

Зміни клімату: моделювання можливих наслідків

Валерій Хохлов

кафедра метеорології та кліматології

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова

Зміст:

- Клімат і зміни клімату: розширені основи
- Принципи моделювання змін клімату
- Глобальні та регіональні кліматичні моделі
- Моделювання ансамблем
- Моделювання впливу змін клімату

Клімат і зміни клімату: розширені основи

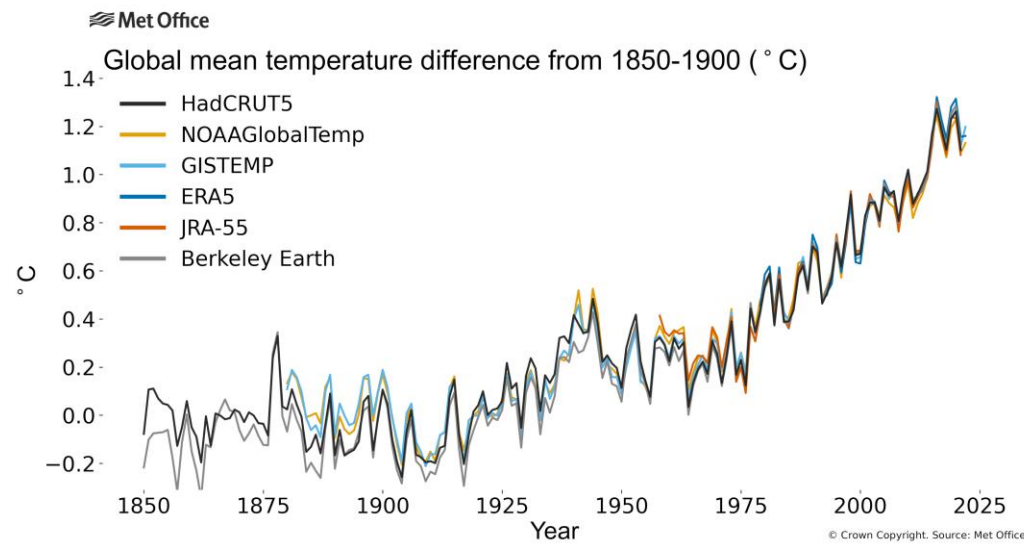
© Wikipedia

Клімат – це середня погода за тривалий період часу:

- для певної території або усієї земної кулі;
- принаймні за 30 років (згідно з ВМО);
- температура, опади, сніговий покрив тощо.

Зміна клімату означає великомасштабну довгострокову зміну погодних умов і середніх температур на планеті.
1911-1940 – збільшення температури
1941-1970 – зменшення температури
1971-now – збільшення температури
1998-2013 – пауза у глобальному потеплінні

Climate data for Stirling (1991–2020 averages, extremes 2009–present, [25 m or 82 ft asl])													[hide]
Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Year
Record high °C (°F)	13.6 (56.5)	15.5 (59.9)	17.1 (62.8)	21.1 (70.0)	27.8 (82.0)	32.3 (90.1)	29.0 (84.2)	24.9 (76.8)	23.8 (74.8)	19.7 (67.5)	15.7 (60.3)	14.5 (58.1)	32.3 (90.1)
Average high °C (°F)	7.3 (45.1)	8.1 (46.6)	9.9 (49.8)	12.4 (54.3)	15.7 (60.3)	18.1 (64.6)	19.9 (67.8)	19.5 (67.1)	17.1 (62.8)	13.5 (56.3)	10.0 (50.0)	7.5 (45.5)	13.3 (55.9)
Daily mean °C (°F)	4.4 (39.9)	5.0 (41.0)	6.4 (43.5)	8.3 (46.9)	11.3 (52.3)	14.0 (57.2)	15.7 (60.3)	15.3 (59.5)	12.9 (55.2)	9.8 (49.6)	6.7 (44.1)	4.3 (39.7)	9.5 (49.1)
Average low °C (°F)	1.4 (34.5)	1.9 (35.4)	2.9 (37.2)	4.3 (39.7)	6.9 (44.4)	9.8 (49.6)	11.5 (52.7)	11.1 (52.0)	8.8 (47.8)	6.2 (43.2)	3.5 (38.3)	1.1 (34.0)	5.8 (42.4)
Record low °C (°F)	−11.1 (12.0)	−7.6 (18.3)	−5.8 (21.6)	−3.9 (25.0)	−1.7 (28.9)	3.6 (38.5)	5.0 (41.0)	3.8 (38.8)	1.0 (33.8)	−2.8 (27.0)	−6.6 (20.1)	−15.6 (3.9)	−15.6 (3.9)
Average rainfall mm (inches)	129.3 (5.09)	97.3 (3.83)	74.5 (2.93)	51.4 (2.02)	56.9 (2.24)	66.6 (2.62)	70.1 (2.76)	76.1 (3.00)	76.3 (3.00)	107.4 (4.23)	109.2 (4.30)	103.1 (4.06)	1,018.1 (40.08)
Average rainy days (≥ 1 mm)	16.3	13.6	12.8	10.6	11.3	11.7	13.0	13.0	12.6	15.2	16.1	15.4	161.4
Mean monthly sunshine hours	39.1	66.9	99.5	137.8	183.1	162.0	153.7	150.5	119.5	81.3	54.0	32.2	1,279.6
Source 1: MetOffice ^[98]													
Source 2: ^[99]													



Клімат і зміни клімату: розширені основи

У 2011–2020 роках, глобальна приземна температура повітря була на 1,09 °C вище, ніж у 1850–1900, причому це перевищення було більшим над суходолом (1,59 °C), ніж над океаном (0,88 °C). (IPCC, 2021: Summary for Policymakers).

Надзвичайно спекотні дні в середніх широтах є теплішими приблизно на 3°C, а надзвичайно холодні ночі у високих широтах – приблизно на 4,5°C. Прогнозується, що кількість спекотних днів збільшиться в переважній кількості регіонів суші, причому найбільшим чином у тропіках.

Глобальне середнє підвищення рівня моря до 2100 року порівняно з 1986–2005 роками передбачається у діапазон від 0,26 до 0,77 м.

Нестабільність морського льодовикового щита Антарктиди та/або незворотна його втрата у Гренландії може призвести до багатометрового підвищення рівня моря протягом сотень або тисяч років.

By IPCC (2018), Global Warming of 1.5°C.

