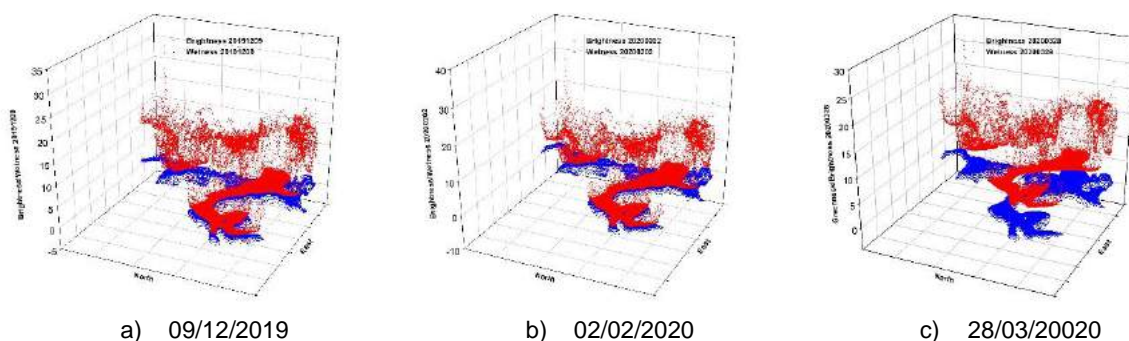


Fig. 5. NDVI index of Durankulak Lake

NDVI of Durankulak Lake for the period December 2019 - July 2020 was shown on the figures above. There is a clear trend towards a decrease in water area and overgrowth, especially in the Kartaliisko marsh (Fig. 5 b). This was noticed in March, when the water area of the swamp was still large. The most significant overgrowth was observed in June and July (Fig. 5 e, f). For the Large water body the appearance of vegetation was also observed in the months of March and April on the periphery of the area, which gradually decreases in the following months. This also leads to a reduction of its open water area. This may be due to the drought during the summer months.

- Spatial distribution of the tested components Brightness and Wetness
The decomposition of the Tasseled Cap components – Brightness (BR) and Wetness (W) are shown in the following figures:



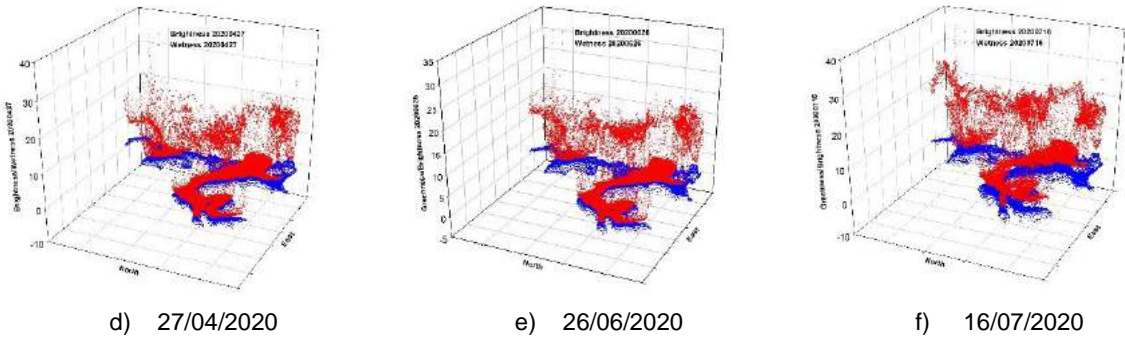


Fig. 6. Spatial distribution of Brightness and Wetness

From the Spatial distribution of the Tasseled Cap components – Brightness and Wetness the following can be seen: During the first months observed, the spatial distribution between the two components remained relatively unchanged, in the months of December and February. In March there is a gradual dominance of the Brightness (soil) component, which maintained in the following months, most significantly in July (Fig. 6 f). In this period the water areas significantly decreased.

- Spatial distribution of the tested components Greenness and Wetness
The decomposition of the Tasseled Cap components –Greenness (GR) and Wetness (W) in the following figures are shown:

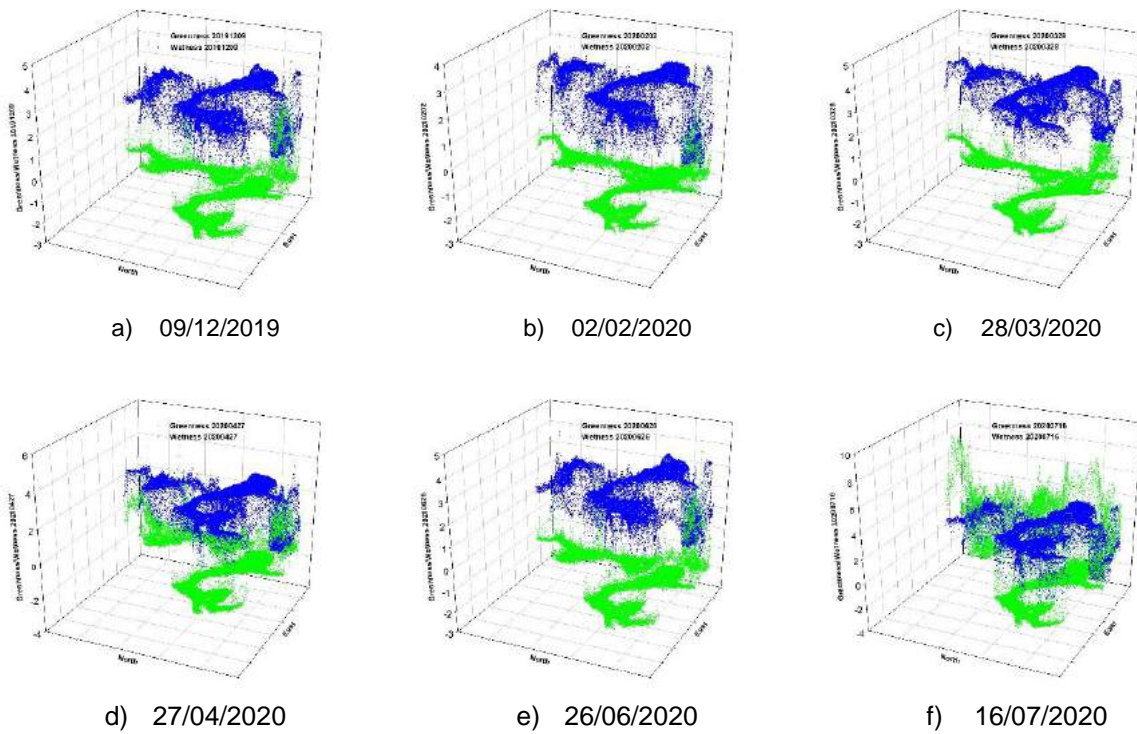


Fig. 7. Spatial distribution of the tested components Greenness and Wetness

From the Spatial distribution of the Greenness and Wetness the increasing of Greenness was noticed mostly in April (Fig. 7d). The Greenness component continues to increase in the following months. In July, the open water areas in the territory of the Durankulak Lake significantly decreased and the Greenness (vegetation) component dominated over the water (Fig. 7f).

- Spatial distribution of Greenness by months
The distribution of the Greenness (vegetation) component, which is compared by month for the observed period from December 2019 to July 2020 was shown on the figures below:

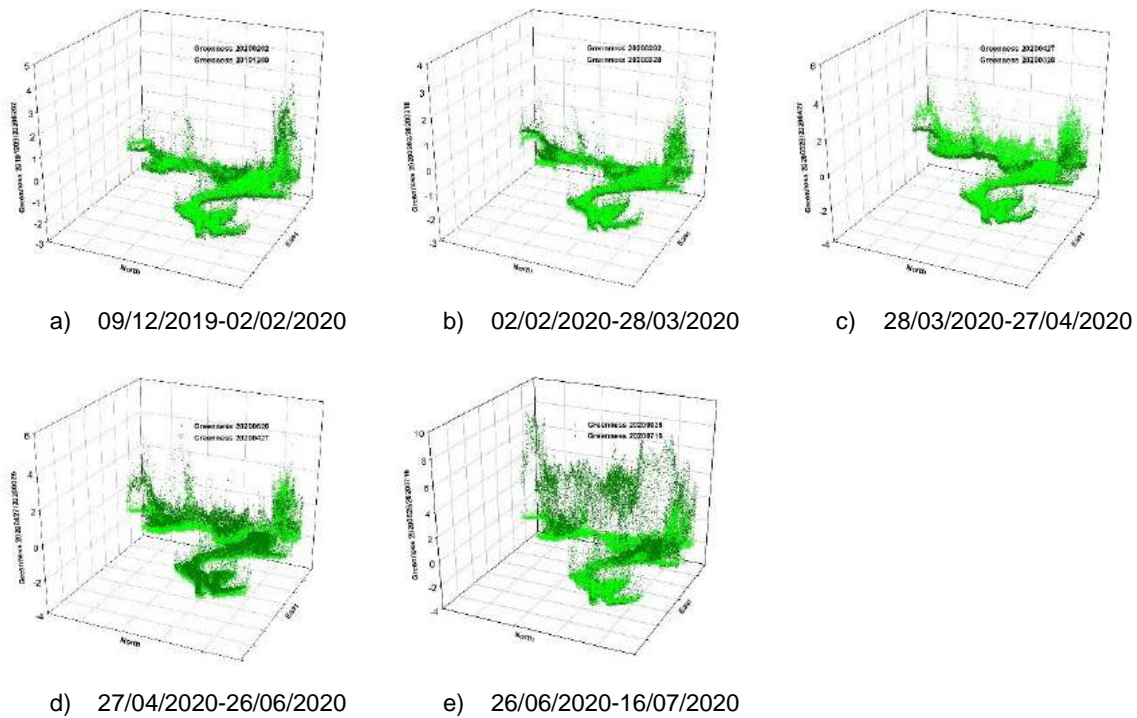


Fig. 8. Spatial distribution of Greenness component by months

The comparison of the Greenness component from the TCT transformation model by months for the observed period shows the development of vegetation in the Durankulak Lake territory. For the period December 2019 - March 2020 their distribution by months was constant (Fig. 8 a-b). For the months of March / April (Fig. 8 c) a predominance of vegetation in April was observed. For the next period - the months of June and July this trend is maintained with the dominance of vegetation for each subsequent month (Fig. 8 d, e).

Conclusion

The study monitoring shows the seasonal dynamic of Durankulak Lake. The results obtained show that there is a significant overgrowth of the open water areas in the territory of the Durankulak Lake and the reduction of their areas. This is established mostly in the months of April-July, when it is the active phase of vegetation. This leads to expansion of the reed massifs in the lake and to gradual eutrophication of the water bodies that reduces their area. This trend, if observed every year, will lead to a gradual reduction of the open water areas and hence to the loss of valuable habitats. It is necessary to carry out regular seasonal monitoring of the lake so that some conservation measures can be taken. The vegetation observations are mainly for higher aquatic vegetation represented mainly by reeds. The presence of biogenic nutrients in the water comparable to the presence of reeds vegetation will be necessary observed in future studies.

These results are important in order to assess what measures are needed to prevent reed overgrowth in the lake in the future. The present study shows a methodology for monitoring the seasonal state of Durankulak Lake, which can help to better management the territory and preserve vulnerable habitats tips.

References:

1. Protected ares "Durankulak Lake" – Management plan, 2002 – 2011, MOSV
2. Davidova, R., V. Vasilev, Seasonal Dynamics of the Testate Amoebae Fauna (Protozoa: Arcellinida and Euglyphida) in Durankulak Lake (Northeastern Bulgaria), *Acta zool. bulg.*, 65 (1), 2013: 27–36
3. Kaplan, G., U. Avdan, MAPPING AND MONITORING WETLANDS USING SENTINEL-2 SATELLITE IMAGERY, *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume IV-4/W4, 2017
4. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>
5. Rouse, J. W., Haas R. H., Schell J. A., Deering D. W. and Harlan J. C. (1974) - Monitoring the vernal advancement and retrogradation (greenwave effect) of natural vegetation. NASA/GSFC Final report, Greenbelt, MD, USA
6. Ivanova, I., I. Gigova, T. Spassova, N. Stankova, DURANKULAK LAKE ACTUAL STATE AND MONITORING USING SENTINEL 2 SATELLITE DATA, *Ecological Engineering and Environment Protection*, No 2, 2019, p. 53–58
7. Meisam Amani, Bahram Salehi, Research , Sahel Mahdavi, Jean Granger, SPECTRAL ANALYSIS OF WETLANDS IN NEWFOUNDLAND USING SENTINEL 2A AND LANDSAT 8 IMAGERY, *IGTF 2017 – Imaging & Geospatial Technology Forum 2017*
8. Nedkov, R., Orthogonal transformation of segmented images from the satellite Sentinel-2, *Comptes rendus de l'Académie bulgare des Sciences*, Tome 70, No 5, 687–692 (2017).
9. Avetisyan, D., R. Nedkov, (2018) "Modification in landscape horizontal structure, induced by changing environmental conditions: a case study of Haskovo region (Southeastern Bulgaria)," *Proc. SPIE 10790, Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications IX*, 107901K (9 October 2018); doi: 10.1117/12.2325398

Приложение на сателитни SAR данни за установяване деформации на земната кора след земетресения

Христо Николов¹, Мила Атанасова², Валентина Протопопова²

¹Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките

²Национален институт по геофизика, геодезия и география – Българска академия на науките
e-mail: mila_at_zl@abv.bg, hristo@stil.bas.bg

Ключови думи: DInSAR, природни бедствия, земетресения

Резюме: Сателитнобазираните радарни апартурни комплекси предоставят данни, на базата на които е възможно да се получи информация за размера на настъпили движения на земната повърхност от порядъка на сантиметри. Подобна информация е от изключително значение за оценка на последиците от природни бедствия или такива с антропогенен произход. Тъй като земетресения се случват постоянно и не е възможно да бъдат предсказани всяка допълнителна информация относно обхвата на конкретни сеизмично събитие е от изключителна важност за местните и национални власти, които са отговорни за отстраняване на щетите причинени на населението, инфраструктурата и ландшафта след такива събития. В това изследване са представени резултатите получени след съвместна обработка на два набора SAR данни, допълнени и с данни от други източници, на чиято основа се формират две интерферометрични изображения, които предоставят информация за настъпилите деформационни процеси в райони от земната повърхност след поредица от земетресения, станали на три различни места на Балканския полуостров - едният в близост до остров Кос и град Бодрум, другият близо до остров Закинтос и третият на Йонийското крайбрежие на Албания. Получените карти, отразяващи деформациите на земната кора след споменатите събития, се основават на данни от възходяща и низходяща орбита на спътника Sentinel-1, който е част от програмата „Коперник“ на ЕС за наблюдение на Земята. Получените резултати за трите изследвани събития включени в това проучване доказаха своята надеждност тъй като бяха сравнени с in-situ измервания. Тази констатация дава основание да се твърди, че на базата на получените резултати е възможно на компетентните национални органи да се предостави надеждна информация относно настъпилите деформации на земната кора в региони, които са проблематични за директни теренни проверки, които имат за задача да установят настъпилите деформации.

Application of satellite SAR data to detect deformations of the Earth's crust after earthquakes

Hristo Nikolov¹, Mila Atanasova², Valentina Protopopova²

¹Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences

²National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: mila_at_zl@abv.bg, hristo@stil.bas.bg

Keywords: DInSAR, natural disasters, earthquakes

Abstract: The data provided by satellite-based active radar instruments after appropriate thematic processing are transformed into information that reflects the amount of movements on the Earth's surface of the order of centimeters. Such information is of crucial importance for assessing the consequences of natural or anthropogenic disasters. Because earthquakes occur constantly and it is not possible to predict them any additional information about the scope of a particular seismic event is essential for local and national authorities who are responsible for mitigating the damages caused to the population, to the infrastructure and to the landscape following such events. This study presents the results obtained by jointly processing two sets of SAR data with other additional data to obtain two interferometric images that provide information on the deformation processes after a series of earthquakes that occurred on three different locations at the Balkan peninsula – one close to island of Kos and Bodrum town, the other close to the island of Zakynthos and the third on Ionian coast of Albania. The obtained maps reflecting the deformations of the Earth's crust after the mentioned events are based

on data from the ascending and descending orbits of the satellite Sentinel-1 under Copernicus EU program, which were compared with in-situ data to increase the reliability of the drawn conclusions. The results of the all researched events included in this study proved to be reliable as they were compared with in-situ measurements. This finding suggest that on the basis of those results it would be possible to provide reliable information to the national authorities on the deformations of the Earth's crust and most specifically in that regions which are problematic for direct field inspections needed to establish the occurred ground deformations.

The obtained maps of the deformations of the earth's crust are based on data from the ascending and descending orbits of the satellite Sentinel1 under the EU program "Copernicus", which were compared with field data to increase the reliability of the drawn conclusions. The results of the study proved to be reliable as they were compared with in-situ measurements, which in turn suggest that on the basis of the results it would be possible to provide reliable information to national authorities on the deformations of the Earth's crust and most specifically in those regions which are problematic for direct field inspections aimed at establishing the occurred deformations.

1. Въведение

Земетресенията са природни бедствия, които причиняват сериозни щети на обществото, включително загуба на човешки животи, наранявания и материални щети водещи до икономически загуби. Така изброените вредни въздействия е възможно да бъдат значително намалени, чрез осигуряване на надеждна и навременна информация относно размера на събитието, която позволява да бъдат подобрени предприеманите мерки за отстраняване на последствията от него. В настоящата статия е направен преглед на възможностите за създаване на интерферометрични карти на засегнатите от земетресенията части от земната повърхност предоставяни от информационните продукти получавани след тематична обработка по метод DInSAR базирани на данни от радари със синтезирана апертура (РСА) разположени на сателитни платформи. Тези информационни продукти могат да подпомогнат националните и местни власти при вземане на решения за отстраняване на настъпилите след събитието последствия и при предприемане на спасителни операции. Разгледани са три отделни събития, които ясно показват предимствата на избрания подход – възможност за оценка на настъпилите в резултат на събитието земни премествания на големи площи (повече от 200 km²), регистриране на сравнително малки премествания (~ 1 cm), както за получаване на данни независимо от метеорологичните условия и сравнително малките интервали на повторно преминаване на сателита над един и същ район от повърхността на Земята.

На 20 юли 2017 г в близост до остров Кос стана земетресение с магнитуд по сеизмичен момент Mw 6.6 и на дълбочина 2 км (по данни на NOAA, KOERI). Епицентърът на земетресението се намира в Егейско море, на около 1 km южно от необитаемия остров Караада, като засегнати са гръцкия остров Кос и гр. Бодрум в югозападната част на Турция (вж. Фигура 1). След земетресението е наблюдавана вълна цунами, която залива бреговете на гр. Бодрум. Според констатациите направени след полеви проучвания и доклади на очевидци, в западната част на полуостров Бодрум почти отсъства движение на водата. Ефектите от вълната цунами са наблюдавани по южния бряг на полуостров Бодрум, само от 27.255E до 27.528E географска дължина, както и по североизточното крайбрежие на остров Кос. Максималната височина на вълната цунами е около 1,9 м, наблюдавана в устието на малък сух поток в залива Гумбет (Gumbet bay), който е най-силно засегнат от цунамието на полуостров Бодрум. Интересен е фактът, че по крайбрежието на залива Битез (Bitez bay), намиращ се западно от залива Гумбет и по пристанище Бодрум, намиращ се на изток, не са наблюдавани разрушения, което показва, че основните въздействия от цунами са локализиращи в залива Гумбет. При терените проверки и по данни от оптичния сензор на борда на сателита Sentinel2A не са установени големи свлачища нито на гръцка, нито на турска територия. (Yaçınpera,2017)

На 25 октомври 2018 на около 45 km югозападно от остров Закинтос бе регистрирано земетресение с магнитуд по сеизмичен момент Mw 6.8 и на дълбочина 10 km. То беше предшествано от форшок с Mw = 4.1 на 17 октомври 2018 г. (т.е. една седмица преди основното събитие) и последвано от вторични трусове, разпространяващи се в голяма офшорна зона на западната Хеленидска дъга (Ganas, 2020).

На 26 ноември 2019 в северозападната част на Албания се случи най-опустошителното земетресение за последните 40 години, което бе второто подобно събитие за период от три месеца. В резултат на него около 50 души загубиха живота си и повече от 5000 останаха без подслон. Местоположението на най-силното земетресение е на около 8 km североизточно от пристанищния град Дуръс, където няколко сгради се срутиха. Общите щети причинени от това събитие, все още са неуточнени, тъй като за много от сградите все още се извършват проверки за да се установи тяхната структурна здравина и безопасност за обитаване.

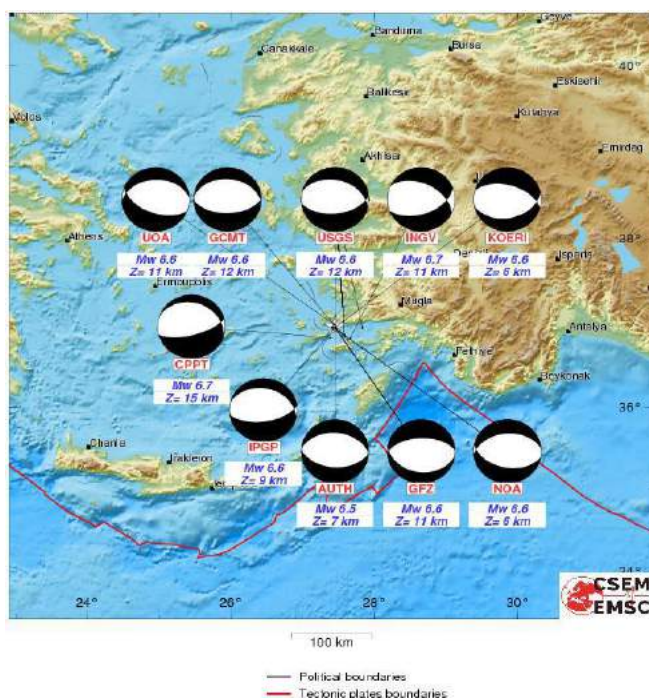
Горепосочените събития са причината авторите да решат да извършат това изследване – да установят дали има настъпили измествания по земната повърхност (деформации) вследствие на тези екстремни събития в рамките на големи площи, които могат да се използват като индикатор кои от намиращите се в засегнатите райони сгради и инфраструктурни обекти се очаква да бъдат по-податливи на щети. В голям брой научни статии (Roland, 1999),(Motagh, 2010) е посочено, че информацията за движения на земната повърхност получена по метод DInSAR е надеждна и може да бъде успешно интегрирана в процеса на вземане на решения от компетентните власти след сеизмични събития. Трябва да се посочи, че за изследваните три конкретни събития тази информация беше получавана в рамките на относително малки времеви периоди след земетресението благодарение на политиката на ЕКА за отворени данни и краткия период от време за повторно преминаване на двойката сателити от мисията Sentinel-1. Основна задача на това проучване беше да се установи величината на деформациите по земната повърхност и да се изготвят карти на преместванията. За постигането на тази цел въз основа на данни извлечени от EMSC (EMSC, 2020) беше създаван кратък каталог на земетресенията с магнитуд по-голям от Mw 3 за период от две седмици преди и след всяко едно от събитията. Конкретните дати за тези каталози се подбираха в зависимост от наличието на използваните изходни данни от PCA. Необходимо е да се подчертае, че резултатите, представени в тази статия, отразяват кумулативния ефект причинен от поредица земетресения в рамките на всеки един от изследваните райони, а не отразяват проучване на единично събитие.

2. Данни и метод

Сеизмологични данни за изследваните събития

Земетресение о-в Кос (Гърция)

Според всички сеизмични центрове подали информация за механизъм на земетресението от 20 юли 2017 г. в близост до остров Кос (вж. Фигура 1) движението е с нормален разседен характер, без или с много малка отседна компонента. Всички по-силни афтершоци имат същия тип механизъм на разломяване, като някои показват по-силно изразена



Фигура 1. Механизъм на земетресението от 20 юли 2017 г., в близост до остров Кос (<https://www.emsc-csem.org>)

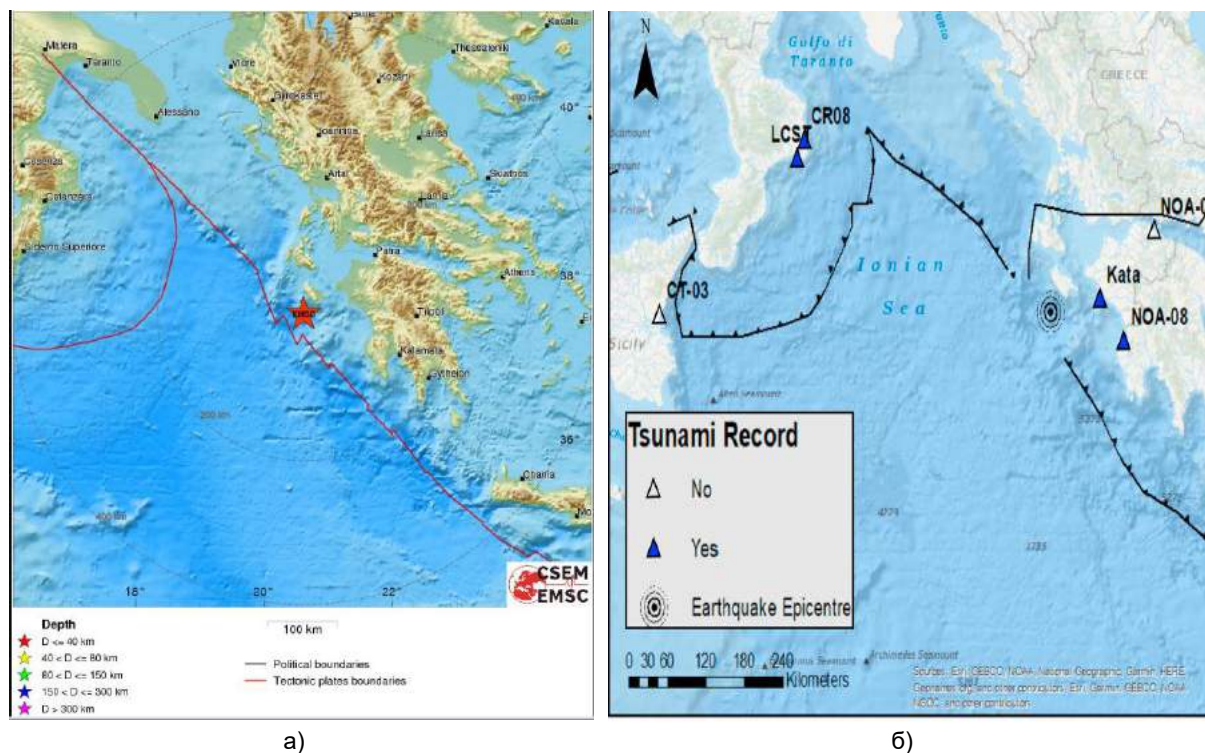
отседна компонента, но нито едно събитие няма чисто отседен характер. Това показва, че причините за произход на катастрофалното земетресение са причинени от екстензията на земната кора в Егейско-Анатолийската област, а не порди ковергенцията на Егейската плоча с микроплочата Нубиа.

Трудно може да се каже, единствено от фокалните механизми, коя от двете нодални равнини е разломна, но по-вероятно е разломната нодална равнина да е тази, която затъва на юг, с проекция на повърхността разположена между полуостров Бодрум (на север) и остров Караада (на юг) и ъгъл на затъване около 50° , съдейки от ефектите от вълната цунами и от InSAR резултатите. (вж. Фигура 1)

Земетресение о-в Закинтос (Гърция)

На 25 октомври 2018 се случи голямо плитко земетресение в западната Хеленидска дъга (WHA), ~ 40 км югозападно от остров Закинтос, Йонийско море, Гърция. Основният шок беше регистриран от Гръцката обединена сеизмологична мрежа (HUSN). Неговата моментна величина, изчислена от Националната обсерватория в Атина (NOA) е $M_w = 6.7$ (по данни от NOA и други източници) (вж. Фигура 2 а). Нанесени бяха незначителни щети на къщи и част от пристанището на острова. Съобщено бе за свлачища на няколко места по западното и южното крайбрежие на острова. Малко цунами е регистрирано от две мареографни станции в Калабрия (Италия) и две в Пелопонес (Фигура 2 б).

Районът на Закинтос се намира в сложен граничен регион, където две основни тектонски плочи, Нубия и Евразия, се сближават, образувайки образуването на Хеленидската дъга. Комплексният характер на движението се дължи на комбинацията от движения: субдукция на север на по-тежката океанска (Нубия) плоча и континентален сблъсък на Адрия (континентален фрагмент на Нубия) с Евразия (Ganas, 2020).



Фигура 2. Основно събитие в близост до о-в Закинтос. (фигура б) е по (Ganas, 2020))

Земетресение в близост до гр. Дуръс (Албания)

Силното земетресение ($M_w 6.3$) удари албанското крайбрежие на Адриатическо море близо до град Дуръс в 2:54 UTC. Усетени бяха и няколко по-слаби форшока, най-силният сред тях се случи в 1:47 UTC ($M_L 4.4$). Основният шок беше последван от дълга афтершокова последователност с повече от 25 земетресения с магнитуд по-голям от 4 само през първата седмица.

Решението на фокусния механизъм на основния шок показва чисто обратно приплъзване (Фигура 3). Движението е по разлом с поска северозапад-югоизток (около 330°), което е в съответствие с тектониката на региона (Фигура 3). Това показва, че „стъпалото“ е разположено под Адриатическо море, а подвижната „висяща стена“ е разположена върху континенталната земна кора (на територията на Албания). Като се има предвид системата от паралелни разломи в региона с насочена в посока запад и ориентация на разломи североизток-югозапад, както и хипоцентърът на земетресението от Дуръс проектиран върху Адриатическото крайбрежие може да се заключи, че проекцията на повърхността разкъсването на разлома е

позиционирана към Адриатическо море. Това се потвърждава и от резултатите от InSAR, които показват издигане по бреговата ивица и липса на потъвания по земната повърхност.

Фокалните механизми на по-силните вторични трусове ($M > 4,5$) имат подобно обратно приплъзване и удар подобен като този на основния трус. Някои от тези по-силни събития (особено по-плитките) също могат да причинят малки повърхностни деформации, дори ако не всички от тях се случват по един и същи разлом. Повърхностните деформации видими в интерферометричните изображения (ИФИ) получени от PCA данните отразяват кумулативния ефект от всички по-силни земетресения, настъпили в региона в периода между 15 ноември - 02 декември 2019 г. и не са в резултат само от основното събитие.



