КОЛИЧЕСТВЕН ПРОСТРАНСТВЕН АНАЛИЗ НА НАВОДНЕНИЯ И РАСТИТЕЛНА ДИНАМИКА ПО ДАННИ ОТ SENTINEL-1 И LANDSAT В GOOGLE EARTH ENGINE

Михайло Мураш

Институт за космически изследвания и технологии, Българска академия на науките
e-mail: m.murash@mail.space.bas.bg

Ключови думи: *дистанционно изследване на Земята, Sentinel-1, SAR, Landsat, NDVI, Google Earth Engine, наводнения, пространствен анализ*

Резюме: *Представен е количествен пространствен анализ на два различни по времеви мащаб процеса с използване на отворени спътникови данни и Google Earth Engine: наводнението в Емилия-Романя (Италия) през май 2023 г. и дългосрочната динамика на растителната покривка в 30-километрова зона за анализ около Чернобилската АЕЦ. За наводнението са използвани Sentinel-1 GRD, VH-поляризация, еднаква низходяща орбита (relative orbit 95) и емпиричен индекс на промяна. При праг 1,25 са картографирани 1807,13 ha наводнени територии; след векторизация са идентифицирани 564 пространствено свързани фрагмента, като 73,0% са под 1 ha, но 74,4% от общата площ е концентрирана във фрагменти ≥ 10 ha. За Чернобил са анализирани летни композити от Landsat 5 (1986, 2000), Landsat 7 (2012) и Landsat 8/9 (2025) върху обща валидна площ 165524,8 ha. Средният NDVI нараства от 0,605 до 0,743, а площта с NDVI > 0,6 – от 98875,5 до 145136,5 ha (1,468 пъти). Резултатите показват приложимостта на облачни геоинформационни среди за възпроизводим количествен анализ на бързи хидроложки събития и дългосрочни промени в земната покривка.*

QUANTITATIVE SPATIAL ANALYSIS OF FLOODING AND VEGETATION DYNAMICS USING SENTINEL-1 AND LANDSAT DATA IN GOOGLE EARTH ENGINE

Mykhailo Murash

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

Keywords: *Earth observation, Sentinel-1, SAR, Landsat, NDVI, Google Earth Engine, flooding, spatial analysis*

Abstract: *This study presents a quantitative spatial analysis of two processes operating at different temporal scales using open satellite data and Google Earth Engine: the May 2023 flood in Emilia-Romagna, Italy, and long-term vegetation cover dynamics within a 30-km analytical study zone around the Chernobyl Nuclear Power Plant. Flood mapping uses Sentinel-1 GRD data with VH polarisation, a common descending orbit (relative orbit 95), and an empirical change index. A threshold of 1.25 yields 1807.13 ha of flooded land. Vectorisation identifies 564 spatially connected patches: 73.0% are smaller than 1 ha, whereas patches ≥ 10 ha account for 74.4% of the total area. For Chernobyl, summer composites from Landsat 5 (1986, 2000), Landsat 7 (2012), and Landsat 8/9 (2025) are analysed over a common valid area of 165524.8 ha. Mean NDVI increases from 0.605 to 0.743, while the area with NDVI > 0.6 grows from 98875.5 to 145136.5 ha, a factor of 1.468. The results demonstrate the applicability of cloud-based geospatial environments to reproducible quantitative analysis of rapid hydrological events and long-term land cover change.*

1. Въведение

Отворените архиви на спътникови данни и облачните среди за геопространствен анализ създават възможност за възпроизводимо изследване както на краткотрайни екстремни събития, така и на промени в земната покривка в многогодишен мащаб. Google Earth Engine (GEE) интегрира големи архиви от дистанционни изследвания с облачна изчислителна

инфраструктура и е широко използван за анализ на природни бедствия, води, растителност и земеползване [1].

В настоящото изследване са обединени два самостоятелни казуса. Първият е наводнението в Емилия-Романя през май 2023 г., когато Copernicus Emergency Management Service активира Rapid Mapping EMSR664 за оценка на залетите територии и нанесените щети [2]. Поради плътната облачност радарните данни Sentinel-1 са подходящ източник за картографиране на наводнения, тъй като C-band SAR наблюдението не зависи от слънчевото осветление и прониква през облаци. Вторият казус е дългосрочната промяна на растителната покривка в района на Чернобилската зона на отчуждение, където ограничаването на стопанската дейност след 1986 г. е последвано от значителни промени в земната покривка и естествено залесяване на изоставени земеделски площи [3].

