

Підкатегорія. Онлайн-сервіси кліматичних даних

Дядін Д. В., ХНУМГ ім. О. М. Бекетова

Про ресурс

Цей ресурс є частиною розділу «Кліматичні дані та інструменти» науково-освітньої платформи ClimEd. Він призначений для студентів, аспірантів, викладачів, дослідників і фахівців кліматозалежних секторів, які працюють із кліматичними даними, реаналізом, кліматичними сценаріями та проєкціями, просторовими даними та часовими рядами. Матеріал може використовуватися під час реалізації курсів ClimEd, виконання практичних і лабораторних робіт, підготовки кваліфікаційних і наукових досліджень, оцінювання кліматичних ризиків та розроблення прикладних кліматичних сервісів.

Ресурс охоплює як сервіси для швидкого перегляду й завантаження окремих показників, так і спеціалізовані платформи для роботи з великими масивами кліматичних і геопросторових даних. Опис кожного сервісу містить його призначення, основні можливості, доступні формати даних, переваги, обмеження та рекомендації щодо практичного використання.

Підкатегорії для підкатегорії «Онлайн-сервіси кліматичних даних»

1. Open-Meteo Climate API
2. WorldClim
3. Copernicus Interactive Climate Atlas
4. IPCC WGI Interactive Atlas
5. Copernicus Climate Data Store (CDS)
6. Google Earth Engine
7. Рекомендації щодо вибору сервісу

1. Open-Meteo Climate API

Коли використовувати. Для швидкого отримання часових рядів для окремої точки або населеного пункту без завантаження великих масивів даних.

Сервіс Open-Meteo Climate API (<https://open-meteo.com/en/docs/climate-api>) є безкоштовним веб-інструментом для перегляду та отримання прогностичних кліматичних даних через браузер або API. Він дозволяє швидко отримувати кліматичні показники для будь-якої точки світу за географічними координатами без необхідності завантаження великих масивів даних або використання спеціалізованого програмного забезпечення. Сервіс орієнтований як на розробників програмного забезпечення, так і на дослідників, які працюють з аналізом зміни клімату.

Основою сервісу є результати високодеталізованих кліматичних моделей проєкту HighResMIP (<https://highresmip.org/>), що входить до програми CMIP6 (<https://wcrp-cmip.org/cmip-phases/cmip6/>). Для підвищення точності прогнозів застосовується статистичне коригування (bias correction) відносно набору даних ERA5-Land, у результаті чого прогностичні дані приводяться до просторової роздільної здатності близько 10 км. Це забезпечує більш коректне відтворення регіональних кліматичних особливостей порівняно з вихідними глобальними моделями.

На веб-сторінці сервісу Open-Meteo Climate API користувач може обрати одну або декілька із семи доступних кліматичних моделей, часовий інтервал (від 1950 до 2050 року) та набір необхідних кліматичних змінних. Серед доступних параметрів – середня, мінімальна та максимальна температура повітря, кількість опадів, швидкість вітру, відносна вологість, хмарність, сонячна радіація, евапотранспірація, вологість ґрунту та інші показники. Дані надаються у добовій часовій роздільній здатності, що є достатнім для більшості досліджень кліматичних тенденцій та оцінювання кліматичних ризиків.

Перевагою Open-Meteo є простий інтерфейс, можливість швидкого візуального перегляду часових рядів, автоматичне формування графіків, а також експорт результатів у формати CSV, XLSX або JSON для подальшого аналізу. Сервіс особливо зручний для оперативного отримання кліматичних даних для окремих населених пунктів або координат без необхідності працювати з великими файлами NetCDF чи спеціалізованими кліматичними архівами. Водночас він не призначений для повномасштабного просторового аналізу або роботи з растровими полями, тому для таких задач доцільніше використовувати вихідні набори даних, наприклад EURO-CORDEX або ERA5.

Обмеження. Open-Meteo зручний для точкових часових рядів, але не замінює повноцінні просторові набори даних і не призначений для комплексної роботи з растровими полями.

2. WorldClim

Коли використовувати. Для картографування, екологічного моделювання та роботи з готовими високодеталізованими кліматичними поверхнями у форматі GeoTIFF.