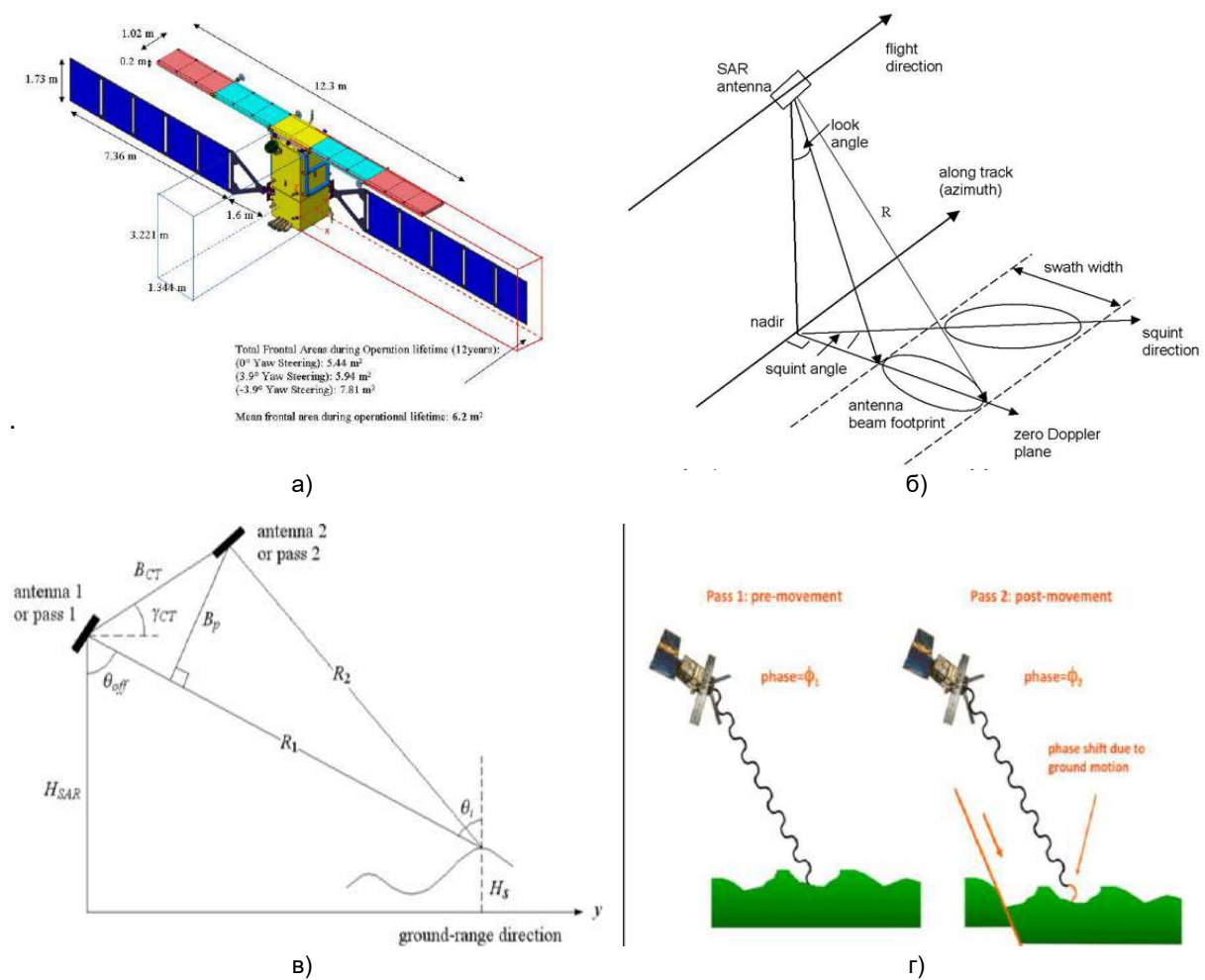
Фигура 3. Основно събитие в близост до гр. Дуръс

Обработка на данни от PCA по метод DInSAR

В рамките на настоящото изследване основен източник на данни за регистриране на резултатите от сеизмичните събития са от PCA апаратура работеща в С обхват (5.4 GHz) разположена на борда на двойката сателити Sentinel-1 (Фигура 4 а). Благодарение на доброто им управление в рамките на зададената им орбити и двата сателита формират тясна орбитална тръба с диаметър 100 m. Това е предпоставка за получаване на такава геометрия на радарния сигнал по време на получаването на данни (Фигура 4 б), която води до намаляване на геометричната декорелация налична в създаваните в процеса на обработка на данните до ИФИ. Регистрирания от приемната антена на радарната апаратура отразен от земната повърхност сигнал е комплексен и съдържа данни както за неговата амплитуда, така и за неговата фаза. Записаните на борда на носителя данни се прехвърлят към наземни станции за предварителна обработка. След като това бъде извършено те се записват в специфичен формат и се предоставят на крайните потребители за последваща тематична обработка посредством специализирани хранилища за данни (напр. <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>).

За получаване на крайните резултати за настоящото изследване беше необходимо за всяко едно от изследваните събития да се осигурят необходимите изходни данни. За тази цел за всяко събитие беше набавен набор от PCA данни от възходящи (посока Ю-С) и низходящи (посока С-Ю) орбити, като по този начин се формираха по минимум две интерферометрични двойки (ИФД). Времевият интервал за всяка ИФД беше подбран така, че да се осигури минимална времева декорелация т.е. подбраните дати да са максимално близо преди и след събитието. Вследствие на това се получаваха високи стойности за оценената кохерентност (Росса, 1997) на всяка ИФД на още на етапа на тяхното формиране, което бе гаранция за високото качество на получаваните от тях резултати на следващите етапи на обработка.

За да се регистрират земните движения, дължащи се на земетресение е необходимо да се създаде ИФД. Всяка ИФД е резултат от две радарни изображения записани регистрирани в режим Interferometric Wide от различни зрителни ъгли (вж. Фигура 4 в) и записани в Single Look Complex (SLC) формат. В този формат са записани данни както за амплитудата, така и фазата на отразения радарен сигнал. А именно разликата във фазовия сигнал получен от преди и след сеизмичното събитие носи информация за настъпилите премествания по земната повърхност (вж. Фигура 4 г). Необходимо е да се обърне внимание на факта, че тази информация е само за настъпилите премествания по визирната линия на антената, а за получаването на преместванията в хоризонтална и вертикална равнини са необходими ИФД от двата типа орбити, както и прецизни данни за положението на носителя спрямо изследвания район от земната повърхност. Наличието на данни от двата типа орбити също така спомага за и намаляване неблагоприятните ефекти причинени от промени в релефа като например радарна сянка (shadow) или промени в размера на обектите, дължащо се на положението на радара спрямо изследваната част от земната повърхност (layover). След подходяща обработка от ИФД се получават интерферометрични изображения (ИФИ), в които като отделни слоеве са включени амплитудата, фазата и кохерентността на ИФД. Именно кохерентността е мярка за качеството на крайните резултати, съдържащи се крайното ИФИ. (Rocca, 1997)



Фигура 4. Схема на сателита Sentinel-1 а), геометрия при получаване на данните б), принципна схема на работа по DInSAR метод и използване на фазовия сигнал за откриване на деформации по земната повърхност

Самата тематична обработка на данните от PCA беше извършена посредством създадения и предоставян за свободно ползване програмен продукт SNAP (SNAP,2020) по утвърдената методика описана в (Braun,2020). В тази методика се включват следните етапи – избор на единична под-сцена от двата изходни набора от данни SLC; прилагане на прецизни ефемеридни файлове; прецизна съвместна регистрация и формиране на интерферограма; премахване на изкривявания на фазовия сигнал, дължащи се на релефа и високочестотна филтрация; извличане на района на изследване; разгъване на фазовия сигнал (unwrap); получаване на преместванията по визирна линия и по вертикала; преминаване към желана

картографска проекция. За да получат вертикалните премествания за всеки един пиксел от ИФИ получени след разгъване на фазовия сигнал беше приложена следната формула:

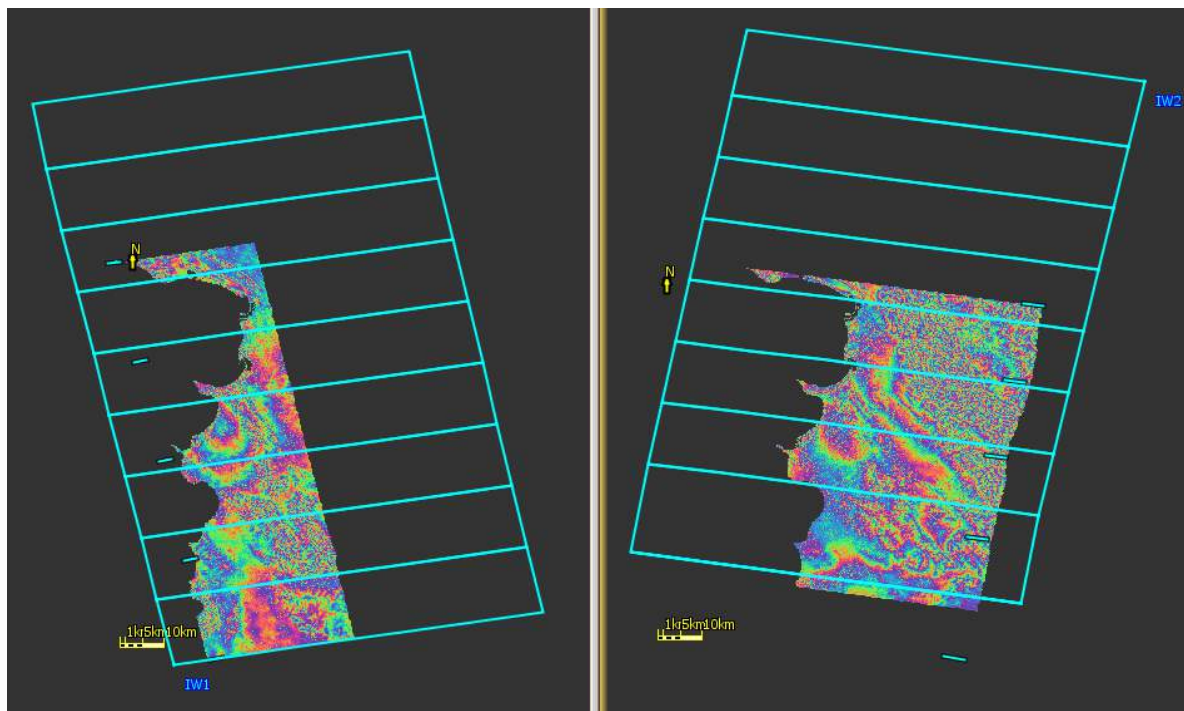
$$\text{vertical displacement} = \frac{\text{unwrapped phase} \times 0.056}{-4 + \pi + \text{rad}(\cos(\text{incidence angle}))} \quad [m] \quad (1)$$

След извършване на описаните процедури за тематична обработка на данните от РСА окончателните резултати бяха записвани и в други файлови формати за последваща визуализация и допълнителни анализи в други програмни продукти.

Важен елемент от тематичната обработка е още в самото нейно начало да се подберат само тези райони от земната повърхност, които са засегнати от конкретното земетресение. Затова от пълния набор изходни данни, състоящ се от 3 под-сцени (общо площта на цялата сцена е ~ 1000 км²) се избира само тази, която включва желанния район и даже е възможно да се изберат само онези ивици, в които попада района (вж. Фигура 5). На същата фигура са илюстрирани и геометрията при получаване на РСА данните за двата типа орбити.

Възможността за създаване на ИФД от двата типа орбити позволи да се направи оценка за наличието на вертикални движения в изследваните райони на всяко едно събитие. Друга предпоставка за това е процеса на създаване на ИФИ от всяка една ИФД на етапа на геометрично съвместяване, както и с оглед елиминиране влиянието на релефа върху крайния резултат, беше използван референтен ЦМТ от SRTM с разделителна способност в хоризонталната равнина 1arcsec (~30m). След това в самите ИФИ бяха локализирани цветово кодирани интерференчни ивици (познати и като *interferometric fringes*), показващи площите, където са протекли деформационните процеси резултат от събитието. При интерпретацията на всяко едно ИФИ се отчита, че една ивица съответства на деформация от 28mm по визирната линия и както се вижда на Фигури 6 а) и г), 7а) и б), 8 а) и г) за областите в близост до епицентъра се наблюдава по-гъста поредица такива ивици.

С цел подобряване на съотношението сигнал/шум (познат като ефект „сол/пипер“ характерен за радарните изображения и проявяващ се като наличие за резки промени в яркостта на ИФИ) след създаване на конкретно ИФИ бе прилаган адаптивен филтър към спектрална плътност на мощността на сигнала, който намалява широкоспектърния шум. Този шум е характерен за данните от РСА, а след прилагане на филтъра пространствената разделителна способност на изображението незначително се влошава. От друга страна този филтър допринася значително за подобряване на резултатите от следващите етапи на обработка, при които от стойностите на регистрирания фазов сигнал след прилагане на процедура за разгъване на фазата се преминава към метрична система.



Фигура 5. Геометрично представяне на единични под-сцени във възходяща (ляво) и низходяща (дясно) орбити и наличието на ивици в тях

Резултати

При изучаването на отделните събития бяха поставени различни цели за изследване като например установяване на качеството на крайните ИФИ, варирайки с параметрите на процедурите прилагани в процеса на тематична обработка на данните от РСА.

Тъй като в тази статия се разглеждат еднотипни събития и при трите за намаляване ефекта на времевата декорелация датите на обработваните РСА данни използвани при интерферометричната обработка бяха избирани по такъв начин, че да удовлетворяват следните изисквания:

- да произхождат от един и същ спътник (в случая Sentinel-1A) – това беше наложено с цел минимизиране на перпендикулярната базова линия между двете преминавания на сателита (вж. Фигура 4 в)), тъй като колкото по-малка е базовата линия, толкова по-добра е корелацията в рамките на единичното ИФИ;

- да бъдат максимално близо до дата на основното събитие (преди и след него) за да се елиминира колкото е възможно повече влиянието на тропосферата върху конкретно ИФИ, което е от особена важност за конкретните събития, тъй като и трите са в близост до големи водни площи;

- да се намали времевата декорелация, причинена от промени в отразения сигнал поради движения или промени на обектите, намиращи се в рамките на единичен пиксел от ИФИ.

При оценка на качеството на отделните ИФИ беше използвано полученото за всяко едно от тях изображение със стойности на кохерентността. Тя представлява статистическа оценка на близостта между двете отделни РСА изображения, от които е създадено ИФИ, в комплексното пространство формирано от регистрирания амплитудни и фазови сигнали отразени от земната повърхност (Росса, 1997).

Друг общ елемент и при трите събития е относителния характер на получаваните резултати относно преместванията. Следва са отчете, че тези премествания са само за периода между двете дати на регистрация на РСА данните.

Земетресение о-в Кос (Гърция)

На Фигура 6 а) и г) са показани получените ИФИ за района за земетресението преди разгъването на фазата, на които се виждат разлики във фазовия сигнал, дължащи се на събитието. На същата фигура се вижда и североизточния бряг на остров Кос, но регистрираните от РСА данни от двете орбити за тази област се различават значително като това се дължи на посоката на наблюдение към терена от апаратурата. В този случай достоверната информация за промените по терена за тази част от района би била резултат от интерпретацията на данни от низходящата орбита.

Получените резултати в рамките на обработка на ИФИ и от двата типа орбити са с високо качество, което е потвърдено от високите стойности на кохерентността за изследваните райони от сушата, за които те са над 0.4 (вж. Фигура 6 б) и д)). Те бяха очаквани, тъй като още на етапа на формиране на ИФД кохерентността беше оценена като висока и за двете – 0.96 за възходяща и 0.98 за низходяща орбита.

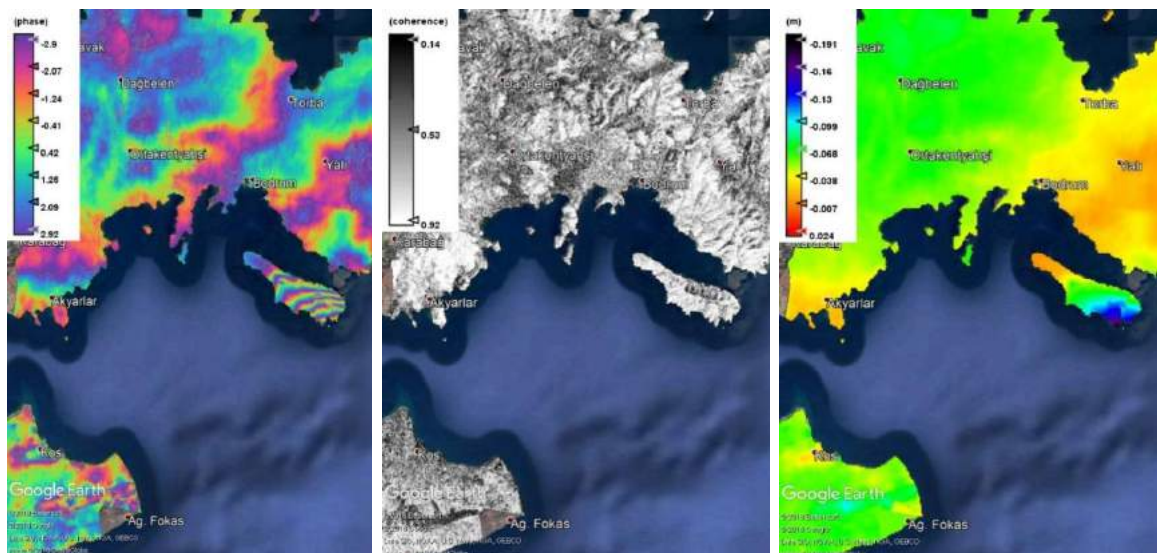
Наличието на интерференчни ивици и в двете изображения (Фигура 6 в) и е)) е доказателство за факта, че регистрираната от РСА промяна във фазата на отразения радарен сигнал се дължи на сеизмичната дейност, а не на атмосферни смущения. На същите фигури за райони около епицентъра на събитието се вижда, че броя интерференчни ивици по остров Караада от възходящата и низходящата орбити е различен съответно 7.5 и 6 ивици. Това е пример за влиянието на различната геометрия при двата типа орбити в момента на получаване на РСА данните т.е. на различния ъгъл, под който е насочена приемната антена за една и съща част от земната повърхност. От резултатите за двата типа орбити е видно, че регистрираните деформации отчетени по визирната линия на РСА са от порядъка на 20см с положителен знак. Оттук може да се направи заключението, че типа на регистрираната по данните от РСА деформация е понижение на терена, което е потвърдено и при теренните проверки (Yalçınara, 2017).

Земетресение о-в Закинтос (Гърция)

При проведеното изследване на това събитие за цел беше поставено да се проучи влиянието на двата типа ефемеридни файлове върху получаваните ИФИ – възстановени и изчислени. Въз основа на тези файлове се определя местоположението на сателитната платформа във времето на регистрацията на данните спрямо референтния елипсоид със съответната точност. Възстановените позволяват обработка на данните от РСА в кратък времеви интервал след тяхното регистриране (този интервал обхваща периода от регистрация до записване в конкретното хранилище за данни), докато изчислените се предоставят след

един по-продължителен период. В този случай е необходимо да се отчете доколко е спешно да се получат крайните резултати от обработката – при необходимост за предоставяне на информация в кратък период след събитието използването на възстановените ефемеридни файлове ще даде добра оценка къде са настъпили премествания на земната повърхност. Докато в случай, че резултатите ще се използват за установяване на движения със стойности от порядък десетки милиметри е наложително при обработката да се използват изчислените ефемеридни файлове. Това е илюстрирано на Фигура 7 а) и б), на които добре е показана разликата при използване на двата типа ефемеридни файлове при създаване на ИФИ и е ясно различима по западните склонове на острова и брега срещу него.

ИФД от дати 12.07-24.07. 2017 възходяща орбита S-1

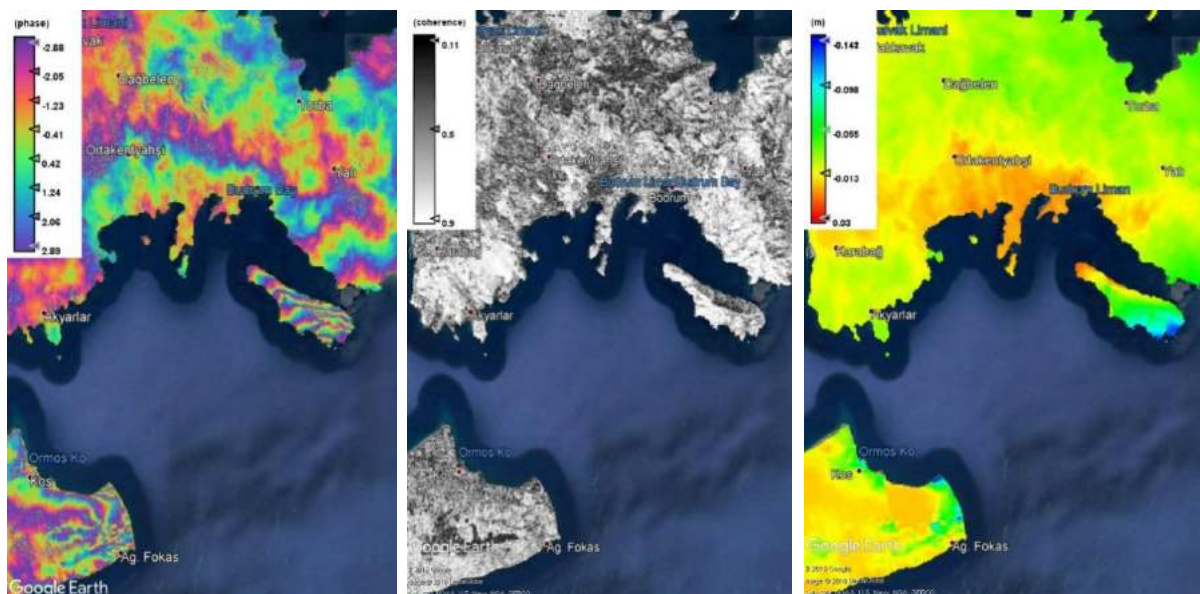


а) ИФИ

б) Изображение на кохерентността за ИФИ

в) ИФИ след разгъване на фазата

ИФД от дати 18.07 - 30.07.2017 от низходяща орбита на S-1

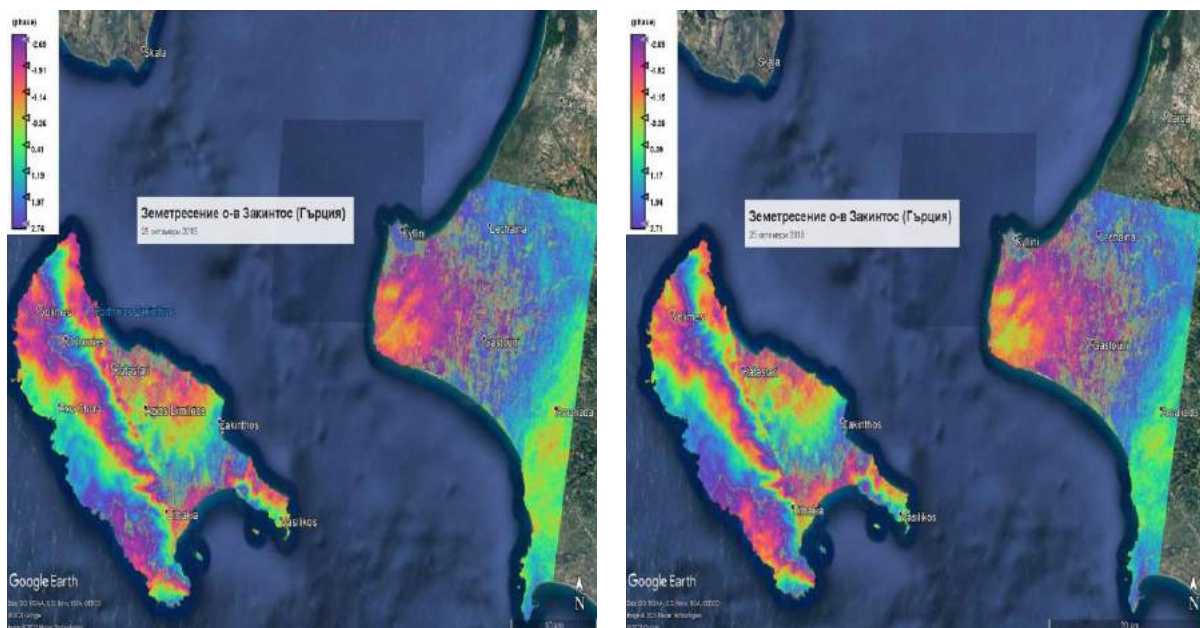


г) ИФИ

д) Изображение на кохерентността за ИФИ

е) ИФИ след разгъване на фазата

Фигура 6. ИФИ от двата типа орбити преди разгъване на фазовия сигнал (а) и г)), кохерентно изображение на ИФИ (б) и д)) и деформации получени след разгъване на фазовия сигнал (в) и е))



а) възстановени ефемеридни файлове

б) изчислени ефемеридни файлове

Фигура 7. Различия в създадено от ИФИ преди разгъване на фазовия сигнал при използване на възстановени и при изчислени ефемеридни файлове

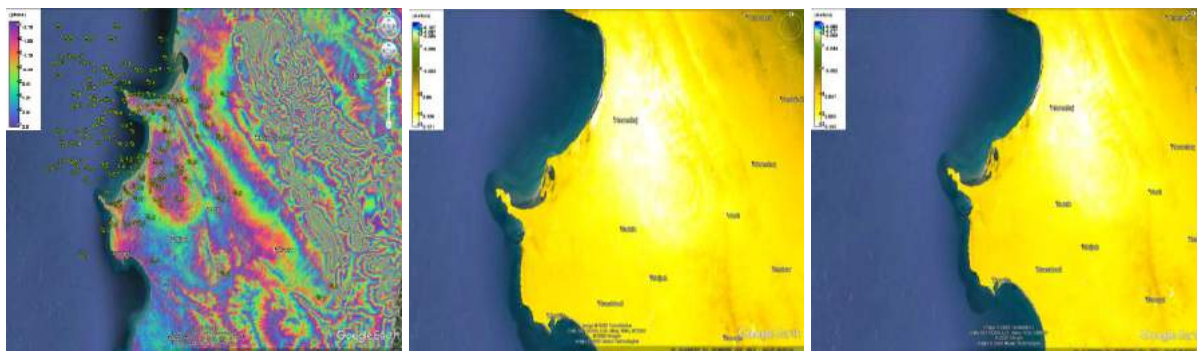
Земетресение в близост до гр. Дуръс (Албания)

Първите получени резултати от обработката на PCA данни за това събитие бяха насочени към най-засегнатите райони съгласно (Newsletter, 2020), а именно по две линии приблизително ориентирани по известен сеизмогенен разлом, около който бяха концентрирани настъпилите земетресения. На Фигура 8 са показани основните резултати получени вследствие на настъпилите събития – интерферометричните ивици получени от обработените фазови сигнали от PCA данни от двете орбити а) и г); деформациите получени след разгъване на фазовия сигнал (б) и д)) и изчислено по формула (1) вертикални движения (в) и е). Показаните ИФИ на фазовия сигнал бяха сравнени в подобни включени в (Newsletter, 2020) и беше установено голямо сходство, факт който потвърди качеството на тези ИФИ. За тях следва да се вземе предвид, че показаните ИФИ предоставят само предварителни информация за относително големи области от земната повърхност, тъй като размерът на пикселите за всяко едно от изображенията е около 14 x 14 m поради тази причина се разглеждат като площен, а не като точков индикатор за деформации. Основание да се твърди, че информацията получена след етап разгъване на фазовия сигнал и за двата типа орбити по отношение на движенията на земната кора е достоверна се базира на факта, че за изследваните области стойностите в слоевете от ИФИ за кохерентността на ИФИ са високи. Това се доказва от процентното съотношение на валидните данни в получените изображения на кохерентностите за районите около град Дуръс, които имат стойности над зададения праг от 0,35 - 74% за възходящата орбита и 70% за низходящата орбита съответно. За този район вертикалните измествания, регистрирани по метода InSAR, са в диапазона -0,009 до 0,13 m, получени от низходящата орбита и в диапазона -0,036 до 0,074 m от възходящата орбита. Различията в стойностите на получените резултати най-вероятно се дължат на геометрията на наблюдение използвана от PCA и по-точно стойностите на ъгъла на регистриране на всеки един елемент от земната повърхност. Както е показано на Фигура 5 за да се получат данни за изследвания район на събитието от двете орбити, са обработени различни под-сцени, което означава, че стойностите на ъгъла на регистриране на отразения радарен сигнал се различават за типа орбита, което води до такива несъответствия между стойностите на вертикални измествания.

В процеса на интерпретация на получаваните резултати въз основа на фазовия сигнал трябва да се отчете и влиянието на терена към нейната промяна. На Фигура 8 а) и г) се вижда, че има големи области, в които фазата се променя в рамките на малки разстояния. Този ефект е добре илюстриран на Фигура 9, където профилът направен по жълтата линия в ИФИ показва, че теренът е силно пресечен и е възможно данните регистрирани от PCA за него да се дължат на неблагоприятни ефекти, дължащи се на радарна сянка. Именно този ефект видим във фазовото изображение може лесно да се тълкува погрешно като големи премествания по

земната повърхност в резултат на земетресението, но в конкретния случай това по-скоро се дължи на силно пресечения терен.