Гренландський льодовиковий щит танутиме швидше в теплішому кліматі та, ймовірно, буде знищений — за винятком залишкових льодовиків у горах — якщо середньорічна температура в Гренландії зросте приблизно на 3°C. (Gregory et al., 2004; Nature)

Клімат і зміни клімату: розширені основи

Екстремальні погодні умови в ОК у 2021 за звітом UK Met Office:

-  Сильний і тривалий дощ на атмосферному фронті, спричинений штормом «Крістоф», призвів до одного з найвищих за три доби (починаючи з 18 січня) накопичень опадів у Північно-Західній Англії та Північному Уельсі - 50-100 мм повсюдно і 150-200 мм на височинах.
-  7 лютого шторм «Дарсі» супроводжувався сильним вітром і сильним снігом на південному сході Англії. Тиждень східних вітрів призвів до дуже низьких температур: $-23,0^{\circ}\text{C}$ у Бремарі, Шотландія, це найнижча температура, зареєстрована у Великобританії з 1995 року.
-  30 березня в Кью-Гарденс у Лондоні температура досягла $24,5^{\circ}\text{C}$. Це лише третій випадок березневої температури, що перевищилп 24°C . Кілька станцій у південній Англії з тривалими рядами спостережень також зафіксували найвищу березневу температуру.
-  Після незвичайного тепла наприкінці березня у Великій Британії спостерігався швидкий перехід до надзвичайно холодної погоди у квітні (12 днів). Численні метеостанції зафіксували найнижчі квітневі температури за останні 40 років. Сильні північні вітри сприяли значному похолоданню.
-  По всій Англії та Уельсі температура була помітно високою, але не винятковою. Проте рекорд високої температури був побитий для Північної Ірландії протягом кількох днів (17–24 липня), причому 21 числа в Каслдерзі, графство Тайрон, було зафіксовано новий рекорд температури $31,3^{\circ}\text{C}$.
-  Шторм Арвен приніс сильний вітер по всій Великобританії вночі з 26 на 27 листопада 2021 року. Шторм, що розвивається, приніс північні вітри з поривами понад 110 км/год. Найвища швидкість поривів була 157 км/год у Брізлі-Вуд, Нортумберленд.

Клімат і зміни клімату: розширені основи

Хвилі тепла у Великій Британії з 1991 р.

1995 – третє найспекотніше літо з 1659 р.

1997 – третя велика хвиля тепла за 7 років.

2003 – *хвиля тепла в Європі 2003 року.*

2006 – *хвиля тепла в Європі 2006 року.*

2013 – *найтепліший липень з 2006 р.*

2015 – *побиття попереднього рекорду липня 2006 р.*

2016 – *найспекотніший день у вересні з 1911 р.*

2017 – *найспекотніша червнева температура.*

2018 – *хвиля тепла та посуха в Європі 2018 року.*

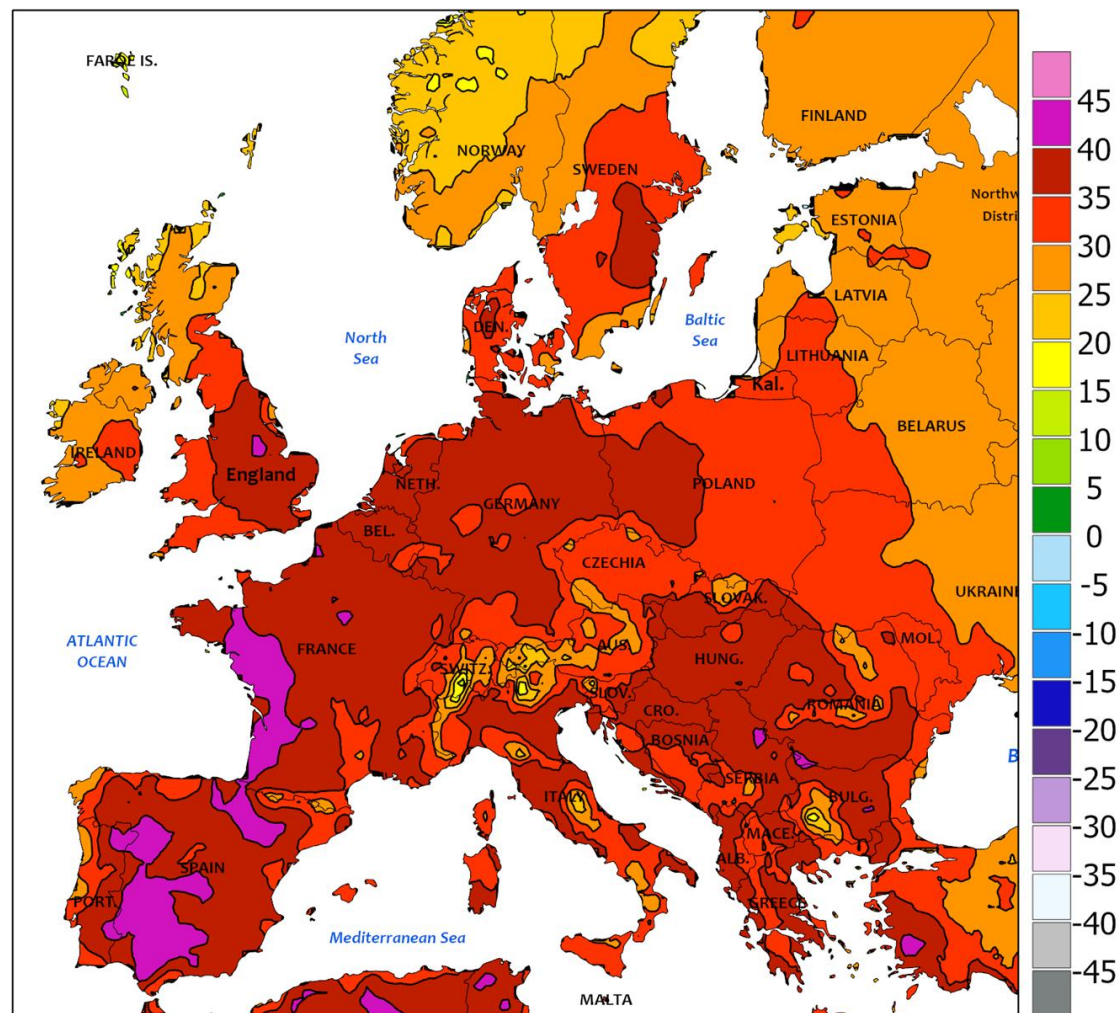
2019 – *хвиля тепла в Європі 2019 року.*

2021 – *хвиля тепла в Європі у середині лютого.*

2022 – *хвиля тепла в Європі 2022 року.*

© Wikipedia

July 17 - 23, 2022



CLIMATE PREDICTION CENTER, NOAA
Computer generated contours
Based on preliminary data

