

Просторове моделювання кліматичної вразливості та ризиків

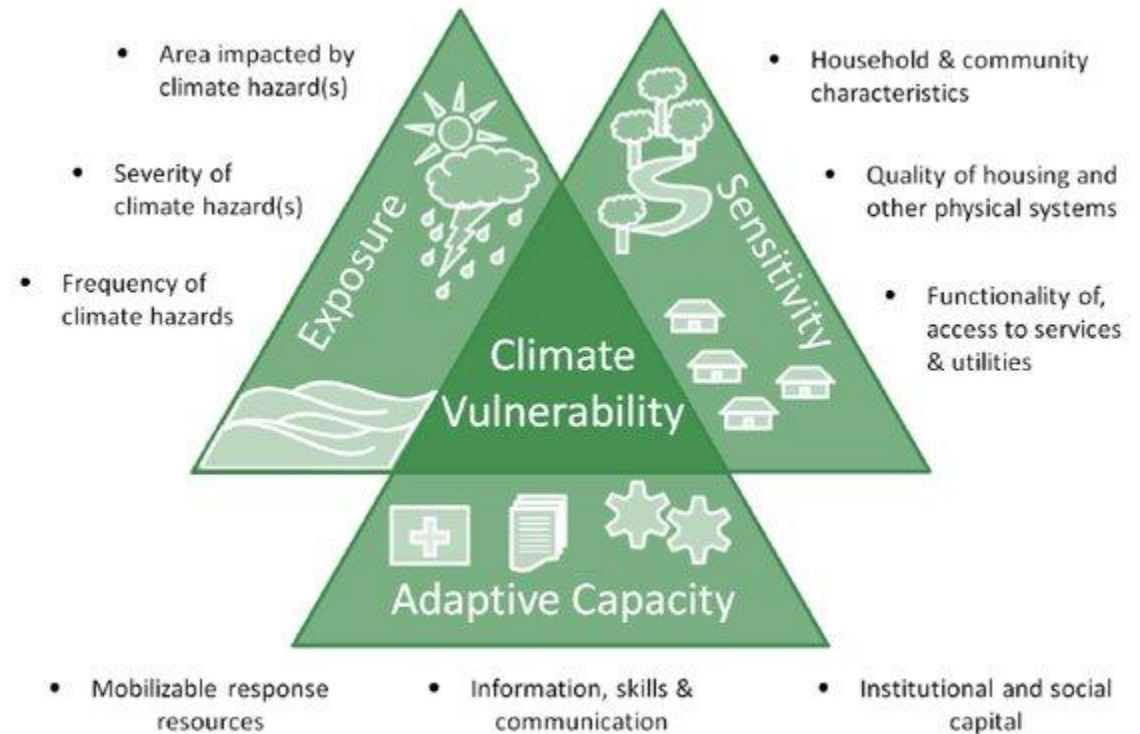
Ольга Хандогіна

Харківський національний університет міського господарства імені О.М.
Бекетова

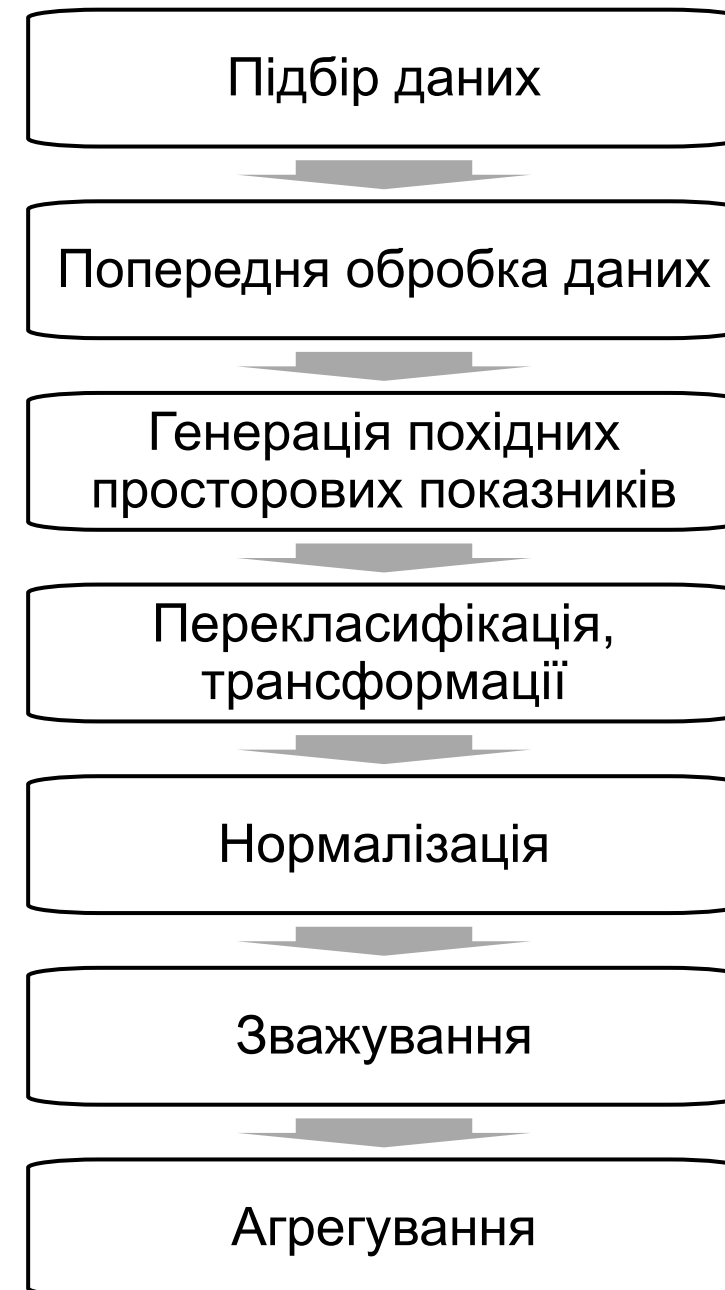
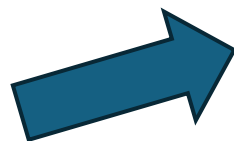
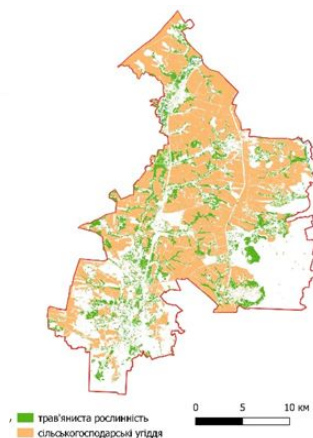
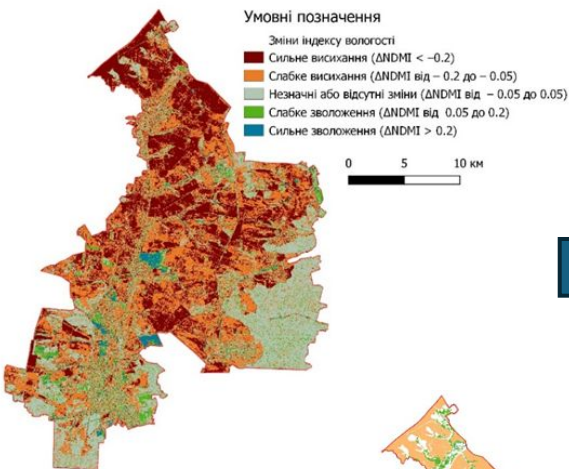
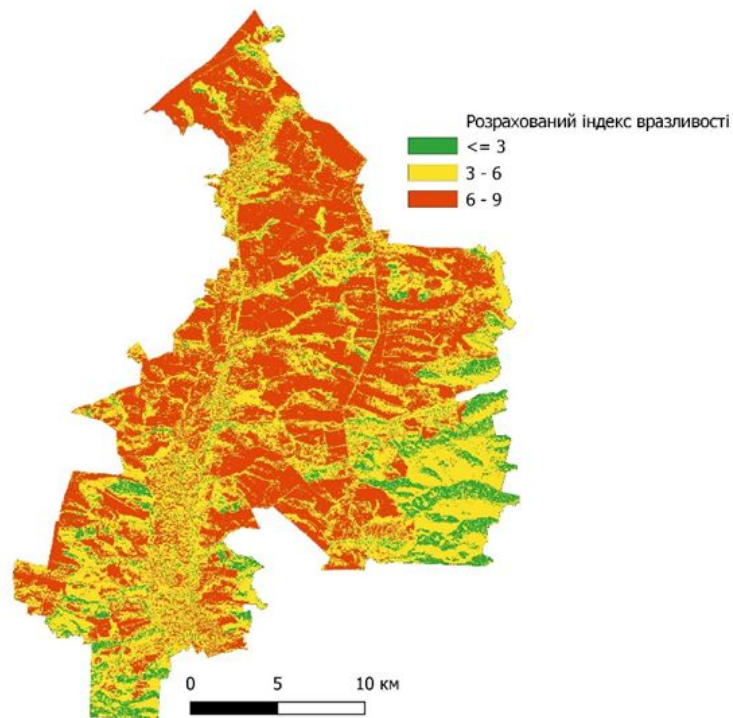
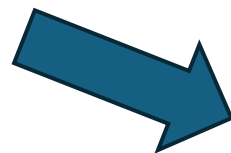
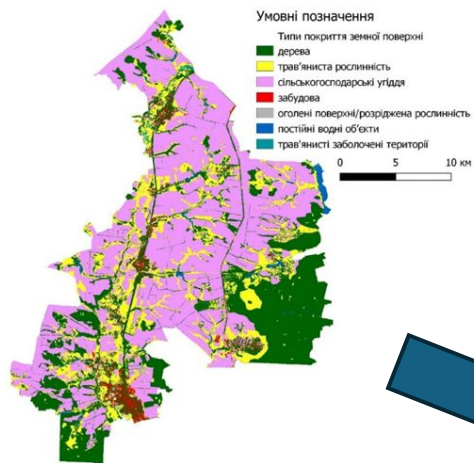
10-14 листопада 2025
м. Одеса