ИФД от дати 01.12. – 19.11.2020 низходяща орбита 153

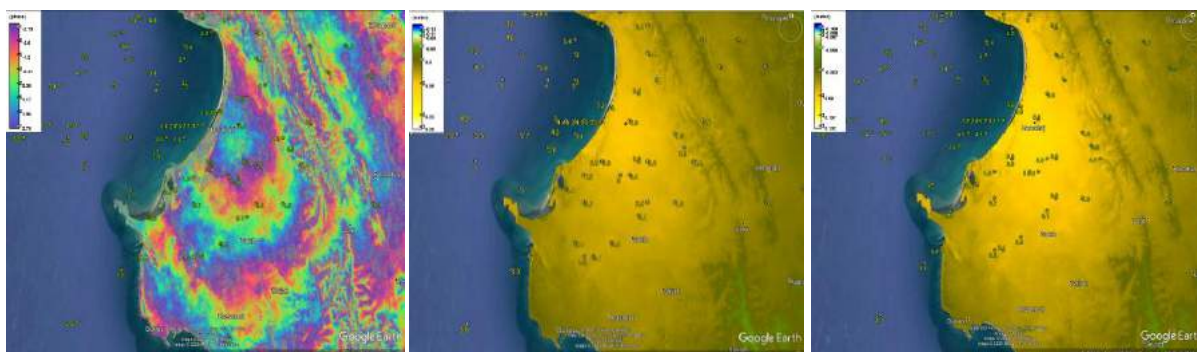


а)

б)

в)

ИФД от дати 02.12 – 19.11.2020 възходяща орбита 175

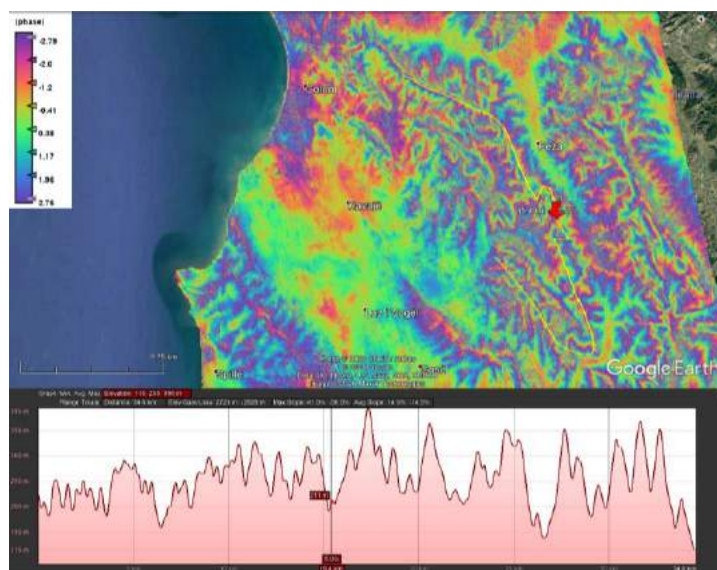


г)

д)

е)

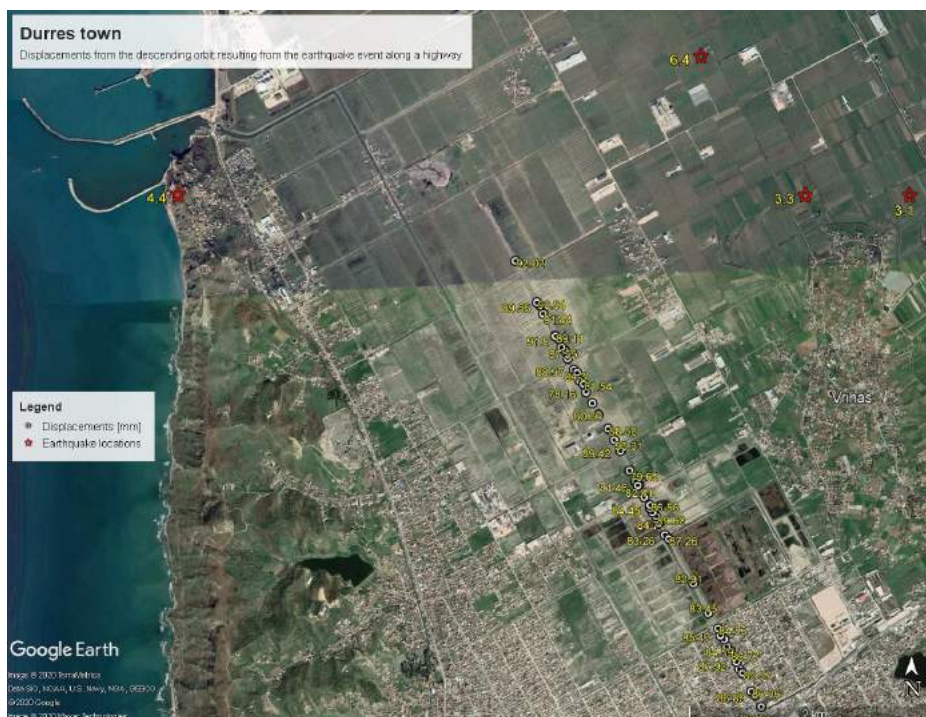
Фигура 8. ИФИ от двата типа орбити – преди разгъване на фазовия сигнал (а) и г)); деформации получени след разгъване на фазовия сигнал (б) и д)) и изчислено по формула (1) вертикални движения (в) и е)



Фигура 9. Вариации на фазовия сигнал в ИФИ, дължащи се на релефа

Както е посочено в (Newsletter, 2020) сеизмогенните разломи, намиращи се в изследваната зона, имат приблизителна ориентация СЗ-ЮЕ. Основавайки се на този факт авторите решиха

да проучат деформациите, получени в ИФИ по протежение на магистрала близо до град Дуръс, която следва приблизително същата посока като тази на разлома. Този инфраструктурен обект е избран, тъй като и за двете орбити в него се очакват високи стойности на кохерентността, което от своя страна прави стойностите за изчислените вертикални премествания в ИФИ надеждни. За да се извлече само необходимата информация от около 100 точки, разположени на споменатата магистрала, само за тези, които имат кохерентност и за двете орбити над 0,3, бяха приети за използване. За тези точки бяха установени минимални и максимални стойности за двете орбити, които се оказаха доста различни - $\min_{asc} = 0,02 \text{ m}$ / $\max_{asc} = 0,033 \text{ m}$ и $\min_{desc} = 0,078 \text{ m}$ / $\max_{desc} = 0,092 \text{ m}$. Поради тази причина за да се установят реалните стойности на преместванията за тази зона са необходими измервания на място. На Фигура 10 са показани стойностите на вертикалните премествания, изчислени от фазовия сигнал след неговото разгъване от низходящата орбита. За изместванията в LOS резултатите следват същата тенденция - $\min_{asc} = 0,016 \text{ m}$ / $\max_{asc} = 0,029 \text{ m}$ и $\min_{desc} = 0,056 \text{ m}$ / $\max_{desc} = 0,071 \text{ m}$. Това още веднъж потвърждава твърдението, че резултатите от обработката по метод DInSAR не могат да се получат точни стойности за преместванията по земната повърхност сравними с резултати от теренни GNSS измервания, а по-скоро дават приблизителна оценка къде са настъпили такива премествания



Фигура 10. Стойности на вертикалните премествания регистрирани в ИФИ от низходящата орбита

Заклучения

В тази статия бяха представени резултатите получени от обработката на данни от PCA по метод DInSAR насочени към определяне стойностите на настъпилите в резултат на три силни, плиткки земетресени премествания на земната повърхност. Качеството на получаваните резултати в интерферометричните фазови канали на ИФИ от възходяща и низходяща орбита са с качество съпоставимо с получаваното от други научни екипи. Тук са докладвани и резултатите за изчислените премествания след разгъване на фазовия сигнал, който съвпада с констатираните от геолозите разломи. За да се увеличи достоверността на получената информация за ограничен набор от точки, при които кохерентността и за двете орбити е над 0,3, настъпилите земни премествания бяха определени като потъване. Всички получени резултати са в добро съгласие с регионалната тектоника и биха могли допринасят за по-доброто разбиране на механизма на изследваните събития и биха могли да се използват от компетентните органи при изготвяне на планове за преодоляване на последствията от такъв тип природни бедствия.

Благодарности

Тези изследвания са реализирани с подкрепата на проект "Национален геоинформационен център (NGIC)", финансиран от Националната пътна карта за научна инфраструктура 2017-2023 г. и по проект с Ф"НИ" № ДН14/1 от 11.12.2017г.

Литература:

1. Braun, A., Veci, L., "TOPS Interferometry Tutorial.", Array Systems. Available online:http://step.esa.int/docs/tutorials/S1TBX%20TOPSAR%20Interferometry%20with%20Sentinel-1%20Tutorial_v2.pdf EMSC 2020, <https://www.emsc-csem.org/Earthquake/?filter=yes>
2. Ganas, A., P. Briole, G. Bozionelos, A. Barberopoulou, P. Elias, V. Tsironi, S. Valkaniotis, A. Moshou, I. Mintourakis, The 25 October 2018 Mw = 6.7 Zakynthos earthquake (Ionian Sea, Greece): A low-angle fault model based on GNSS data, relocated seismicity, small tsunami and implications for the seismic hazard in the west Hellenic Arc, *Journal of Geodynamics*, 137, 2020
3. Motagh, M., Schurr B., Anderssohn J., Cailleau B., Walter T. R., Wang R., Villotte J.-P., "Subduction earthquake deformation associated with 14 November 2007, mw 7.8 Tocopilla earthquake in Chile: results from InSAR and aftershocks," *Tectonophysics*, 490, 60–68 (2010)
4. Rocca, F., C.Prati, A.Ferretti, An Overview of SAR Interferometry, 3rd ERS Symposium, Florence, 1997
5. Roland, B., Ayhan M. E., Fielding E. J., Wright T. J., McClusky S., Aktug B., Demir C., Lenk O., Türkezer A, "Deformation during the 12 November 1999 Düzce, Turkey, Earthquake, from GPS and InSAR Data, *Bulletin of the Seismological Society of America* ; 92 (1): 161–171. SNAP 2020, <https://step.esa.int/main/>
6. Yalçinera, A. et al., The 20th July 2017 (22:31 Utc) Bodrum/Kos Earthquake and tsunami; post tsunami field survey report, <http://users.metu.edu.tr/yalciner/july-21-2017-tsunami-report/Report-Field-Survey-of-July-20-2017-Bodrum-Kos-Tsunami.pdf>
7. Newsletter of Environmental, Disaster, and Crisis Management Strategies, Nov 2019, issue 15, ISSN 2653-9454, (accessed Feb 2020 https://www.emscsem.org/Files/news/Earthquakes_reports/Newsletter_15_2019_Albania_EQ.pdf)

Мониторинг на свлачищни процеси по Северното Черноморие на България, използвайки данни от програма Коперник

Мила Атанасова, Христо Николов

Национален институт по геофизика, геодезия и география – Българска академия на науките
Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: mila_at_zl@abv.bg, hristo@stil.bas.bg

Ключови думи: GNSS, InSAR, мониторинг на свлачища

Резюме: Основната цел на това изследване е мониторинг на процесите протичащи в свлачищен район чрез допълващо използване на данни от SAR (радар с синтезирана апертура - PCA) и GNSS (глобални навигационни спътникови системи). Резултатите от изследването предоставят надеждни данни за протичащи рискови геопроцеси за региона на Североизточна България известен с няколко големи активни свлачища. Получените резултати са важни за разбирането на произхода и динамиката на свлачищните процеси, както и за оценка на произтичащите от тях опасности.

В настоящото изследване е използван метод DInSAR за установяване на деформации на земната повърхност в района на Северното Черноморие на България с цел определяне на райони с регистрирани деформации на земната повърхност и идентифициране на протичащи свлачищни процеси. Локализираните свлачища, както вече регистрираните, така и потенциални могат да бъдат изследвани с помощта на изградена локална геодинамична GNSS мрежа за тяхното прецизно наблюдение. За целта съвместно се анализират резултати от проведените от авторите през 2019г. и 2020г. теренни проучвания и резултати от обработка на набор от SAR данни. Въз основа на получените резултати може да се заключи, че и двата използвани източника от данни водят до подобни резултати (преместванията са в диапазона на сантиметри) и те потвърждават цялостното поведение на изследваните свлачища. Разликите между тях могат да бъдат обяснени с големия брой външни фактори, влияещи върху данните за SAR, като растителност и времева декорелация. При съпоставяне на двата метода трябва да се вземе предвид, че стойностите на елементите на интерферометричните изображения (IFI) съответстват на много по-голяма площ (14 м. на 14 м. размер на пиксел), докато GNSS се отнася до отделни точки.

Monitoring of landslide processes on the Northern Black Sea of Bulgaria using data from the Copernicus program

Mila Atanasova, Hristo Nikolov

National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography – Bulgarian Academy of Sciences
Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: mila_at_zl@abv.bg, hristo@stil.bas.bg

Keywords: GNSS, InSAR, landslide monitoring

Abstract: The main purpose of this study is to monitor the processes occurring in a landslide area through the additional use of data from SAR (Synthetic Aperture Radars) and GNSS (Global Navigation Satellite Systems). The results of the study provide reliable data on ongoing hazardous geoprocesses for the region of Northeastern Bulgaria known for several large active landslides. The obtained results are important for understanding the origin and dynamics of landslide processes, as well as for assessing the dangers arising from them.

In the present study, the DInSAR method was used to establish deformations of the Earth's surface in the region of the Northern Black Sea coast of Bulgaria in order to determine areas with registered deformations of the earth's surface and identify ongoing landslides. The localized landslides, both already registered and potential, will be able to be studied with the help of a local geodynamic GNSS network for their precise monitoring. For this

purpose, the results of the conducted by the authors in 2019 and 2020 yr. are jointly analyzed and in-sute studies and results of SAR data processing. Based on the obtained results, it can be concluded that both used data sources lead to similar results (displacements are in the range of centimeters) and they confirm the overall behavior of the studied landslides. The differences between them can be explained by the large number of external factors influencing SAR data, such as vegetation and temporal decorrelation. When comparing the two methods, it should be taken into account that the values of the IFI elements correspond to a much larger area (14 m by 14 m), while GNSS refers to individual points.

1. Въведение

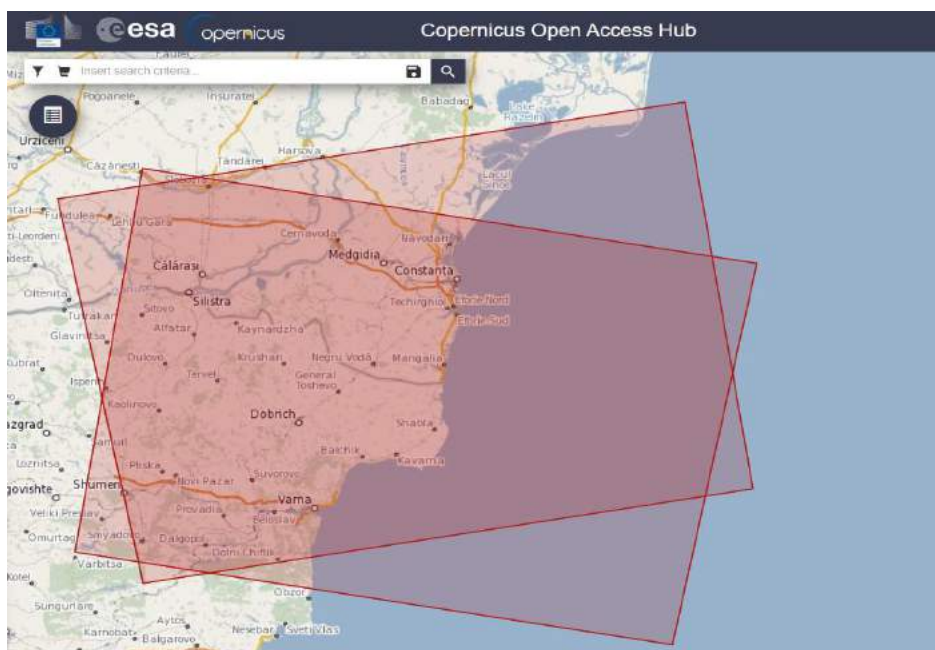
Целта на това проучване е да се идентифицират райони с активно движение на свлачища по северното Черноморие на България и да се осъществи мониторингът им чрез комбиниране на данни от GNSS и интерферометрични изображения от SAR. GNSS данни от постоянни и локални геодезически мрежи се използват за валидиране на получената от SAR информация, отнасяща се до зоната на изследване. Изследването ще даде надеждни данни за текущите рискови свлачищни процеси за региона на СИ България.

Геодинамичните процеси и свлачишната активност се считат за основен двигател на хоризонтални и вертикални движения на земната кора на СИ България. Един доказан метод за непрекъснато наблюдение на земните деформации е използването на данни от активно радиолокационно дистанционно наблюдение. Тези данни са основата за създаване на интерферометрични изображения за количествена оценка на регистрираните движения на земната повърхност в рамките на фиксиран интервал от време. За това изследване беше създаден набор от IFI за районите Северното Черноморие на България.

2. Метод

Напоследък интерферометричният подход е широко използван в геодезическите изследвания. Този метод използва интерферометрично обработени данни от наземни или сателитни радари със синтезирана апертура. Целта на обработката е да се регистрира промяната на фазовия сигнал, присъстващ в две радарни изображения, получени на различни дати. Въз основа на тази разлика може да се проследят геодинамични явления от различен тип - земетресения, свлачища и скални падания и др.

Трябва да се отбележи, че инструментът SAR е активна радарна система за изображения, която обикновено е монтирана на летящи платформи, за да картографира повърхността на Земята. В този инструмент основният елемент е SAR активната антената, която излъчва и приема обратно отразените от земната повърхност радарни сигнали.



Фиг. 1. Изображения от Сентинел 1А/В от възходяща орбита 36 и низходяща орбита 58 орбита покриващи СИ България

Получените данни образуват радарно изображение, което е съставено от два различни компонента на електромагнитната вълна - амплитуда и фаза. Трябва да се има предвид, че дължината на вълната и фазата на радарния сигнал са взаимно свързани. За използване на интерферометричния метод трябва да бъдат обработени заедно две радарни изображения (често наричани интерферометрична двойка - IFP) и в полученото изображение се записва фазовата разлика на обратното отразения сигнал между двете измервания. Тази разлика е пряко свързана с промените (ако има такива), настъпили на повърхността на Земята във времеви интервал между получаването на двете SAR изображения. Също така трябва да се отчете, че регистрираните по този начин измествания са в линията на заснемане (LOS) на антената и не могат да бъдат директно интерпретирани като движение в хоризонтална или вертикална равнина. За да се направи това са необходими допълнителни изчисления.

2.1. Приложение на DInSAR за определяне на премествания в СИ България

Подходът DInSAR (диференциален интерферометричен радар с синтетична апертура), използван за получаване на резултатите в това проучване, се състои от следните етапи.

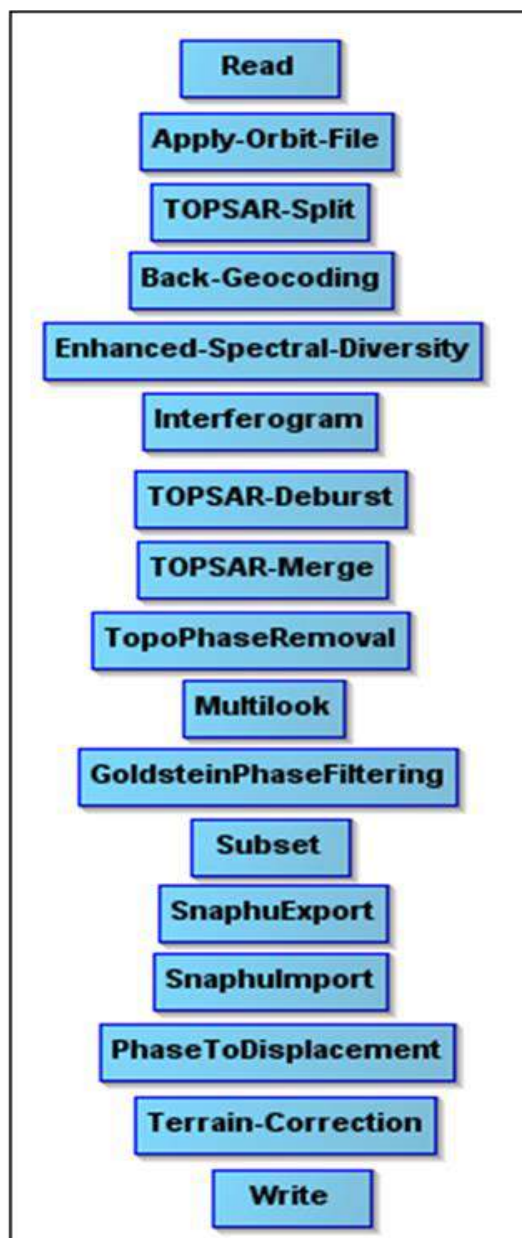
Първият е подготвителният етап на данните, при който на базата на експертизата на авторите от наличните онлайн архиви с данни за SAR, поддържани от различни институции, са получени необходимите. В този процес бяха изчислени перпендикулярните базови линии между всички възможни IFP и бяха избрани най-подходящите за по-нататъшна обработка на следващия етап. Събрана е и допълнителна помощна информация (цифрови карти и други данни) относно топографията на изследвания регион. Друго съображение, което беше взето предвид за смекчаване на споменатите ефекти, беше обработката на данни от възходяща и низходяща орбита и съвместното им регистриране. (вж. Фиг. 1).

2.2. Процедура за обработка по метод DInSAR

Във втория етап от това изследване беше приложена процедурата за обработка по метод DInSAR за всяка една IFP, която се счита за една от най-важните за да се получат крайните резултати.

На този етап бяха обработени само данни във формат Single-Look Complex (SLC). В този формат се регистрират както данни за амплитудния, така и фазовия сигнал. Освен това тези данни имат добра позиционна информация за географска ширина/дължина (вж. Фиг. 1) и в същото време осигуряват пространствена резолюция, която е от значение за целите на това изследване. За създаването на единичен IFP SAR данните бяха обработени със софтуера SNAP, предоставен от ESA, в който лесно се реализира добре установена методология за DInSAR (вж. Фиг. 2).

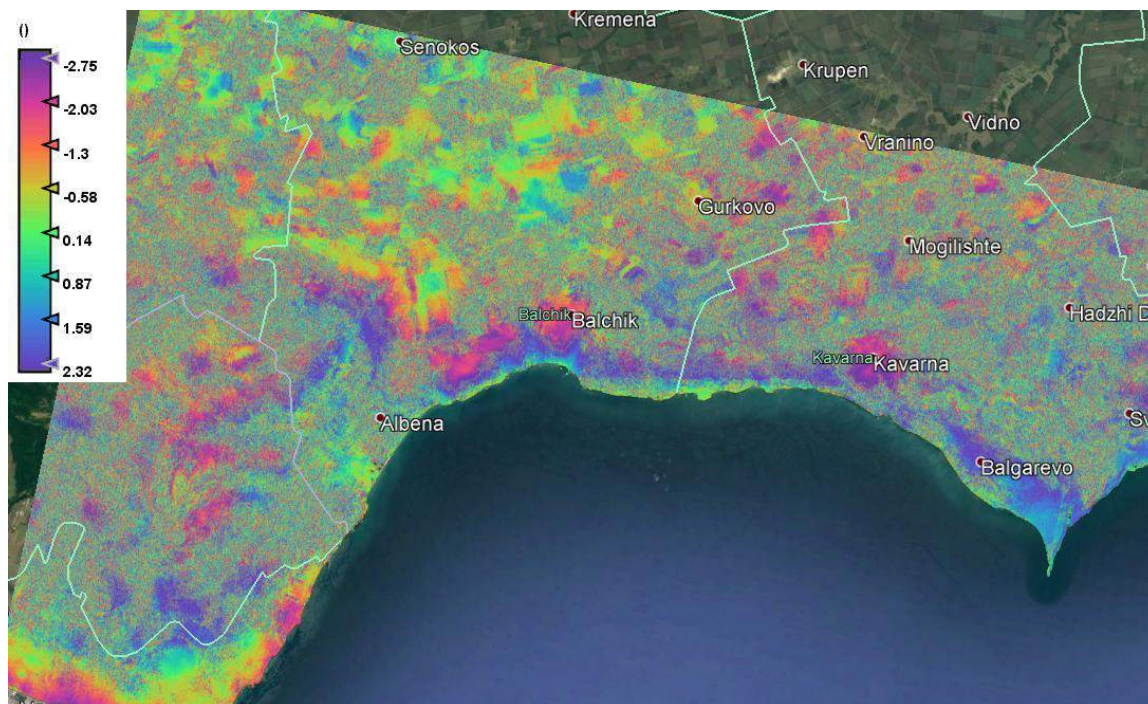
В рамките на това проучване е създаден архив от IFP за периода между април 2015 г. и ноември 2020 г. Трябва да се изясни, че обработените IFP покриват четиримесечен интервал, който е от съществено значение за минимизиране на негативните ефекти като затихване на радарния сигнал и намаляване на съгласуваността, причинена от растителността, присъстваща в изследваните райони. Друго ограничение, което беше отчетено в началото на обработката, беше да се максимизира моделираната съгласуваност за всеки IFP. По време на създаването на интерферометричното изображение от значение е да се избере такъв ЦМР (DEM - Digital elevation model) който ще осигури възможно най-добрата пространствена разделителна способност на крайния продукт [1]. Тъй като по време на обработката не беше предоставена подобър DEM, беше използван 1arcsec SRTM. За да се гарантира високото качество на крайните IFP, бяха използвани само точни орбитални данни за съвместната регистрация на първоначалните SLC изображения. Тази стъпка е от значение за формирането на единична интерферограма, тъй като при нея да се осигури съвпадение на регистрираните амплитудни и фазови сигнали от един пиксел (земен елемент) както по посока на обхвата, така и по азимута от двете SLC изображения.



Фиг. 2. Методология за обработка на IFI

Следващата стъпка в обработката беше да се подобри качеството чрез високочестотна филтрация и намаляване на шума да се формират квадратни пиксели, отговарящи на елементи от земната повърхност, в IFI. Тъй като за това изследване ние стеснихме района на изследване беше необходимо да се създаде по-малък полигон чрез подмножества на IFI. След тази процедура IFI може да бъде геокодиран и експортиран към друг софтуер (например QGIS, Google Earth) за визуализация и допълнителен анализ. Цветовете, присъстващи в тези IFI, показват степента на промяна на фазовия сигнал. В случай на единичен гладък цвят, означава че няма промяна на фазата, т.е. не се откриват повърхностни деформации. В областите, където ефектът „сол и пипер“ е видим, може да се заключи, че фазата е силно декорелирана поради ниската кохерентност в единичния основен елемент. Само за тези области в IFI, където има интерферометрични ивици, може да се заключи, че деформациите на земята са били надеждно регистрирани от промяна на фазовия сигнал в LOS.

За да се получат повърхностни измествания по LOS в метрични единици е необходима още една процедура, известна като разгъване на фазовия сигнал. Всъщност това е процес на възстановяване на фазовата разлика чрез добавяне на правилното цяло число, кратно на 2π към интерферометричните ивици [2]. Тази процедура за разгъване на фазата може да се извърши от няколко софтуерни продукта, но в това проучване ние използвахме модула Snaphu [3].



Фиг. 3. IFI (възходяща орбита 36) за датите 20Nov2015_11Mar2016

За изследване на текущите геодинамични процеси в региона на СИ България е създадено локално хранилище/архив с данни за SAR от мисията Sentinel-1. Използвайки горе описания метод, беше създаден набор от IFI на интервали от 4, 8 и 12 месеца и в случаите когато трябваше да се проучи конкретно неочаквано събитие породено от аквизиране на свлачищните процеси. Валидирането на информацията, получена от IFI, беше извършено с помощта на данните от създадените локални GNSS мрежи.

Третата и последна стъпка включва анализ на информацията, получена от обработката на DInSAR и се основава на получените карти на деформация в метрични единици за съответния период. Първо трябва да се подчертае, че регистрираните измествания на повърхността са по LOS на антената. Още едно практическо съображение при интерпретиране на LOS деформации е, че реалното триизмерно движение на земната повърхност (север, изток, нагоре) не е оценка и изводите трябва да се направят внимателно.

3. Райони на изследване

3.1. Свлачище по крайбрежния склон преди голф клуб “Тракийски скали”

3.1.1. Геоложкско описание

Свлачището е регистрирано през 2014 г. под номер DOB 17.05009-01-03 и е развито по крайбрежния склон, непосредствено преди входа на голф клуб „Тракийски скали“. Проявено е в предната част на древно стабилизирано свлачище, известно с името “Калкан тепе” – югозападно разположено от с. Божурец [4], [5].

Древното свлачище е блоков тип. На терена ясно се виждат свлачищни пакети, разположени на различни нива. Между тях са оформени множество негативни безотточни форми с различни размери, които задържат голямо количество повърхностни води.

Свлачището засяга територия с площ около 110 дка, разположена между дерето пред с.Топола и входа на голф комплекса, морето и древния свлачищен откос. Размерите му са: ширина около 550 м и дължина около 280 м в източната част и около 150 м в западната част. Главният свлачищен откос е висок до 12-15 м. По цялата ширина на свлачището в морето има свлачищен вал с височина до 3-4 м. Представлява издигане на глини, скални късове с различни размери и сивосини мергели. Мергелите, които в естествения терен са с хоризонтален пласторед във вала са наклонени до вертикални. Свличат се сивобели глини с разнородни скални късове в тях с различни размери. В западна посока до дерето на бреговия склон ясно личи и свлачищен пакет със запазени седименти, които имат наклонен пласторед [4], [5] [6] и [7].



Фиг. 4. Свладище преди голф клуб Тракийски [8]

В района има малки и тесни пясъчни ивици, които не могат да защитят брега от морската абразия. В резултат на това и изветрителните процеси, по високия и оголен морски бряг възникват съвременни свлачища и срутища. Двата вида негативни геодинамични процеси - свлачища и морска абразия са в пряка зависимост и активността на единия процес предопределя развитието на другия.

Констатацията от визуалния оглед направен на 03 април 2019 г. е, че видимо свлачището е активно. Пътят към голф клуба е асфалтиран и в новата настилка на места се виждат тънки пукнатини с размер 2-3 см. Под пътя ясно личи левия борд, от който е насечен свлачищен пакет. Масивните сгради (Фиг. 4) засегнати от свлачищните процеси са необитаеми и видимо приличат на изоставени. Територията, засегната от свлачищните процеси е затревена, обрасла с високи храсти и е труднодостъпна.

Основни причини за активизиране на свлачищните процеси са преовлажняване на земните маси от води с неясен произход (възможно е да са подземни, подхранвани с битови), течове от компрометираната на този етап канализация, изградена в пътя за голф-комплекса и морската абразия.

3.1.2. GNSS на геодинамичната мрежа

Геодинамичните мрежи, създадени за мониторинг на свлачища, се състоят обикновено от два типа точки - референтни или неподвижни точки, разположени на геологично стабилен терен и точки за наблюдение разположени в свлачищното тяло. За да бъдат постигнати целите на настоящото проучване са необходими геодезически данни от тези два типа точки. Данните за стабилните точки разположени в недеформируема зона се предоставят от перманентни GNSS мрежи. Новите точки на наблюдение са разположени вътре в конкретното свлачище и ще бъдат измерени в няколко цикъла.

За това проучване е създадена контролна геодинамична мрежа, обхващаща свлачищната зона преди голф клуб „Тракийски скали“ (Фиг. 5). Тя се състои от общо 10 точки, стабилизирани с метални тръби с дължина 35 см използвани за наблюдение на деформации по пътя. Първият цикъл на измерване на GNSS на геодинамичната мрежа беше извършен в периода 19-23 юни 2019 г. а втория юли 2020 г.



Фиг. 5. Свлачище преди голф клуб „Тракийски скали“ и новоизградената геодинамична GNSS мрежа

Понякога е трудно да се извършат измервания на свлачищните процеси в точките от GNSS геодезическата мрежа поради технически причини, напр. наличието на високи дървета, което води до влошаване и/или липса на GNSS сигнал от спътниците; труднодостъпен терен; опасностите от наличието на полуразрушени сгради и съоръжения; административни пречки - частна собственост върху имотите в активната част на свлачището. В тези случаи е удачно да се използват дистанционни методи, а в конкретния случай сателитни данни от SAR.