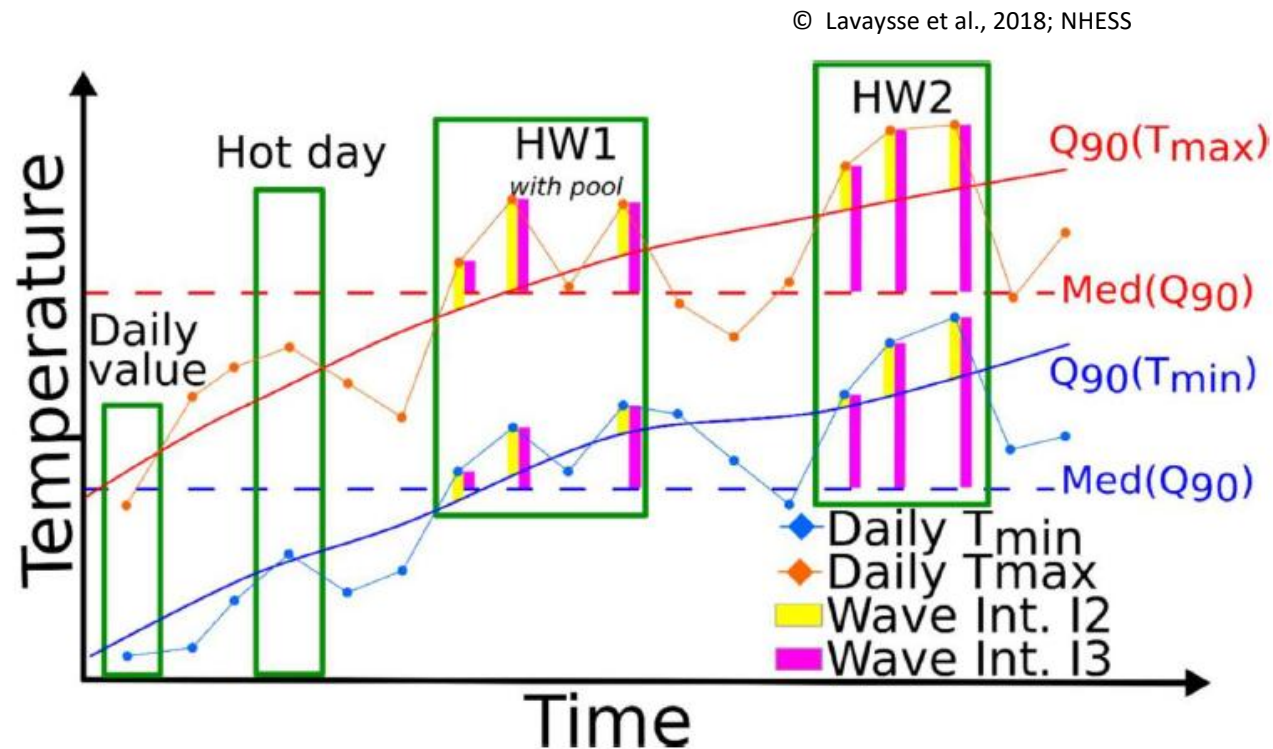


Клімат і зміни клімату: розширені основи

Хвиля тепла – це подія, яка триває принаймні три послідовні дні з температурою, що перевищує квантильні пороги (WMO, 2015)

Квантильні пороги розраховані за даними за 1981-2010 рр.

Внаслідок підвищення температури з 2010 року було більше днів було з температурою, що перевищувала квантильні пороги.

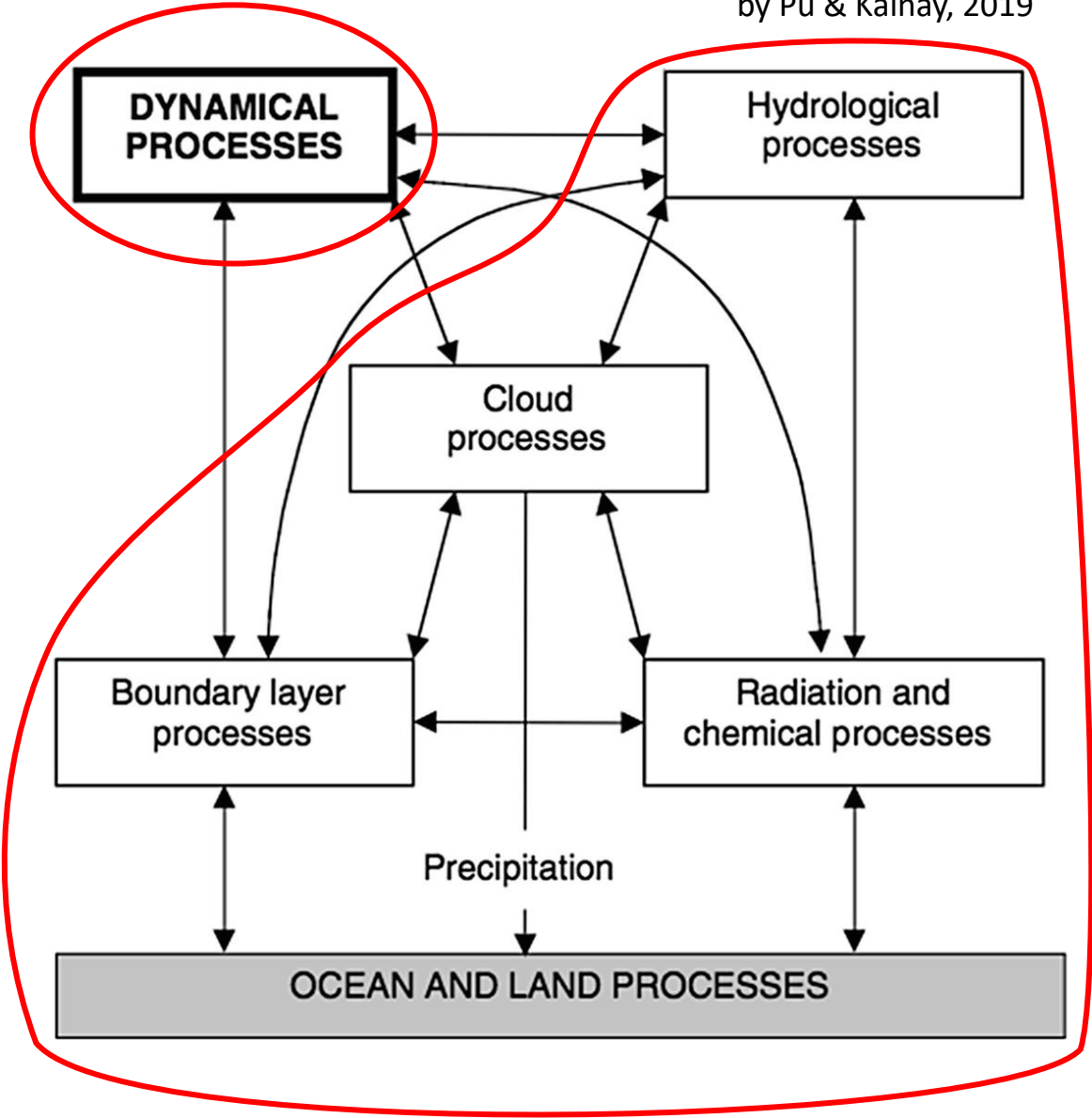


Деякі висновки:

- Середні значення за 30 років можна використовувати лише для порівняння, оскільки вони були в минулому, а клімат все ще змінюється.
- На фоні підвищення температури зростає кількість екстремальних подій.
- Величина «екстремального значення» залежить від вхідних даних.
- Потрібно враховувати не тільки середні значення, а й, головним чином, екстремуми.