Кліматична вразливість

- Експозиція – ступінь, до якого система піддається впливу
- Чутливість – ступінь, до якого система реагує на вплив
- Адаптаційна спроможність – здатність системи пристосовуватись до змін, пом'якшувати шкоду, справлятися з наслідками і т.д.



Кліматична вразливість неоднорідна в просторі

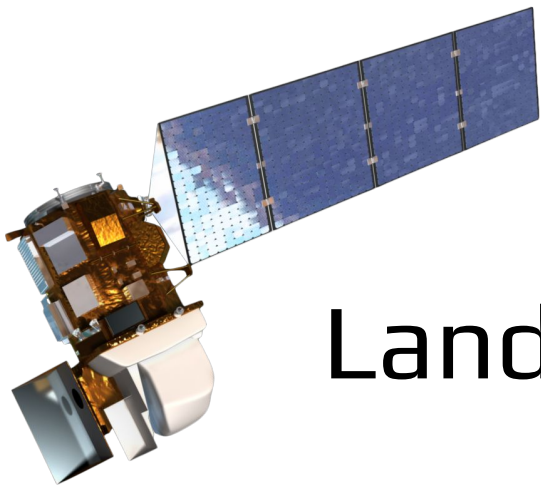


Просторові характеристики територій для моделювання кліматичної вразливості/ризиків

- Фізико-географічні характеристики (висота над рівнем моря, експозиція схилів, крутизна схилів, гідрографія)
- Кліматичні характеристики (температура, аномалії, індекси посухи, опади)
- Землекористування та покрив (типи землекористування, зміни у землекористуванні, індекси рослинності, індекс LST)
- Соціально-економічні характеристики, інфраструктура (щільність населення, близькість до доріг, наявність об'єктів інфраструктури, тип забудови)
- Екологічні та біофізичні характеристики (індекси рослинності, вологості, пожеж – NDVI, NDMI, MI, NBR, деградація земель, близькість до природоохоронних територій, зелених зон, водойм і т.д.)