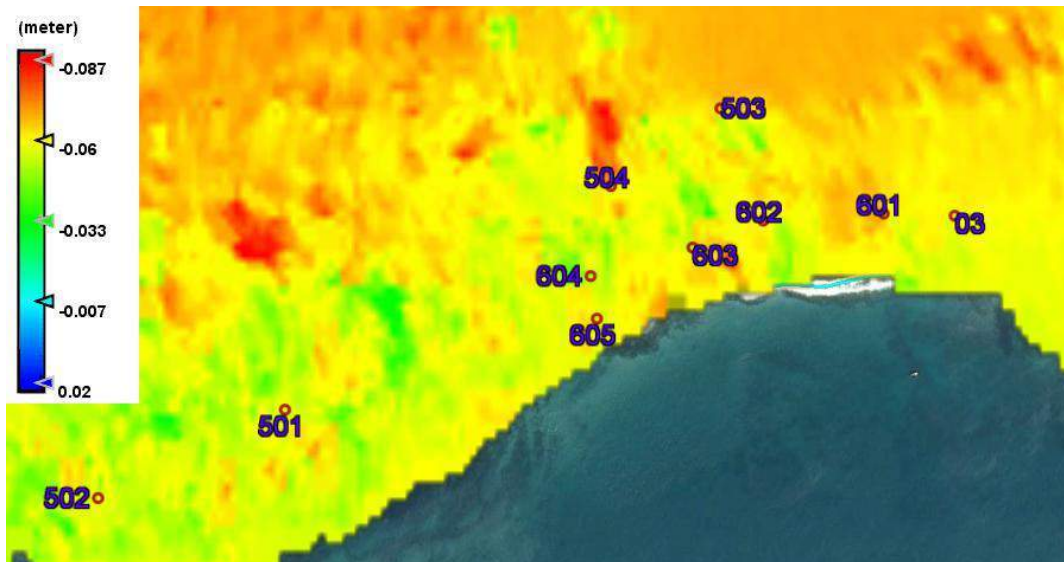
3.1.3. Приложение на DInSAR за определяне на премествания

За целите на това изследване създадохме времева поредица от IFI базирана на данни от сателитите Sentinel-1A/B, започваща през ноември 2015 г. и завършваща през април 2020 г. Зададохме времето между две сцени, образуващи IFI, да бъде четири месеца, за да има минимална растителна покривка в изследваните област поради добре познатия ефект на затихването на сигнала и намаляването на кохерентността. Друго ограничение, с което трябваше да се справим, беше да намерим онези сцени, които имат най-къса перпендикулярна базова линия и висока моделирана кохерентност.

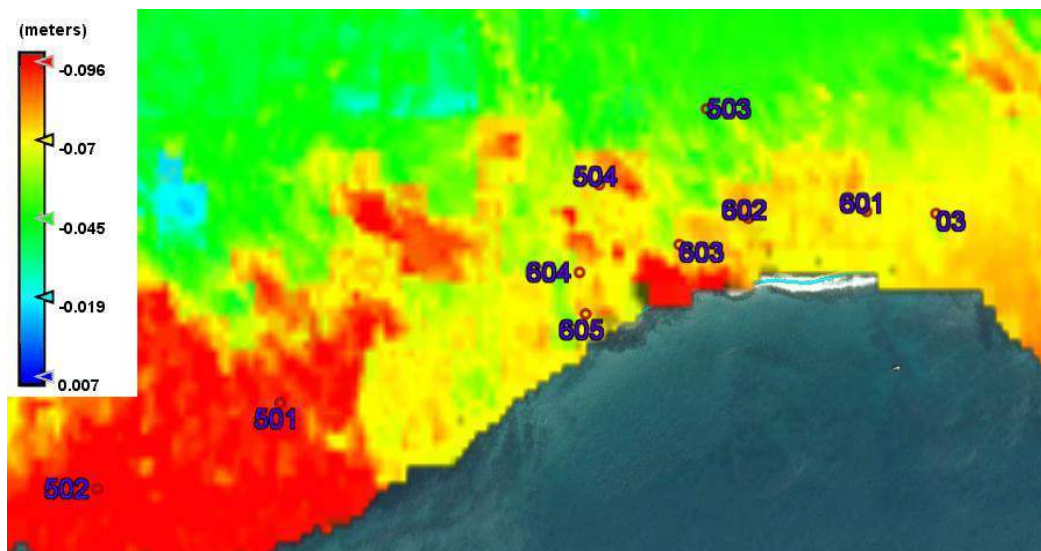
Таблица 1. Списък на сателитните изображения на Sentinel 1A / B, използвани при създаването на IFI

Master / Slave dates	Orbit type	Bperp [m]	Btemp [days]	Modeled coherence
20Nov2015_11Mar2016	Desc. 36	-28.91	-120	0.87
26Nov2016_20Mar2017	Desc. 36	-125.08	-114	0.80
15Nov2017_27Mar2018	Desc. 36	-106.94	-132	0.80
20Nov2018_22Mar2019	Desc.36	-66.42	-120	0.84
29Nov2019_28Mar2020	Desc.36	-86.00	-120	0.82

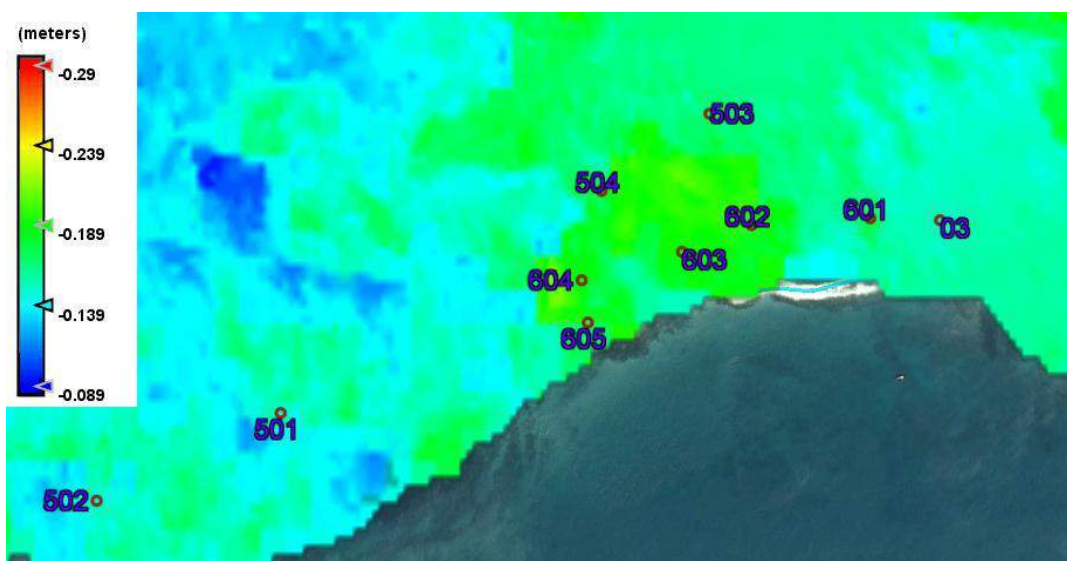
От наличните изображения в създадения архив на данни, изображенията отговарящи на посочените критерии, са показани в Таблица 1. По този начин бяха формирани шест интерферометрични двойки, които бяха използвани в следващите стъпки за обработка по метод DInSAR. Общо дванадесет изображения са обработени и допълнително анализирани в рамките на времевите редове (вж. Табл. 1).



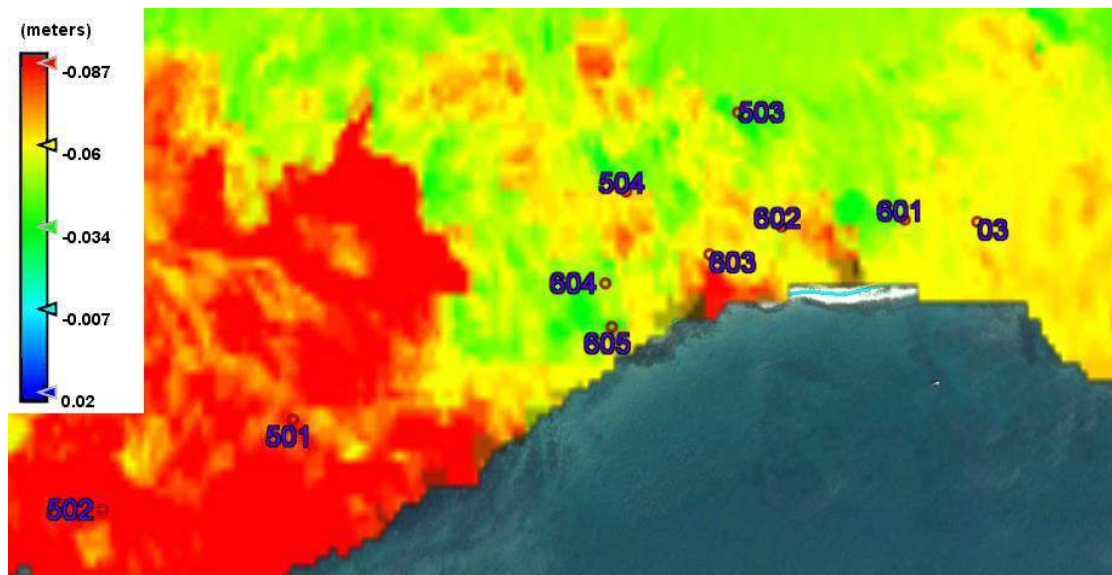
IFI 20Nov2015_11Mar2016



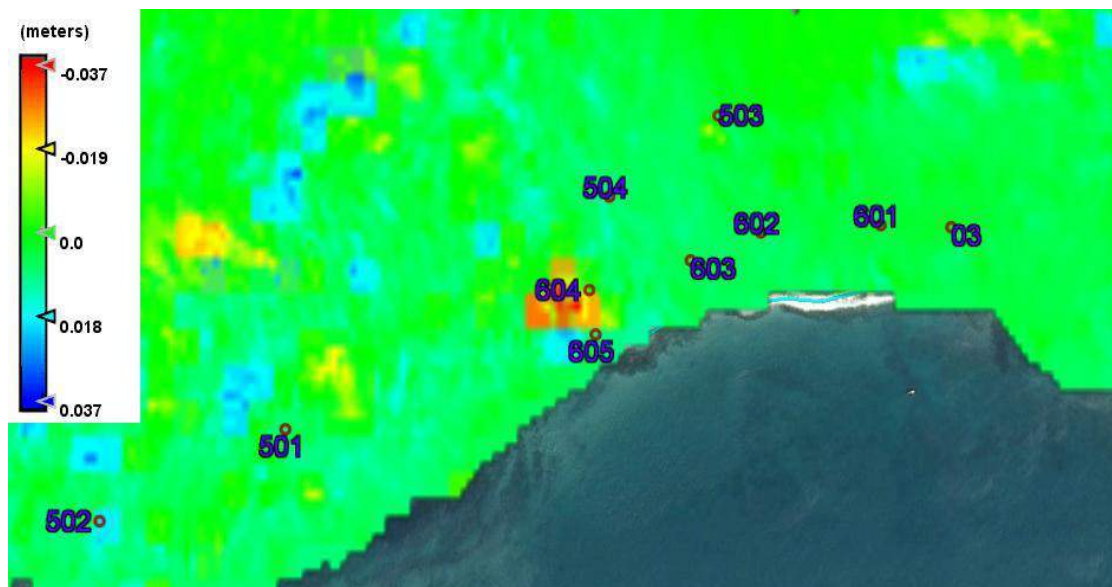
IFI 26Nov2016_20Mar2017



IFI 15Nov2017_27Mar2018



IFI 20Nov2018_22Mar2019



IFI 29Nov2019_28Mar2020

Фиг. 6. Регистрирани премествания в свлачище „Тракийски скали“ получени от IFI за различните периоди

На Фиг. 6 са представени карти на преместванията определени от интерферограми за различни зимни периоди от 2015-2020 г. (винаги е използвана възходяща орбита 36) наложени върху растер на Google Earth, покриващи зоната на свлачище „Тракийски скали“. Преместванията на земната кора са изчислени от фазовия сигнал след неговото разгъване и са цветово кодирани. Следва да се отбележи, че за период от 4 месеца те варират между -2 до -10 cm. Само през периода през зимата на 2017-2018 г. стойностите на движенията достигат -20 cm за отделни пиксели.

Получените крайни резултати са представени по-долу в Таблица 2. В нея се предоставя информацията, получена от интерферограмата относно движенията на земната повърхност за определен период по IFI. За тази цел за всяка точка от геодезическата мрежа (виж Фиг. 5 и Фиг. 6) се определя пиксел, на който тя съответства. В същата таблица срещу номера на геодезическата точка е представено преместването по LOS /m/ получено на базата на фазовия сигнал с поляризация VV за всеки един от периодите.

Таблица 2. Изчислени стойности на преместваната по LOS от получените IFI в точките на геодезическата мрежа за свлачище „Тракийски скали“

Point number	Displacements VV (LOS) /m./				
	20Nov2015-11Mar2016	26Nov2016-20Mar2017	15Nov2017-27Mar2018	20Nov2018-22Mar2019	29Nov2019-28Mar2020
03	-0.054	-0.051	-0.091	-0.060	0.00
501	-0.045	-0.091	-0.119	-0.079	0.005
502	-0.061	-0.094	-0.140	-0.085	0.020
503	-0.073	-0.040	-0.189	-0.029	-0.009
504	-0.085	-0.071	-0.170	-0.072	0.013
601	-0.081	-0.073	-0.142	-0.065	-0.008
602	-0.066	-0.078	-0.156	-0.069	-0.011
603	-0.064	-0.069	-0.172	-0.062	0.002
604	-0.052	-0.065	-0.192	-0.017	-0.024
605	-0.058	-0.081	-0.201	-0.028	-0.009

При интерпретацията на резултатите от горната таблица следва да се вземе предвид, че получените стойности отразяват движенията на земната повърхност само за споменатите 4-месечни периоди. В конкретния случай е важно да се отбележи следното предимство на прилагания подход - възможността за картографиране на области, които са недостъпни по друг начин поради особености на релефа и опасност от срутвания на сгради.

3.2. Свлачищен циркус „Дългия Яр“

3.2.1. Описание

Изследваният район „Дългия яр“ е свлачищен циркус попадащ във Варненския свлачищен район, който включва крайбрежната ивица, която започва от гр. Варна и достига до долината на река Батова близо до село Кранево. Образоването на дълбоки свлачища в района се дължи главно на морската абразия. Той е част от големи свлачищни комплекси (тип циркус) проявени по източния склон на Франгенското плато - от ръба му до морския бряг. На фона на тези стари стабилизирани свлачища в резултат на комплексното въздействие на природните фактори и техногенната активност възникват съвременни активни местни свлачища [9] и [10].

Изследваният район „Дългия яр“ е свлачищен циркус, който обхваща няколко активни свлачища, чиито граници се припокриват и поради тази причина е трудно да се разграничат. Дори за някои от изследваните свлачища разположени в този район вътре в тях може да се локализира по-малко свлачище

Свлачище „Фара“, разположено между село Кранево и туристическия курорт "Панорама", обхваща само ниското стъпала на циркус „Дългия яр“ и е с идентификационен номер VAR 02.54145-01-17 в регистъра на свлачищата на Република България, То се активизира на 13 октомври 2012 г., унищожавайки фара и вилите около него.

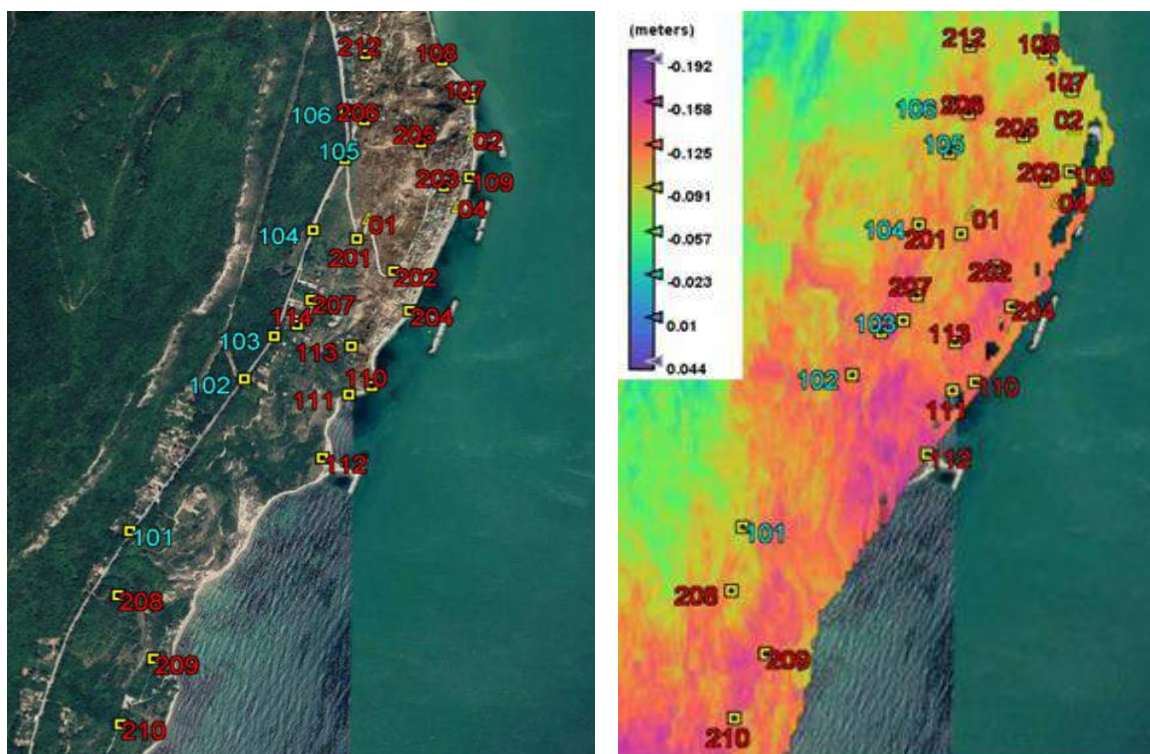


Фиг. 7. Свлачищния циркус „Дългия Яр“

3.2.2. GNSS на геодинамичната мрежа

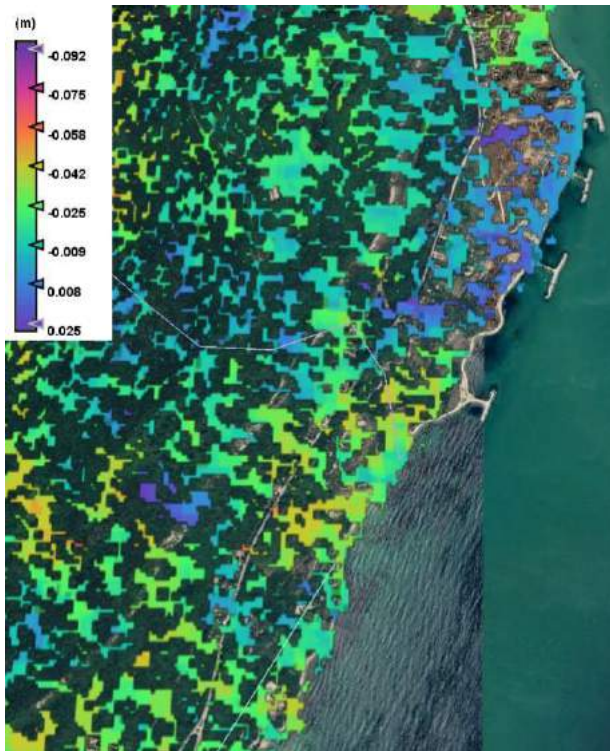
За постигане на целта на това проучване е създадена контролна геодинамична мрежа, обхващаща свлачищната зона „Дългия Яр“ - „Фара“ (Фигура 7). Тя се състои от общо 30 точки, стабилизирани с метални тръби с дължина 35 см и метални болтове в скалата. Измерванията на всички точки са извършени в статичен режим с продължителност на измерването един час, а референтните станции натрупваха данни за около 8 часа.

Референтната система е дефинирана от станции на националната перманентна GNSS мрежа на НИГГ-БАН. Новосъздадената геодинамична мрежа (Фиг. 8), която е разположена вътре в зоната на свлачището ще се измерва веднъж годишно. В споменатата геодинамична мрежа "Дългия Яр" са включени всички шест точки, открити по-рано на терен от мрежа, използвана за наблюдение на деформации по пътя (означени със син цвят на Фиг. 8). Първият цикъл на измерване на геодинамичната мрежа е извършен в периода 19-23 юни 2019 г, а вторият в края на юни 2020 г [11].

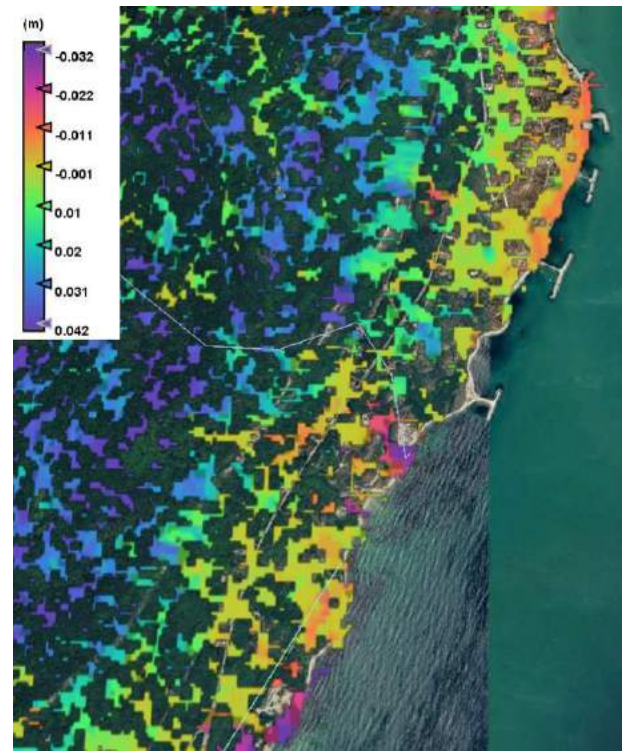


Фиг. 8 а) Точки от новата геодинамична мрежа в и около свлачището "Дългия Яр" (вляво) и б) Премествания в свлачището "Далгия Яр", получени от IFI от 2 април 2018 г. - 28 ноември 2018 г., орбита 36 низходяща

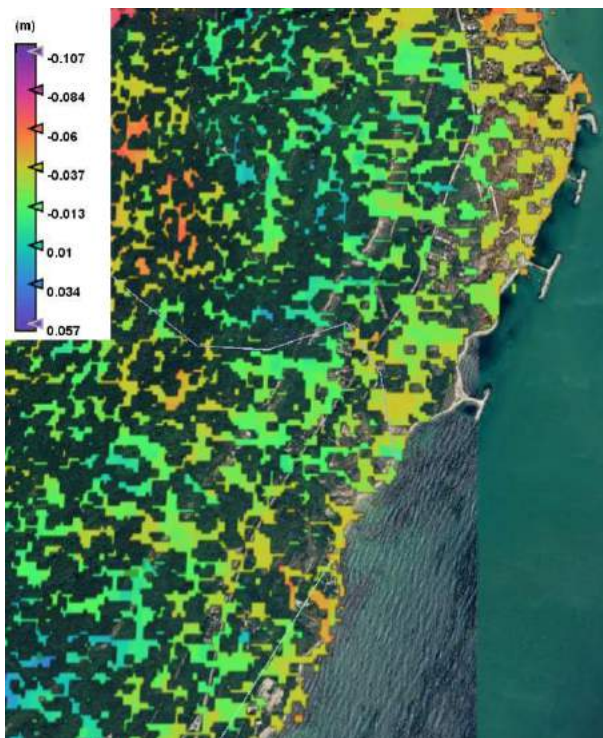
На Фиг. 8 б) е показана карта на преместванията определени в IFI, които бяха получени от теметично обработени изображения от дати 2 април 2018-28 ноември 2018 г.. Това IFI е едно от многото обработени двойки изображения включени в новосъздадения архив, който ще се използва за проследяване динамиката на свлачищните процеси въз основа на данни от този тип. Цветът на пикселите представлява движението на повърхността в дименсия метър за изследвания период, вариращо от тъмносино до пурпурно. Особено уязвимите зони са показани в пурпурно, а по-малко уязвимите в жълто и зелено. Пример за оценка на активността на свлачището базирана на това IFI показана на Фиг. 8 б), е че слягането варира до -192 mm. Площта, затворена от многоъгълника от точки 208, 209, 201, 102, 111 и 112 е недостъпна, тъй като е с най-висока степен на наклон (Фиг. 8) и следователно не беше възможно да се поставят геодезически точки и извършат GNSS измервания. Преместванията на терена в тази област ще се наблюдават само по данни от SAR и именно там се регистрират някои от най-големите стойности на потъване за изследвания период.



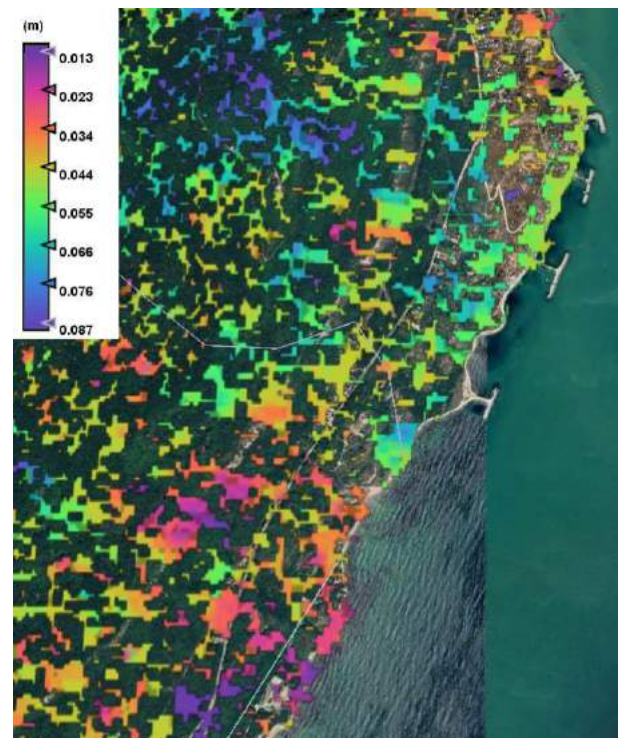
20Nov2015_11Mar2016



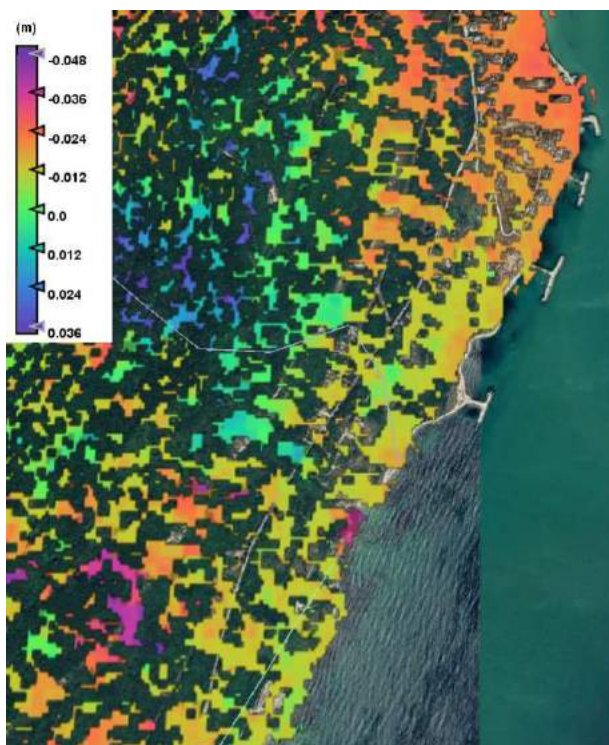
26Nov2016_20Mar2017



15Nov2017_27Mar2018



20Nov2018_22Mar2019



29Nov2019_28Mar2020

Фиг. 9. Премествания в свлачището "Далгия Яр", получени от IFI г., низходяща орбита 36 за есенно-зимните периоди от 2015 до 2020 г.

На Фиг. 9 е представен нагледен пример за настъпилите измествания на земната повърхност по LOS. Те се изчисляват от разгънатия фазов сигнал, който е кодиран с цвят. Може да се отбележи, че за всеки един от четиримесечните периоди от зимните месеци ноември – март 2015-2020 г. изчислените измествания са в диапазона между 2 (издигане) и -25 (слягане) см. Получените IFI разкриват, че регистрираните деформации са концентрирани в някои области с неравномерна структура. От тях е създадена и карта на концентрацията на деформации на земната кора. От същото изображение са премахнати онези пиксели от IFI, които имат съответни стойности на кохерентност под 0.3, тъй като информацията получена от тях се счита за ненадеждна.

Представените по горе резултати за двата изследвани обекта (свлачищен циркус „Дългия Яр“ и свлачище „Тракийски скали“) предоставят солидна основа, за да потвърдят, че IFI, получени от сателитни SAR данни са подходящи за изследване на деформации на земната кора. За конкретния период изчислените премествания са в диапазон от няколко сантиметра до няколко дециметра, което е в съответствие с очакваните годишни стойности за изследваните райони. Към момента обработените по DInSAR данни може да се считат за единственият източник на информация за онези части от конкретни обекти, когато теренът е трудно достъпен и непроходим или е недостъпен по други причини. Може да се каже, че реализираният подход при проучването на двата обекта може да се използва за проучване и наблюдение на цялата свлачищна зона от гр. Варна до нос Калиакра, както и в други райони по Черноморското крайбрежие.

Заклучения

Получените от това изследване резултати демонстрират потенциала и способността на радиолокационните сателитни данни и подхода за използване на времеви редове от DInSAR за изследване и постоянен мониторинг на деформациите на земната повърхност в двата изследвани района. Въз основа на тези редове се измерват техните вариации по LOS със сантиметрова точност във времето, използвайки свободно достъпни данни от PCA и безплатен софтуер. Тематичната обработка по DInSAR може да се разглежда като привлекателен метод и оперативен инструмент за решаване на опасни задачи геоложки изследвания като откриване и наблюдение на деформации на земната повърхност. Трябва да се подчертае, че повърхностните деформации, получени от сателитни данни, изискват прецизни изчисления и

допълват полевите измервания и биха могли да ги насочат към конкретни райони/обекти, но не могат да ги заменят в пълна степен.