Принципи моделювання змін клімату

by Pu & Kalnay, 2019



точний розв'язок

Динамічне ядро

Чисельний розв'язок

Параметризації

Невраховані процеси

Різноманіття підходів

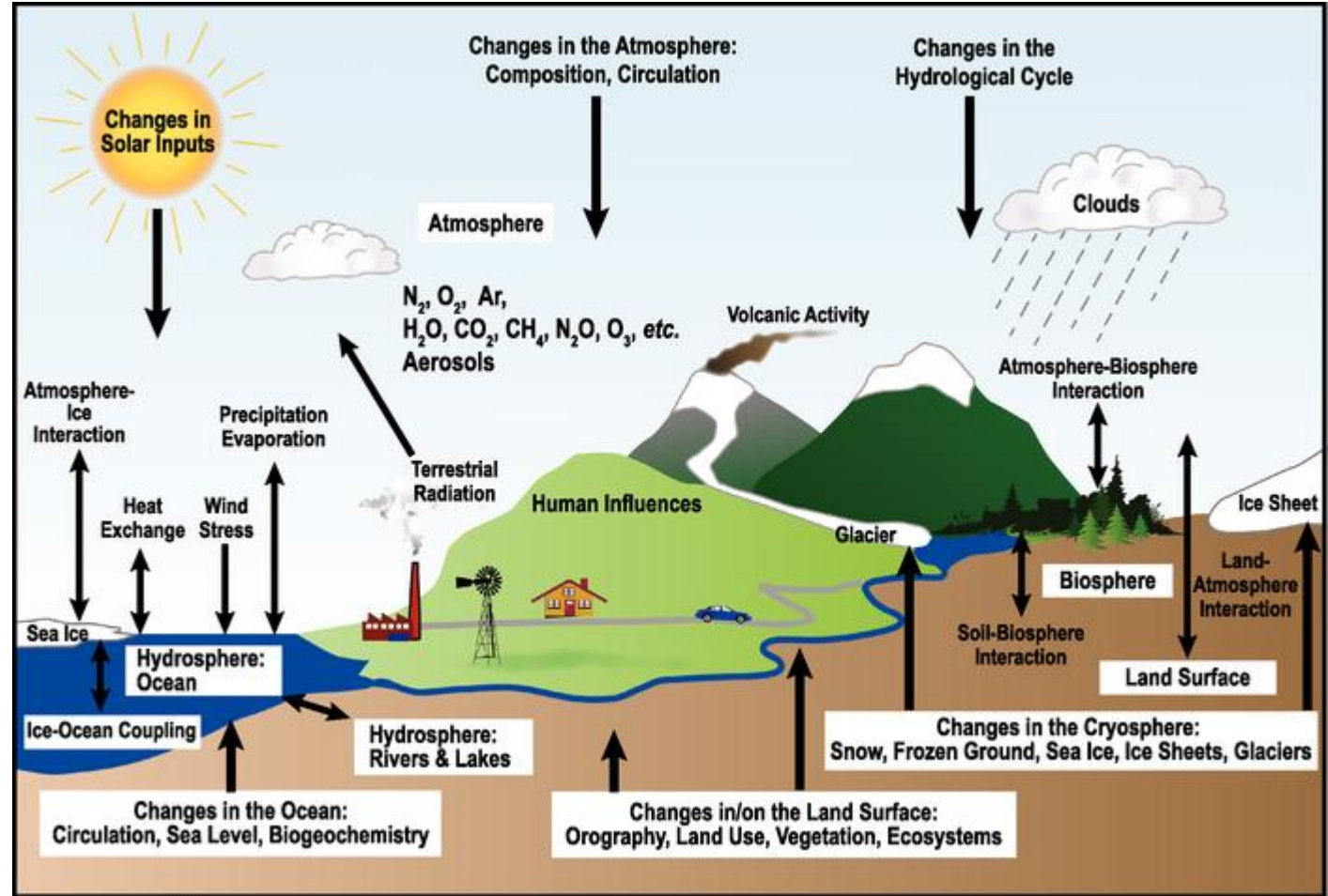
поганий розв'язок

Принципи моделювання змін клімату

by IPCC AR4 FAQ

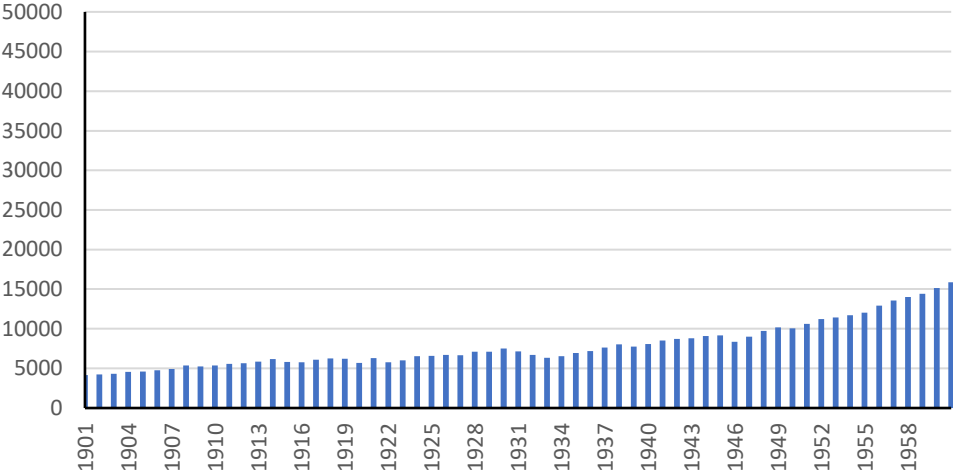
Складові кліматичної системи:

- Атмосфера
- Біосфера
- Кріосфера
- Гідросфера
- Підстильна поверхня

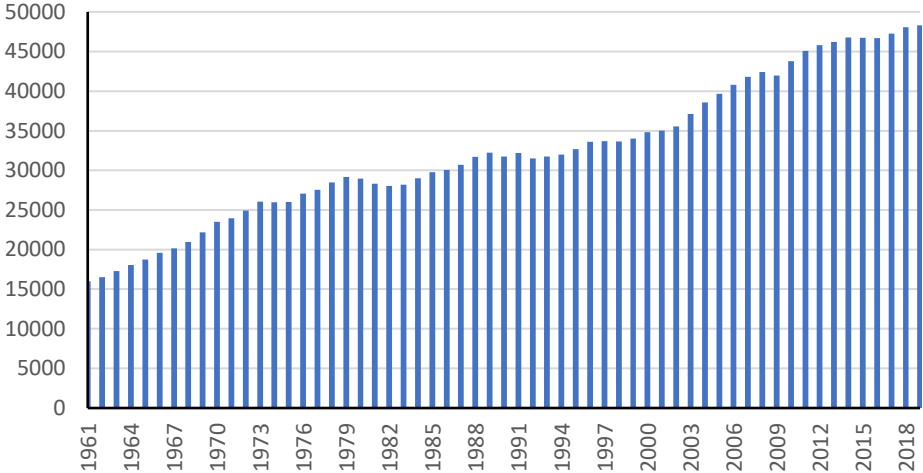


Принципи моделювання змін клімату

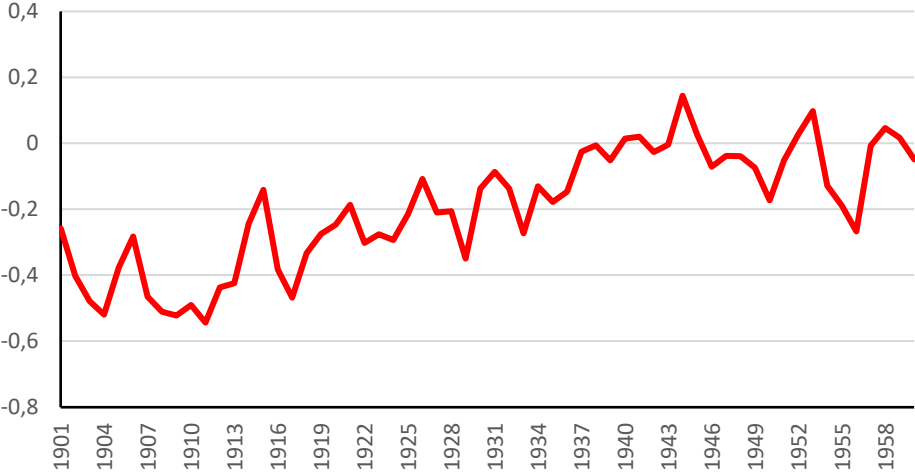
Глобальні викиди ПГ, Мт (1901-1960)