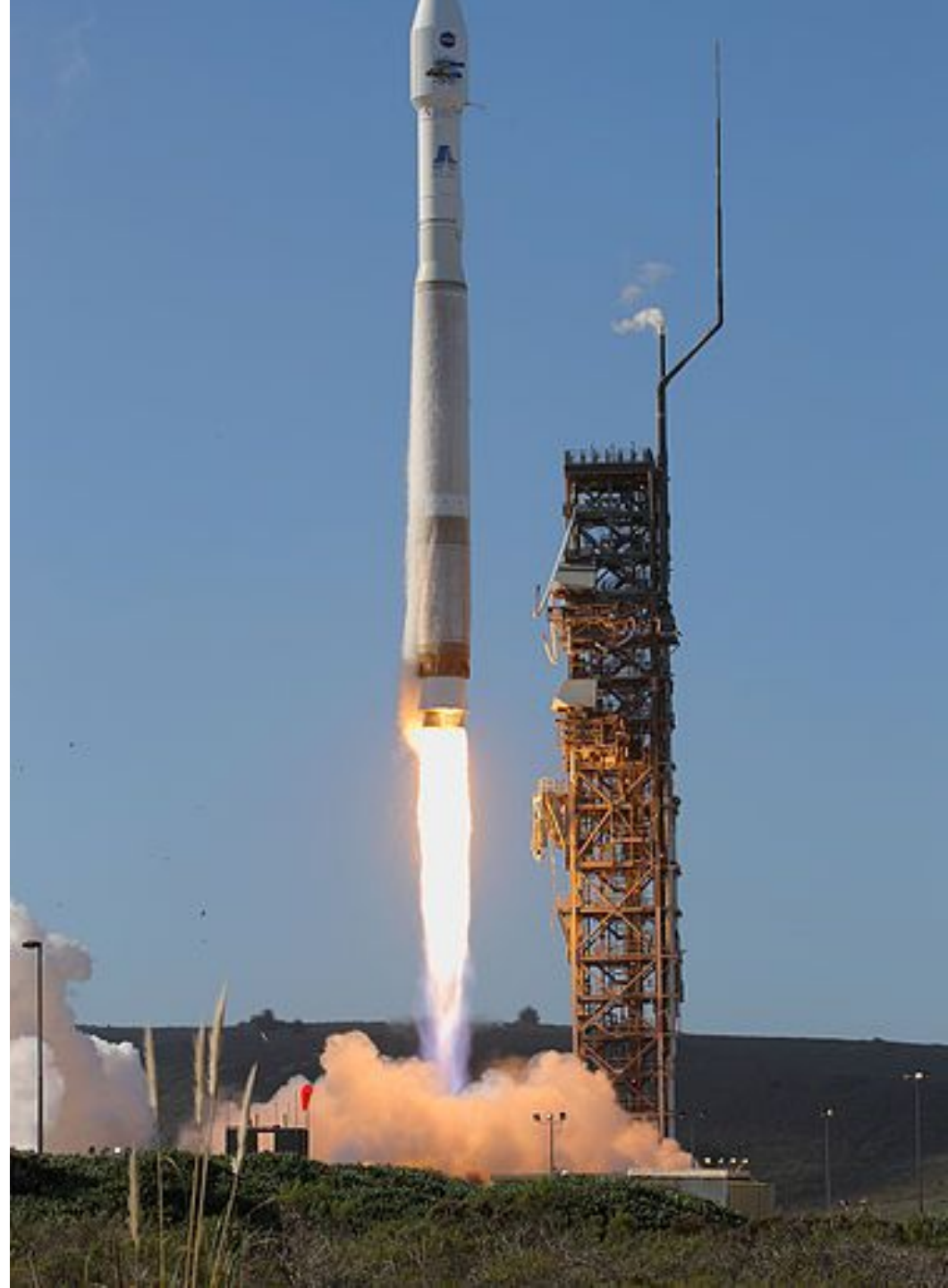
Джерела даних

- Супутникові знімки: Sentinel-2, Landsat-8/9, MODIS, VIIRS.
- Кліматичні набори даних: ERA5, WorldClim, Copernicus Climate Data Store
- Землекористування та покрив: [WorldCover](#), [Copernicus Land Monitoring Service](#)
- Висота: SRTM
- Просторові шари соціально-економічних даних