WorldClim – це один із найпоширеніших у світі відкритих наборів глобальних кліматичних даних високої просторової роздільної здатності, спеціально розроблений для картографування, просторового аналізу та екологічного моделювання (<https://www.worldclim.org/data/index.html>). Проєкт підтримується дослідниками University of California, Davis під керівництвом професора Robert J. Hijmans. Дані є вільно доступними для наукових досліджень і широко використовуються в екології, біогеографії, ландшафтному плануванні, гідрології та дослідженнях зміни клімату.

На відміну від ERA5 або EURO-CORDEX, WorldClim не є ані реаналізом, ані результатом регіонального кліматичного моделювання. Це набір просторово інтерпольованих кліматичних поверхонь, побудованих на основі багатотисячної мережі метеорологічних станцій світу із застосуванням статистичних методів інтерполяції та врахування цифрової моделі рельєфу. Базова кліматологія сучасної версії WorldClim 2.1 характеризує середні кліматичні умови за період 1970–2000 pp.

Однією з головних переваг WorldClim є дуже висока просторова деталізація. Дані доступні у чотирьох просторових роздільних здатностях:

- 30 кутових секунд (приблизно 1 км);
- 2,5 кутових хвилини (приблизно 5 км);
- 5 кутових хвилин (приблизно 10 км);
- 10 кутових хвилин (приблизно 20 км).

Набір містить середньомісячні значення основних кліматичних параметрів:

- середньої температури повітря;
- мінімальної температури;
- максимальної температури;
- кількості атмосферних опадів;
- сонячної радіації;
- швидкості вітру;
- тиску водяної пари.

Особливу цінність WorldClim становлять 19 біокліматичних змінних (BIO1–BIO19), які автоматично розраховані на основі температури та опадів. До них належать середньорічна температура, сезонність температури, температура найтеплішого та найхолоднішого кварталів, річна кількість опадів, сезонність опадів, кількість опадів найсухішого та найвологішого кварталів та інші інтегральні показники. Саме ці змінні є стандартом у моделюванні поширення видів, оцінюванні екологічних ніш, аналізі біорізноманіття та прогнозуванні змін природних екосистем.

Окрім історичної кліматології, портал містить також прогнози кліматичні дані, отримані шляхом статистичної деталізації результатів глобальних кліматичних моделей СМІР. Для різних моделей і сценаріїв зміни клімату користувач може завантажити майбутні середньомісячні кліматичні характеристики та відповідні біокліматичні змінні, що робить WorldClim зручним джерелом даних для оцінювання можливих наслідків зміни клімату.

Усі дані поширюються у форматі GeoTIFF, тому безпосередньо відкриваються в QGIS, ArcGIS та інших геоінформаційних системах без необхідності попереднього перетворення форматів. Кожна кліматична змінна представлена окремими растровими шарами, що значно спрощує виконання просторового аналізу та використання растрового калькулятора.

Основними перевагами WorldClim є глобальне покриття, дуже висока просторова роздільна здатність, простота використання, широкий набір біокліматичних показників та готовність даних до використання у ГІС. Саме тому цей набір став фактичним стандартом для екологічного моделювання, оцінювання придатності середовища існування видів та аналізу природних екосистем.

Водночас необхідно враховувати і його обмеження. WorldClim містить довгострокові кліматичні середні, а не часові ряди щоденних або погодинних спостережень, тому він непридатний для аналізу окремих екстремальних погодних явищ. Крім того, точність даних залежить від густоти мережі метеостанцій, яка є нерівномірною у різних регіонах світу, а статистична інтерполяція не завжди повністю відтворює локальні особливості клімату в гірських районах або на узбережжях. Незважаючи на це, WorldClim залишається одним із найавторитетніших і найширше використовуваних глобальних джерел кліматичних даних для просторового аналізу та моделювання.

Зверніть увагу. WorldClim містить переважно довгострокові кліматичні середні та біокліматичні змінні, а не щоденні або погодинні часові ряди.

3. Copernicus Interactive Climate Atlas

Коли використовувати. Для інтерактивного порівняння спостережень, реаналізу та кліматичних

проекцій, а також для швидкого експорту карт і просторових даних.