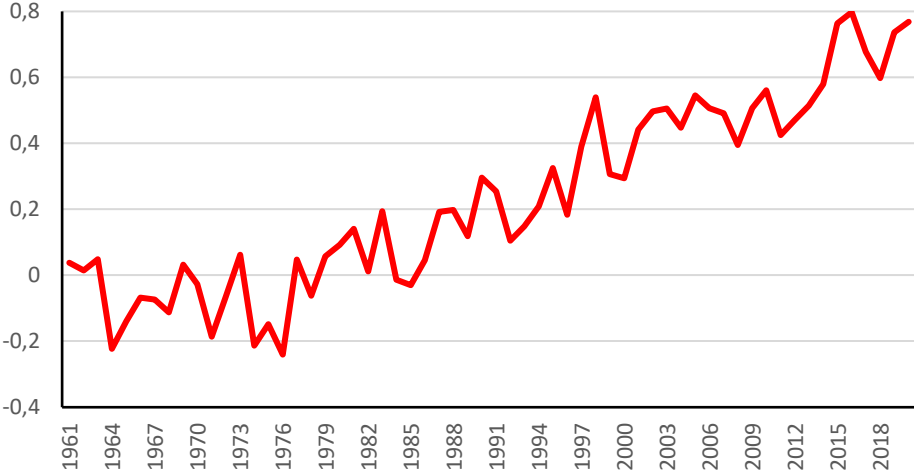
Глобальні викиди ПГ, Мт (1961-2019)



Аномалія глобальної температури (1901-1960)



Аномалія глобальної температури (1961-2020)



Принципи моделювання змін клімату

Спільні соціально-економічні шляхи (SSPs):