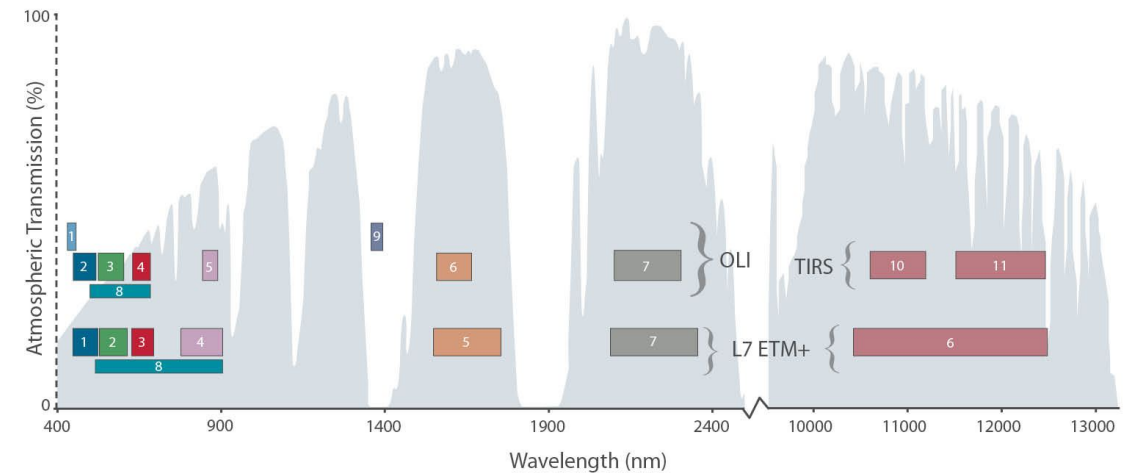
Landsat

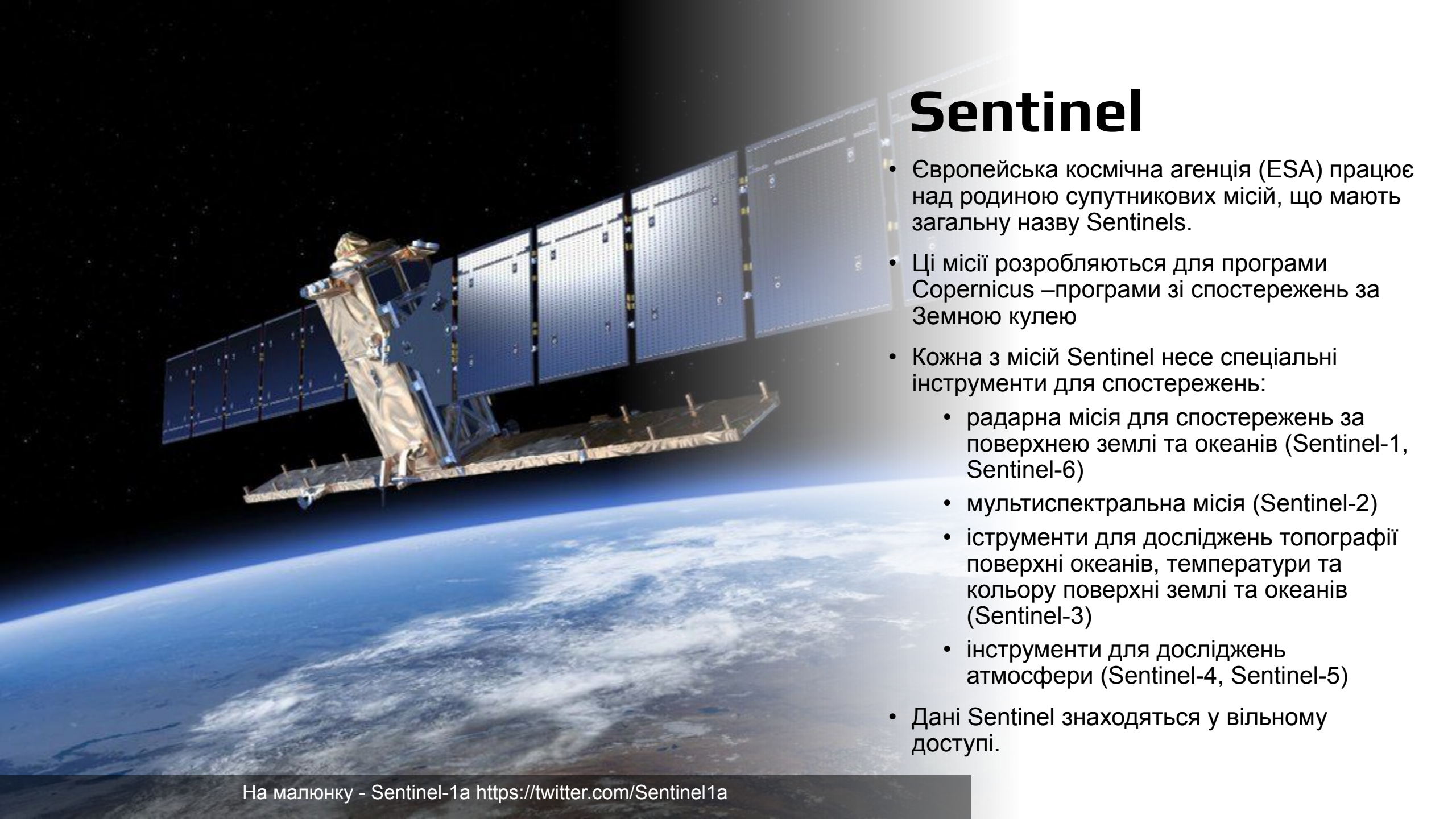
- Програма Landsat - найтриваліший проект з отримання супутникових фотознімків планети Земля.
- Перший з супутників в рамках цієї космічної програми був запусканий в 1972 році; останній, на цей момент, Landsat 9 - 27 вересня 2021 року
- Surface Reflectance products (Landsat Collection 2 SR) – атмосферно скориговані



Спектральні канали Landsat-7 та -8 та їх роздільна здатність

Landsat-7 ETM+ Bands (μm)			Landsat-8 OLI and TIRS Bands (μm)		
			30 m Coastal/Aerosol	0.435 - 0.451	Band 1
Band 1	30 m Blue	0.441 - 0.514	30 m Blue	0.452 - 0.512	Band 2
Band 2	30 m Green	0.519 - 0.601	30 m Green	0.533 - 0.590	Band 3
Band 3	30 m Red	0.631 - 0.692	30 m Red	0.636 - 0.673	Band 4
Band 4	30 m NIR	0.772 - 0.898	30 m NIR	0.851 - 0.879	Band 5
Band 5	30 m SWIR-1	1.547 - 1.749	30 m SWIR-1	1.566 - 1.651	Band 6
Band 6	60 m TIR	10.31 - 12.36	100 m TIR-1	10.60 - 11.19	Band 10
			100 m TIR-2	11.50 - 12.51	Band 11
Band 7	30 m SWIR-2	2.064 - 2.345	30 m SWIR-2	2.107 - 2.294	Band 7
Band 8	15 m Pan	0.515 - 0.896	15 m Pan	0.503 - 0.676	Band 8
			30 m Cirrus	1.363 - 1.384	Band 9



A Sentinel satellite is shown in orbit above the Earth's horizon. The satellite has a central body with gold-colored thermal insulation and two long, rectangular solar panel arrays extending outwards. The Earth's surface is visible below, showing blue oceans and white clouds.

Sentinel

- Європейська космічна агенція (ESA) працює над родиною супутникових місій, що мають загальну назву Sentinels.
- Ці місії розробляються для програми Copernicus –програми зі спостережень за Земною кулею
- Кожна з місій Sentinel несе спеціальні інструменти для спостережень:
 - радарна місія для спостережень за поверхнею землі та океанів (Sentinel-1, Sentinel-6)
 - мультиспектральна місія (Sentinel-2)
 - інструменти для досліджень топографії поверхні океанів, температури та кольору поверхні землі та океанів (Sentinel-3)
 - інструменти для досліджень атмосфери (Sentinel-4, Sentinel-5)
- Дані Sentinel знаходяться у вільному доступі.

Спектральні канали Sentinel 2 та їх роздільна здатність

Band	Resolution	Central Wavelength	Description
B1	60 m	443 nm	Ultra Blue (Coastal and Aerosol)
B2	10 m	490 nm	Blue
B3	10 m	560 nm	Green
B4	10 m	665 nm	Red
B5	20 m	705 nm	Visible and Near Infrared (VNIR)
B6	20 m	740 nm	Visible and Near Infrared (VNIR)
B7	20 m	783 nm	Visible and Near Infrared (VNIR)
B8	10 m	842 nm	Visible and Near Infrared (VNIR)
B8a	20 m	865 nm	Visible and Near Infrared (VNIR)
B9	60 m	940 nm	Short Wave Infrared (SWIR)
B10	60 m	1375 nm	Short Wave Infrared (SWIR)
B11	20 m	1610 nm	Short Wave Infrared (SWIR)
B12	20 m	2190 nm	Short Wave Infrared (SWIR)

NDVI - нормалізований диференційний вегетаційний індекс (англ. Normalized Difference Vegetation Index)

- використовується для вирішення завдань кількісної оцінки рослинного покриву, крім випадків із розрідженою рослинністю
- можна використовувати протягом усього вегетаційного сезону, за винятком тих випадків, коли рослинний покрив занадто мізерний і не має достатньої спектральної відбивної здатності
- Дані NDVI найбільш точні на стадії активного зростання
- Фізіологічний стан рослинного покриву значною мірою визначається вмістом хлорофілу і рівнем водозабезпечення – використовуються спектральні індекси, які тісно корелюють з хлорофілом і вологою