Copernicus Interactive Climate Atlas – це інтерактивний веб-сервіс (<https://atlas.climate.copernicus.eu/atlas>), розроблений в рамках програми Copernicus Climate Change Service, який призначений для дослідження, візуалізації та аналізу сучасних і майбутніх змін клімату. Атлас є розвитком Intergovernmental Panel on Climate Change Interactive Atlas (<https://interactive-atlas.ipcc.ch/>), створеного для Шостої оціночної доповіді МГЕЗК, але містить ширший набір даних, регулярно оновлюється та інтегрований із інфраструктурою Copernicus Climate Data Store.

Основною перевагою сервісу є можливість інтерактивної візуалізації кліматичних даних без необхідності їх попереднього завантаження. Користувач може обирати набір даних (спостереження, реаналіз або кліматичні проєкції), кліматичну змінну, часовий період, сезон, сценарій зміни клімату або рівень глобального потепління (наприклад, 1,5; 2; 3 або 4 °C відносно доіндустріального періоду). Після зміни будь-якого параметра карта автоматично оновлюється, що дозволяє оперативно аналізувати просторові закономірності кліматичних змін.

Сервіс об'єднує дані кількох типів джерел. До них належать історичні кліматичні спостереження, набори реаналізу, глобальні кліматичні моделі CMIP6, а також регіональні моделі CORDEX, що дозволяє безпосередньо порівнювати сучасний клімат із прогнозами майбутніх змін. Загалом сервіс надає доступ до десятків кліматичних змінних і екстремальних індикаторів, серед яких температура повітря, атмосферні опади, швидкість вітру, посухи, екстремальна спека, сильні опади та інші показники, які широко використовуються під час оцінювання кліматичних ризиків.

Важливою особливістю Copernicus Interactive Climate Atlas є широкий набір інструментів візуалізації. Крім традиційних карт, користувач може будувати часові ряди, кліматичні смуги (Climate Stripes), графіки річного ходу показників, діаграми розсіювання та інші інтерактивні графіки для окремих регіонів або довільно вибраних територій. Передбачена можливість аналізу як адміністративних або кліматичних регіонів, так і власних полігонів, що значно розширює можливості регіональних досліджень.

Суттєвою перевагою Copernicus Interactive Climate Atlas є можливість не лише візуалізувати кліматичні дані, а й експортувати їх для подальшого аналізу у геоінформаційних системах. Після відкриття сервісу користувач спочатку обирає необхідний набір даних (наприклад, спостереження або кліматичні проєкції CMIP6 чи CORDEX), кліматичний показник (температура, опади, швидкість вітру, екстремальні індикатори тощо), часовий період, сезон або місяць, а також сценарій зміни клімату (наприклад SSP2-4.5 або SSP5-8.5). Після зміни будь-якого параметра карта автоматично оновлюється, відображаючи відповідний просторовий розподіл вибраного показника.

Для експорту даних необхідно скористатися меню Download або Export, яке доступне у панелі інструментів карти. Залежно від типу відображуваних даних сервіс пропонує декілька варіантів експорту. Найпростішим є збереження карти у форматах PNG або PDF, що доцільно використовувати для підготовки звітів, презентацій та наукових публікацій. При цьому зберігається поточний масштаб карти, легенда та налаштована кольорова шкала.

Для подальшого просторового аналізу більш корисною є можливість експорту растрових даних у форматі GeoTIFF. Після вибору відповідної опції сервіс формує геоприв'язаний растровий файл, який можна безпосередньо відкрити у QGIS, ArcGIS або іншому програмному забезпеченні для роботи з ГІС. Завантажений GeoTIFF містить числові значення кліматичного показника для кожної комірки растру, що дозволяє виконувати растрові обчислення, обрізання за контурами адміністративних одиниць, статистичний аналіз або побудову власних тематичних карт.

Під час експорту необхідно звертати увагу на параметри, які були вибрані перед завантаженням, оскільки вони визначають зміст отриманого файлу. Зокрема, слід перевірити:

- набір кліматичних даних (CMIP6, CORDEX, спостереження тощо);
- кліматичну змінну;
- сценарій зміни клімату;
- часовий період;

- сезон або місяць;
- одиниці вимірювання;
- тип показника (абсолютні значення чи величина змін відносно базового періоду).

Важливо розуміти, що GeoTIFF, який експортується з Атласу, зазвичай відповідає одному конкретному часовому зрізу та одному кліматичному показнику. Якщо необхідно отримати серію часових зрізів або декілька змінних, процедуру експорту потрібно повторити для кожної комбінації параметрів.