SSP1: Екологічний розвиток

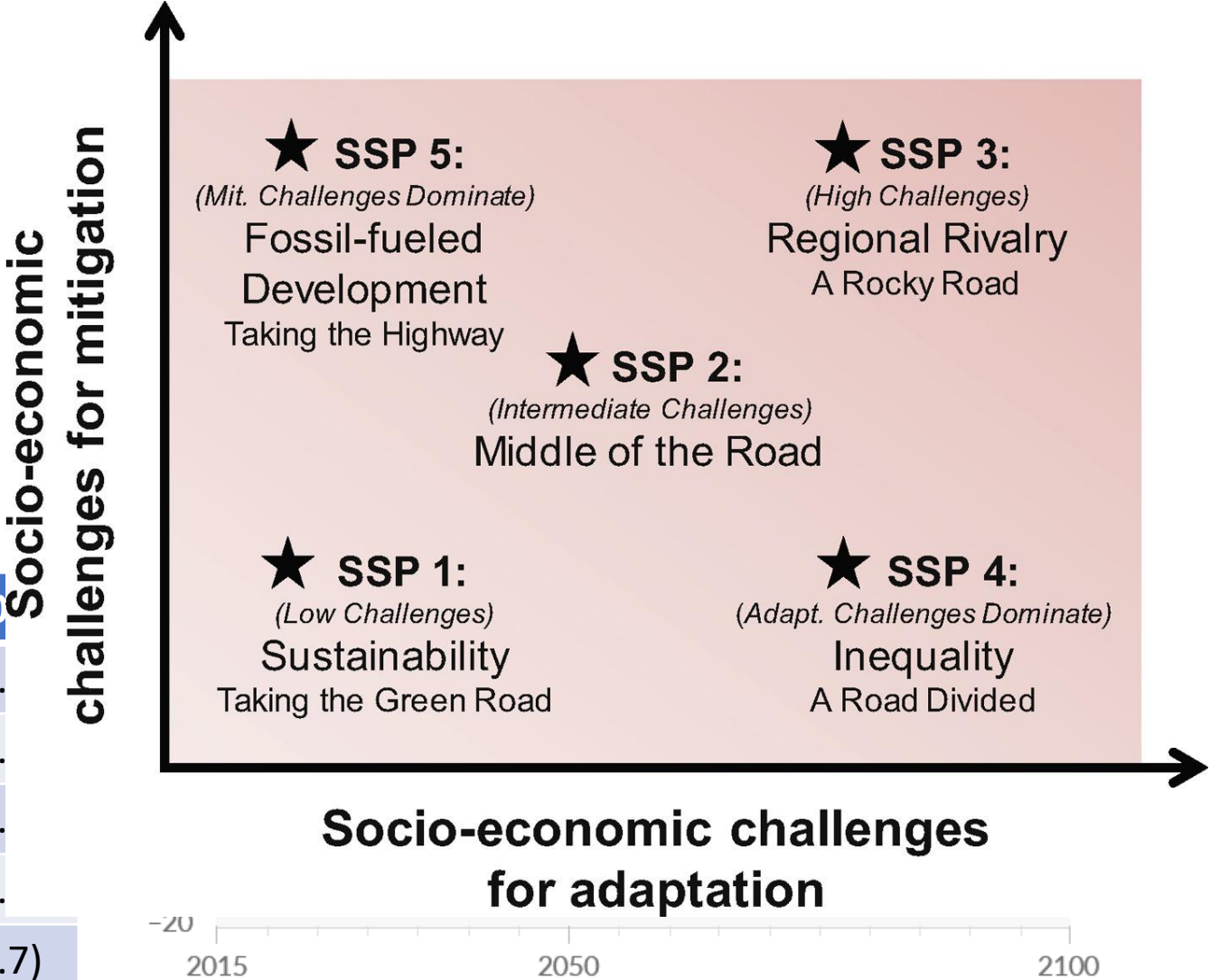
SSP2: Середина дороги

SSP3: Регіональне суперництво

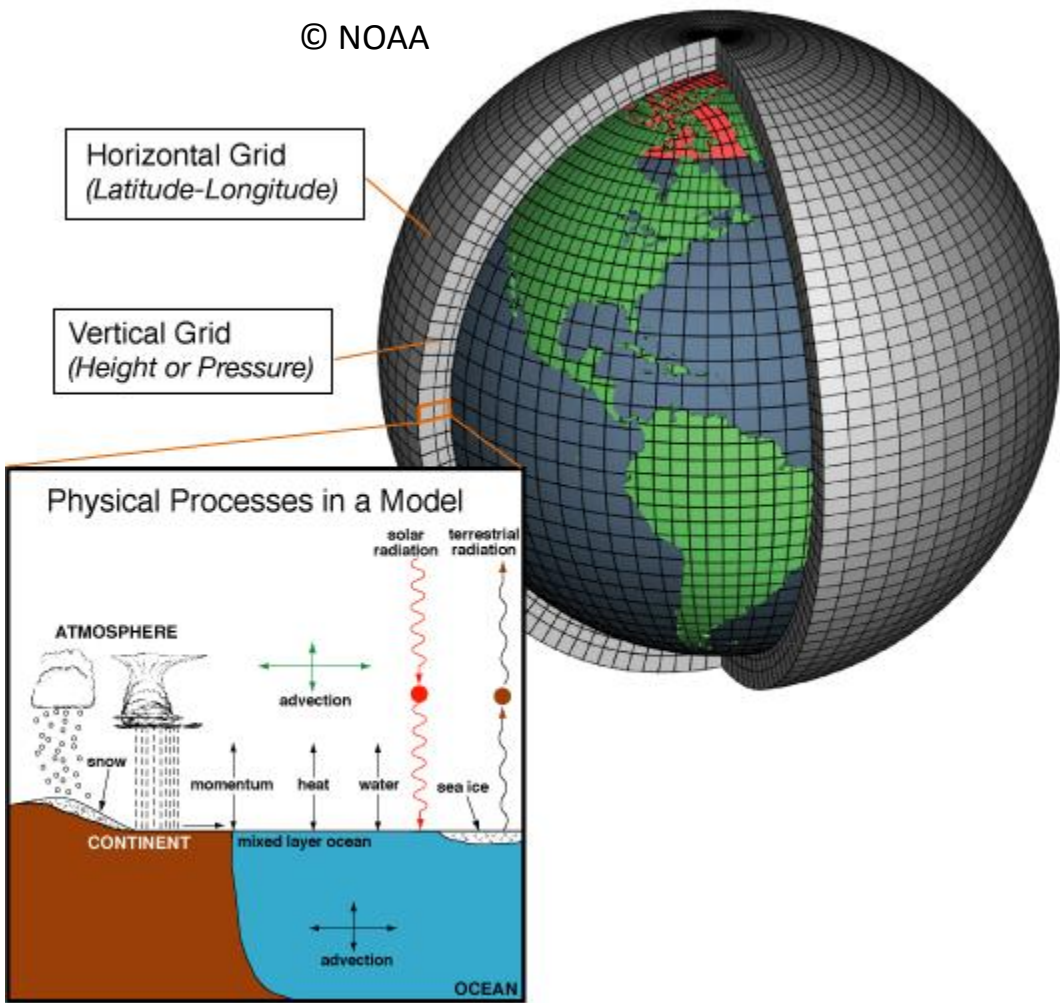
SSP4: Нерівність

SSP5: Розвиток в викопним паливом

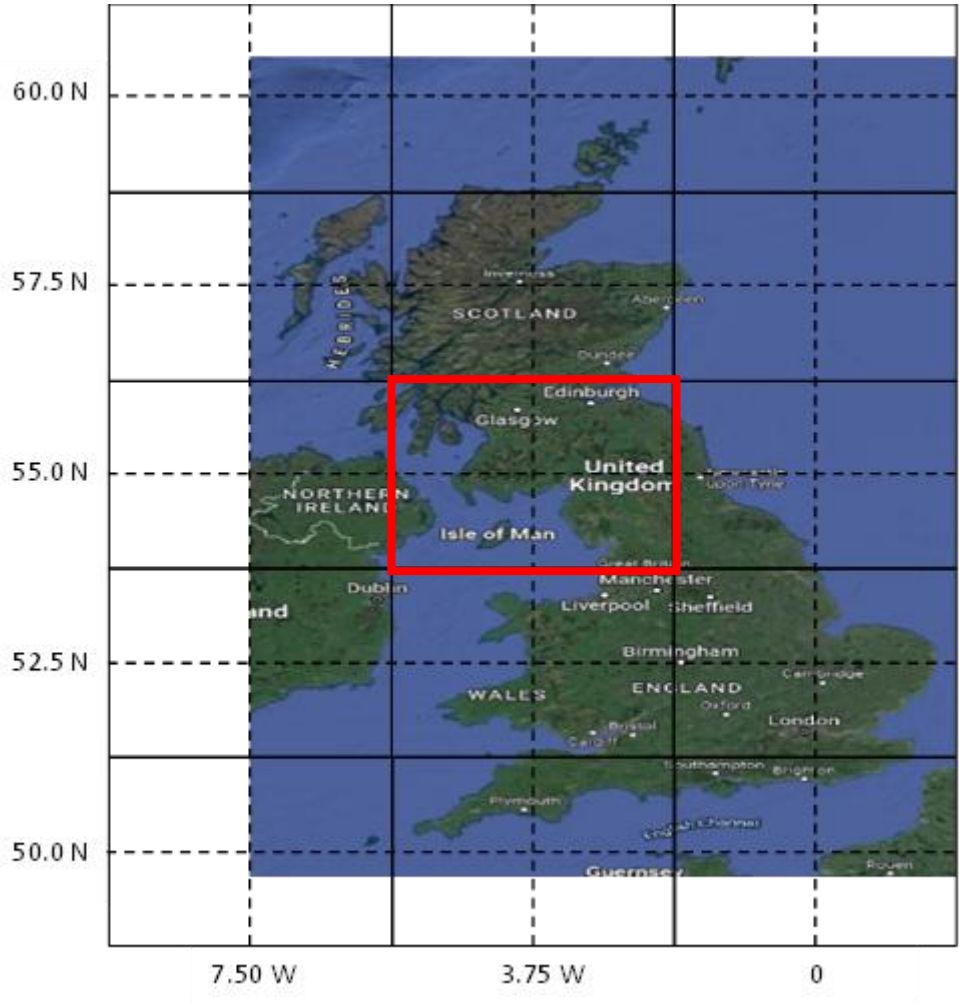
	2021-2040	2041-2060	2081-2100
SSP1-1.9	1.5 (1.2-1.7)	1.6 (1.2-2.0)	1.4 (1.0-1.8)
SSP1-2.6	1.5 (1.2-1.8)	1.7 (1.3-2.2)	1.8 (1.3-2.3)
SSP2-4.5	1.5 (1.2-1.8)	2.0 (1.6-2.5)	2.7 (2.1-3.3)
SSP3-7.0	1.5 (1.2-1.8)	2.1 (1.7-2.6)	3.6 (2.8-4.4)
SSP5-8.5	1.6 (1.3-1.9)	2.4 (1.9-3.0)	4.4 (3.3-5.7)



Глобальні і регіональні кліматичні моделі

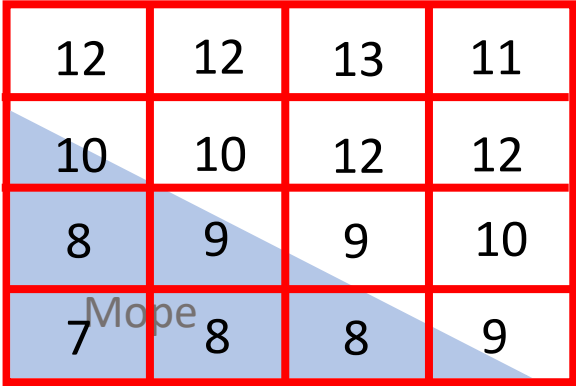
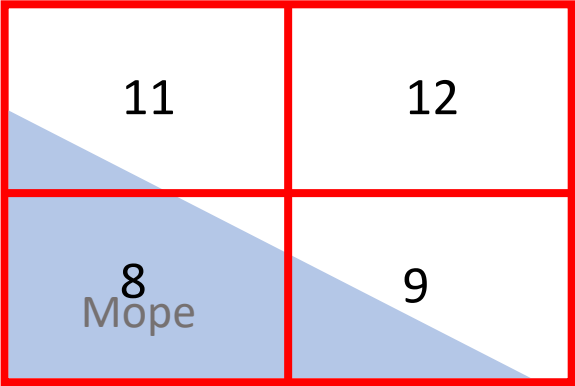
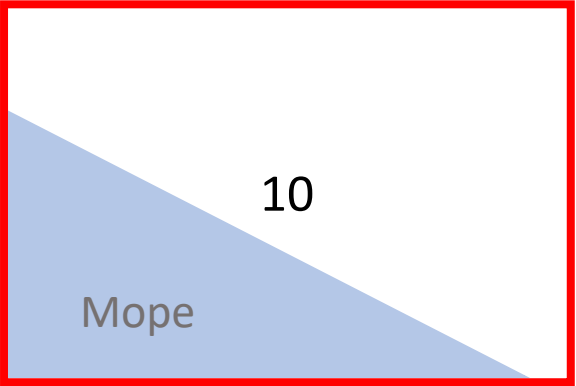