Целта е да се разработи и демонстрира единна, възпроизводима GEE-базирана схема за количествен пространствен анализ, която включва: (1) картографиране и фрагментен анализ на наводнени територии чрез Sentinel-1 SAR; и (2) сравним многогодишен анализ на NDVI и площите на спектрални класове по Landsat. Акцентът е поставен върху числените характеристики – обща площ, размер и разпределение на пространствените фрагменти, средни и медианни стойности на NDVI и площи на класове.

2. Данни и методи

Всички операции са изпълнени в Google Earth Engine. Използвани са отворени колекции Sentinel-1 GRD, Landsat Collection 2 Level 2 Surface Reflectance, JRC Global Surface Water и цифров модел на релефа HydroSHEDS. За да се осигури възпроизводимост, областите на анализ, времевите интервали, орбиталните параметри, праговете и правилата за маскиране са зададени експлицитно в скриптовете.

2.1. SAR-картографиране на наводнението в Емилия-Романя

Изследваната област обхваща сектора Conselice-Lavezzola-Alfonsine и е зададена като фиксиран правоъгълник 11,76–12,09° E и 44,45–44,60° N с площ 436,35 km². От колекцията COPERNICUS/S1_GRD са избрани изображения в режим IW, VH-поляризация, 10 m пространствена резолюция, низходяща орбита и относителна орбита 95 (relative orbit 95). За състоянието „преди“ е използвана сцена Sentinel-1A от 28.04.2023 г., а за „след“ – сцена от 22.05.2023 г. Използването на еднаква посока на орбитата и относителна орбита намалява различията, свързани с геометрията на наблюдение.

С цел редуциране на спекъл-шума е приложено пространствено осредняване с радиус 50 m. В съответствие с възпроизведената процедура на UN-SPIDER [4] е изчислен емпиричен индекс на промяна като отношение AFTER/BEFORE директно върху dB-стойностите и е използван праг 1,25. Тъй като dB е логаритмична величина, този показател не представлява физическо отношение на мощностите и прагът 1,25 не следва да се интерпретира като 25% изменение на обратното разсейване; в настоящото изследване той се използва единствено като емпиричен критерий за съществена промяна между двете SAR наблюдения. Постоянните водни площи са отстранени чрез JRC Global Surface Water при seasonality ≥ 10 месеца годишно [5]. Допълнително са изключени пиксели с наклон ≥ 5° и изолирани групи с по-малко от 8 пиксела при осемсвързана съседност. Подобни схеми за откриване на промени са широко използвани за автоматизирано SAR-картографиране на наводнения [4, 6].

Финалната бинарна маска е векторизирана при 10 m. За всеки пространствено свързан фрагмент е изчислена площта, след което обектите са групирани в шест класа: < 1, 1–5, 5–10, 10–50, 50–100 и ≥ 100 ha. Освен общата залята площ са определени броят фрагменти, средна и медианна площ, максимален фрагмент и относителният принос на всеки размерен клас.

2.2. Многогодишен NDVI-анализ около Чернобилската АЕЦ

За втория казус е създадена 30-километрова буферна зона около Чернобилската АЕЦ по предварително зададена и възпроизводима геометрична процедура, след което е пресечена с държавната граница на Украйна. Тази геометрия е използвана единствено като зона за анализ и не представлява официалната административна граница на Чернобилската зона на отчуждение. Анализирани са летни сцени за периода юни-август: Landsat 5 TM за 1986 г. (14 сцени) и 2000 г. (11 сцени), Landsat 7 ETM+ за 2012 г. (11 сцени) и обединена колекция Landsat 8 OLI + Landsat 9 OLI-2 за 2025 г. (30 сцени). Landsat 7 е използван за 2012 г., тъй като редовните наблюдения на Landsat 5 приключват през май 2012 г.