Крайните продукти от обработката по DInSAR са карти на повърхностно преместване, показващи средните повърхностни измествания за фиксиран период от време в посока LOS. Още едно предимство на резултатите от DInSAR обработка, е че те предоставят плътна пространствена информация само в райони с малка растителна покривка, докато в силно райони където растителността доминира кохерентността в IFI е ниска и за получаване на резултати се налага да се извършва интерполация. Комбинацията от GNSS измервания и DInSAR повиши качеството на информацията относно текущите геодинамични процеси и повърхностни движения.

Окончателните резултати получени от съместната интерпретация на данни от GNSS и DInSAR, които ще се извършат по проект „Мониторинг на свлачишни процеси....“ ще даде по-подробна представа за продължаващите деформации на земната повърхност за периода 2015 ÷ 2022. Информацията, събрана чрез двете досегашни GNSS кампании, както и планираните за 2021/2022 г. ще осигурят добра база за точното определяне на хоризонтални и вертикални премествания земната повърхност на конкретни геодезически точки, докато информацията получена след обработка по DInSAR отразява повърхностни измествания за хиляди наземни пиксела, но само в посока по LOS. Моделът на скоростите получен за точките на GNSS мрежите ще е с висока точност гарантирана от метода на измерване и поради тази причина се счита за референтен, докато от обработката по DInSAR ще се получи покритие за много по-големи площи. Следователно комбинацията от тези две метода ще позволи по-точно и по-подробно изследване на текущите геодинамични процеси в района.

Благодарности

Тези изследвания са реализирани с финансовата подкрепа на Националния Фонд за научени изследвания, проект КП-06-ОПР 06/1 от 14.12.2018г. „Мониторинг на свлачишни процеси по Северното Черноморие на България, чрез съвместно използване на данни от глобални навигационни спътникови системи и интерферометрични изображения от радари със синтезирана апертура“, по програма „Фундаментални научни изследвания по обществени предизвикателства – 2018 г.“

Литература:

1. Nikolov, H., Atanasova M.. (2017), Influence of different DEMs on the quality of the InSAR results – case study over Bankya and Mirovo areas. Active and Passive Microwave Remote Sensing for Environmental Monitoring, edited by Claudia Notarnicola, Nazzareno Pierdicca, Emanuele Santi, 10426, SPIE, 104260M-1-104260M-8. <https://doi.org/10.1117/12.2278393>
2. Veci Luis (2016). TOPS Interferometry Tutorial, <http://sentinel1.s3.amazonaws.com/docs/S1TBX%20TOPSAR%20Interferometry%20with%20Sentinel-1%20Tutorial.pdf>, 2019
3. SNAPHU: Statistical-Cost, Network-Flow Algorithm for Phase Unwrapping <https://web.stanford.edu/group/radar/softwareandlinks/sw/snaphu/>
4. Геозащита Варна ООД (2017). Годишен отчет 2017
5. Геозащита Варна ООД (2018). Годишен отчет 2018
6. Нанкин, Р., Иванов П. (2019) Актуално състояние на свлачищата, засягащи Северното българско Черноморие, Review of the bulgarian geological society, vol. 80, part 3, 2019, p. 176–178
7. Nankin, R., Krastanov M., Ivanov P.I. (2020). Geotechnical investigation and spatial orientation of the sediments of the topola formation in the area of the Topola village landslides, Northeast Bulgaria, Volume 20, Book 1.1, 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference (SGEM 2020) 18-24 August, Albena, Bulgaria, 2020
8. Nankin, R., P.I. Ivanov, M. Krastanov (2020). Thracian Cliffs landslide, Northern Bulgarian Black Sea Coast. Review of the Bulgarian Geological Society, vol. 81, part 3, 2020, p. 215–217
9. Bruchev, I., Dobrev, N., Frangov, G., Ivanov, P.I., Varbanov, R., Berov, B., Nankin, R. Krastanov, M. (2007). The landslides in Bulgaria — factors and distribution, Geologica Balcanica, 36, 3–4, pp. 3–12.
10. Evlogiev, Y., D. Evstatiev. 2011. New geological model for the landslides between the Kranevo village and the Panorama camping-site (North Black Sea coast). – Eng. Geol. and Hydrogeol., 26, 3–26
11. Dimitrov, N., Georgiev I., Atanasova M., Ivamov A.. Monitoring of the landslide processes at the "Dalgiya Yar" landslide. Conference Proceedings of Selected papers, Section Geodesy and Mine Surveying, Volume 20, Book 2.2, 20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference (SGEM 2020) 18-24 August, Albena, Bulgaria, 2020

Use of satellite data by the Copernicus program for assessment of modeled wind field from atmospheric weather prediction models for the Black Sea

Marieta Dimitrova

National Institute of Meteorology and Hydrology
e-mail: marieta.dimitrova@meteo.bg

Key words: Scatterometers , ALADIN, HRES, WW3, SWAN models

Abstract: The National Institute of Meteorology and Hydrology of Bulgaria (NIMH) is responsible for the marine meteorological forecast service in the western part of the Black Sea, according to the requirements of the World Meteorological Organization (WMO) and the International Maritime Organization (IMO). The issue of marine forecasts in NIMH is carried out by the numerical wind- wave forecast system for the Black Sea, which was developed and improved through the years. The existing operational marine forecasting system is based on state of art numerical spectral wave models SWAN and WAVEWATCH III (WW3), providing 72-hours wind wave forecast for the Black Sea area. The input data for the system are the wind fields at 10 m over the sea surface provided by the atmospheric model ALADIN, specially set up for the Black Sea. The accuracy of the wind - wave forecast depends largely on the quality of the wind fields and the type of atmospheric models - global or regional. This paper present the results of the evaluation of the wind speed at 10 m from the regional atmospheric model ALADIN and HRES – a global atmospheric model with high spatial resolution of the European Center for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF). The statistical assessment was made by comparing of modeled wind speed fields with satellites wind data (in near real time) at 10 m from ASCAT scatterometers of satellites MetOP B and MetOP C over the Black Sea, which are disseminated by the Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS), part of the Copernicus Program. The statistical results show a good agreement between the models and satellite measurements.

Приложение на спътникови данни от програма „Коперник“ за оценка на вятъра от атмосферните прогностични модели за Черно море

Мариета Димитрова

Национален институт по метеорология и хидрология
e-mail: marieta.dimitrova@meteo.bg

Ключови думи: скатерометри, ALADIN, HRES, WW3, SWAN модели

Резюме: Националният Институт по Метеорология и Хидрология (НИМХ) в качеството си на национална хидрометеорологична служба на България осъществява дейността по морското метеорологично обслужване в западната част на Черно море, съгласно международните изисквания на Световната Метеорологична Организация (СМО) и Международната Морска Организация (ИМО). Издаването на морски метеорологични прогнози в НИМХ се осъществява с помощта на разработената и усъвършенствана през годините оперативна система за числена прогноза на ветровото вълнение в Черно море. Действащата оперативна системата е напълно автоматизирана, изградена на базата на съвременни числени спектрални вълнови модели SWAN и WAVEWATCH III (WW3), осигуряваща 72 часова прогноза на вятъра и вълнението в басейна на Черно море. Системата се захранва с прогностични данни за вятъра на височина 10м от версия на модела ALADIN, специално подготвена за атмосферен форсинг на вълновите модели за акватория на Черно море. Точността на числените прогнози на вълнението зависи от качеството на информацията за вятъра на 10 м. от атмосферните модели и от вида на атмосферните модели - глобални или регионални. Представят се резултатите от проверката на точността на прогнозата на скоростта на вятъра на 10 м. от регионалния атмосферен

модел ALADIN и глобалния атмосферен модел с висока резолюция HRES на Европейският център за средносрочна прогноза на времето (ECMWF). Направена е статистическа оценка на точността чрез сравнение на моделните и на спътниковите данни (в почти реално време) за скоростта на вятъра на 10 м от скатерометъри ASCAT на спътниците MetOP B и MetOP C за Черно море, разпространявани от Службата за наблюдение на морската среда (CMEMS) - част от услугата Морски мониторинг по програмата на Европейската Комисия "Коперник". Статистическите резултати показват добро съвпадение между моделните и спътниковите данни.

Introduction

The western part of the Black Sea area is highly vulnerable to natural hazards. The major hazards which pose a real danger to shipping and many other human activities in the coastal zone are strong winds, wind waves and especially the extreme ones, occurring during severe storms as well as storm surge events. Therefore accurate and reliable prediction of such events and timely early warning of severe weather, are absolutely necessary in order to minimize the risk offshore and along the coasts. The National Institute of Meteorology and Hydrology of Bulgaria is responsible for the marine forecasts services and issue of early warnings on operational basis. The issue of sea state forecasts in NIMH is carried out by using the numerical wind- wave forecast system for the Black Sea, which was developed and improved through the years. The system was created in 1996 as a result of the common efforts of the scientists of NIMH-BAS and Meteo-France (Kortcheva et al, 2010, Kortcheva et al, 2014). The existing operational marine forecasting system is based on state of art numerical models. It is a coupled system and consists of third-generation spectral wave models WAVEWATCH III (WW3; Tolman, 2009) and SWAN (Booij et al. 1999, SWAN, 2019), and the limited area Numerical Weather Prediction (NWP) model ALADIN (ALADIN, 2019). The system is used to deliver early warning information for the extreme weather events along the Bulgarian Black Sea coast to end-users and incorporated into the publically available European early warning alert system Meteoalarm on the website of NIMH freely accessible by the public (Dimitrova et al., 2019). Figure 1 shows an overview of the current operational marine forecasting system in NIMH. The recent advances in satellite technology have created the possibility to evaluate the quality of the 72 hours wind wave forecast. Use of the remotely sensed wind and wave data is important for the improvement of the accuracy of the operational numerical wind and wave forecasts and hindcast applications (Galabov et al, 2015). It has to be noted that the validation of the models outputs (wind speed and direction, significant wave height and direction, wave period) for the Black Sea is a difficult task because the number of marine surface observations along the Bulgarian Black Sea coast are sparse and not sufficient. Therefore we chose the satellite-derived wind and wave data, which are the only continuous source of information to compare the atmospheric and wave models results with observations. Satellite altimeter wind and wave data from Jason-2, Jason-3, and SARAL AltiKa and scatterometer wind data from MetOP ASCAT-B and MetOP ASCAT-C are used for the statistical evaluation and calibration of the operational models for the Black sea area.

The atmospheric models provide winds field at 10m over sea surface as driving forces for the numerical wave models which provide detailed sea-state information for any given location in the Black sea area. The output from wave models depends largely on the quality of the wind fields as well as of the type of atmospheric models - global or regional. (Holthuijsen et al., 1996, Ardhuin et al., 2007, Galabov et al., 2013, Umesh, 2017)

This work has been designed to demonstrate how the Near Real Time (NRT) scatterometer wind data from MetOP ASCAT-B and MetOP ASCAT-C disseminated by the Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS), part of the Copernicus Program are used operationally to evaluate the quality of the modeled wind products for the Black Sea.

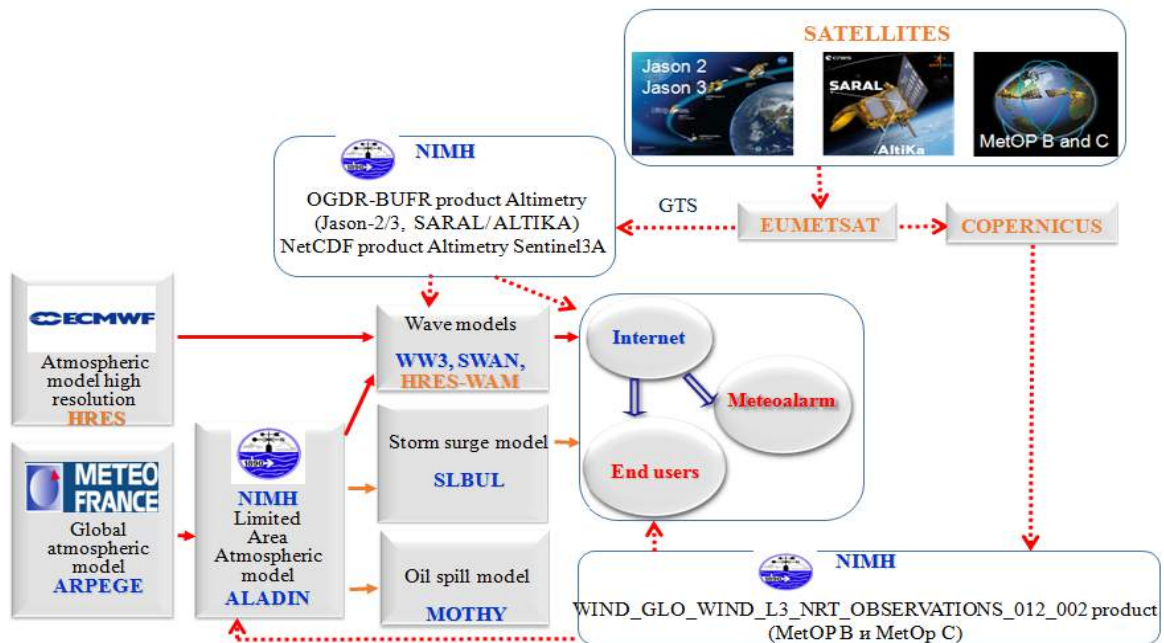


Fig. 1. The operational marine forecasting system of NIMH

Data and Methods

In 2019, a fully automated scheme was set up at NIMH for operational use of near real time satellite altimeter wind and wave data from Jason-2, Jason-3, and SARAL AltiKa and scatterometers wind data from MetOP ASCAT-B and MetOP ASCAT-C (Fig.1). The scheme work as additional module to the current operational marine forecasts system and it is integrated into the web-based system of NIMH. It consists by two parts with algorithms for combining satellites data with numerical models outputs. The first one is algorithm with a few technological steps for a comparison of atmospheric models and scatterometers data (Fig. 2).

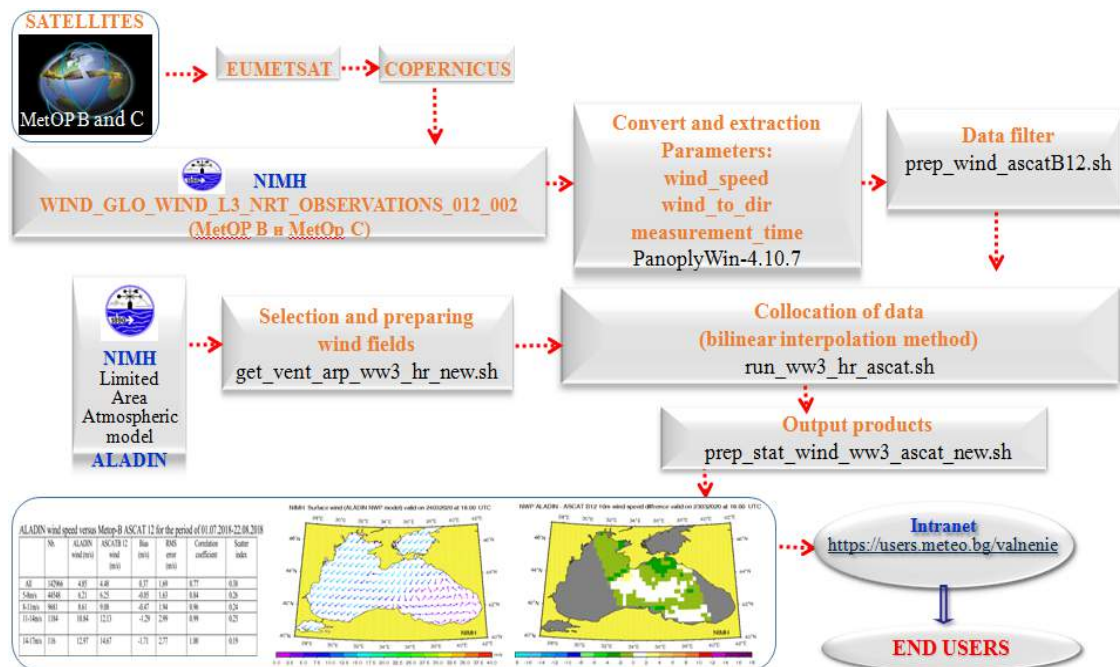


Fig. 2. Chart of the technological steps for comparison of the atmospheric models and scatterometers data

Advanced Scatterometers ASCAT on board of polar orbiting Meteorological Operational satellites MetOP-B and MetOP-C launched by the EUMETSAT, are designed to provide unique global ocean wind field products operationally (ASCAT, 2015). We used the Royal Netherlands Meteorological

Institute (KNMI), Global Wind Level-3 ASCAT 12 km (WIND_GLO_WIND_L3_NRT_OBSERVATIONS_012_002) coastal wind product downloaded from the CMEMS website (CMEMS, 2019). The scatterometer measurements from MetOP ASCAT-B and MetOP ASCAT-C over the Black sea are taken two times daily due to descending swaths (between 06:00 and 09:00) and ascending swaths (between 17.00 and 20.00) (Fig. 3 and Fig. 4). The near real time daily and reprocessing L3 wind products contains gridded L2 scatterometer wind vector observations and allows for direct use without preliminary manipulation. The scatterometer and models data are at different time scale. It means that ASCAT wind measurements had to be coordinated with the time of ALADIN wind forecast. The ASCAT B and ASCAT C scatterometers wind data are chosen to be with a minimal time difference compared to the NWP models winds (less than one hour). More details about technical steps can be found in Dimitrova, 2019.

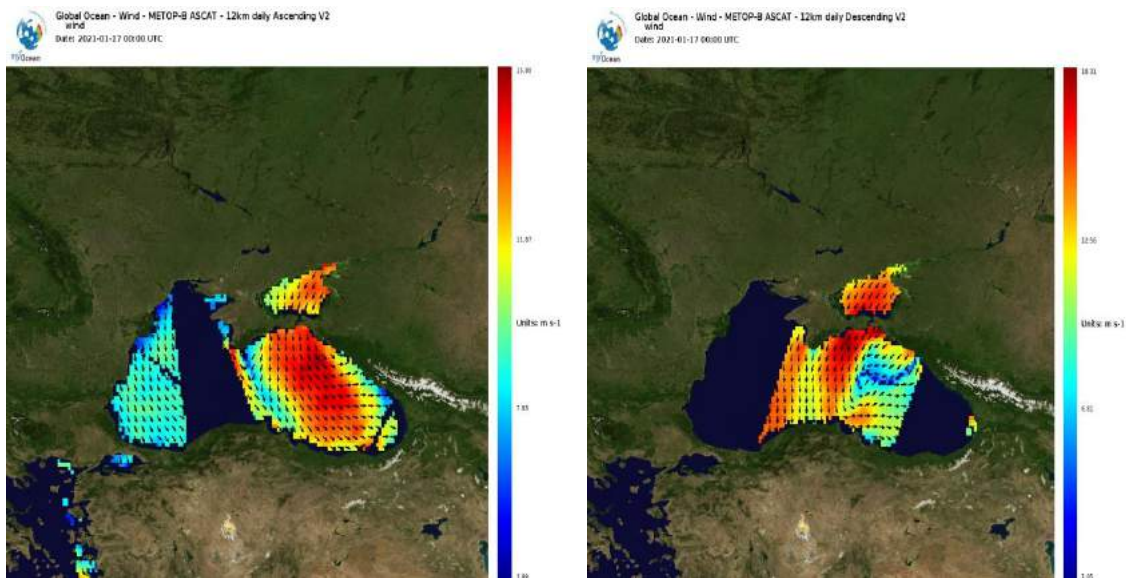


Fig. 3. Data for wind speed and direction obtained from MetOP-B ASCAT 12 km, on 17.01.2021, ascending (left) at 17:58 UTC and descending pass (right) at 06:33 UTC

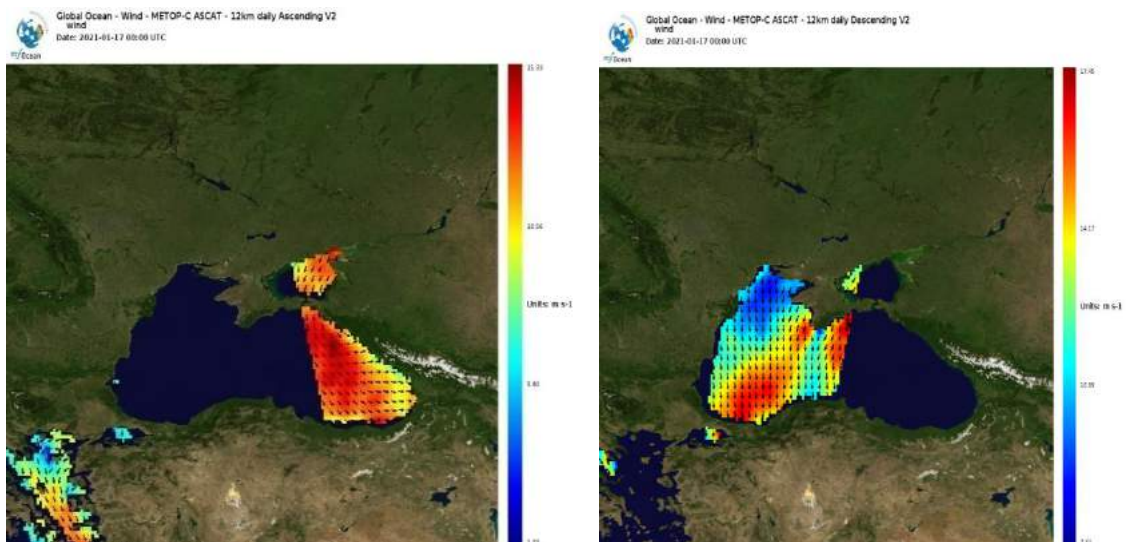


Fig. 4. Data for wind speed and direction obtained from MetOP-C ASCAT 12 km, on 17.01.2021, ascending (left) at 07:29 UTC and descending pass (right) at 18:49UTC

The second part of the module consist of algorithm for a relevant comparison of wave models and satellite altimeter data with several important steps, in order to make the time and space scales of the different systems compatible. The altimeter wind and wave NRT data from Jason-2, Jason-3 and SARAL AltiKa satellites is received at NIMH through the World Meteorological Organization (WMO) network Global Telecommunication System (GTS). The European Organization for the Exploitation of

Meteorological Satellites (EUMETSAT) distributes the wind speed at 10m above the mean sea level and the significant wave height as the operational geophysical data records (OGDR)-in BUFR format. The wind and wave data provided by the three altimeter missions mentioned above is passed through decoding tools to convert the OGDR-BUFR data to ASCII format and then a quality control process according to the products handbooks (i.e., Jason-3, 2016) and the best quality data is selected for the study after applying the editing criteria for Jason-2, Jason-3 and SARAL AltiKa altimetry (Dimitrova et al.,2019). Further details about technical steps can be found in (Dimitrova et al.,2013). Fig. 5 shows the daily coverage of satellite altimeter ground tracks over the Black Sea on 17.01.2021.

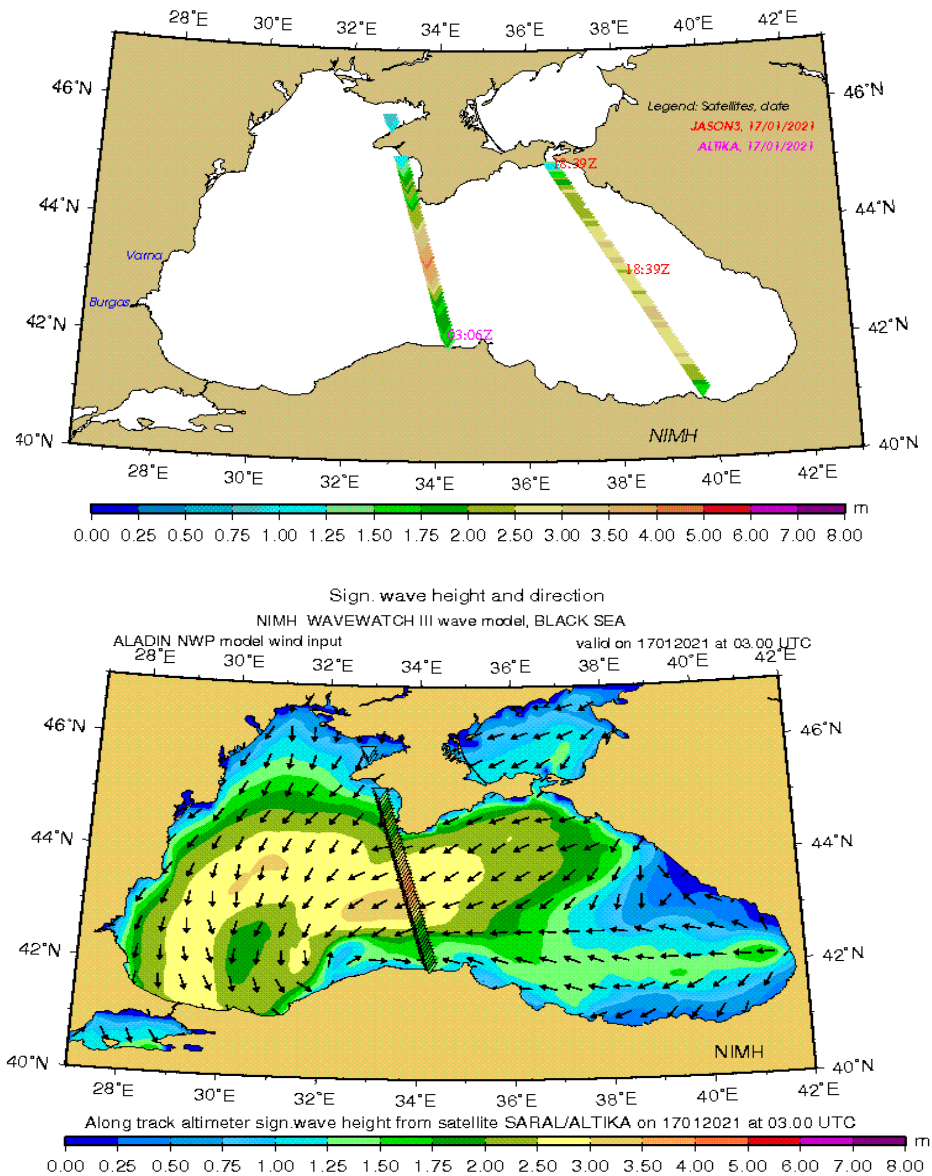


Fig. 5. Collection of altimeter satellite tracks over the Black sea for 17.01.2021 and wave field from WW3 in the Black Sea (the arrows indicate the mean wave directions), the black line denotes the ground track of AltiKa above the Black Sea on 17.01.2021 at 03h06min (down)

The products from the first part of the module are visualize by using GMT (GMT, 2019) software (Fig. 6) and tables with statistical characteristics (Table 1, Table 2, Table 3 and Table 4) are uploaded on the internal webpage <https://users.meteo.bg/valniev> of NIMH on a daily basis for operational use. The statistics generated from verification scheme are important to represent effectiveness of the numerical models and reliability of wind wave forecasts. The statistical results show that the wind speeds from the limited area model ALADIN show better coincidence with the observed winds. The HRES model also in a good agreement with scatterometers ASCAT B and ASCAT C measurements, but there is tendency of some underestimation of the wind fields. This is not general conclusion, because the period of estimation is not long enough. Overall, the atmospheric models provide accurate forecast of wind field over the Black sea.

The outputs of the scheme can be used not only to improve the quality of the marine forecast and to prepare expert assessments for the benefit of state institutions and private sector.

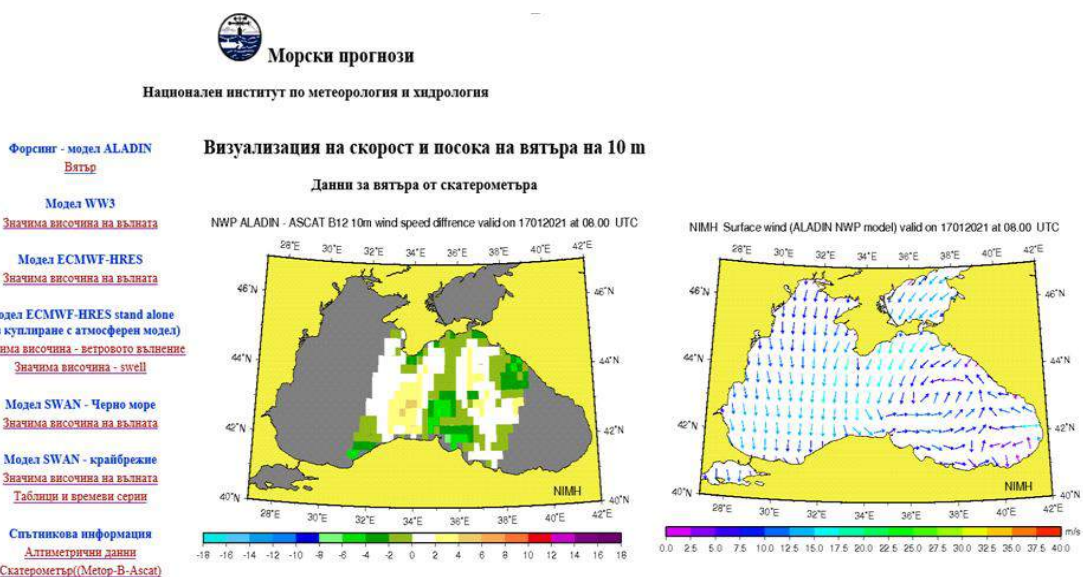


Fig. 6. Print screen of internal webpage with wind speed differences ALADIN-ASCAT B (left) and wind speed and direction from ALADIN model (right) with grid mesh 12km on 17.01.2021 at 08 UTC

Table 1. ALADIN wind speed versus Metop-B ASCAT 12 for the period of 01.01.2018-31.12.2019

	Nb.	ALADIN wind (m/s)	ASCATB 12 wind (m/s)	Bias (m/s)	RMS error (m/s)	Correlation coefficient	Scatter index
All	783074	7.63	7.86	-0.23	1.76	0.88	0.23
5-10m/s	653831	6.93	7.06	-0.13	1.74	0.85	0.25
10-15m/s	127459	10.90	11.56	-0.66	1.75	0.91	0.16
15-20m/s	7582	14.59	16.21	-1.62	1.69	0.99	0.14
>20m/s	184	17.66	20.70	-3.04	1.42	0.99	0.16

Table 2. HRES wind speed versus Metop-B ASCAT 12 for the period of 01.01.2018-31.12.2019

	Nb.	ECMWF wind (m/s)	ASCATB 12 wind (m/s)	Bias (m/s)	RMS error (m/s)	Correlation coefficient	Scatter index
All	783074	7.30	7.86	-0.56	1.77	0.89	0.24
5-10m/s	653831	6.67	7.06	-0.39	1.62	0.87	0.24
10-15m/s	127459	10.27	11.56	-1.28	2.00	0.93	0.21
15-20m/s	7582	12.75	16.21	-3.47	3.35	0.99	0.30
>20m/s	189	13.70	20.70	-7.00	5.36	0.98	0.43

Table 3. ALADIN wind speed versus Metop-C ASCAT 12 for the period of 01.01.2020-31.12.2020

	Nb.	ALADIN wind (m/s)	ASCAT C 12 wind (m/s)	Bias (m/s)	RMS error (m/s)	Correlation coefficient	Scatter index
All	489616	7.65	7.93	-0.28	1.86	0.87	0.24
5-10m/s	404468	6.90	7.06	-0.17	1.84	0.83	0.26
10-15m/s	82965	10.93	11.66	-0.73	1.86	0.90	0.17
15-20m/s	5834	14.62	16.13	-1.52	1.66	0.99	0.14
>20m/s	184	17.70	20.72	-3.02	1.41	0.99	0.16

Table 4. HRES wind speed versus Metop-C ASCAT 12 for the period of 01.01.2020-31.12.2020

	Nb.	HRES wind (m/s)	ASCAT C 12 wind (m/s)	Bias (m/s)	RMS error (m/s)	Correlation coefficient	Scatter index
All	489616	7.36	7.93	-0.57	1.82	0.88	0.24
5-10m/s	404468	6.68	7.06	-0.39	1.68	0.85	0.24
10-15m/s	82965	10.40	11.66	-1.26	2.02	0.95	0.20
15-20m/s	5834	13.02	16.13	-3.11	2.99	0.99	0.27
>20m/s	184	13.93	20.72	-6.79	5.24	0.98	0.41

Conclusion

Satellite Earth Observation techniques matured over the last two decades to such a stage, that quality products of ocean wind and waves, can be produced routinely. The meteorological and oceanographic satellites information is freely disseminated within the framework of the Copernicus program of European Commission and has various applications in the field of marine meteorology.