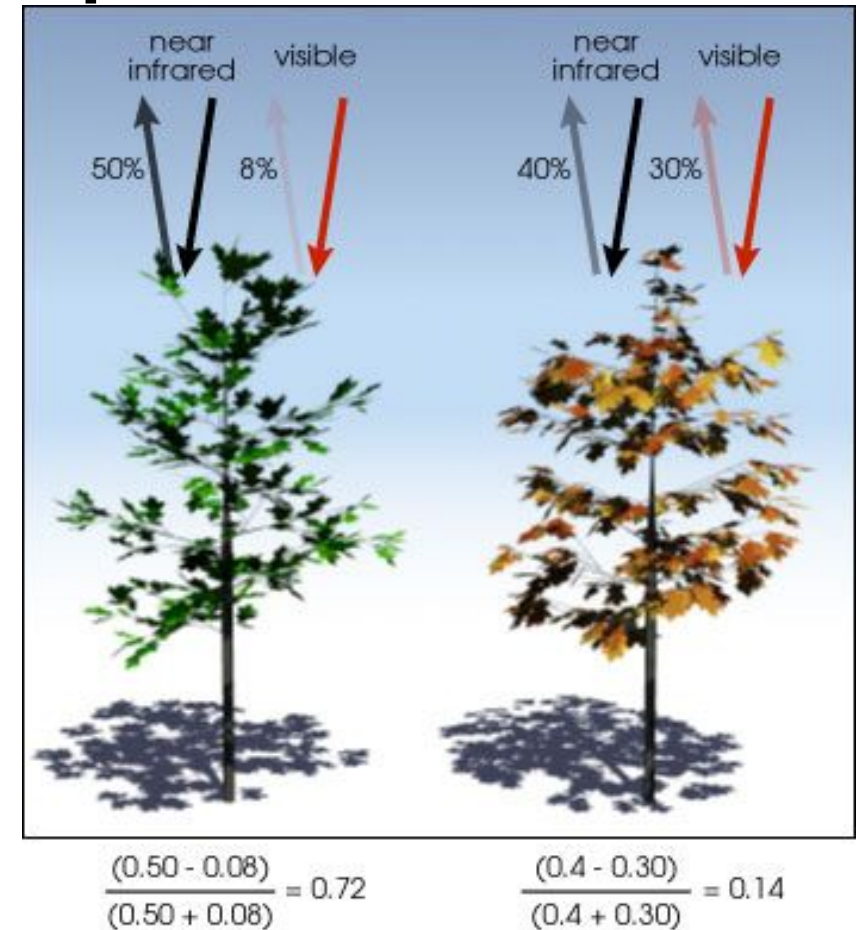
NDVI - нормалізований диференційний вегетаційний індекс

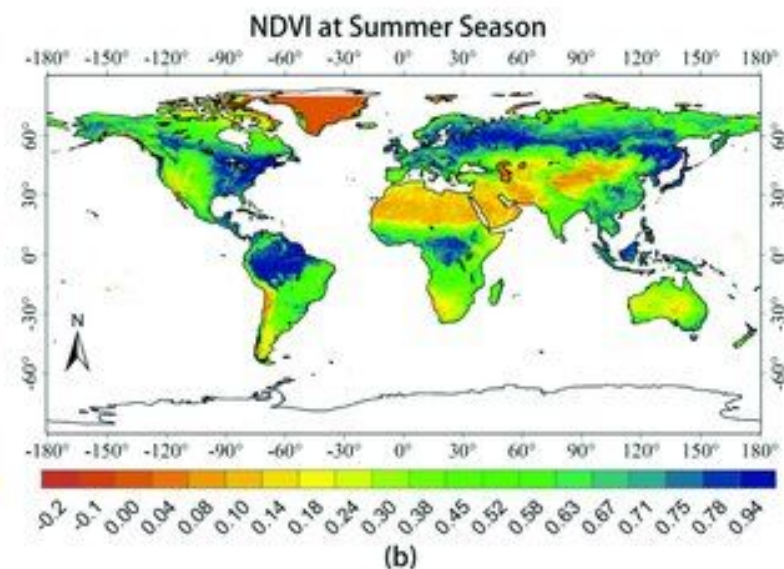
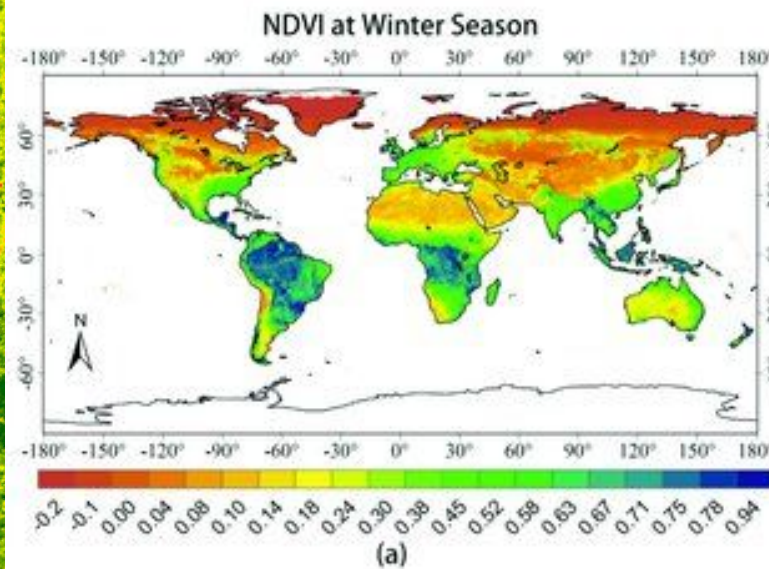
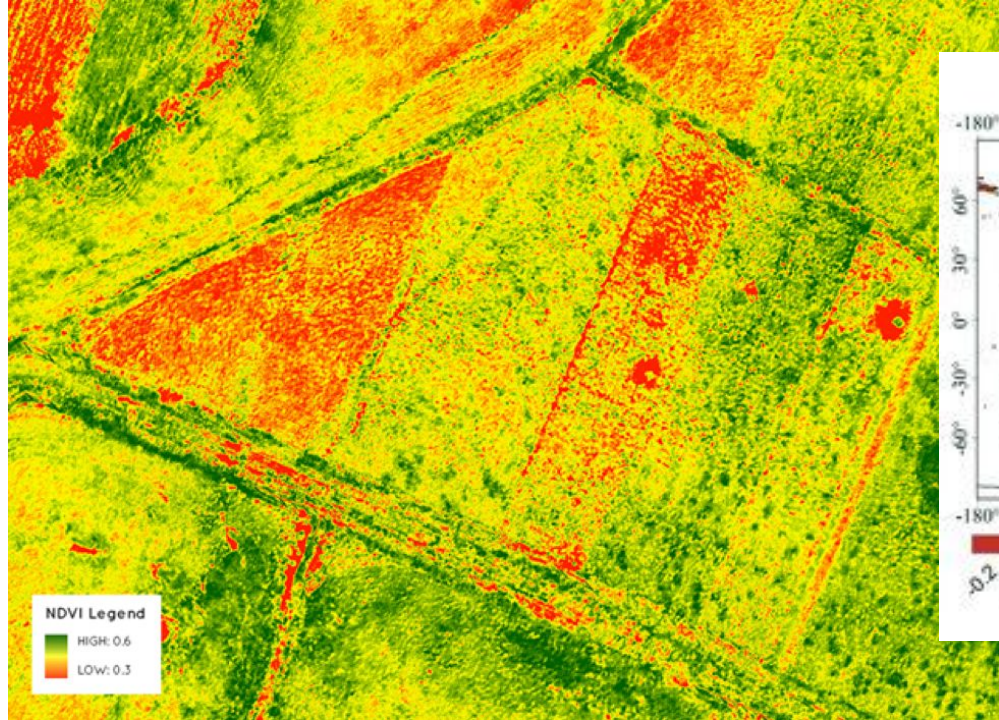
- NDVI може бути розрахований на основі будь-яких знімків, що мають спектральні канали в червоному і ІЧ діапазонах
 - NDVI для водних об'єктів набуває від'ємних значень (за розрахунку в інтервалі від -1 до 1),
 - для ґрунтів і сухої рослинності – позитивних і близьких до 0,
 - максимальних – для вегетуючої рослинності,
 - проміжних – для різних станів рослинного покриву.