За всяка сцена са приложени QA_PIXEL и QA_RADSAT маски за облаци, облачни сенки, сняг, запълващи и наситени пиксели. Каналите за повърхностна отражателна способност (Surface Reflectance) са мащабирани с коефициент 0,0000275 и отместване -0,2. NDVI е изчислен по класическото определение [7]:

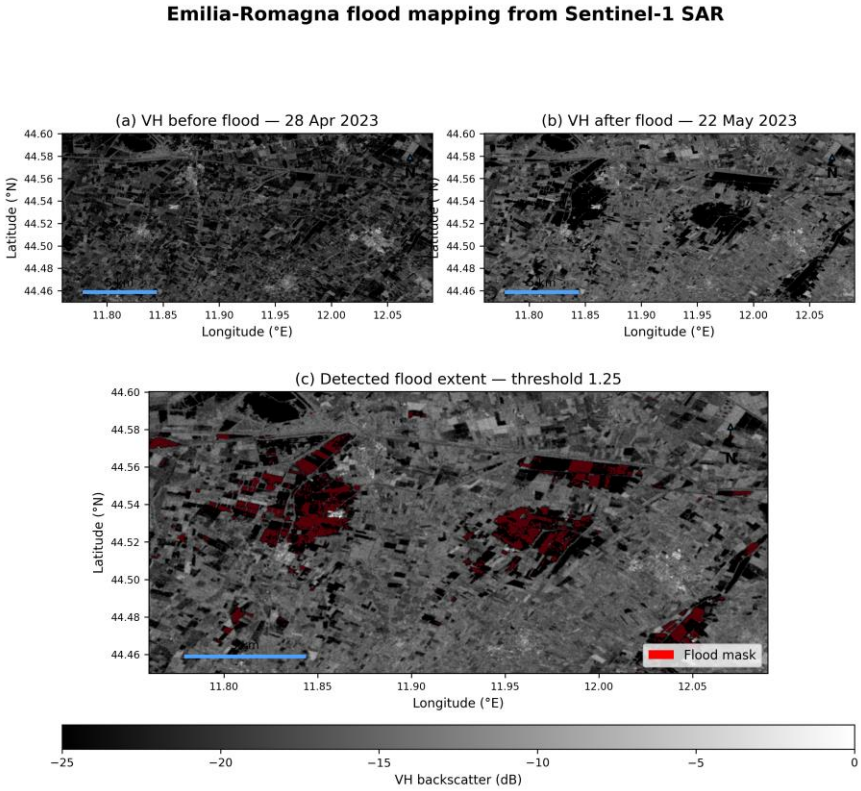
(1) $NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$

За Landsat 5/7 са използвани RED = SR_B3 и NIR = SR_B4, а за Landsat 8/9 – RED = SR_B4 и NIR = SR_B5. За всяка година е съставен медианен летен композит. За да бъде времевото сравнение пространствено еднозначно, е формирана обща маска от пиксели с валиден NDVI и през четирите години, след изключване на постоянните водни площи. Така общата валидна площ е 165524,8 ha. NDVI е разделен в класове < 0,2; 0,2–0,4; 0,4–0,6; 0,6–0,8 и ≥ 0,8. Площта с NDVI > 0,6 е използвана като индикатор за плътна зелена растителност, но не се интерпретира като еквивалент на клас „гора“.

3. Резултати

3.1. Наводнение в Емилия-Романя

При праг 1,25 финалната растерна маска показва 1807,13 ha наводнена площ, което представлява приблизително 4,14% от изследваната област. Пространственият модел се характеризира с компактни залети масиви в земеделската равнина около Conselice, Lavezzola и Alfonsine и съответства по общо местоположение на зоните, за които по активация EMSR664 са изготвени Copernicus EMS продукти за Lugo и Ravenna [2]. Съпоставянето тук е пространствено и качествено; не е извършено пикселно валидиране спрямо официалните векторни продукти за очертаване и оценка на щетите. Радарните изображения „преди“ и „след“, заедно с финалната аналитична маска, са представени на Фиг. 1.



Фиг. 1. Sentinel-1 VH преди (28.04.2023) и след (22.05.2023) наводнението и финална аналитична маска при праг 1,25. Източник: Sentinel-1 GRD; изчисление на автора в Google Earth Engine.

След векторизация са получени 564 фрагмента с обща площ 1803,18 ha. Разликата спрямо растерната оценка е 3,95 ha (0,22%), което показва добра вътрешна съгласуваност на растерно-векторното преобразуване. Най-големият фрагмент е 305,57 ha, средната площ е 3,20 ha, а медианата е едва 0,41 ha. Значителната разлика между средната стойност и медианата показва силно дясно асиметрично разпределение. Обобщените показатели по размерни класове са представени в Таблица 1.