Many studies have confirmed that scatterometers data is important and reliable data source for marine and NWP communities. The importance for operational real-time marine applications and oceanographic research is to characterize the differences between the scatterometer and NWP products (Stoffelen et al., 2006). The greatest benefit of ASCAT measurements is the possibility to analyze the wind fields over the sea and to understand how reliable the sea state forecast is. The accurate prediction of wind field by atmospheric models is absolutely necessary for accurate numerical simulation of the wave conditions over the sea.

The overall conclusion is that the operational marine forecast system produces a reliable wind wave forecasts for the Black Sea. The results from the evaluation of the wind speeds of the model systems by comparing very short-range forecasts of ALADIN and HRES with scatterometers ASCAT B and ASCAT C wind product show a good coincidence. There is a good agreement in terms of statistical characteristics between atmospheric models output and scatterometer wind data.

References:

- ALADIN,(2019). Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNationa <http://www.umr-cnrm.fr/aladin/spip.php?article259>
- Arduin, F, Bertotti L, Bidlot J-R, Cavaleri L, Filipetto V, Lefevre JM and Wittmann P., (2007), Comparison of wind and wave measurements and models in the Western Mediterranean Sea. *Ocean Engineering* 34 (3–4): 526–541
- Booij, N., Ris, R. C. and Holthuijsen L. H. (1999), "A third-generation wave model forcoastal regions. 1. Model description and validation", *J. Geophys. Res.*, 104,7649–7666.
- CMEMS: http://marine.copernicus.eu/services-portfolio/access-to-products/?option=comcw&view=details&productid=WIND_GLO_WIND_L3_NRT_OBSERVATIONS_012_002).
- Dimitrova, M, Kortcheva A, Galabov V., (2013) Validation of the operational wave model WAVEWATCH III against altimetry data from Jason-2 satellite, *Bul. J. of Meteo & Hydro* 18/1-2 : 4–17.
- Dimitrova, M., Galabov, V., Kortcheva, A. and Marinski, J. (2019). Use of Satellite Data in Marine Early Warning System Proceedings of the 14TH International MEDCOAST Congress on Coastal and Marine Sciences, Engineering, Management and Conservation, 22-26 October 2019, Marmaris, Turkey; Ozhan, E. (editor), MEDCOAST 19, vol. 1, pp. 139–150.
- Dimitrova, M, Kortcheva A, Galabov V., (2019) Comparison of modeled wind speed fields with scatterometer wind data over the Black Sea *Bul. J. of Meteo & Hydro*, 23/2;1-19
- EUMETSAT,(2019), EPS/Metop-SG Scatterometer Mission Science Plan https://www.eumetsat.int/website/wcm/idc/idcplg?IdcService=GET_FILE&dDocName=PDF_SCIENCE_EPSSG_SCA_PLAN&RevisionSelectionMethod=LatestReleased&Rendition=Web
- Galabov, V., Kortcheva A., (2013), The influence of the meteorological forcing data on the reconstructions of historical storms in the Black Sea, DOI:10.5593/SGEM2013/BC3/S15.006
- Galabov, V., Kortcheva, A., Bogachev, A., andTsenova, B. (2015), "Investigation of the hydro-meteorological hazards along the Bulgarian coast of the Black Sea by reconstructions of historical storms",*Journal of Environmental Protection and Ecology*, 16, 3, 1005–1015.
- GMT (2019) "The Generic Mapping Tools" generic-mapping-tools.org. <https://www.generic-mapping-tools.org/>
- Holthuijsen, LH., Booji N. and Bertotti L., (1996), The Propagation of Wind Errors through Ocean Wave Hindcasts. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering* 118:184–189
- Jason-3 Products Handbook,(2016),SALP-MU-M-OP-16118-CN, available at www.aviso.altimetry.fr/fileadmin/documents/data/tools/hdbk_j3.pdf
- Kortcheva, A & Dimitrova M. & Galabov V. (2010), A wave prediction system for real time sea state forecasting in the Black Sea, *Bul. J. Meteo & Hydro*, 15/2, pp. 66–80

15. Kortcheva, Anna, Vasko Galabov, Marieta Dimitrova, Andrey Bogatchev, (2014), Hindcast of extreme hydro-meteorological events along the Bulgarian Black Sea coast. In: proceedings of International Conference Analysis and Management of Changing Risks for Natural Hazards, 18-19 November 2014, Padua, Italy, AO6, 10–17.
16. Stoffelen, A., and D. Anderson, (1997), Scatterometer Data Interpretation: Measurement Space and Inversion, *J. Atmos. and Oceanic Tech.*,14,1298–1313
17. Stoffelen, A., Portabella M., Verhoef A., Verspeek J., Vogelzang J., (2006), Mesoscale winds from the new ASCAT scatterometer, *KNMI Res. Biennial Rep. 2005–2006*, <http://www.knmi.nl/research/biennial/05-06/ASCAT.pdf>.
18. Stoffelen, A., Vogelzang J., Verhoef A., (2010), Verification of scatterometer winds, 10th Int. Winds Workshop, http://www.knmi.nl/publications/fulltexts/scat_iww10.pdf.
19. SWAN Team,(2019), " SWAN Scientific and Technical Documentation,SWAN Cycle III version 41.31", Delft University of Technology.
20. Tolman, H. L., 2009: User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14. NOAA/NWS/NCEP/MMAB Tech. Note 276, 194 pp. + appendixes.
21. Umesha P.A., Prasad K.Bhaskarana., K.G.Sandhyab, T.M.Balakrishnan Nairb, (2017), An assessment on the impact of wind forcing on simulation and validation of wave spectra at coastal Puducherry, east coast of India, *Ocean Engineering* Volume 139, 15 July 2017, Pages 14–32
22. WMO, (1998), Guide to Wave Analysis and Forecasting, Vol. WMO 702 World Meteorological Organization ISBN 92-63-12702-6.

Application of mean statistics derived from Sentinel-1 time series on forest – examine forest type and correlation with biomass layers

Zlatomir Dimitrov

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

Keywords: Sentinel-1, time series, forest, RVI, SAR indices, CCI-Biomass, GlobBiomass, pyroSAR

Abstract: This study is focused on the mean characteristics derived from Sentinel-1 time series, on mountainous forest in Bulgaria, for a four year period of continuous observation. General aim is to demonstrate the utilization of resulted SAR observables in C-band by means of dual polarimetry, in mountainous disturbed forest, along the diversity of forest layer and local incidence angle. To study also statistical relationship between the SAR observables and forest parameters. The SAR observables consists of statistical mean values of both VH and VV backscatter intensities, and the dual-pol Radar Vegetation Index (dRVI). Three layers describing forest parameters are used as dependent variables, where - GlobBiomass-2010© and CCI-Biomass-2018©, freely provided by University of Jena (Lehrstuhl für Fernerkundung), and also Tree-Cover-Density-2015 in the scope of COPERNICUS Services. Time series processing is performed within the OS framework “PyroSAR”, developed there. Disturbed forest is considered, resulted from past Icethrow disaster event. Various RGBs are calculated, in order to distinguish particular backscatter behavior related to different conditions. Particular SAR responses are summarized for mean - dRVI, VH and VV, and used for supervised classification using SVM. Forest type and Forest/Non-forest masks are resulted from SVM-classifications, where highest accuracy achieved is 78%, whereas about forest masks highest accuracy is 91%. Additional SAR indices - such as dual-pol SAR Vegetation Index (dSVI) and Polarization Ratio (PR) are also calculated, showing non-significant contribution. Performed regression analysis shown that none significant correlation is observed between the SAR observables and biomass layers in mountainous forest. Nonetheless, high correlation exists between dRVI and local incidence angle, with $R^2 = 0.78$. Therefore, the mean characteristics calculated from the Sentinel-1 C-band using time series approach, show good feasibility to study forest areas. This study was kindly supported by Prof. C. Schmullius, PhD F. Cremer, Dr. N. Salepci from FSU-Jena, Lehrstuhl für Fernerkundung, in the framework of ERASMUS+ Programme.

Приложение на средни стойности на времева серия от Sentinel-1 в гори в планински територии – определяне вида на гората и статистическа корелация със слоеве биомаса (GlobBiomass, CCI-Biomass, TCD)

Златомир Димитров

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

Ключови думи: Sentinel-1, времева серия, гори, RVI, CCI-Biomass, GlobBiomass, TCD, pyroSAR

Резюме: Това изследване е фокусирано върху приложение на средни стойности на характеристики, получени от времева серия от радари със синтезирана апертура (SAR), от – Sentinel-1. Основната цел на настоящия доклад е да се демонстрира потенциалът на продължителните измервания в микровълнов канал „C“, за изследване на горски територии от различен тип в планински район. От средните стойности на обратното разсейване (VH и VV) е изчислен Радарния индекс на растителността – RVI, където в три-канална комбинация е изследван обратния отговор от различни видове обекти. Изчислени са и други два индекса – SVI и Polarization ratio, с цел да се провери техния принос в изследването. Основен проблем се явяват геометричните дефекти в радарното изображение. Извършени са неконтролируеми (ISO Cluster) и контролируеми (SVM) класификации, показвайки различна точност, като е изчислена и маска на горската растителност. От направения Principal Component Analysis са разпознати различни обекти отнесени към вида на гората и други класове земно покритие. От друга страна, в доклада се изследва статистическата сходимост между изчислените характеристики от Sentinel-1 и слоеве за състоянието на гората. Това са - GlobBiomass-2010© и CCI-

Biomass-2018© предоставени от Университета в Йена, както и *Tree-Cover-Density-2015*© в рамките на COPERNICUS Services. Времевата серия е изчислена със софтуерни продукти на Университета в Йена. Проведения корелационен анализ не показва статистическа сходимост, между характеристиките от Sentinel-1 и слоевете биомаса. Въпреки това, се наблюдава корелация между dRVI и локалния ъгъл на падане, където $R^2 = 0.78$. Направеното изследване показва голям потенциал за изследване на горски територии, чрез времева серия от Sentinel-1. Това изследване е подпомогнато с данни и софтуер от Университета в Йена (FSU-Jena), Lehrstuhl für Fernerkundung, в рамките на обмен по програма ЕРА3ЪМ+.

Introduction

Forests have been widely studied with SAR via variety of methods and techniques, which overcome a lot of imitations that frustrates optical approaches [1]. By means of e.m. properties of the backscattered chirp (e.g. polarization, intensity and phase), the bio-physical properties of the forest volume could be estimated [2, 3]. Forest parameters estimation, like the Above Ground Biomass (AGB) and forest stand Height via SAR measurements, are wavelength dependent [2, 4]. Assessed techniques comprises of scalar interferometry (InSAR) and vector interferometry (POLinSAR) that allows modelling of the backscattered signal throughout the forest volume [2, 5, 6]. Besides, measuring polarization states that constitutes of dual- or quad-pol, is of great importance in order to retrieve the geometric properties of the scattering media [7]. Dual polarization instruments that operates in C-band, like Sentinel-1 constellation, are capable to achieve accurately to delineation of the land cover classes [8]. Nonetheless, assessing growing stocks via SAR signal could be limited, due to saturation problems as a function of the wavelength, from which point SAR intensities could not be related with the biomass [9]. A lot of limitations imposed by environmental issues (e.g. precipitation) could be overcome, when assessing SAR intensities approach via time series analysis [10]. Considering forests, time series analysis based solely on SAR intensities is promising to assess forest structure and to delineate broadleaf from coniferous types [11]. In that relation, the ESA Copernicus - Sentinel-1 dual-pol C-band SAR mission offers great perspectives such a forest studies, by means of time series analysis. Dedicated world biomass estimation projects by ESA in the face of *GlobBiomass* and *CCI-Biomass* with referent years of the AGB layers - 2010 and 2018 [11, 12], introduces good basement for biomass change detection. In spite of that uncertainties should be analyzed, related to the local specifics of the landscape and environment, or even disaster events like Icethrow. The COPERNICUS Services – *Tree Cover Density* (TCD-2015) layer brings also fruitful information to the forest condition estimation.

Bulgarian temperate forests have commonly been affected by abiotic disturbance events, such as Icethrow. Due to harsh conditions in the mountains in winter, such massive disaster event happened in the late of 2014, demolishing more than 5 000 Hectares [13]. That brings needs of studying Bulgarian mountainous forests via SAR methods, where time series analysis is of great potential. Currently, there are no such studies in Bulgarian literature, which to assess utilization of Sentinel-1's time series in disturbed forest, especially on the North-West slope of Stara Planina Mountain. It is not studied also correlation of the C-band time series observables, with *GlobBiomass* and *CCI-Biomass* layers.

This study namely considers time series analysis application in Bulgarian temperate forest, resulted from for years of continuous observation, using Sentinel-1 SAR data. Resulted mean values of the backscatter intensities - VH and VV are used to calculate the dual-pol Radar Vegetation Index (dRVI). The dRVI have proven its potential in vegetation structure mapping, related with the optical NDVI [14]. In addition, the SAR vegetation index (dSVI) and Polarization ratio (PR) are also calculated. Two general approaches are followed, where in the first one thematically delineation of the land cover objects is pursued, via RGB combinations of dRVI-VH-VV, and Principal Component Analysis (PCA). Optical data is used for reference, comprising the VHR *GoogleSatellite* base map, and ancillary Sentinel-2 imagery. Resulted are unsupervised and supervised classifications with forest type, and forest/non-forest masks, where accuracy assessment is performed on those products in QGIS. The second approach tests statistical relationship between biomass layers provided from the University of Jena, Lehrstuhl für Fernerkundung – *GlobBiomass-2010* and *CCI-Biomass-2018*, with the Sentinel-1 mean observables from time series. Also, correlation is pursued with the local incidence angle and TCD-2015 from Copernicus Services. The time series calculations from Sentinel-1 data are performed at the FSU-JENA, Lehrstuhl für Fernerkundung, within ERASMUS+ exchange, with the kind support of Prof. C. Schmullius, Dr. N. Salepci and PhD F. Cremer. This study correlates with the Author's PhD study.

Data used and test site

The Sentine-1 (S1) SAR C-band data were used for time series analysis, in dual polarimetry that constitutes of – VH and VV. The S1 data specification used are summarized in the following table.

Table 1. Sentinel-1A/B SAR data specification, used at test sites – TS20 and TS21

Orbit	Descending	Product type	GRDH
Relative Orbit Number	80	Mean incidence angle	38 deg
Resolution cell	10 m	Azimuth / range looks	5 / 1
Begin / End of acquisition	23th Oct. 2014 / 17th May 2018	Polarization	VH / VV

Time series begins with the first available GRD-SAR image from Sentinel-1A, with benefit of the highest possible 10 m spatial resolution, and firstly having 12-days of temporal resolution. Since October 2016 the Sentinel-1B observations contribute to the time series, which improved the temporal resolution up to 6 days. Total period of continuous observation is four years. The SAR data is extracted via API-Hub of the Open Access Data Hub, by using the software tool developed at the University of Jena – “esa_sentinel_api“, by Jonnas Erlebe and John Truckenbrodt. Preliminary analysis pointed out that Sentinel-1’s Relevant Orbit Number – 80 suits to the desired test area, which covers test sites – TS20 and TS21, from the Author’s PhD. Projections used are - World WGS84 (4326), or UTM 34N (32634)

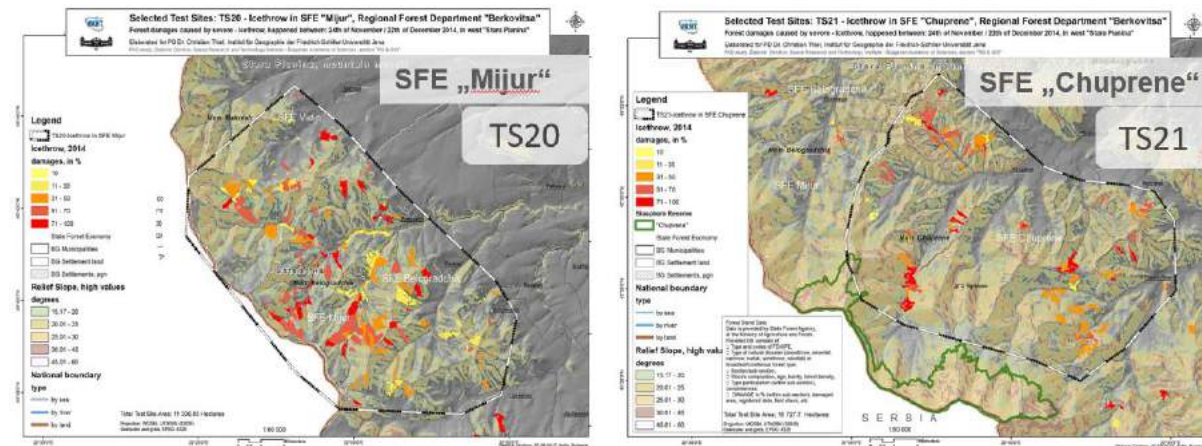


Fig. 1. Test sites maps, of - TS20 in SFE "Mijur" and SFE "Chuprene", with forest disturbances patches from 10% up to 100% forest loss, from the past Icethrow event in 2014, are overlaid on the DEM slope map

The test sites - TS20 and TS21 are located near North-West slope of the Stara Planina Mountain massif, in the vicinity of the State Forest Entities (SFE) of “Mijur” and “Chuprene” respectively. Severe natural disaster - Icethrow happened in late December 2014 erasing whole stands, with damages up to 100% at SFE “Mijur. The total affected area was about 50 000 Decares of century-old forest [11]. Test site maps of TS20 and TS21 are prepared using reference database for forest disturbances, according to the author’s PhD study, showing stands with damages from 10 to 100% (Fig. 1). Species distribution charts are elaborated according to the forest plans, where TS20 showed – 88.8% broadleaf forest, contrary to - 11.2% for coniferous one. About TS21, the broadleaf forest is – 72.4%, contrary to - 27.6 for coniferous, thus TS21 shows more coniferous forest unlike TS20. In spite of that, many forest stands were with undetermined tree species in the forest plans, hence was marked out with “no data” (Fig. 2).

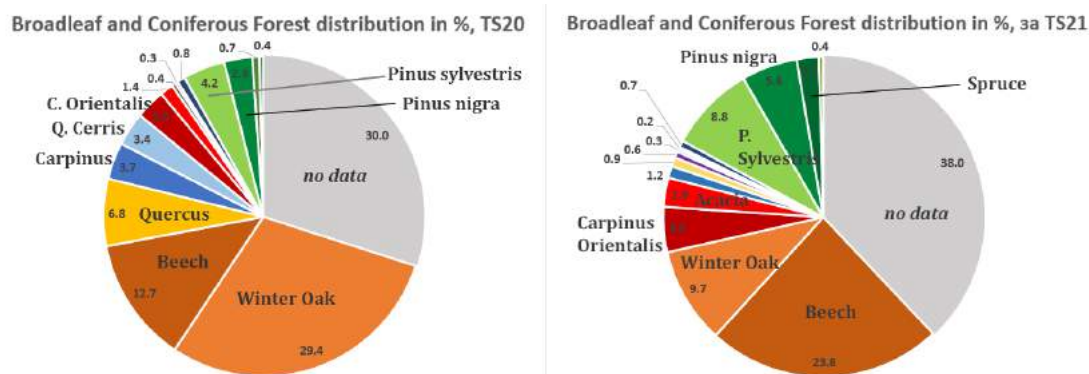


Fig. 2. Tree species distribution on TS20 and TS21, represented in %. Significant percentage of forest stands are with tree species undetermined - e.g. "no data". The TS21 is much coniferous type, rather than TS20.

Reference biomass data is represented by layers - *GlobBiomass-2010* and *CCI-Biomass-2018*, exclusively provided by Friedrich-Schiller-Universität - JENA, Institut für Geographie, Lehrstuhl für Fernerkundung. Resolution cell of both raster datasets is 90 m, where the CCI-Biomass layer originally

may have had coarser spatial resolution, in regard to the GlobBiomass one (Fig. 3). Auxiliary layer – Tree-Cover-Density – 2015 freely accessed from COPERNICUS Services is also incorporated, coming with spatial resolution of 20 m, in order to test its correlation with Sentinel-1 SAR observables.

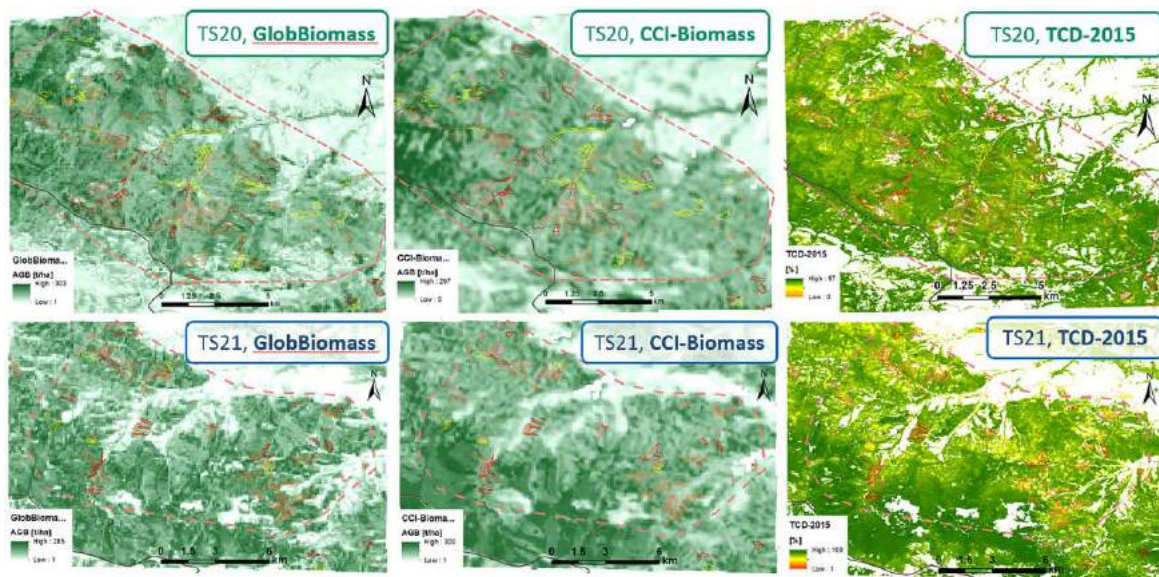


Fig. 3. Raster datasets representing AGB, exclusively provided by FSU-Jena (Lehrstuhl für Fernerkundung) - GlobBiomass-2010 and CCI-Biomass-2018, as well as Tree-Cover-Density-2015 from COPERNICUS Services.

Reference optical imagery used are the VHR *GoogleSatellite*© base map, and Sentinel-2 from 6th Oct., 2018, with id: [S2B_MSIL2A_20181006T092029_N0208_R093_T34TFP_20181006T142726](#). Whole bands are resampled, spatial resolution is 10 m. The RGB used is: B8 (842nm) – B5 (705nm) – B3 (560nm).

Methodology

The methodology is based on time series approach that aims direct interpretation of the mean values of Sentinel-1 GRD data, with benefit of dual polarization states of VH and VV. Methodology also aims utilization of the dual-pol Radar Vegetation Index (dRVI) in respect to diversity of the temperate mountainous forest; calculation is performed using the following formula [14]:

$$(1) \quad dRVI = \frac{4\sigma_{vh}^0}{\sigma_{vv}^0 + \sigma_{vh}^0}$$

General steps are: download of the Sentinel-1 GRD data, geocode and time series generation; calculation in Python of mean values from time series for - VH, VV and dRVI (formulating *S1-mean-characteristics* of the mean backscatter); calculation of the additional - dSVI and Pol. Ratio are followed up. First approach in methodology considers thematic analysis in GIS with two RGBs – RGB-1 (dRVI-VH-VV), RGB-2 (SVI-PR-dRVI) and Principal Component Analysis (PCA), where to analyze particular contribution of the characteristics; summary and classification of distinct land-cover type is made, referenced by VHR base map of *GoogleSatellite*© and Sentinel-2 satellite imagery. Forest/non-forest masks, as well as forest type are resulted from the supervised classification, followed by accuracy assessment. Second approach tests statistical correlation, which models the local incidence angle, GlobBio, CCI, and TCD, versus the mean SAR-observables in C-band as independent variables (Fig.4).

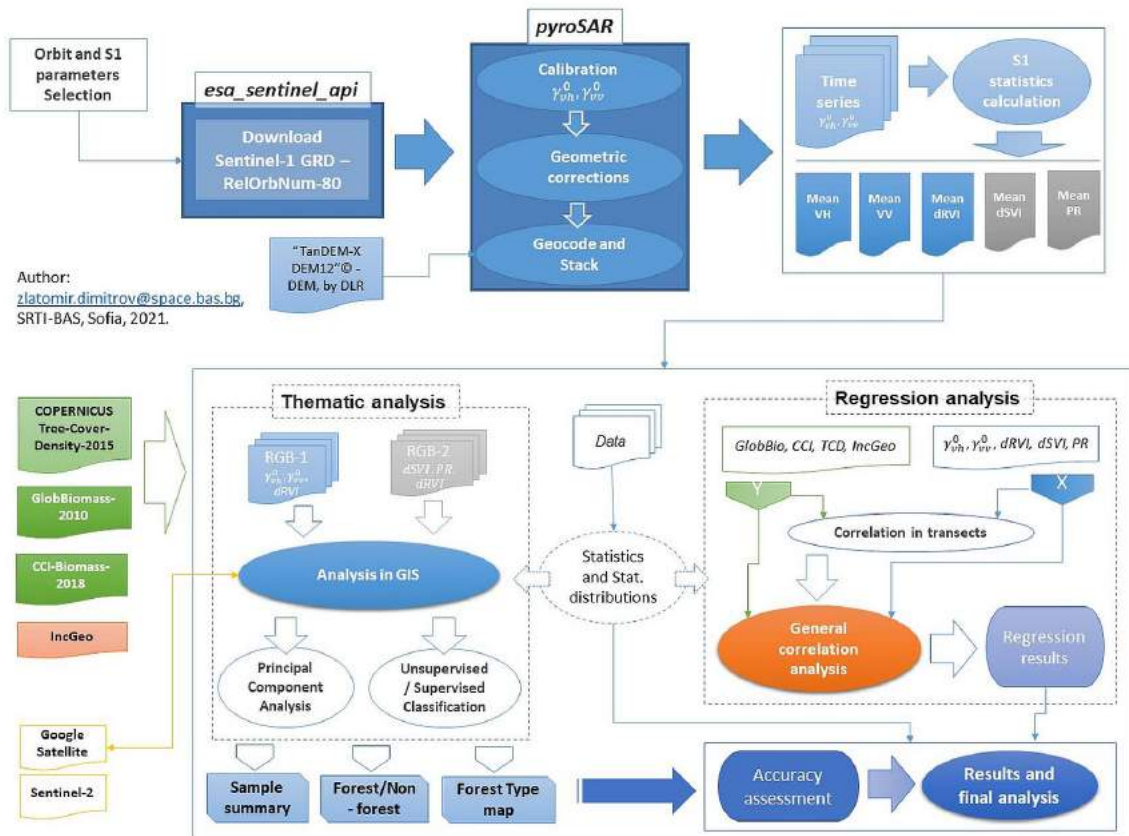


Fig. 4. Workflow chart, representing general steps of the analysis

Results and Discussion

S1 - Time series elaboration

Download of the Sentinel-1 GRD products is made via – “*esa_sentinel_api*” tool developed at the University of Jena, by J. Erlebe and J. Truckenbrodt in the framework of ESA project. Desired test site boundaries are applied, where download is performed via the ESA Copernicus Open-Access / API Hub. A total amount of 138 successfully downloaded scenes is achieved in “Descending” orbit from 158 available ones at the Hub. The “missing data” or broken archives are especially in the beginning of the Sentinel-1A lifecycle, as seen on Fig. 5. After downloading, for each pixel the Ellipsoidal (E) radar cross section by means of *gamma-nought* (γ^0) is calculated, from *sigma nought* (σ^0) and incidence angle - θ_i :

$$(2) \quad \gamma_E^0 = \sigma_E^0 / \cos\theta_i$$

A topographic normalization is used to derive terrain flattened intensities, based on the method proposed by D. Small [16], which is needed due to rugged terrain in the test areas. Whole of that is done during the geocoding of GRD-data, which is made in the framework of “*pyroSAR*” using the - SENTINEL-API, by function - *geocode()*. The SENTINEL-API uses ESA SNAP implemented geocoding methods.