HadCM3 model

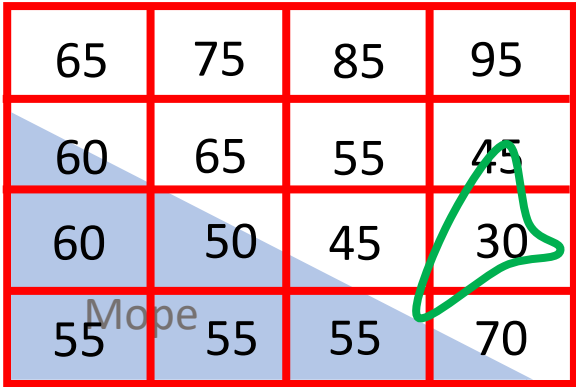
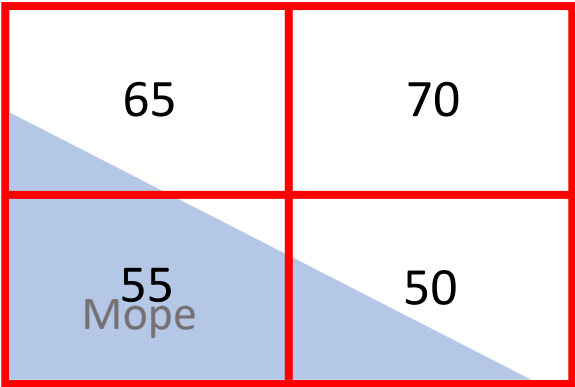
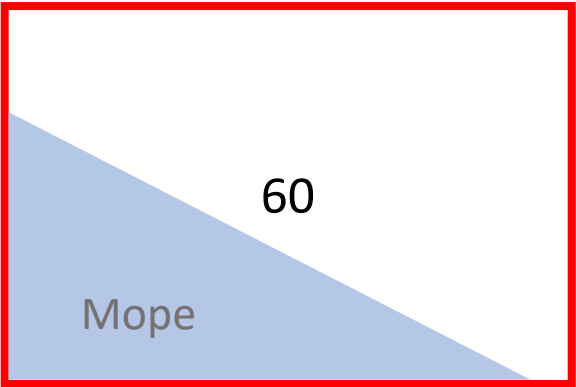


Глобальні і регіональні кліматичні моделі

Температура, °C



Опади, mm



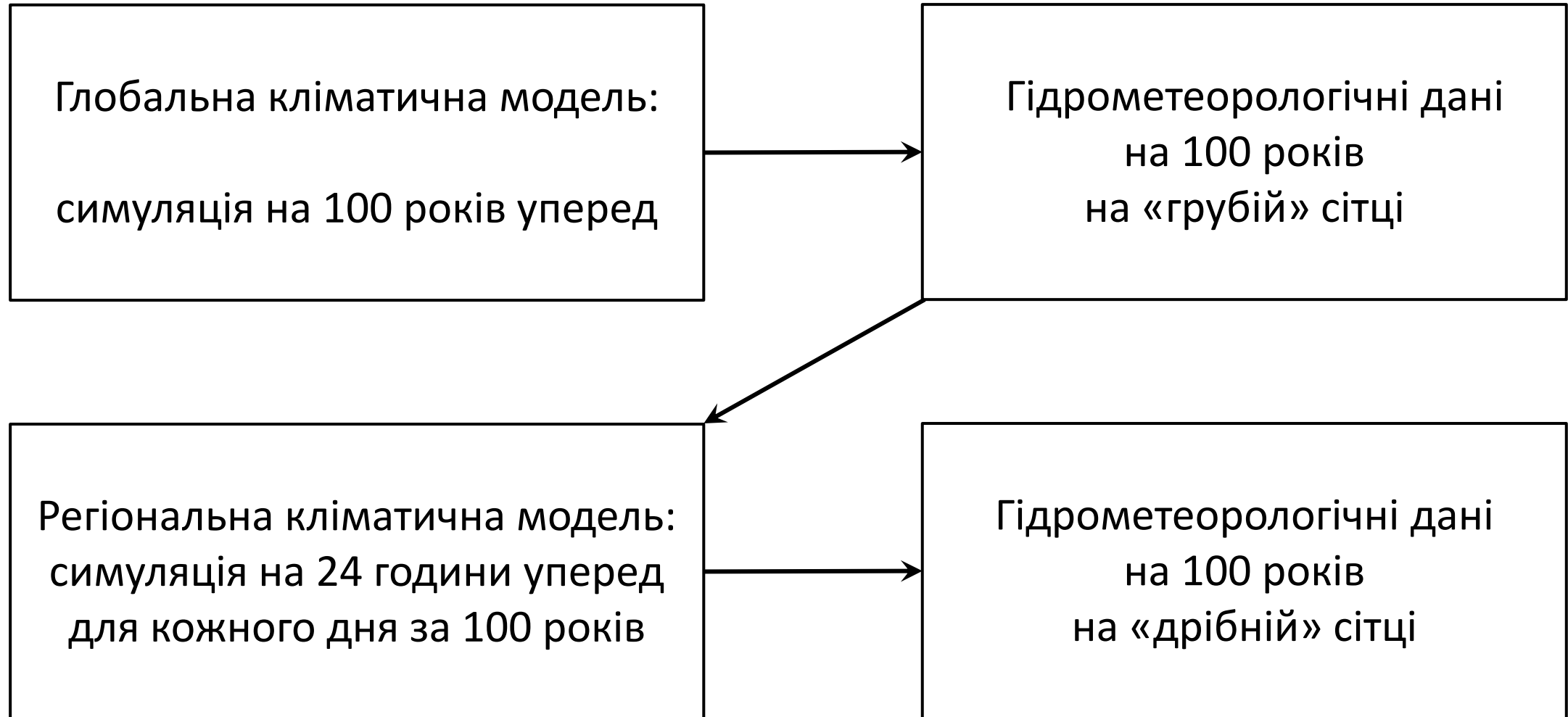
Глобальні і регіональні кліматичні моделі

	HadCM3B (Valdes et al., 2017)	COSMO-CLM (Sørland et al., 2021)
Горизонтальне розділення	2.5x3.75 град.	0.11x0.11 град.
Вертикальне розділення	19 рівнів	40 рівнів
Крок у часі	30 хв.	100 сек.