Таблица 1. Разпределение на наводнените фрагменти по площ

Клас, ha	Брой	Дял от броя, %	Площ, ha	Дял от площта, %
< 1	412	73,0	114,86	6,37
1–5	100	17,7	218,39	12,11
5–10	18	3,2	128,34	7,12
10–50	29	5,1	660,73	36,64
50–100	3	0,5	178,10	9,88
≥ 100	2	0,4	502,76	27,88
Общо	564	100,0	1803,18	100,0

Малките обекти доминират по брой: 412 фрагмента (73,0%) са под 1 ha, но заемат само 6,37% от общата векторизирана площ. Обратно, едва 34 фрагмента с площ ≥ 10 ha представляват около 6,0% от броя на обектите, но акумулират 74,4% от наводнената площ. Следователно пространствената картина е фрагментирана по брой обекти, но площта се контролира от относително малък брой големи залети масиви. Разпределението по размерни класове е показано на Фиг. 2.



Фиг. 2. Разпределение на наводнените фрагменти: (a) брой по размерни класове; (b) дял от общата наводнена площ. Източник: авторски изчисления.

3.2. Динамика на NDVI в 30-километрова зона за анализ около Чернобилската АЕЦ

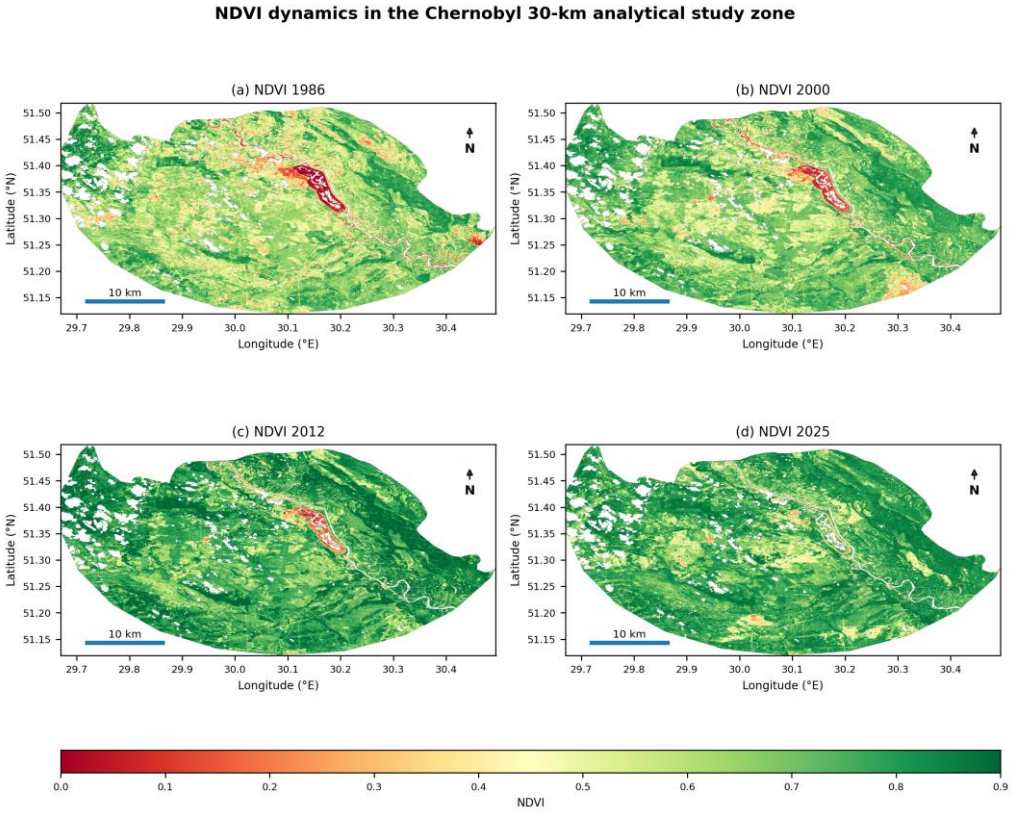
Картите на NDVI показват ясно увеличаване на площите с по-високи стойности на индекса между 1986 и 2012/2025 г. (Фиг. 3). Средният NDVI се увеличава от 0,605 през 1986 г. до 0,656 през 2000 г. и достига 0,761 през 2012 г., след което намалява слабо до 0,743 през 2025 г. Медианата се изменя аналогично: 0,629 → 0,691 → 0,785 → 0,777. Следователно резултатът показва изразен дългосрочен нетен растеж, но не и строго монотонна динамика. Обобщените показатели са представени в Таблица 2.