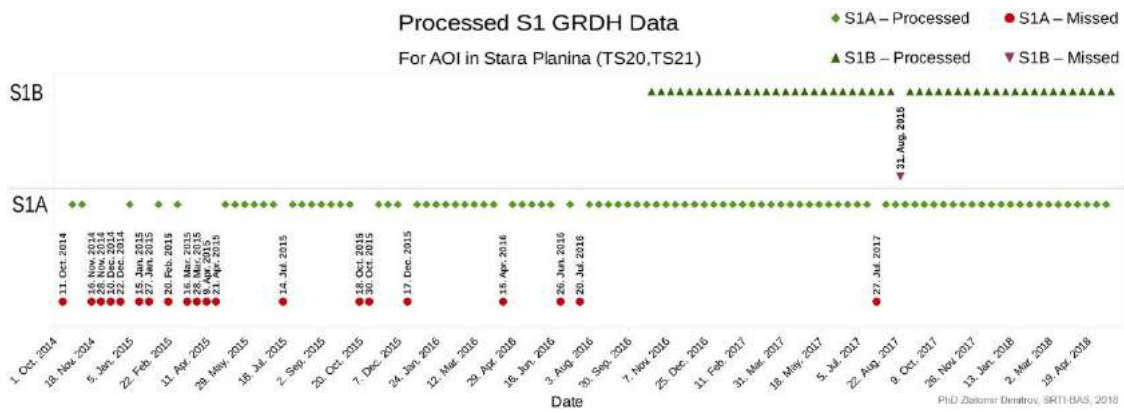


Fig. 5. Sentinel-1A/B available and successfully downloaded GRD data scenes that covers both test sites. From total amount of - 158, a 138 have been successfully downloaded and processed.

The *pyroSAR* is a Python based extensive framework, which includes wide toolset and APIs for SAR imagery manipulation and processing, developed at the University of Jena (FSU-JENA), Institut für Geographie, Lehrstuhl für Fernerkundung [17]. At the geocoding, the highly scaled reference DEM – “TanDEM-X DEM12”© provided by DLR, is used, in the frame of “DEM Proposal”. Afterwards, a stack of geocoded data via “*pyroSAR*”, using – *stack()* is elaborated, for each polarization, using ENVI file container, with BSQ order in a 32-bit pixel depth. Thereafter the mean values from times series ($\gamma_{vv}^0, \gamma_{vh}^0, \overline{dRVI}$ – *S1-mean-characteristics*) are calculated in Python, for both test sites – TS20/TS21 (Fig. 6).

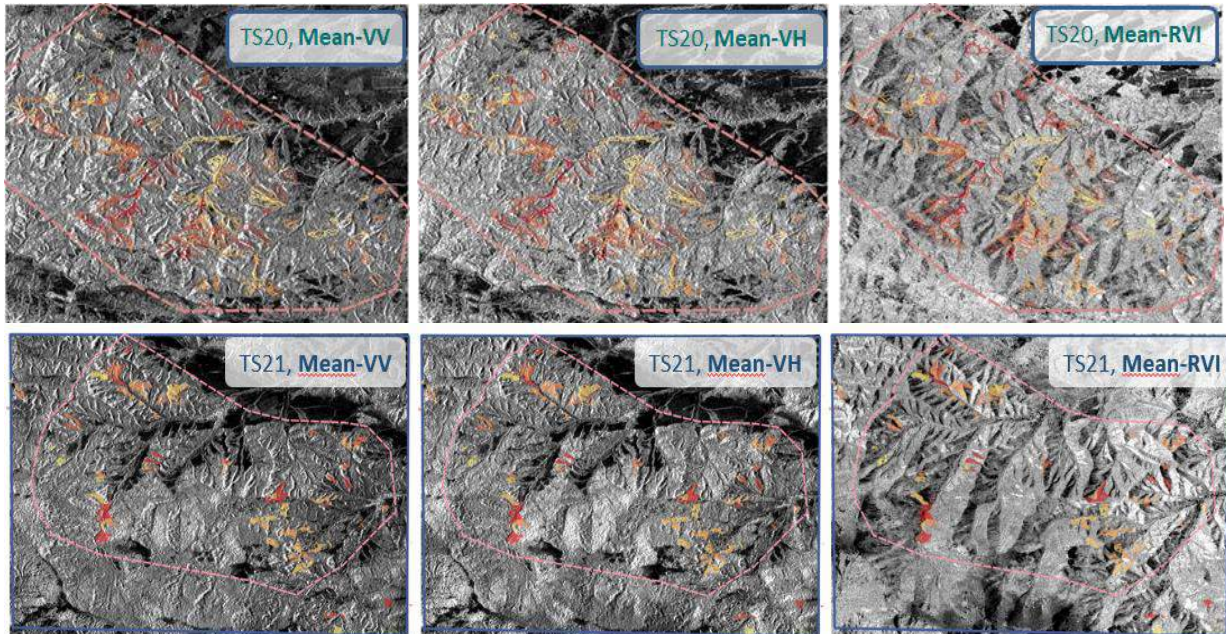
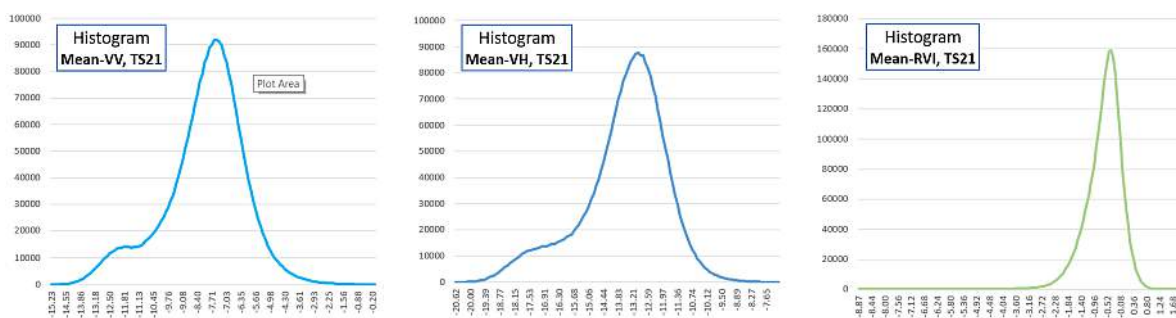


Fig. 6. Mean values from S1-time series, where from left to right are - $\gamma_{vv}^0, \gamma_{vh}^0$, and \overline{dRVI} , for TS20 and TS21

Statistics are calculated for each dataset, representing statistical distribution of the mean backscatter on different S1-characteristics, over the test areas of TS20 (SFE “Mijur”) and TS21 (SFE “Chuprene”) - Fig. 7.



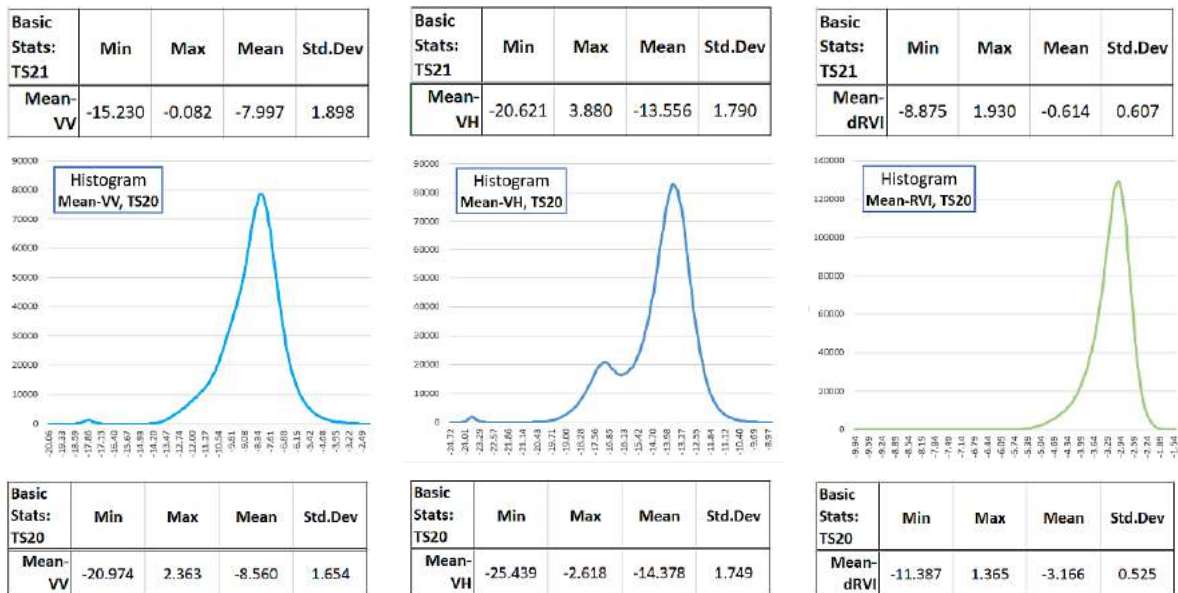


Fig. 7. Statistics and histograms of the calculated S1-characteristics for TS20 and TS21, using Decibel scale

Statistics on Fig. 7, confirms lower mean of the cross-pols ($\overline{\gamma_{vh}^0}$) rather than the co-pols ($\overline{\gamma_{vv}^0}$), with more than 6 dB, due to volumetric backscatter. Histogram profiles of S1-characteristics doesn't look very similar for both test sites, except the dRVI distributions. The only difference here is in the range of the values, where at the TS20, the dRVI show higher response. Also, notable is the standard deviation of the dRVI versus polarizations, which is one third of the VH and VV. Besides, the cross-pol for TS20 shows little extremum near -17 dB. Reason for that as founded, belongs to the agricultural areas in the NE part of the scene. Maximums of both polarizations encompass backscatter from forest areas, where different histogram profiles of TS20 and TS21 are dedicated to the complexity of the landscape.

On the other hand, from the calculated mean values of S1-time series (Fig. 6) following is observed: 1) the speckle noise is missing; 2) relief affects differently the three S1-characteristics, where on the $\overline{\gamma_{vv}^0}$ foreshortenings are more obvious (bright stripes), rather than the $\overline{\gamma_{vh}^0}$. This is because the $-\overline{\gamma_{vh}^0}$ is more sensitive to the forest volume, despite the response from $-\overline{\gamma_{vv}^0}$ that comes mainly from phase centers located in the crowns. That results to dark areas on \overline{dRVI} in forest, corresponding to geometric distortions – foreshortenings. Those areas are related with low local incidence angles between target vector and the radar beam, below 29 deg. Therefore, dRVI seems to be very sensitive to the relief; 3) The dRVI “sinks” over forest area, but shows higher values over grassland, crops, water, and random over bare/urban areas. Specific interestingly, the dRVI shows lower values on South at TS21, over the Biosphere Reserve (BR) “Chuprene”, characterized with dense and lower height coniferous species.

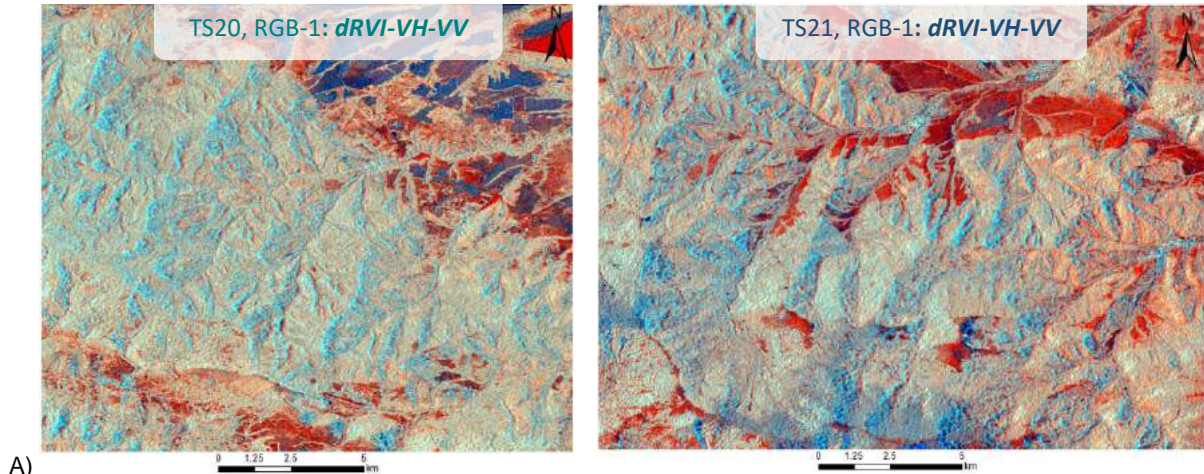
Thematic analysis, by means of S1-mean-characteristics

First approach pursue utilization of the RGB-1: dRVI-VH-VV, which underlines well backscatter contribution in respect to the type of land cover objects (see, fig. 8). Discussed dependencies above are clearly observed on RGB1, over TS20 and TS21, where more peculiarities are recognized. As seen from Fig. 8, the dark-red regions belong to grassland, some crops and standing water body; dark-blue belongs to other crops and bare fields; in light-blue mainly foreshortenings are recognized. Forest is colored from bright-beige colors, through orange patches and ends up with bluish that's belongs to the dense coniferous forest of BR “Chuprene” on TS21. Analysis shows that general reason for color changing in forest is dedicated to the dRVI. To track out those changes as eigen-based approach, a Principal Component Analysis (PCA) is calculated from the RGB-1. Herewith the PCA, forest structure is distinctly recognized, where wine-reddish and greenish regions give imprint amongst the rest of the pixels. Green areas are related to foreshortenings, while magenta colors reveal non-forest areas.

Those relations are tracked out in GIS by using the VHR optical base map of *GoogleSatellite*. The wine-red areas at the PCA-1 that shows up as dark-orange at RGB-1, resulted as a coniferous forest patches. Those areas exhibits high values in dRVI, above -2.5 dB, but mixed up with values over water and crops. That means that the dual-pol RVI brings up precious contribution, to differentiate forest type in C-band SAR! Overlaying the TCD-2015 (COPERNICUS) and CCI-Biomass-2018 (Uni-JENA) in GIS, showed high values of biomass (above 100 t/ha) and density (above 79%) within those dark-red patches that constitutes of coniferous forest (see, fig. 9). Whilst, analyzing the dense forest at the BR “Chuprene” (TS21) via the PCA-1 and biomass layers, showed high biomass (above 250 t/ha) on CCI-

Biomass, and density above 92 %. As stated, the dRVI there shows low values over forest. To obtain more information on this particular forest, the Sentinel-2 L2A reference imagery was used, with date of acquisition – 2018-10-06. Analysis confirmed that this is coniferous forest type, but with rather different spectral signature from the rest of the coniferous forest. Therefore, additional sensitivity of the dRVI to particular coniferous species in high mountain is observed (refer to Fig. 9, and Table-2).

In other hand, none distinct color, or values combination of *S1-mean-characteristics* could be related to the disturbed forest patches. Interestingly, considering forest loss above 80%, the dRVI showed higher values, pointing out to fresh vegetation regrowth. Must be stated also that the dRVI solely could not differentiate forest from non-forest area!



A) Fig. 8. The RGB-1: dRVI-VH-VV, for both test sites - TS20 and TS21, with good representation of the different land cover objects, based on backscatter response, due to sensitivity of the dRVI to vegetation

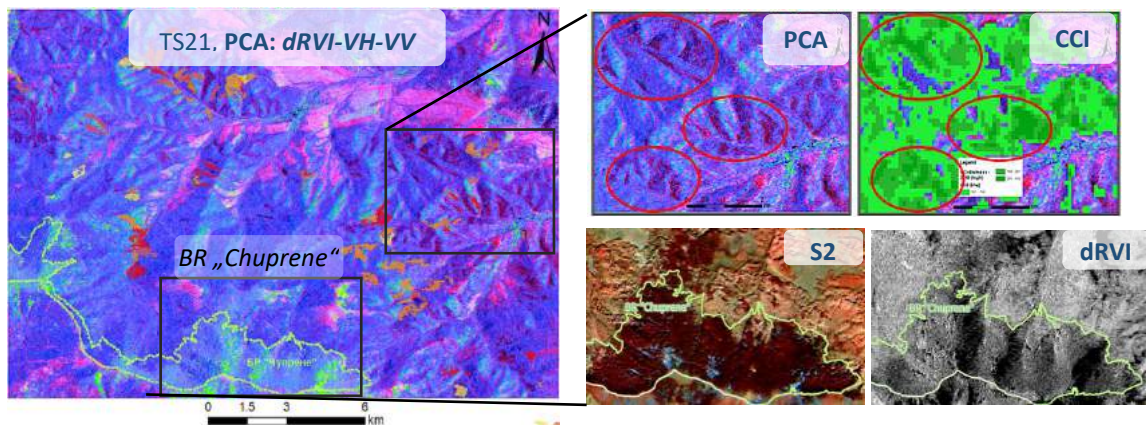
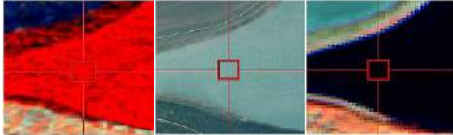








Fig. 9. The PCA-1 for TS21, derived from RGB-1 with disturbed patches and BR "Chuprene" overlaid. On the right: rectangle area, representing: Up - dark-red patches of different forest type/structure that exhibits high biomass (CCI-Biomass); Down – BR "Chuprene" with different coniferous forest, on reference S2 and dRVI.

Samples of land cover objects with different peculiarity are summarized in a table, where the land cover type is confirmed by referring the *GoogleSatellite*© VHR and S2. Also, optical imagery of Sentinel-2 as second reference is used, within RGB of B8(842nm) – B5(705nm) – B3(560nm), see Table-2.

Table 2. Samples of distinct land cover (LC) objects recognized on RGB-1, showing values of $\overline{\gamma_{vv}^0}$, $\overline{\gamma_{vh}^0}$, and \overline{dRVI} , referenced by *GoogleSatellite*© VHR base map, and Sentinel-2 in RGB combination of – B8 - B5 - B3.

RGB-1	Google	S2 - L2A	Samples object in recognized Land Cover (LC) type	\overline{dRVI} [dB]	$\overline{\gamma_{vh}^0}$ [dB]	$\overline{\gamma_{vv}^0}$ [dB]
			Sample 1 – geometric distortions (foreshortennings) over mountainous broadleaf forest (collected from TS20)	-4.163	-10.143	-3.898
			Sample 2 – agricultural fields, or kind of cultivated areas (collected from TS20)	-5.065	-18.086	-9.028

	Sample 3 – standing water body (collected from TS20)	-2.587	-23.653	-17.950
	Sample 4 – grassland / abandoned land, at open forest or non-forest (collected from TS20)	-3.451	-19.372	-13.275
	Sample 5 – coniferous forest type (collected from TS20) *winter VHR image of Google Satellite is used here.	-1.602	-12.833	-8.926
	Sample 6 – broadleaf forest type (collected from TS20)	-2.799	-13.690	-8.342
	Sample 7 – broadleaf mountainous forest on a slope (collected from TS21)	-0.538	-10.673	-5.199
	Sample 8 – second coniferous forest type, in Biosphere Reserve „Chuprene“ (TS21)	-1.894	-14.002	-6.853
	Sample 9 – bare areas, rocks, radar shadows (collected from TS21)	-4.048	-17.569	-7.951

From analysis above is obvious that the foreshortenings totally obstruct interpretation, because of higher sensitivity of the dRVI to geometric distortions. In fact, within certain interval of variations of the local incidence angle (*IncGeo*), the interpretation on slopes is possible; such an example is found on sample-7, where forest is a bit biased, but still interpretable. Other biased interpretation due to *IncGeo* is the top hill bare area with rocks and grass, on sample-9; because of the geometric distortions, firstly grassland is correctly interpreted in reddish, but due to increasing of the local incidence angle, its values become more alike to the agricultural ones, from sample-2.

From the recognized LC - objects above, training samples are elaborated in order to train Supervised classification, using Support Vector Machine – non-parametric machine learning algorithm. Total of eight LC – classes are formulated to classify objects based on the *S1-mean-characteristics* in RGB-1, approached differently in both test sites, represented on table-3. Zonal statistics and histograms are elaborated, about statistical distributions within training zone data, for each class. Largest standard deviation (STD) have classes – 1 (available only in TS21) and 2, in the reason of that they mostly describe geometric distortions, and also because those classes comprises mixture of land cover.

Table 3. Zonal statistics with Standard deviation (STD) of S1-mean-characteristics within training zone data, of classes particular for each test site. *Grey columns does not belong to the particular classification.

Formulated classes, of the training samples	STD for TS20		STD for TS21	
	Mean-VH	Mean-dRVI	Mean-VH	Mean-dRVI
Class 1 - Radar shadows / Bare area			2.486	1.437
Class 2 - Foreshortenings	1.225	0.332	1.568	0.444
Class 3 - Grassland	0.922	0.336	0.823	0.324
Class 4 - Crops	0.536	0.500	0.640	0.366
Class 5 - Deciduous forest	0.742	0.247	0.938	0.246
Class 6 - Coniferous forest	0.797	0.286	1.008	0.287
Class 7 - Coniferous forest, at BR „Chuprene“			0.817	0.308
Class 8 - Water	0.555	0.238		

The STD for Mean-dRVI in both cases is rather smaller than the mean-backscatter in VH. The STD is quite the same for both training classes – 5 and 6 comprising the deciduous and coniferous forests for both test areas and mean-characteristics, but also and the particular class-7 representing specific coniferous forest type. It should be stated, that the samples were collected over as most as possible homogenous conditions for conifer and deciduous forest (e.g. constant relief, small slope, density, etc.). Here, it was expected that standard deviation of both would defer in the expense of deciduous one, because conifer species are much homogenous, as refer to fig.2, especially for TS21. Nonetheless, rather the opposite is observed comparing STD of the cross-pol (Mean-VH), with largest difference at TS21 in amount of 0.070, in respect to 0.055 for TS20. The reason may be in the mixture of conifer species within the sample and resulting complex volumetric backscatter. The STD for Mean-dRVI is almost equal for both test areas, pointing out for similar coniferous species at TS20 and TS21, as a component of the training samples. Here, considering class-7 containing specific conifer type, the STD for both S1-characteristics is rather higher than regular coniferous in class-6.

Calculated histograms for coniferous training classes are in whole cases non-symmetrical, where for Mean-dRVI in TS20 histogram have strong negative skewness. Whilst, the specific conifer forest in BR “Chuprene” show positive skewness within the histogram. In spite of that, the deciduous class for both test sites are showing almost perfect symmetry. In other hand, sampled Crops showed smaller STD in Mean-VH rather than Grassland, pointing out to more distinct volumetric backscatter. However, the STD of Mean-dRVI is the highest at TS20 (because of the plenty of agricultural fields), and higher than Grassland. The Grassland sampled class-3 showed most symmetrical histograms, along high STD in Mean-VH. Highest STD is observed at class-1, because it encompass samples from bare area, urban and shrubs.

Unsupervised classifications are also elaborated, based on ISO-Cluster, resulted with three particular classes dedicated to forest. Aim is to test differences in accuracy of the resulted classifications and related products. The supervised classifications using SVM approach are shown below, on Fig. 10.

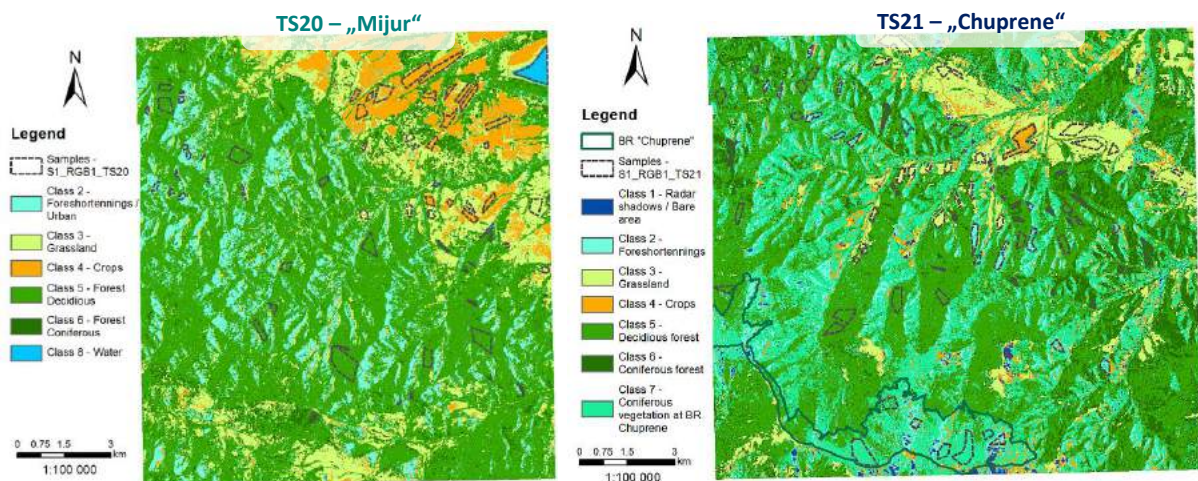


Fig. 10. Supervised classifications, using SVM with same number of classes; training samples are overlaid

The class-2 with foreshortenings comprises much large area on TS21, due to higher relief roughness and incision. Related to that, because of the similarity in values between coniferous forest in BR „Chuprene” and forest in foreshortenings, class-7 comprises large amount of pixels and complement to class-2. That problem does not exist in TS20. Nonetheless, ambiguities persists in particular to the test site and thematic class respectively. Accuracy assessment is therefore performed in order to obtain the Error matrices, including overall accuracy together with the Cohen’s Kappa coefficient, used as a measure of agreement between two individual pixels [18]. Software used is QGIS with the *Semi-Automatic-Classification* (SCP) plugin [19]. For the accuracy assessment of the supervised classifications, 15-random points per class are generated and furtherly validated by the VHR *Google Satellite*© and *Bing World Imagery*© base maps, facilitated by S2-reference imagery. Results from the Error matrices for both supervised classifications are summarized below, in Table-4.

Table 4. Error matrices output summary for both supervised classifications, along thematic classes' accuracy

	Classes	1	2	3	4	5	6	7	8	Overall accuracy [%]	Kappa hat classif.
TS20	PA [%]		94.79	79.99	100.0	89.46	100.0		100.0	78.723	0.6475
	UA [%]		80.0	70.0	80.0	100.0	50.0		100.0		
	Kappa hat		0.78	0.65	0.78	1.00	0.48		1.00		
TS21	PA [%]	9.31	96.21	33.00	100.0	79.31	85.82	100.0		68.897	0.5885
	UA [%]	70.00	80.0	70.0	10.0	100.0	70.0	30.0			
	Kappa hat	0.68	0.79	0.63	0.10	1.00	0.66	0.24			

As seen from table-4, the overall accuracy is higher for test site-TS20. The class-2 have very high Kappa-hat for both classifications, of which resulted very good delineation of foreshortenings. In other hand, the highest Kappa-hat is for deciduous forests. Errors for this class are observed in two directions – enlargement of the forest edge due to sparse forest areas and higher shrubs, and misclassification of urban areas that is specific for rural areas in Bulgaria, where houses are surrounded by lot of trees, especially for abandoned houses, which are very often picture unfortunately in the North-West Bulgaria. Coniferous forest have lower accuracy in respect to deciduous forest, which is more prominent on TS20, because there coniferous types are much less. Moreover, the coniferous types here are mixed up with other forest. Besides, in TS21 conifer patches are more homogenous and better distinguishable. There is no doubt that water is best classified, because of the highest values in dRVI and lowest in cross-pols. In crops class, for TS21 accuracy is very low, due to very small agriculture areas, in respect to the TS20. The grassland class is well classified by means of S1-characteristics.

Comparing supervised with the unsupervised classifications, general conclusion is that coniferous forest could not be delineated and is misclassified as deciduous one. Besides, whole three classes depicts forest areas. In spite of that, better performance of unsupervised classification is observed, in delineation of the forest edge in sparse forest areas (Fig. 11). Also, errors on the supervised on TS20, related to misclassification of agricultural lands as a forest, at unsupervised they are relatively small. Sparse forest is better classified here, but mixed up with shrubs and grassland. Agricultural lands are very well classified on both classifications types.

Resulted products from supervised/unsupervised classifications are - Forest type maps, related to deciduous / coniferous forest types, and Forest/Non-Forest masks, shown below (Fig. 11).

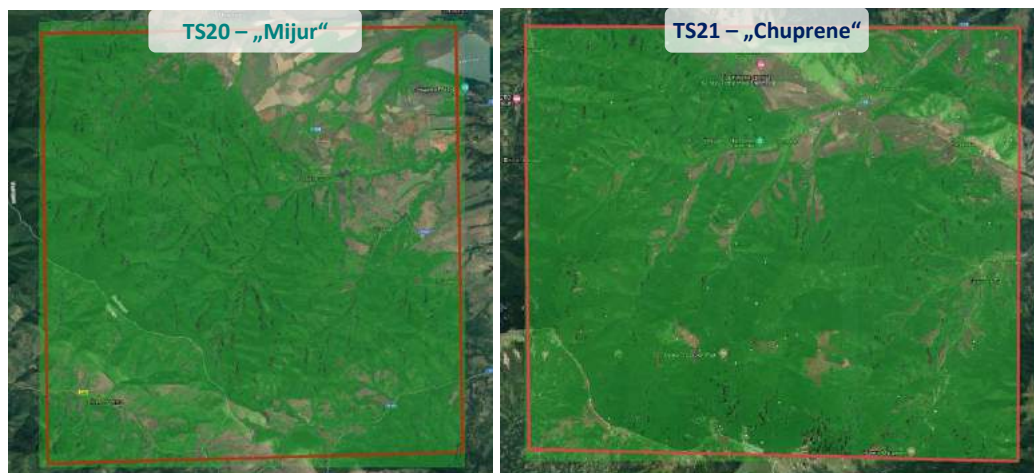


Fig. 11. Forest/Non-Forest masks derived from supervised classifications, where - left: TS20, right: TS21, over Google Satellite© VHR base map

Differences between forests masks approached via supervised or unsupervised classification are very small. Nonetheless accuracy assessment is approached also here, by generation of 60 points – 30 by 30 about forest/non-forest classes. Validation is performed again within QGIS environment, via SCP-plugin, incorporating Google Satellite© base map and Sentinel-2 optical imagery; see Table-5.

Table 5. Error matrices summary of Forest/Non-Forest Masks, derived from Supervised and Unsupervised classifications

	TS20				TS21			
	Supervised		Unsupervised		Supervised		Unsupervised	
	Non-Forest	Forest	Non-Forest	Forest	Non-Forest	Forest	Non-Forest	Forest
PA [%]	74.83	95.38	82.33	93.56	63.53	97.62	100.00	81.35
UA [%]	86.93	90.22	86.78	91.16	87.34	91.21	61.18	100.00
Kappa hat	0.816	0.664	0.800	0.739	0.841	0.571	0.498	1.000
Overall accuracy [%]	89.39		89.75		90.63		85.59	
Kappa hat classif.	0.732		0.769		0.680		0.665	

In overall, whole forest masks have very high accuracy, with high Kappa-hat classification value, showing strong similarity. Differences in accuracy between supervised and unsupervised approaches could be neglected. Highest accuracy is for Forest/Non-Forest mask in TS21 derived from supervised classification, where non-forest class has highest similarity by means of the Kappa-hat. Considering mask elaboration, foreshortenings touching forest at supervised classifications are incorporated, in order to fulfil holes in sloped forest. This is not wrong within current test areas, because mostly geometric distortions are located in mountainous forest areas, rather over bare sloped area. Nonetheless, errors are observed at TS21 in NE direction, where in the sake of misclassification within supervised approach, hills covered with shrubs that exhibits small incidence angles toward SAR antenna, are recognized as forest class-7 that is merged into deciduous and coniferous classes, in order to derive the output mask. In spite, interruptions within forest at both test sites, are due to misclassified forest as grassland or crops. In the forest masks by means of unsupervised approach, foreshortenings are not included because of ambiguities, in spite of that the forest edge is much better delineated (Fig. 12).