Для більш складних досліджень Copernicus Interactive Climate Atlas надає доступ до вихідних наборів даних через Copernicus Climate Data Store (CDS). У багатьох випадках поряд із кнопкою експорту присутнє посилання на відповідний набір даних у CDS. Перейшовши за ним, користувач може завантажити вже не окремий GeoTIFF, а повні масиви кліматичних даних у форматах NetCDF або GRIB, вибравши необхідні змінні, часові діапазони, кліматичні моделі та сценарії. Такий спосіб є доцільним під час виконання масштабних досліджень, коли потрібно аналізувати багаторічні часові ряди або обробляти дані для великих територій.

Таким чином, Copernicus Interactive Climate Atlas може використовуватися як наочний інструмент для швидкого перегляду кліматичних змін, так і як джерело просторових даних для подальшої роботи у ГІС. Для оперативного аналізу достатньо експорту окремих карт у форматі GeoTIFF, тоді як для комплексних наукових досліджень доцільніше переходити до Copernicus Climate Data Store і завантажувати повні кліматичні набори даних.

Належна практика. Перед експортом перевіряйте набір даних, змінну, сценарій, часовий період, сезон, одиниці вимірювання та тип показника. Ці параметри визначають зміст отриманого файлу.

4. IPCC WGI Interactive Atlas

Коли використовувати. Коли необхідно працювати з офіційно оціненою інформацією, що лежить в основі Шостої оціночної доповіді IPCC, і забезпечити узгодженість із висновками AR6.

IPCC Interactive Atlas – це інтерактивний веб-атлас (<https://interactive-atlas.ipcc.ch/>), розроблений Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) у рамках підготовки Шостої оціночної доповіді (AR6) Робочої групи I. Його основною метою є надання користувачам можливості досліджувати результати, що стали основою наукових висновків доповіді IPCC, у вигляді інтерактивних карт, графіків та регіональних узагальнень. Так само як і Interactive Copernicus Climate Atlas, на відміну від більшості кліматичних веб-сервісів, IPCC Interactive Atlas не є окремим сховищем кліматичних даних, а являє собою інструмент для аналізу та візуалізації вже оцінених і гармонізованих даних, використаних експертами IPCC.

Інтерактивний атлас містить дві основні складові. Перша – Regional Information, яка дозволяє аналізувати просторовий розподіл кліматичних показників, а друга – Regional Synthesis, що узагальнює інформацію про Climatic Impact Drivers (CID) – кліматичні чинники впливу, які використовуються в оцінці ризиків для природних і соціально-економічних систем. Користувач може працювати як із сучасними спостереженнями, так і з результатами глобальних моделей CMIP5, CMIP6 та регіональних моделей CORDEX, обираючи різні кліматичні змінні, часові періоди, сценарії викидів або рівні глобального потепління (+1,5; +2; +3; +4 °C).

Основною перевагою IPCC Interactive Atlas є надзвичайно широкий набір засобів інтерактивної візуалізації. Після вибору потрібного набору даних користувач може:

- переглядати глобальні карти просторового розподілу кліматичних показників;
- аналізувати часові ряди для окремих регіонів;
- будувати графіки річного ходу кліматичних показників;
- переглядати діаграми розсіювання;
- формувати табличні зведення;
- використовувати Climate Stripes;

- аналізувати зміни за різними рівнями глобального потепління, а не лише за календарними періодами.

Особливістю Атласу є можливість швидкого переходу від глобальної карти до регіонального аналізу. Після вибору будь-якого регіону користувач автоматично отримує набір графіків і статистичних характеристик саме для цієї території без необхідності виконувати додаткові обчислення. Крім стандартних адміністративних або географічних регіонів, підтримуються регіони IPCC, які використовуються в усіх розділах AR6, що забезпечує повну узгодженість із результатами доповіді.

IPCC Interactive Atlas підтримує експорт як графічних матеріалів, так і просторових даних. Після налаштування карти (вибору набору даних, змінної, сценарію, періоду та інших параметрів) користувач може скористатися кнопкою Download або Export.