$$NDVI = \frac{B8 - B4}{B8 + B4}$$

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)}$$

RED і NIR – величини спектральної яскравості в червоному і ближньому інфрачервоному діапазонах відповідно.





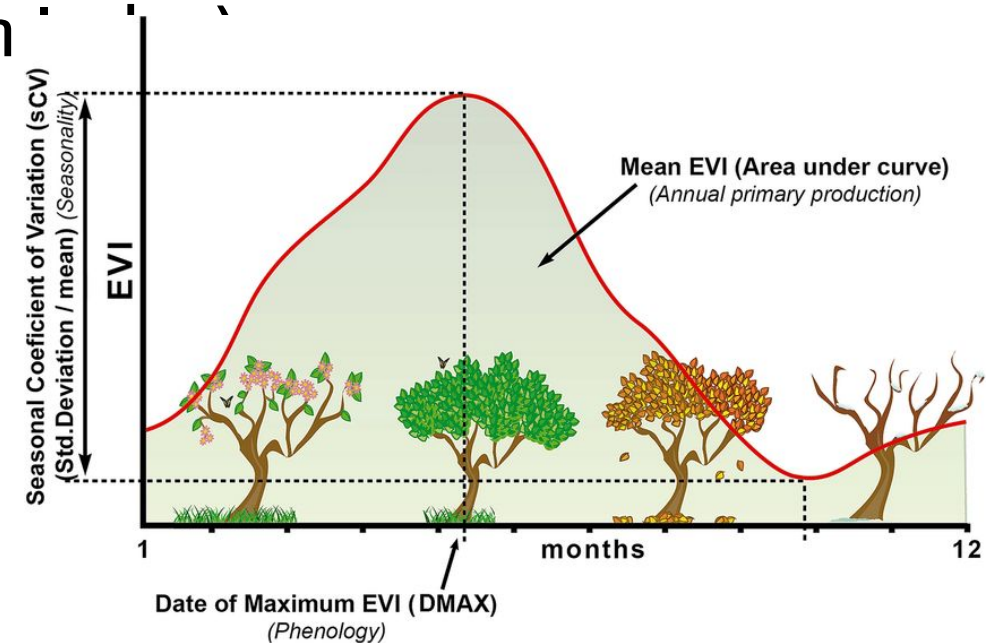
Global distribution map of seasonal averaged NDVI from MODIS;

- (a) Seasonal averaged NDVI during the winter season of the northern hemisphere;
- (b) Seasonal averaged NDVI during the summer season of the northern hemisphere



ЕVI - вдосконалений вегетаційний індекс (англ. Enhanced Vegetation

- Розроблений як поліпшення NDVI шляхом оптимізації сигналу рослинності в областях із високим індексом листової поверхні. Використовується як в умовах густого рослинного покриву, так і в умовах розрідженої рослинності
- Індекс використовує синю область відображення для корекції фонових сигналів ґрунту і зменшення атмосферних впливів, у тому числі аерозольного розсіювання.
- Значення EVI для вегетаційних пікселів повинні бути в діапазоні від 0 до 1.
- Яскраві об'єкти, такі як хмари й білі будівлі, поряд із темними об'єктами, такими як вода, можуть призвести до аномальних значень пікселів у зображенні EVI.



$$EVI = 2.5 * \frac{(NIR - Red)}{(NIR + 6 * Red - 7.5 * Blue + 1)}$$

Red, Blue, NIR – величини спектральної яскравості в червоному, синьому і ближньому інфрачервоному діапазонах відповідно.

GNDVI - зелений нормалізований диференційний вегетаційний індекс (англ. Green Normalized Difference Vegetation Index)

- схожий на NDVI, але використовує зелену смугу замість червоної
- Це особливо корисно в районах з рослинністю, яка має яскраво-зелений колір. GNDVI застосовується для моніторингу луків та інших територій з низькою щільністю рослинності, пригніченої та старіючої рослинності

$$GNDVI = \frac{(NIR - Green)}{(NIR + Green)}$$

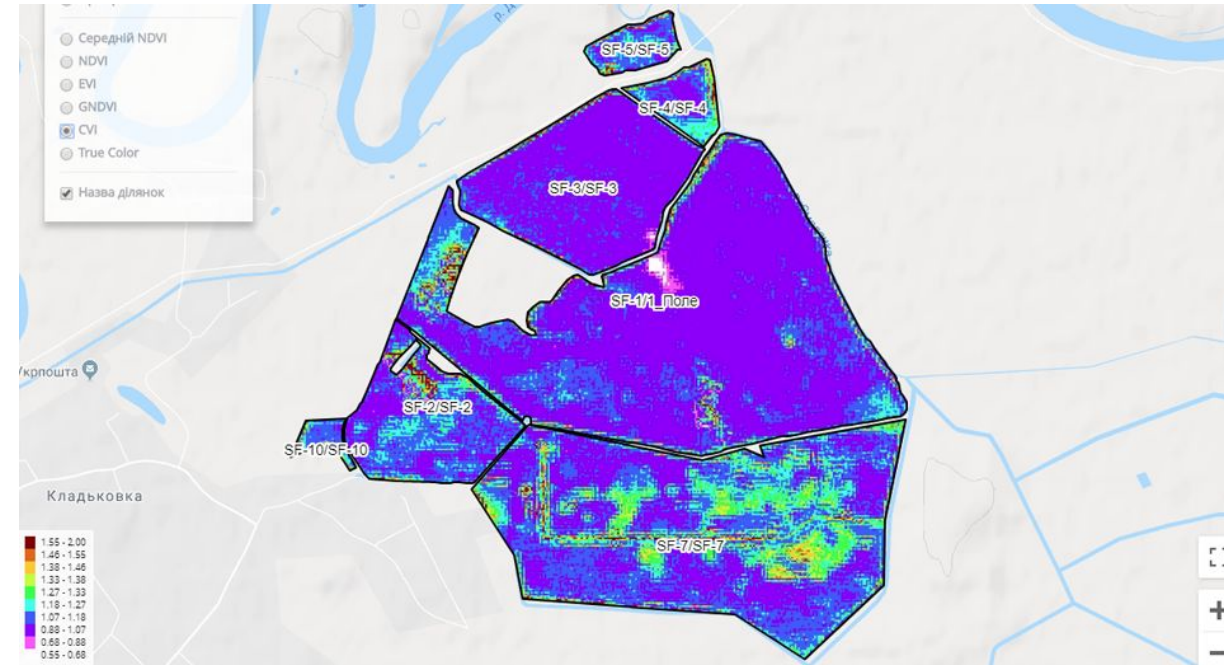
CVI – вегетаційний індекс хлорофілу

(англ. Chlorophyll Vegetation Index)