Таблица 2. Обобщени показатели за NDVI и плътната растителност

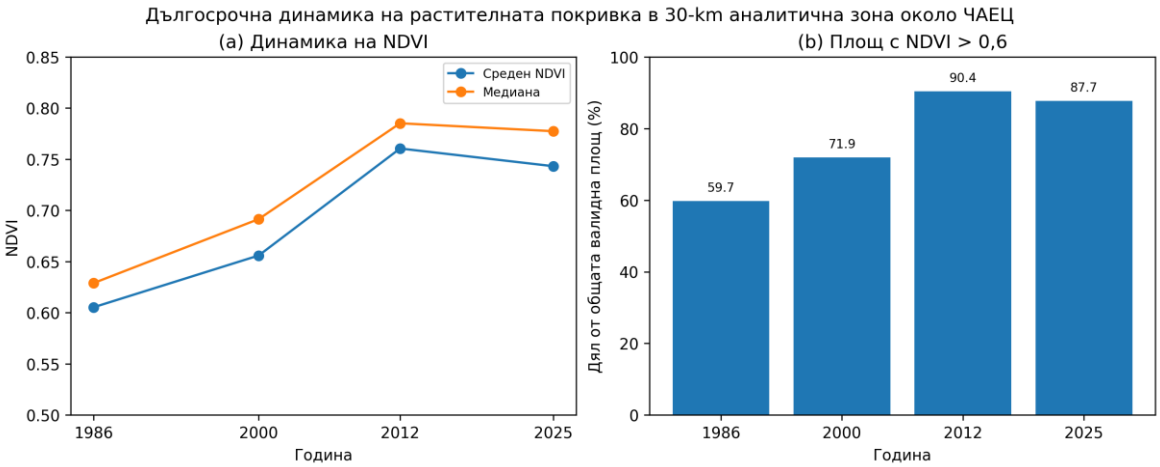
Година	Сензор	Mean NDVI	Median NDVI	NDVI >0,6, ha	Дял, %
1986	Landsat 5 TM	0,605	0,629	98875,5	59,7
2000	Landsat 5 TM	0,656	0,691	119000,2	71,9
2012	Landsat 7 ETM+	0,761	0,785	149647,9	90,4
2025	Landsat 8/9 OLI	0,743	0,777	145136,5	87,7

Площта с NDVI > 0,6 се увеличава от 98875,5 ha (59,7% от общата валидна площ) през 1986 г. до 145136,5 ha (87,7%) през 2025 г. Това съответства на увеличение 1,468 пъти или 46,8%. Най-високата стойност се наблюдава през 2012 г. – 149647,9 ha (90,4%). Паралелно делът на класа NDVI ≥ 0,8 нараства от 6,8% през 1986 г. до 40,9% през 2025 г., докато класът 0,4–0,6 намалява от 30,4% до 10,6%. Получената промяна е съпоставима по направление и порядък с резултата на Matsala et al. [3], които установяват увеличение на горската покривка от 41% през 1986 г. до около 59% през 2020 г. Въпреки това двата показателя не са еквивалентни:

NDVI > 0,6 включва и плътна тревиста/храстова растителност и не представлява тематична класификация на гора. Динамиката на средния и медианния NDVI и на дела на площите с NDVI > 0,6 е показана на Фиг. 4.



Фиг. 3. NDVI в 30-километрова зона за анализ около Чернобилската АЕЦ: (a) 1986, (b) 2000, (c) 2012 и (d) 2025 г. Всички панели са с еднаква скала и обща маска от валидни пиксели.
Източник: Landsat Collection 2 Level 2; изчисление на автора в Google Earth Engine.



Фиг. 4. Динамика на (a) средния и медианния NDVI и (b) дела на площите с NDVI > 0,6.
Източник: авторски изчисления.