Доступні такі варіанти експорту:

- PNG — для використання карт у презентаціях або звітах;
- PDF — для підготовки друкованих матеріалів;
- GeoTIFF — для подальшої роботи в QGIS або ArcGIS;
- для окремих продуктів також доступні агреговані дані у форматі NetCDF, які поширюються через IPCC Data Distribution Centre (IPCC-DDC).

Експортований GeoTIFF містить фактичні числові значення карти, а не лише її зображення, тому його можна використовувати для подальших просторових розрахунків, побудови власних тематичних карт або інтеграції з іншими геоданими.

Для дослідників особливо цінною є реалізація принципів FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable). Для кожного продукту доступна інформація про походження даних (provenance), а також відкритий програмний код, який використовувався для їх оброблення. Крім того, значна частина проміжних гармонізованих наборів даних і скриптів доступна через відкритий репозиторій GitHub та IPCC-DDC, що забезпечує повну відтворюваність результатів.

Попри схожий інтерфейс, IPCC Interactive Atlas і Copernicus Interactive Climate Atlas мають різне призначення.

IPCC Interactive Atlas є інструментом, безпосередньо пов'язаним із Шостою оціночною доповіддю IPCC. Він містить лише ті дані, які були офіційно оцінені експертами IPCC і використані для формування висновків AR6. Саме тому набір змінних, часових періодів і моделей є певною мірою фіксованим та орієнтованим на забезпечення відтворюваності результатів доповіді.

Натомість Copernicus Interactive Climate Atlas є сучасним сервісом програми Copernicus Climate Change Service, який регулярно оновлюється, підтримує нові набори даних, містить ширший вибір кліматичних продуктів і тісно інтегрований із Copernicus Climate Data Store, звідки можна завантажувати повні масиви вихідних даних для подальшої обробки.

Таким чином:

- IPCC Interactive Atlas доцільно використовувати тоді, коли необхідно відтворити результати Шостої оціночної доповіді IPCC, проаналізувати офіційно оцінені сценарії зміни клімату або підготувати матеріали, які безпосередньо відповідають висновкам IPCC.
- Copernicus Interactive Climate Atlas є більш універсальним інструментом для прикладних досліджень, розроблення регіональних оцінок кліматичних ризиків, навчального процесу та отримання актуальних кліматичних даних для подальшої роботи у ГІС.

Вибір між атласами. IPCC Interactive Atlas доцільний для відтворення оцінених результатів AR6; Copernicus Interactive Climate Atlas — для ширшого прикладного аналізу й роботи з актуальними наборами даних.

5. Copernicus Climate Data Store (CDS)

Коли використовувати. Для пошуку та завантаження повних масивів кліматичних даних, зокрема ERA5, ERA5-Land, CMIP і CORDEX, для подальшої обробки у ГІС або мовах програмування.

Copernicus Climate Data Store (CDS) (<https://cds.climate.copernicus.eu/>) є центральним сховищем кліматичних даних програми Copernicus Climate Change Service, яку реалізує European Centre for Medium-Range Weather Forecasts. Це один із найбільших у світі відкритих порталів кліматичної інформації, який забезпечує безкоштовний доступ до тисяч наборів даних, включаючи спостереження, реаналіз, кліматичні проєкції, сезонні прогнози, супутникові продукти та численні кліматичні індикатори. На відміну від інтерактивних атласів, CDS є не стільки сервісом візуалізації, скільки платформою для пошуку, вибору та завантаження повних масивів кліматичних даних для подальшої наукової обробки.

Каталог CDS містить сотні тематичних наборів даних, серед яких:

- реаналіз ERA5 та ERA5-Land;
- глобальні кліматичні проєкції CMIP5 і CMIP6;
- регіональні кліматичні проєкції CORDEX;
- супутникові кліматичні продукти;
- історичні кліматичні спостереження;
- сезонні прогнози;
- численні похідні кліматичні індикатори.

Більшість наборів даних доступні у форматах NetCDF або GRIB, що дозволяє безпосередньо використовувати їх у QGIS, ArcGIS, Python, R та інших системах аналізу просторових даних.

Перед початком роботи необхідно безкоштовно зареєструвати обліковий запис у CDS. Після входу до системи користувач може скористатися пошуком або переглянути каталог наборів даних.