- використовує співвідношення NIR і Red для оцінки вмісту хлорофілу в рослинності.
- Його можна застосовувати для моніторингу стану рослинності виявлення дефіциту поживних культур.

$$CVI = \frac{NIR}{Green} \times \frac{Red}{Green}$$

Можуть бути й інші методики розрахунку



NDMI - нормалізований різницевий індекс вологості (англ. Normalized Difference Moisture Index)

$$\text{NDMI} = (\text{NIR} - \text{SWIR}) / (\text{NIR} + \text{SWIR})$$

- визначає рівень вмісту води в рослинах, використовуючи комбінацію спектральних діапазонів у ближньому інфрачервоному (NIR) та короткохвильовому інфрачервоному (SWIR) діапазонах.
- є відмінним індикатором нестачі води у рослинах
- здатний виявляти водний стрес на ранній стадії
- є ефективним для контролю зрошення, особливо в засушливих районах
- NDMI має значення від -1 до +1. Про водний стрес можуть свідчити негативні значення, що наближаються до -1, тоді як +1 може вказувати на заболочування.
- NDMI більш ефективно виявляє знеліснення, порівняно з NDVI, завдяки менш різкому зниженню значень.

Sentinel-2:

$$\text{NDMI} = (\text{B08} - \text{B11}) / (\text{B08} + \text{B11})$$

Landsat 4-5 TM:

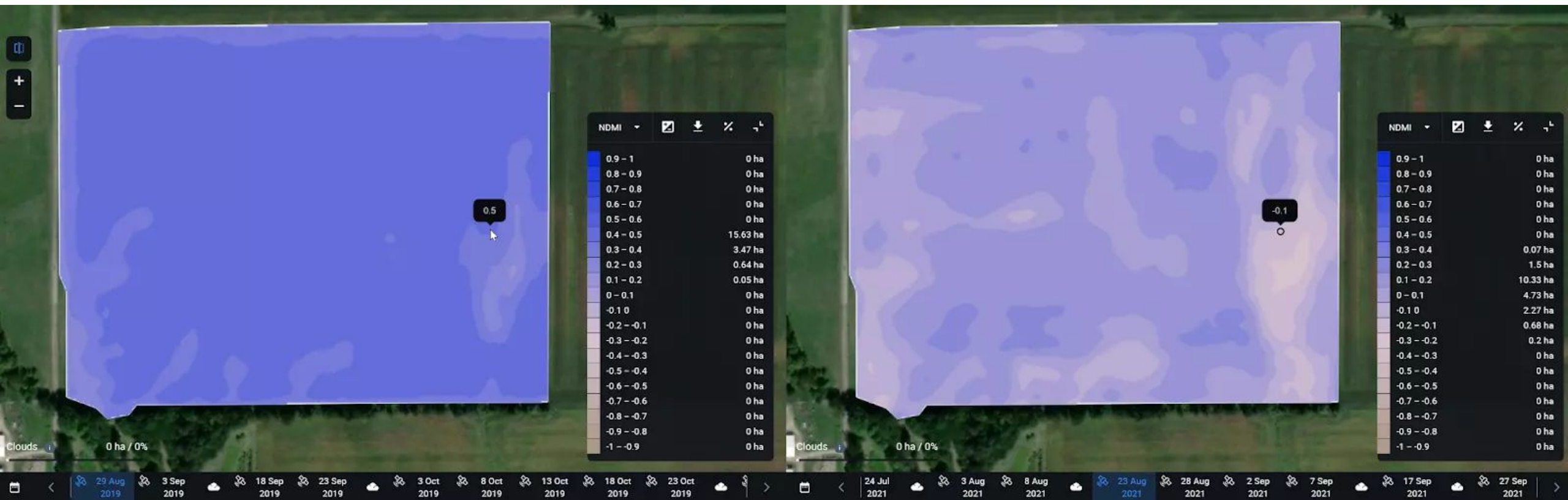
$$\text{NDMI} = (\text{B04} - \text{B05}) / (\text{B04} + \text{B05})$$

Landsat 7 ETM+:

$$\text{NDMI} = (\text{B04} - \text{B05}) / (\text{B04} + \text{B05})$$

Landsat 8:

$$\text{NDMI} = (\text{B05} - \text{B06}) / (\text{B05} + \text{B06})$$



- На скріншоті представлені два знімки того ж самого поля, зроблені з різницею в два роки. Значення NDMI суттєво відрізняються. На зображенні зліва відсутні ознаки водного дефіциту, а на знімку праворуч культури зазнали водного стресу після тривалого періоду аномально низького рівня опадів у 2021 році.

NDWI – нормалізований диференційний водний індекс (Normalized Difference Water Index)

- розроблений для визначення меж відкритих водойм та оцінки їх каламутності, виділення їх на супутниковому знімку на тлі ґрунту та рослинності
- розраховується з використанням комбінації GREEN-NIR (видимий зелений та ближній інфрачервоний)

$$\text{NDWI} = (\text{Green} - \text{NIR}) / (\text{Green} + \text{NIR})$$

Для даних Landsat 7:

$$\text{NDWI} = (\text{Band 2} - \text{Band 4}) / (\text{Band 2} + \text{Band 4})$$

Для даних Landsat 8:

$$\text{NDWI} = (\text{Band 3} - \text{Band 5}) / (\text{Band 3} + \text{Band 5})$$

Для даних Sentinel 2:

$$\text{NDWI} = (\text{Band 3} - \text{Band 8}) / (\text{Band 3} + \text{Band 8})$$

Значення індексу NDWI відповідають наступним діапазонам:

- 0,2 – 1 – Поверхня води,
- 0,0 – 0,2 – Затоплення, вологість,
- 0,3 – 0,0 – Помірна посуха, неводні поверхні,
- 1 – -0,3 – Посуха, неводні поверхні



... та інші...