4. Обсъждане

Двата казуса показват различни силни страни на отворените данни за ДИЗ. Sentinel-1 позволява анализ на наводнения при облачни условия и осигурява достатъчна пространствена детайлност за фрагментен анализ на залетите територии. Landsat от своя страна предоставя дълъг архив, който позволява съпоставяне на състояния през почти четири десетилетия. Общата GEE-среда улеснява възпроизводимото комбиниране на архиви, QA-маски, допълнителни геоданни и последващи площни статистики.

При SAR-казуса най-чувствителният параметър е прагът на индекса на промяна. Диагностичният тест показа плавно намаляване на картографираната площ при увеличаване на прага, докато маските за постоянни води, наклон и пространствена свързаност променят резултата значително по-слабо. Това налага прагът 1,25 да се разглежда като операционен параметър на конкретната процедура, а не като универсална физическа граница. Допълнителна неопределеност произтича от използването на единични изображения „преди“ и „след“; многовременни композити биха намалили влиянието на краткотрайни промени в обратното разсейване.

При Чернобил основното ограничение е, че са сравнени четири летни композита, а не непрекъснат годишен времеви ред. Малки разлики могат да бъдат повлияни от междусезонна вариабилност, спектралните характеристики на TM/ETM+/OLI и SLC-off режима на Landsat 7. Общата маска от валидни пиксели намалява пространственото изкривяване, но не елиминира напълно междусензорните различия. Наблюдаваното слабо понижение между 2012 и 2025 г. не противоречи на дългосрочния нетен растеж и е съвместимо с наличието на големи пожари и други нарушения в зоната след 2012 г., описани и в специализираната литература [3]. За по-строг анализ следва да се използва официалната граница на зоната и плътен годишен ред с алгоритми за времева сегментация, например LandTrendr.

5. Заключение

Разработената схема демонстрира възможността чрез отворени спътникови данни и Google Earth Engine да се извличат не само картографски изображения, но и възпроизводими количествени показатели за пространствената структура и динамиката на наблюдавани процеси. За наводнението в Емилия-Романя са картографирани 1807,13 ha залята площ и 564 свързани фрагмента, като 74,4% от общата площ е концентрирана във фрагменти ≥ 10 ha. За 30-километровата зона за анализ около Чернобилската АЕЦ средният NDVI се увеличава от 0,605 през 1986 г. до 0,743 през 2025 г., а площта с NDVI > 0,6 – 1,468 пъти. Получените резултати потвърждават приложимостта на интегрираните SAR и оптични подходи за количествен анализ на бързи бедствени събития и дългосрочни промени в земната покривка. Следващ етап е количествена валидация на SAR-маската с Copernicus EMS и разширяване на Landsat анализа до непрекъснат годишен времеви ред.

Литература:

1. Gorelick, N., M. Hancher, M. Dixon, S. Ilyushchenko, D. Thau, R. Moore. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment, 202, 2017, pp. 18–27. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031
2. Copernicus Emergency Management Service. Information Bulletin 167 - The Copernicus Emergency Management Service activities following the latest floods in Emilia Romagna. Copernicus EMS On Demand Mapping, 5 June 2023; Rapid Mapping Activation EMSR664.
3. Matsala, M., A. Bilous, V. Myroniuk, D. Holiaka, D. Schepaschenko, L. See, F. Kraxner. The Return of Nature to the Chernobyl Exclusion Zone: Increases in Forest Cover of 1.5 Times Since the 1986 Disaster. Forests, 12(8), 2021, 1024. https://doi.org/10.3390/f12081024
4. UN-SPIDER Knowledge Portal. Recommended Practice: Flood Mapping and Damage Assessment Using Sentinel-1 SAR Data in Google Earth Engine. United Nations Office for Outer Space Affairs. https://un-spider.org/advisory-support/recommended-practices/recommended-practice-google-earth-engine-flood-mapping (accessed 14.10.2026)
5. Pekel, J.-F., A. Cottam, N. Gorelick, A.S. Belward. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. Nature, 540, 2016, pp. 418-422. https://doi.org/10.1038/nature20584
6. Twele, A., W. Cao, S. Plank, S. Martinis. Sentinel-1-based flood mapping: a fully automated processing chain. International Journal of Remote Sensing, 37(13), 2016, pp. 2990–3004. https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1192304
7. Rouse, J.W., R.H. Haas, J.A. Schell, D.W. Deering. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, Vol. I, Sec. A, NASA SP-351, 1974, pp. 309–317.