Після відкриття потрібного набору даних на екрані відображається інтерактивна форма, у якій необхідно послідовно вибрати параметри запиту. Залежно від конкретного набору вони можуть включати:

- кліматичну змінну (наприклад температуру, опади або швидкість вітру);
- часовий інтервал;
- рік, місяць або окремі дати;
- часову роздільну здатність (погодинні, добові або місячні дані);
- кліматичну модель або сценарій;
- формат вихідного файлу (NetCDF або GRIB).

Для більшості наборів можна також задати просторову область (Area), вказавши координати північної, західної, південної та східної меж. Це дозволяє завантажувати лише потрібний регіон (наприклад територію України) замість усього глобального масиву даних, що значно скорочує обсяг файлів і час їх підготовки.

Після вибору всіх параметрів достатньо натиснути кнопку Submit або Download. Запит передається на сервер, де формується необхідний набір даних. Якщо обсяг інформації невеликий, файл готується протягом кількох хвилин. Для великих запитів (наприклад кілька десятиліть погодинних даних ERA5) обробка може тривати від десятків хвилин до кількох годин. Після завершення підготовки файл стає доступним для завантаження.

Однією з найважливіших переваг CDS є підтримка CDS API, що дозволяє автоматизувати завантаження даних за допомогою Python. Після того як користувач налаштує параметри у веб-формі, унизу сторінки можна натиснути кнопку Show API request code. Система автоматично сформує готовий Python-скрипт із усіма вибраними параметрами. Його достатньо скопіювати, встановити бібліотеку cdsapi, виконати одноразове налаштування особистого API-ключа і запустити програму. Такий підхід особливо ефективний під час регулярного отримання даних або завантаження великих серій кліматичних змінних.

Під час роботи з CDS доцільно дотримуватися кількох правил:

- завантажувати лише необхідні змінні, а не весь набір даних;
- максимально обмежувати часовий період і територію дослідження;
- для великих проєктів виконувати завантаження окремими часовими блоками (наприклад по роках);
- за можливості використовувати формат NetCDF, який є найбільш зручним для подальшого аналізу у ГІС та мовах програмування;
- перед автоматизацією запитів через API спочатку протестувати їх вручну через веб-інтерфейс.

Належна практика. Перед автоматизацією запитів через CDS API спочатку сформуєте й перевірте запит у вебінтерфейсі, а великі масиви завантажуйте окремими часовими блоками.

6. Google Earth Engine

Коли використовувати. Для хмарного аналізу великих геопросторових масивів без попереднього завантаження даних на локальний комп'ютер.

Google Earth Engine (GEE) – це хмарна геоінформаційна платформа (<https://code.earthengine.google.com/>), призначена для зберігання, оброблення та аналізу великих масивів просторових даних без необхідності їх завантаження на локальний комп'ютер. На відміну від більшості кліматичних порталів, GEE не є лише сховищем даних, а поєднує глобальний каталог геоданих із потужним середовищем для просторового аналізу. Усі обчислення виконуються на серверах Google, що дозволяє працювати навіть із терабайтами кліматичної інформації практично без обмежень обчислювальних ресурсів користувача.

Каталог GEE містить десятки глобальних кліматичних наборів даних, які регулярно оновлюються. Проте, не всі набори доступні через цю платформу – зокрема, через GEE немає доступу до E-OBS та EURO-CORDEX. Найчастіше для кліматичних досліджень використовуються:

- ERA5 та ERA5-Land (реаналіз ECMWF);
- TerraClimate;
- WorldClim (кліматичні норми та біокліматичні змінні);
- GRIDMET;
- CHIRPS (опад);
- NASA GLDAS;
- FLDAS;
- численні продукти щодо вологості ґрунту, снігового покриву, випаровування, сонячної радіації та інших кліматичних характеристик.
- Наприклад, набір даних ERA5-Land представлений у декількох варіантах:
- погодинні дані;

добові агреговані значення;

місячні агреговані значення;

1. Вибір набору даних

Вони охоплюють період від 1950 року до майже реального часу, мають просторову роздільну здатність близько 11 км та містять близько 50 кліматичних змінних, включаючи температуру, опади, вітер, вологість ґрунту, випаровування, стік, сніговий покрив і потоки енергії.