- SUHI - Surface Urban Heat Island Index - різниця між температурою поверхні міської території та температурою навколишніх сільських/природних територій
- TVDI - Temperature Vegetation Dryness Index - поєднує температуру поверхні (LST) та індекс рослинності (NDVI) для оцінки вологості ґрунту
- MSI - Moisture Stress Index - розраховується як відношення SWIR до NIR каналів: $MSI = SWIR / NIR$
- NBR (Normalized Burn Ratio) та dNBR для оцінки серйозності пожеж
- ...

Температура поверхні (Land Surface Temperature)

- показник, що характеризує інтенсивність теплового інфрачервоного випромінювання від підстилаючої поверхні (ґрунту, дахів, стін тощо) до атмосфери
- Розраховується за супутниковими даними, які мають канали, чутливі до теплового інфрачервоного діапазону.

$$L_{\lambda} = M_L * Q_{cal} + A_L \quad (1)$$

де

L_{λ} - спектральне випромінювання

M_L, A_L – коефіцієнти масштабування

Q_{cal} – значення пікселів

$$T = \frac{K2}{\ln(\frac{K1}{L_{\lambda}} + 1)} \quad (2)$$

де

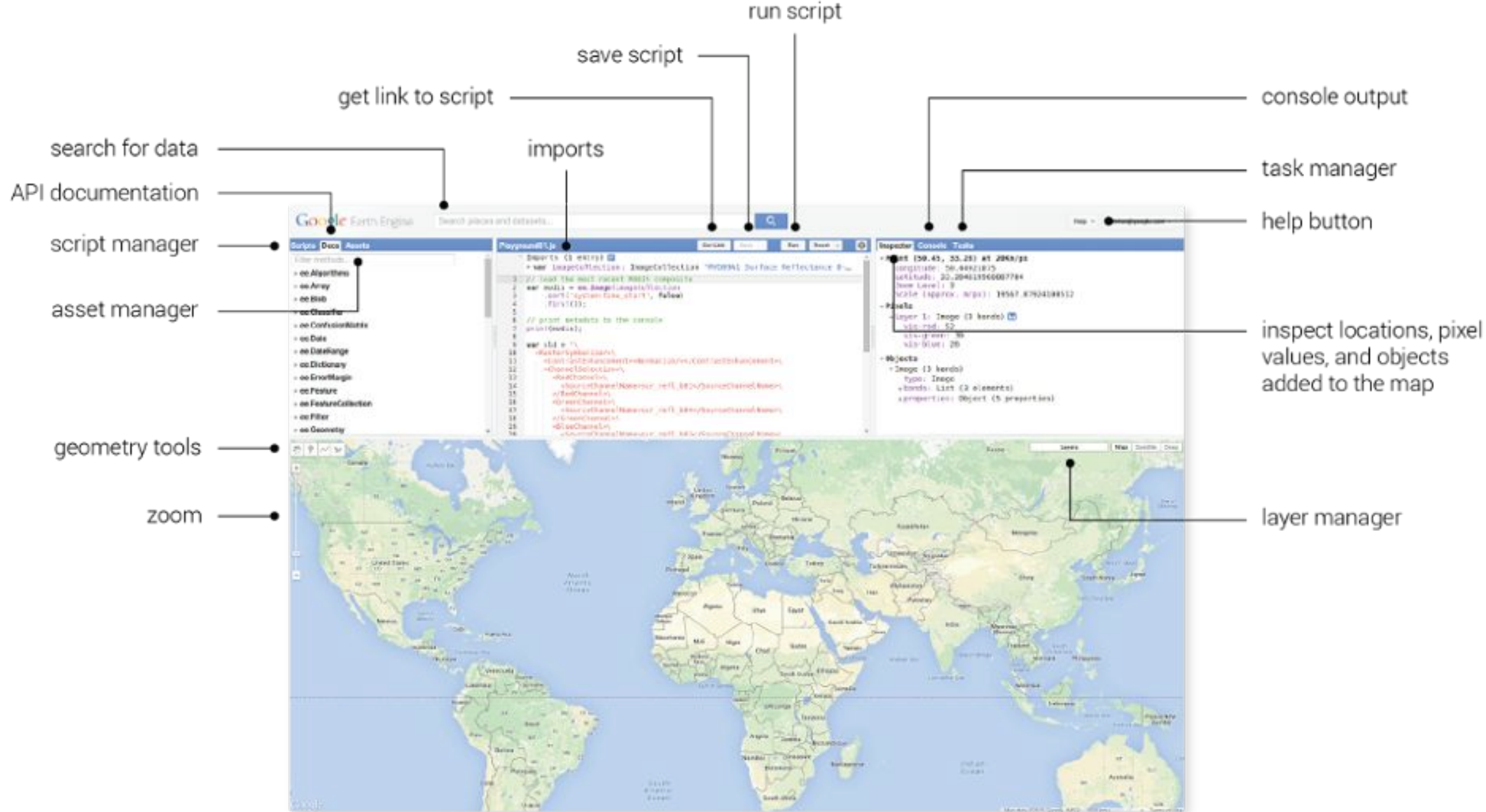
$K1, K2$ - коефіцієнти з метаданих знімка

$$LST = T / (1 + w * T / p * \ln(e)) \quad (5)$$

- онлайн-платформа для аналізу та обробки географічних даних, зокрема зображень супутників
- інструмент створено Google з метою забезпечити науковцям, дослідникам та розробникам засоби для вивчення і розуміння Землі на основі супутникових даних
- об'єднує багатопетабайтний каталог супутникових зображень і наборів геопросторових даних із можливостями аналізу планетарного масштабу
- можна використовувати для вивчення Землі та розв'язання різних проблем, пов'язаних з довкіллям, змінами клімату, аграрним виробництвом, лісовим господарством, географією, гідрологією та іншими галузями науки

Google Earth Engine (GEE)

- Каталог Earth Engine містить безліч загальнодоступних наборів геопросторових даних:
 - космо- та аерофотознімки, зроблені в різних діапазонах електромагнітного спектру
 - моделі прогнозування погоди та параметри клімату
 - Карти земного покриву
 - Топографічні та соціально-економічні набори даних
 - Різні параметри навколишнього середовища (наприклад, вологість ґрунту або вихідне теплове випромінювання Землі)
- Загальнодоступний [архів даних](#) містить понад сорок років історичних зображень і наборів наукових даних, які щодня оновлюються та розширюються.
- Він містить понад вісімдесят петабайт геопросторових даних, миттєво доступних для аналізу
- Також містить інструменти та обчислювальну потужність, необхідні для аналізу та обробки цього величезного сховища даних



Доступ до інструменту Earth Engine здійснюється через редактор коду (Code Editor) – веб-середовища розробки на основі JavaScript