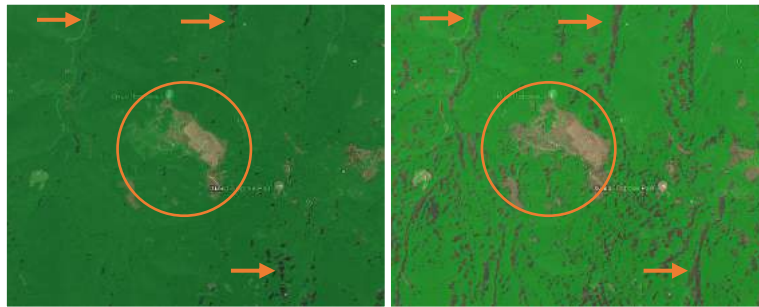


Fig. 12. Comparison in details, between forest masks derived from supervised (left), and unsupervised classification (right), for TS21 in high mountains, near BR “Chuprene” and hut - Gorski Rai

Additional SAR indices

Complementary SAR indices to the dRVI have been also calculated, based on their functional contribution to describe phenology of crops, mentioned in the literature [14]. Therefore, the dual-pol SAR Vegetation Index (dSVI) and Polarization ratio (Pol.R) are utilized in that study, where to test their functionality into forest status, using equation – 3:

$$(3) \quad Pol.ratio_{cross-pol} = \frac{\gamma_{VH}^0}{\gamma_{VV}^0}; \quad SVI_{dual-pol} = \frac{\gamma_{VH}^0 + \gamma_{Vv}^0}{\gamma_{Vv}^0}$$

Based on the first approach RGB-2-combination is hereof calculated, based on: $dRVI$, $dSVI$ u $Pol.R$, calculated from the $S1$ -mean-characteristics - γ_{vv}^0 , and γ_{vh}^0 . The GIS analysis showed high correlation in between in the forest territory, with no difference with the dRVI. Thus, in forest high values (white patches) on dSVI and PR are related with coniferous type, whilst forest in BR “Chuprene” is again well delineated (dark grey). Histograms show symmetrical distribution, with small differences in standard deviation, which should be due to diversity in agriculture and forest type (Fig. 13).

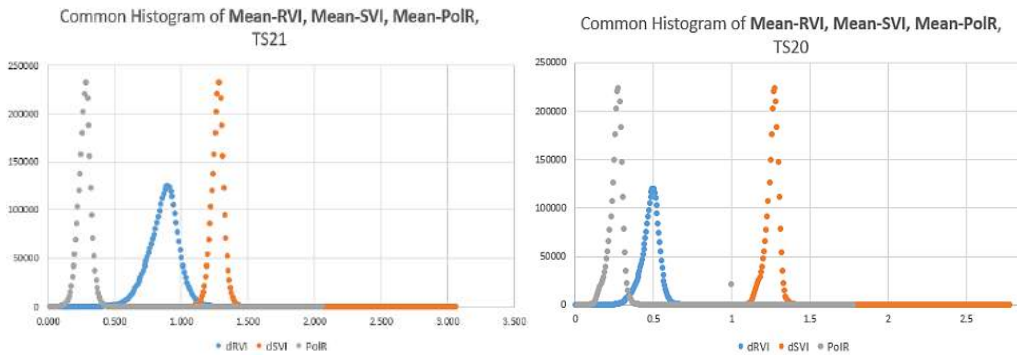


Fig. 13. Common histograms for distribution of the mean values of - dRVI, dSVI and Pol.R., for both test sites

Main differences are observed over agricultural areas, where values of the indices differ in general. On the second PCA calculated from RGB-2, eigen values have almost constant difference in forest area, where: $\lambda_1 \approx 1.5$, $\lambda_2 \approx 0.5$, $\lambda_3 \approx 0.7$. Exceptional cases are over some urban pixels (in green and yellow), and some pixels with strong backscatter toward sensor (in yellow) in the mountain; the radar shadows/bare areas from class-1 (RGB-1) are also delineated (in green), see Fig. 14. In the first case where yellow pixels are observed, in urban and forest regions, we have - $\lambda_1 > \lambda_2 \approx \lambda_3$, where eigen are about: $\lambda_1 \approx 3.3$, $\lambda_2 \approx 0.8$, $\lambda_3 \approx 0.7$. In the second case, where green pixels are observed, in urban region and radar shadows, we have - $\lambda_1 \leq \lambda_2 < \lambda_3$, where: $\lambda_1 \approx 3.2$, $\lambda_2 \approx 1.3$, $\lambda_3 \approx 0.7$.

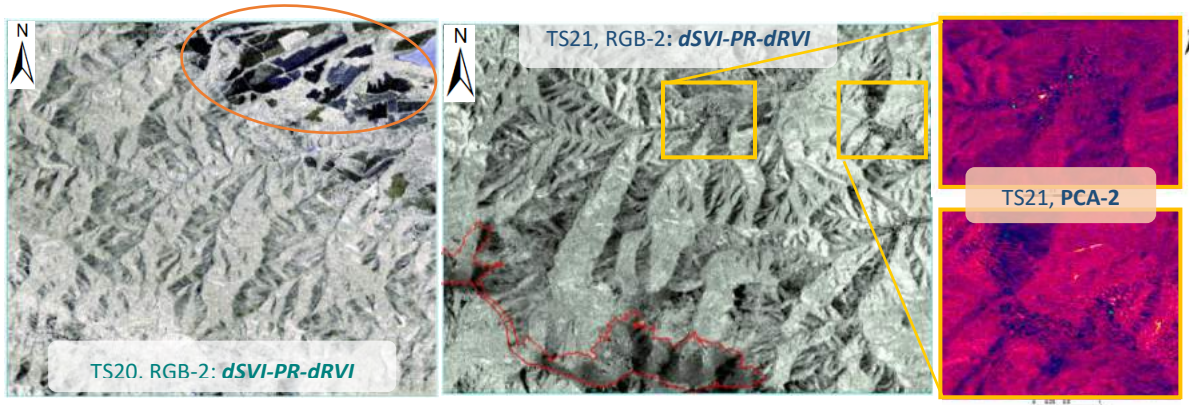


Fig. 14. The RGB-2 (dSVI, PR, dRVI) for both test sites, derived from the $-\overline{\gamma_{vv}^0}$, and $\overline{\gamma_{vh}^0}$, and showing high correlation in between (greyish), with exception over agricultural areas and reservoir. The PCA-2 on the right, showing differences in urban and within the mountain.

Regression analysis

In the purpose to study the possible statistical relation between *S1-mean-characteristics* and environmental characteristics (e.g. biomass, relief) regression analysis is considered. Related to that, the following regression tests are performed, aiming different combinations of dependent (DV) versus independent variables (IV) – such as: 1 – IncGeo as DV-1, 2 – TCD as DV-2, 3 – GlobBio/CCI as DV-3; and aiming particular regions of interest – (1) in transect on TS20; (2) for whole scene on TS20/21.

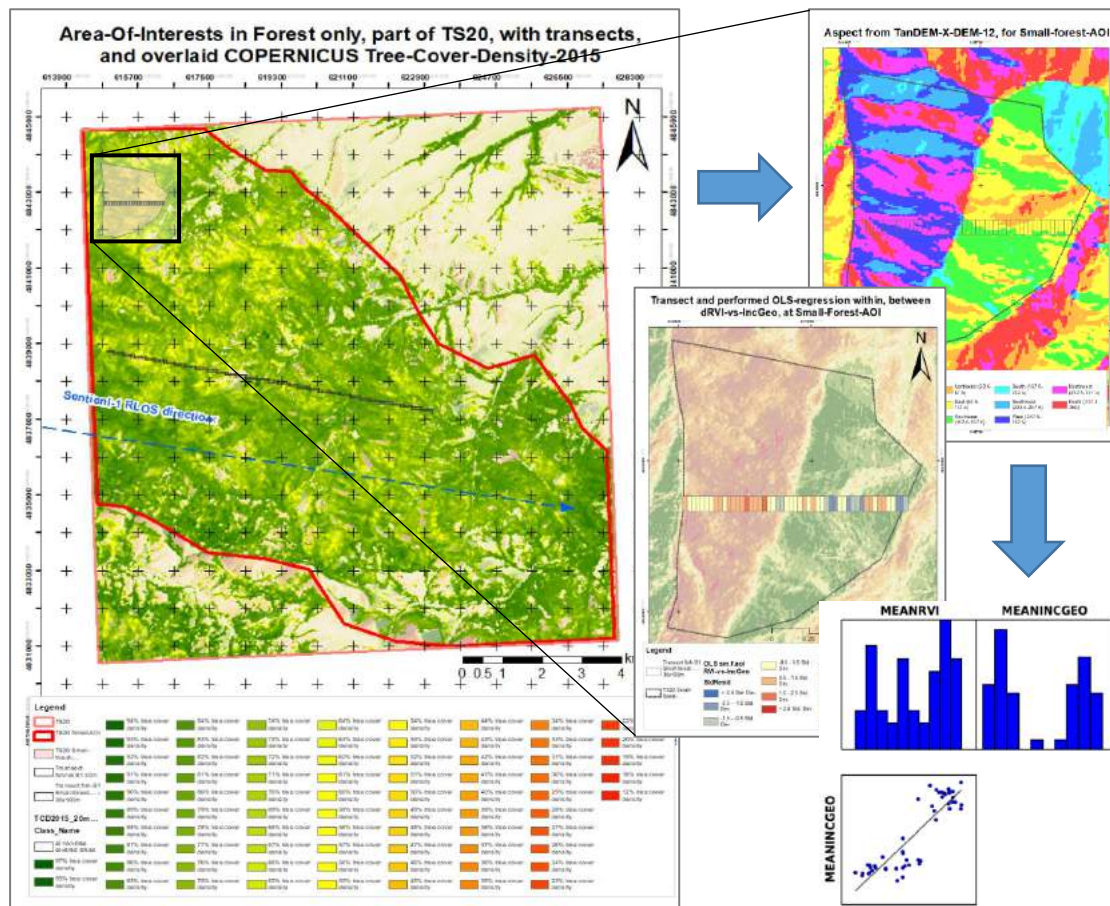


Fig. 15. Thematic map (left) with the two transects over COPERNICUS TCD-2015 base map. Sample maps (two, on the right) of the selected small transect, within quasi-homogenous environment, in terms of slope, aspect, and canopy density, in purpose of the regression test.

Regression test – 1: Firstly, the observed correlation between local incidence angle (*IncGeo*) and radar vegetation index (*dRVI*), is taken into account to be statistically tested. For that a small region that constitutes of 51 resolution cells of 30 x 100 m, is located in the NW part of TS20 - “Transect-small”, having high terrain slope, constant incidence angle and aspect, whole with small variations. Statistical distributions and histograms are calculated in transect, followed by single OLS regression in ArcGIS; please, refer to Fig.15. Regression results proves the preliminary observed correlation, between local incidence angle and radar vegetation index with very high coefficient of determination (R^2); see, table-6, DV-1. Thereafter, regression over wider transect is performed that constitutes of 196 resolution cells of 50 x 50 m whole over the TS20, aiming regression with DV-1 and 2, where *IncGeo* and *TCD-2015* are considered as dependent variables (see, table-6). Regression result for DV-1 is again high, using multi-parametric regression, but with lower coefficient of determination, because of the larger area used that brings more outliers in statistical point of view. This also points to strong “non-linearity” of the data. Considering the DV-2 combination, shows non statistical correlation between *TCD-2015* and SAR observables, by means of S1-mean-characteristics!

Table 6. Regression results of DV-combinations 1 and 2, with single- and multiple-parametric regression OLS - with the highest correlation result, within the two transects, at TS20

<i>TS20</i>	Transect – small		Transect - big	
<i>DV</i>	Equation tested	R^2	Equation tested	R^2
1	$IncGeo \sim dRVI_{mean}$	0.7808	$IncGeo \sim dRVI_{mean} + VH_{mean}$	0.6743
2	-	-	$TCD_{2015} \sim dRVI_{mean} + VH_{mean} + VV_{mean}$	0.0724

Regression test – 2: For tracking out statistical relationships within whole test area another test is performed, using forest AOI only, determined by the condition: $TCD-2015 > 10\%$. Full regression

analysis is performed in that case, using whole DV – combinations mentioned above. Regression equations with the best coefficient of determination are published and analyzed.

Considering local incidence angle, because of the larger region, correlation between *IncGeo* vs. *dRVI* (DV-1) is quite lower but still exists (please, refer to table-7, DV-1/TS20).

Considering regression of *TCD-2015* as dependent variable (DV–2), several equation combinations are approached testing also additional SAR indices and biomass layers as IV. Highest possible correlation in that case is achieved by incorporating the S1-mean-characteristics together with the both biomass layers, pointing out that there is correlative relationship between the tree density and AGB (table-7, DV–2.1/TS21). In spite of that, regression with *GlobBiomass-2010* using same DV gives no statistical correlation, whilst regression with *CCI-biomass-2018* interestingly shows some statistical relationship, with very low coefficient of determination (table-7, DV–2.3/TS21). Regarding *dSVI*, there is no correlation relationship between SAR indices and the tree density (table-7, DV–2.1/TS20).

Considering regression of the biomass layers, using delivered by the Uni-Jena, Lehrstuhl für Fernerkundung – *GlobBiomass-2010* and *CCI-Biomass-2018*, the performed regression shows small differences in depend of the test site environmental conditions. Hence, considering *GlobBiomass*, better result is for TS20, by using cross-pol - γ_{vh}^0 (table-7, DV-3.1/TS20) in the equation, rather than - γ_{vv}^0 (table-7, DV-3.2/TS20) at the multi-parametric regression, possibly because of the better sensitivity of the cross-pols to the forest volume. It is interesting, that the - \overline{dRVI} improves regression result, rather than using equation based solely on both polarizations. In spite, the correlative relationship in between is very poor, and does not exists for TS21. For *CCI-Biomass*, also, considering TS20 a kind of correlative relationship exists rather than for TS21, where different IV are found to be valuable for the regression (table-7, DV-3.3/TS20 and TS21). Poorer regression result on behalf of *CCI-Biomass* than *GlobBiomass* is interesting, because reference period for *CCI-Biomass* matches the four years period of the Sentinel-1 - time-series. Nonetheless, could be said that correlative relation between biomass and SAR indices (e.g. *dRVI*, *dSVI*) does not exists, which is proved finally by regressing the *GlobBiomass* versus Polarization Ratio (table-7, DV-3.4/TS21), or by *CCI-Biomass* versus dual-pol SAR vegetation index (table-7, DV-3.5/TS21), despite result of *Pol.Ratio* is better than *dSVI*.

Table 7. Highest correlation results from the regression with whole DV-combinations, including single- and multiple-parametric regression OLS, performed on both test sites

	TS20		TS21	
DV	Equation tested	R ²	Equation tested	R ²
1	$IncGeo \sim dRVI_{mean}$	0.4709	-	-
2.1	$TCD_{2015} \sim dSVI_{mean}$	0.0045	$TCD_{2015} \sim VV_{mean} + VH_{mean} + CCI_{Biomass}_{2018} + GlobBiomass_{2010}$	0.2111
2.2	-	-	$TCD_{2015} \sim GlobBiomass_{2010}$	0.0774
2.3	-	-	$TCD_{2015} \sim CCI_{Biomass}_{2018}$	0.1781
3.1	$GlobBiomass_{2010} \sim dRVI_{mean} + VH_{mean}$	0.1528	$GlobBiomass_{2010} \sim VH_{mean} + dRVI_{mean}$	0.0972
3.2	$GlobBiomass_{2010} \sim dRVI_{mean} + VV_{mean}$	0.1482	$GlobBiomass_{2010} \sim VV_{mean} + dRVI_{mean}$	0.0963
3.3	$CCI_{Biomass}_{2018} \sim VH_{mean} + VV_{mean}$	0.1092	$CCI_{Biomass}_{2018} \sim dRVI_{mean} + VV_{mean}$	0.0645
3.4	-	-	$GlobBiomass_{2010} \sim Pol.Ratio_{mean}$	0.0768
3.5	-	-	$CCI_{Biomass}_{2018} \sim dSVI_{mean}$	0.0046
3.6	$CCI_{Biomass}_{2018} \sim GlobBiomass_{2010}$	0.2629	$CCI_{Biomass}_{2018} \sim GlobBiomass_{2010}$	0.3434

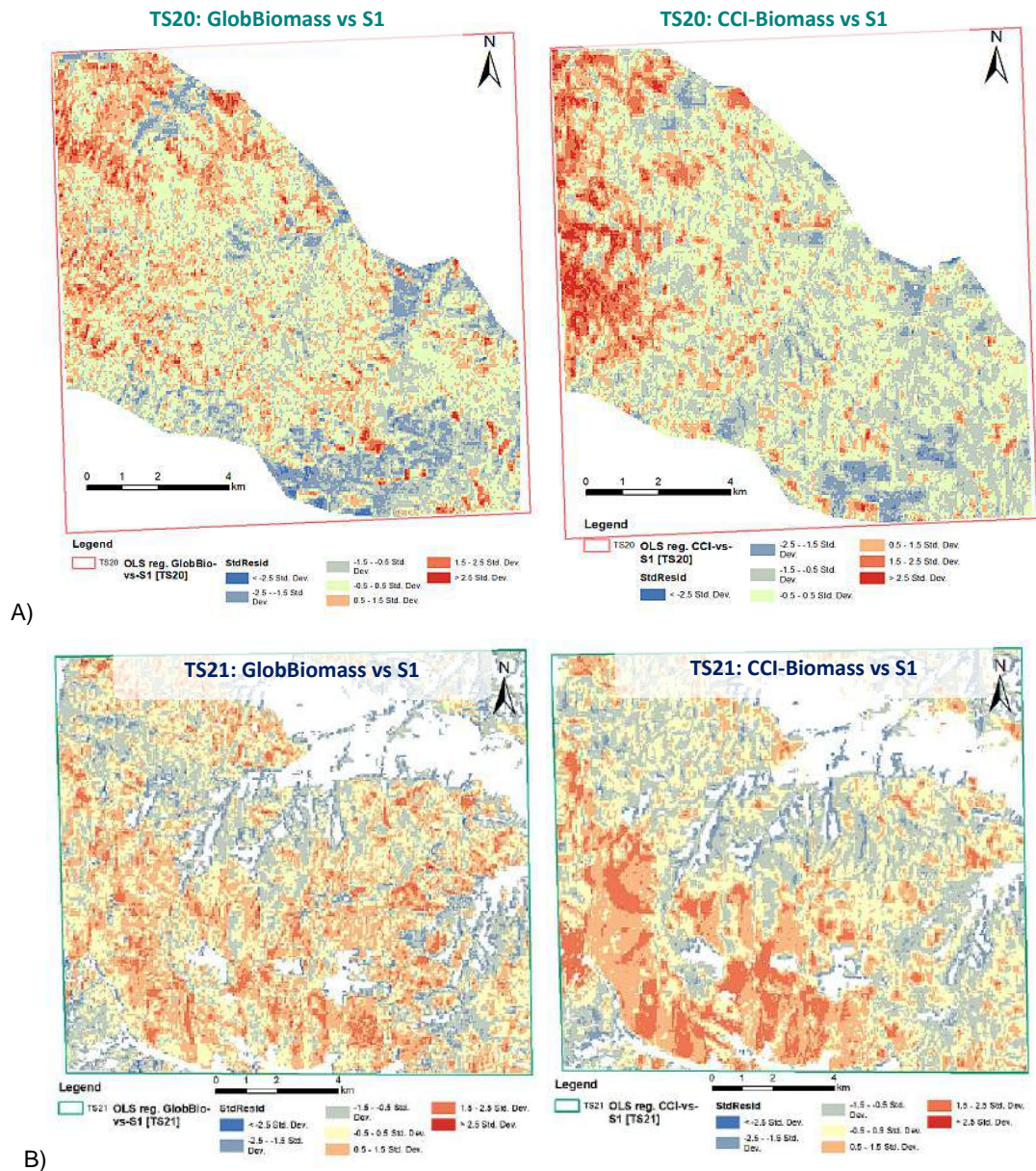


Fig. 16. Residual maps for TS20 (left) and TS21 (right) from multiple-parametric regression using OLS, between GlobBiomass-2010 and CCI-Biomass-2018 vs S1-mean-characteristics, where low statistical correlation is observed in-between

Taking into account geographical representation of the residuals from both OLS-regressions of GlobBiomass and CCI-Biomass versus *S1-mean-characteristics*, could be stated that S1-SAR observables loose sensitivity at regions with high biomass levels, which is expected result, due to fast saturation of the radar backscatter in C-band [9] (see Fig.15 – A). These are residuals with positive distances > 1.5 STD (reddish). Contrariwise, the residuals with negative distances < -1.5 STD (bluish) are dedicated to non-forest areas. Besides, due to differences in AGB estimation by GlobBiomass and CCI-Biomass, residual maps are different, with predominance at CCI-biomass, where distances > 2.5 STD are much more that proofs regression results. In spite, a convergence is observed between low values in dRVI (dark) and high negative distances (> 2.5 STD) at Residual map of GlobBiomass (reddish). Residual map for TS21 confirms stated at the above, about lower sensitivity of the S1-SAR observables at higher levels of AGB, therefore high differences, above – 2.0 STD are observed over southern part of the test site, near BR “Chuprene”.

For finalization of the regression analysis, a correlation between both biomass layers is taken into account. Result showed low correlation inbetween, where higher coefficient of determination is at TS21, unlike the TS20 (see, table-7, DV-3.6). A possible answer to this difference is given from GIS based analysis of calculated AGB- change-layer, where:

$$(4) \Delta AGB = AGB_{GlobBio}^{2010} - AGB_{CCI}^{2018}$$

together with the vector information about forest disturbances, from the reference database. A positive convergence is observed for some disturbed forest stands with damages above 30%, together with the AGB-change-layer, and where forest loss is: $\Delta AGB < -80$ t/ha. That is interesting result, but needs more in depth analysis of those changes, and evaluation of the reference database with forest disturbances. For such utilization, resulted S1-mean-characteristics from the time series are proper tool and could give reliable results. In other hand, this is not the complete answer for the observed changes in AGB, because time difference in between is 8-years and forest is changing, as well as a lot of forestry activities are ongoing in those rural areas.

Conclusions

To conclude the analysis held in that study, it can be categorically confirm that delineation between deciduous and coniferous forest could be done by means of Sentinel-1 time series intensities products. Utilization of the dual-pol RVI (dRVI) in mountainous temperate forest is of great importance, because it provides that sensitivity to the forest structure. General conclusion is also that geometric distortions influences dRVI, which limitates the correct interpretation in those areas. Thematic analysis via proposed RGB-1: dRVI-VH-VV gives good representation of the backscattering that originates from different type of the scattering media – e.g. land cover. Resulted PCA from RGB-1 gives best delineation between deciduous and coniferous forest type. Additionally tested SAR indices – the dual-pol SVI and Polarization Rati, gives non additional information apart from the dRVI, pointing out to equilibrium of the sensitivity over forest by means of the three tested SAR indices. Contrariwise, this is not the case over other type of natural media, such as agricultural fields and water, where SAR indices differ in-between. The PCA based on RGB-2 provides interesting strong bias at some distinct pixels with strong backscatter toward sensor, colored in yellowish or greenish3h that should be studied.

The resulted supervised classifications that also incorporates Forest type map, resulted with 78.8 and 68.9 overall accuracy for TS20 and TS21 respectively. General uncertainties are dedicated to coniferous forest at BR “Chuprene” (class-7) that constitutes of sloped forest at TS21, whereas crops biased the correct interpretation of grassland on TS21. Coniferous forest in some degree is also misclassified as deciduous forest, mainly in areas where coniferous species are sparse or well mixed up with the deciduous ones. In addition, unsupervised classifications showed better performance in forest edge delineation. Resulted Forest/non-forest masks resulted with high accuracy, where the only frustration is the uncertainty in the foreshortenings.

Subsequent Regression analysis that aimed to test in general statistical correlation between mean characteristics resulted from Sentinel-1 time series, and provided AGB layers from Uni-Jena – GlobBiomass-2010 and CCI-Biomass-2018, as well as the TCD-2015 in the frame of COPERNICUS Services, showed very low or no correlation in between. Most prompt answer about the observed poor correlation between AGB and the SAR observables from Sentinel-1, is the lower saturation level of C-band intensities from forest [9]. Nonetheless, high correlation is observed between dRVI and local incidence angle, with $R^2 = 0.78$. Differences in both AGB layers are most likely to be related with the forest loss, due to forest disturbances caused from a past Icethrow disaster event.

Finally, could be stated that conducted utilization of Sentinel-1 time series in mountainous temperate forest, on behalf of dual-polarimetric capabilities, as well as SAR indices in the face of dRVI, gives good results where could be incorporated successfully in variety of thematic analyses for the forest structure, and mapping.

Acknowledgement

The author would like to acknowledge the University of Jena (FSU-Jena), Lehrstuhl für Fernerkundung about the provided AGB-layers (GlobBiomass-2010 and CCI-Biomass-2018), in the face of Prof. C. Schmullius, P.D. Dr. C. Thiel, and also Felix Cremer and Dr. N. Salepci for the support in the elaboration of the Sentinel-1 - time series. Also to acknowledge DLR about the provided “TanDEM-X DEM12”© in the frame of DEM Proposal. As a final, to acknowledge author’s PhD tutor at SRTI-BAS, Prof. E. Roumenina, and Dr. L. Filchev – head of department.

References:

1. Fernandez-Ordonez, Y., J. Soria-Ruiz, B. Leblon. "Forest Inventory using Optical and Radar Remote Sensing", Advances in Geoscience and Remote Sensing, ISBN 978-953-307-005-6, 2009, pp. 540–556.
2. Le Toan, T., S. Quegan, M.W.J. Davidson, H. Balzter, P. Paillou, K. Papathanassiou, S. Plummer, F. Rocca, S. Saatchi, H. Shugart, L. Ulander. "The BIOMASS mission: Mapping global forest biomass to better understand the terrestrial carbon cycle", Remote Sensing of Environment 115, 2011, pp. 2850–2860. DOI:10.1016/j.rse.2011.03.020.

3. Lei, Y., P. Siqueira. "Estimation of Forest Height Using Spaceborne Repeat-Pass L-Band InSAR Correlation Magnitude over the US State of Maine", *Remote Sens.*, 6, 2014, pp. 10252–10285. DOI:10.3390/rs61110252.
4. Englhart, S., V. Keuck, F. Siegert. "Aboveground biomass retrieval in tropical forests — The potential of combined X- and L-band SAR data use", *Remote Sensing of Environment* 115, 2011, pp. 1260–1271. DOI:10.1016/j.rse.2011.01.008.
5. Garestier, F., T. Le Toan. "Forest Modeling For Height Inversion Using Single-Baseline InSAR/Pol-InSAR Data", *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, VOL. 48, NO. 3, 2010, pp. 1528–1539.
6. Stebler, O., E. Meier, D. Nüsch. "Multi-baseline polarimetric SAR interferometry—first experimental spaceborne and airborne results", *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 56, 2002, pp. 149–166.
7. Ainsworth, T. L., J.P. Kelly, J.-S. Lee. "Classification Comparisons Between Dual-Pol and Quad-Pol SAR Imagery", *Proceedings of ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64, 2009, pp. 464–471.
8. Banqué, X., J. M. Lopez-Sanchez, D. Monells, D. Ballester, J. Duro, F.Koudogbo. "POLARIMETRY-BASED LAND COVER CLASSIFICATION WITH SENTINEL-1 DATA", *Proceedings of POLinSAR 2015*, ESA, 2015.
9. Imhoff, M. L. "Radar Backscatter/Biomass Saturation: Observations and Implications for Global Biomass Assessment." *Proceeding of the Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'93*. Tokyo, August 18-21, 1993, pp. 43–45. DOI:10.1109/IGARSS.1993.322465.
10. Santoro, M., C. Beer, O. Cartus, C. Schmullius, A. Shvidenko, I. McCallum, U. Wegmüller, A. Wiesmann. "Retrieval of growing stock volume in boreal forest using hyper-temporal series of Envisat ASAR ScanSAR backscatter measurements", *Remote Sensing of Environment* 115, 2011, pp. 490–507.
11. Quegan, S., et al. "GlobBiomass - Algorithm Theoretical Basis Document", D6, GlobBiomass Project ESRIN/Contract No. 4000113100/14/I_NB, Vol.01, ESA, 2016.
12. Seifert, F., et al. "CCI Biomass Product User Guide v1", *PRODUCT USER GUIDE, YEAR 1, VERSION 1.0*, CCI BIOMASS Project, ESA, 2019.
13. Николов, З., „Около 300 000 кубически метра гори в Северозападна България са засегнати от ледолома в края на миналата година“, *Информация от БТА*, NZ1442BO.020, c/BO/id/1020172, 2015.
14. Mandal, D., V. Kumar, D. Ratha, S. Dey, A. Bhattacharya, J. M. Lopez-Sanchez, H. McNairn, Y. S. Rao. "Dual polarimetric Radar vegetation index for crop growth monitoring using Sentinel-1 SAR data", *Remote Sensing of Environment* 247, 2020, 111954.
16. Small, D., N. Miranda, L. Zuberbühler, A. Schubert. "Terrain-corrected Gamma: Improved thematic land-cover retrieval for SAR with robust radiometric terrain correction", *Proc. 'ESA Living Planet Symposium'*, Bergen, Norway, 28 June – 2 July 2010 (ESA SP-686, December 2010), 2010. DOI: 10.5167/uzh-41236.
17. Truckenbrodt, J, F. Cremer, I. Baris, J. Eberle. "PYROSAR: A FRAMEWORK FOR LARGE-SCALE SAR SATELLITE DATA PROCESSING", *Proc. of the 2019 conference on Big Data from Space (BiDS'19)*, 2019. DOI:10.2760/848593.
18. Cohen, J. "A coefficient of agreement for nominal scale", *Educational Psychological Measure* (20), 1960, 37–46.
19. Congedo, L. „Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS“. *Journal of Open Source Software*, 6(64), 2021, 3172. DOI: <https://doi.org/10.21105/joss.03172>.

**Sofia
2021**

Безплатен екземпляр