- Для початку роботи з платформою GEE необхідно мати обліковий запис Google та зареєструватися у Google Earth Engine. Після отримання доступу відкривається Code Editor, який є основним середовищем роботи з платформою.
- Типовий алгоритм роботи складається з кількох етапів.
- 1. Вибір набору даних

- У каталозі GEE необхідно знайти потрібний кліматичний набір даних. Для цього можна скористатися пошуком за ключовими словами, наприклад ERA5, WorldClim, precipitation або temperature. Для кожного набору наведено його опис, часовий діапазон, просторову роздільну здатність, перелік доступних змінних та приклади коду.

2. Завантаження набору до скрипта

Замість скачування файлів користувач просто підключає набір даних однією командою JavaScript або Python. При цьому самі дані фізично залишаються на серверах Google.

3. Вибір потрібних даних

Після підключення набору можна задати:

часовий період;

- досліджувану територію;
- необхідні кліматичні змінні;
- спосіб агрегації (середнє, максимум, мінімум, сума тощо).
- Наприклад, із погодинних даних ERA5-Land можна отримати середню температуру лише за липень 2024 року в межах України або середньорічну кількість опадів за будь-який багаторічний період.
- 4. Просторовий аналіз
- Після фільтрації даних можна виконувати практично будь-які операції просторового аналізу:

4. Просторовий аналіз

побудову часових рядів;

визначення кліматичних аномалій;

розрахунок різниці між двома періодами;

статистичний аналіз;

зональну статистику по адміністративних одиницях або річкових басейнах;

- об'єднання кліматичних даних із супутниковими знімками, цифровими моделями рельєфу чи даними земного покриття.
- Оскільки всі операції виконуються безпосередньо на сервері, швидкість аналізу практично не залежить від розміру вихідних наборів даних.
- 5. Експорт результатів
- Після завершення аналізу результати можна експортувати у різних форматах:
- GeoTIFF – для подальшої роботи у QGIS або ArcGIS;
- CSV – для статистичного аналізу;

5. Експорт результатів

Google Cloud Storage;

- GEE Assets для подальших розрахунків у GEE.
- Користувач може експортувати як окремі растри, так і таблиці зі статистичними показниками для великої кількості територіальних одиниць.
- Головною перевагою GEE є те, що користувачу не потрібно попередньо завантажувати великі кліматичні набори даних. Наприклад, для отримання середньорічної температури за 40 років немає необхідності завантажувати сотні файлів ERA5 – достатньо кількох рядків коду, після чого сервер автоматично виконає всі обчислення та поверне лише готовий результат.
- Другою важливою перевагою є можливість поєднувати кліматичні дані з іншими глобальними геопросторовими наборами. Наприклад, температуру ERA5-Land можна безпосередньо аналізувати

разом із даними Sentinel-2, Landsat, цифровими моделями рельєфу, картами земного покриття ESA WorldCover або адміністративними межами. Це робить GEE надзвичайно ефективною платформою для оцінювання кліматичних ризиків, моделювання водних ресурсів, аналізу біорізноманіття та досліджень зміни клімату.

- Водночас слід зазначити, що Google Earth Engine не замінює спеціалізовані кліматичні архіви, такі як Copernicus Climate Data Store або ESGF. Частина найновіших кліматичних проєкцій або окремих модельних реалізацій може бути відсутня або з'являтися із затримкою. Тому для роботи з найактуальнішими версіями CMIP або EURO-CORDEX дослідники часто завантажують дані безпосередньо з відповідних архівів, тоді як GEE використовують для швидкого аналізу, оброблення та інтеграції кліматичних даних з іншими просторовими наборами.

7. Рекомендації щодо вибору сервісу

Вибір онлайн-сервісу має визначатися не його популярністю, а типом завдання, необхідною часовою та просторовою роздільною здатністю, форматом результату й подальшим способом аналізу.

Завдання	Рекомендований сервіс
Швидкий часовий ряд для точки або міста	Open-Meteo Climate API
Готові високодеталізовані кліматичні поверхні та біокліматичні змінні	WorldClim
Інтерактивне порівняння кліматичних змін і проєкцій	Copernicus Interactive Climate Atlas
Результати, узгоджені з оцінками IPCC AR6	IPCC WGI Interactive Atlas
Повні масиви реаналізу й кліматичних проєкцій	Copernicus Climate Data Store
Хмарний аналіз великих геопросторових даних	Google Earth Engine