Точок сітки за X	x 98	x 3270
Точок сітки за Y	x 73	x 1636
Вертикальних рівнів	x 19	x 40
Кроків за добу	x 48	x 864
Кроків за рік	x 365	x 365
Кількість років	x 100	x 100
	≈2,3e11	≈6,7e15

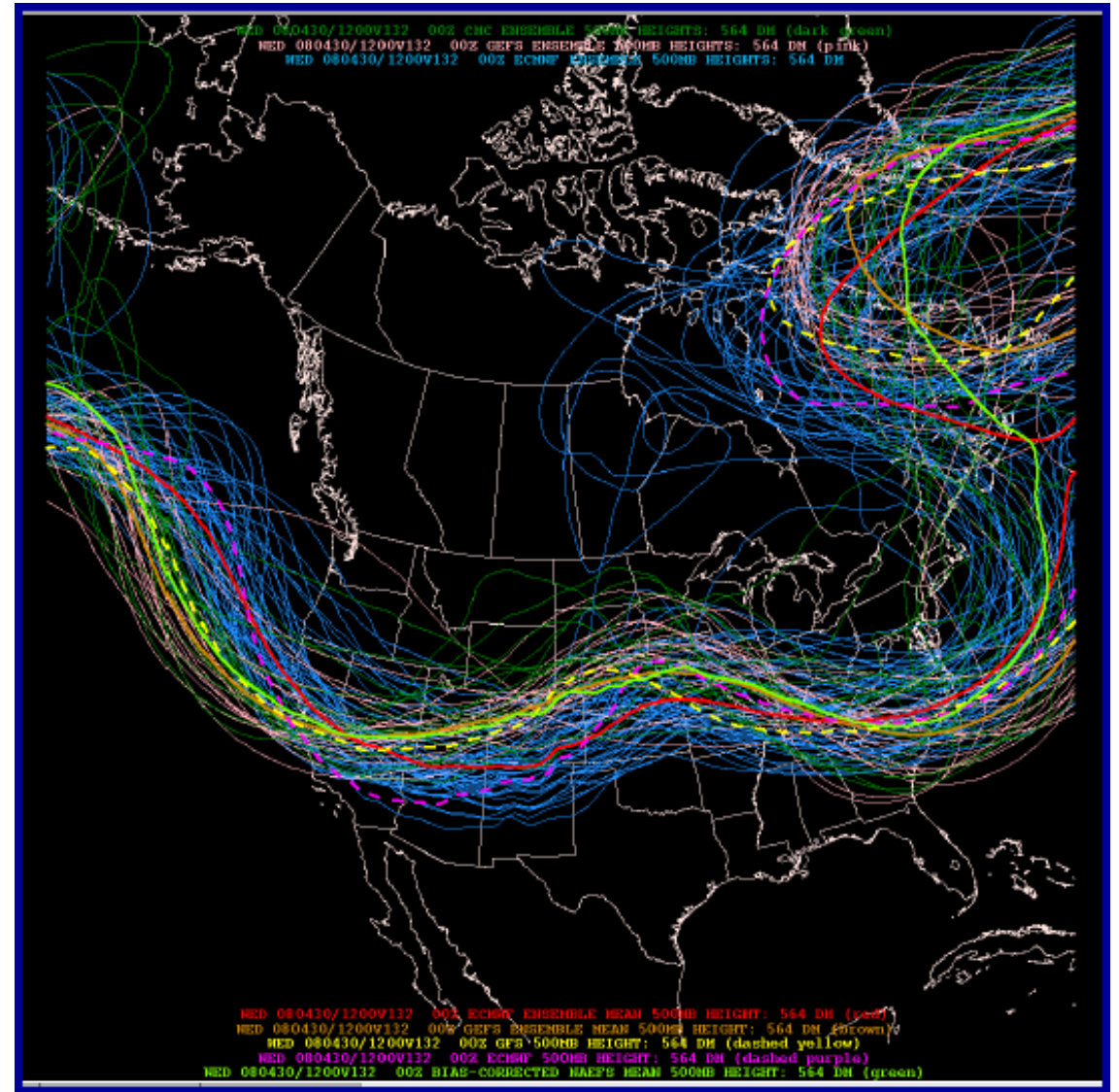
Абстрактний час CPU	1 година	3 роки і 4 місяці
---------------------	----------	-------------------

Глобальні і регіональні кліматичні моделі

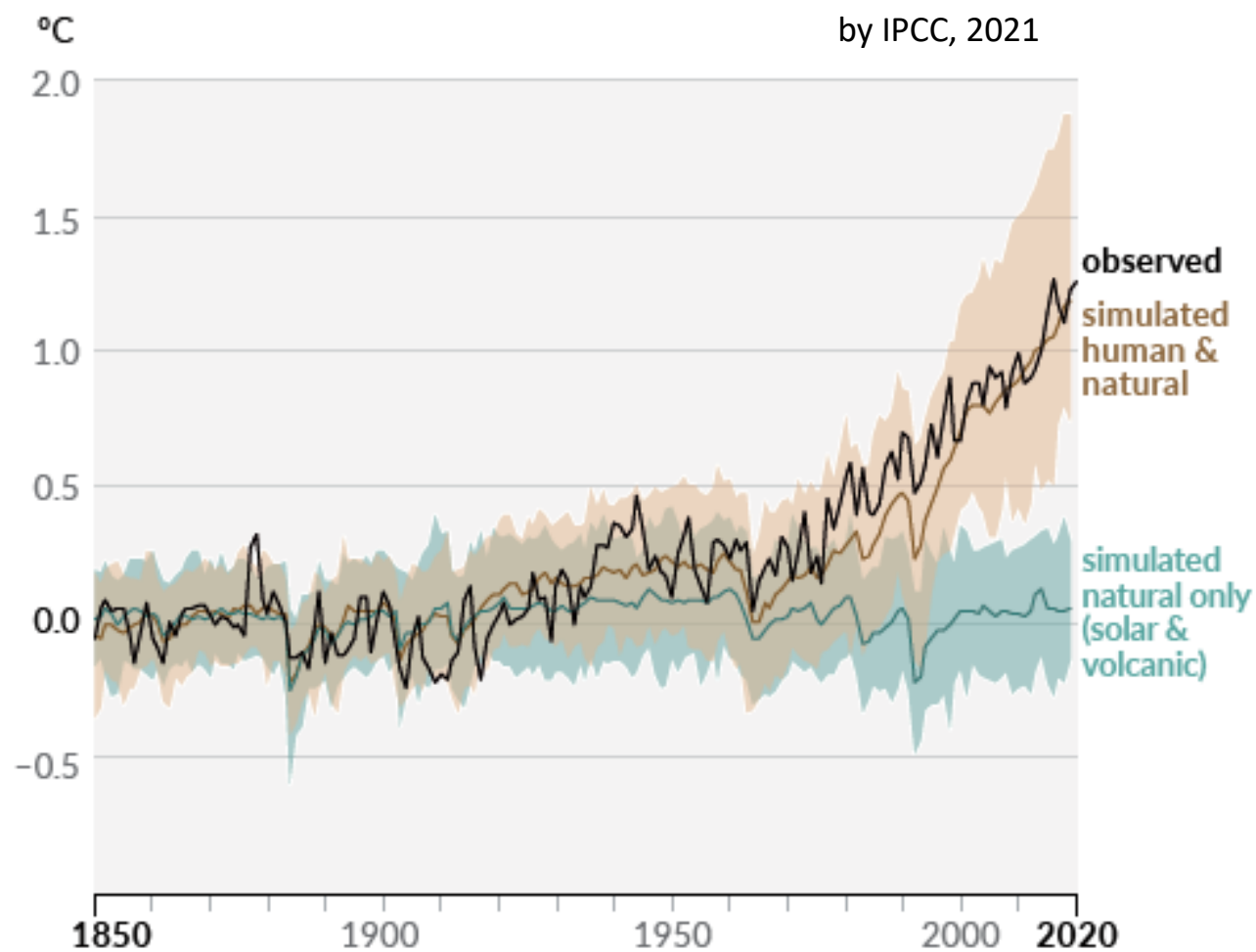


Ансамбль моделей за:

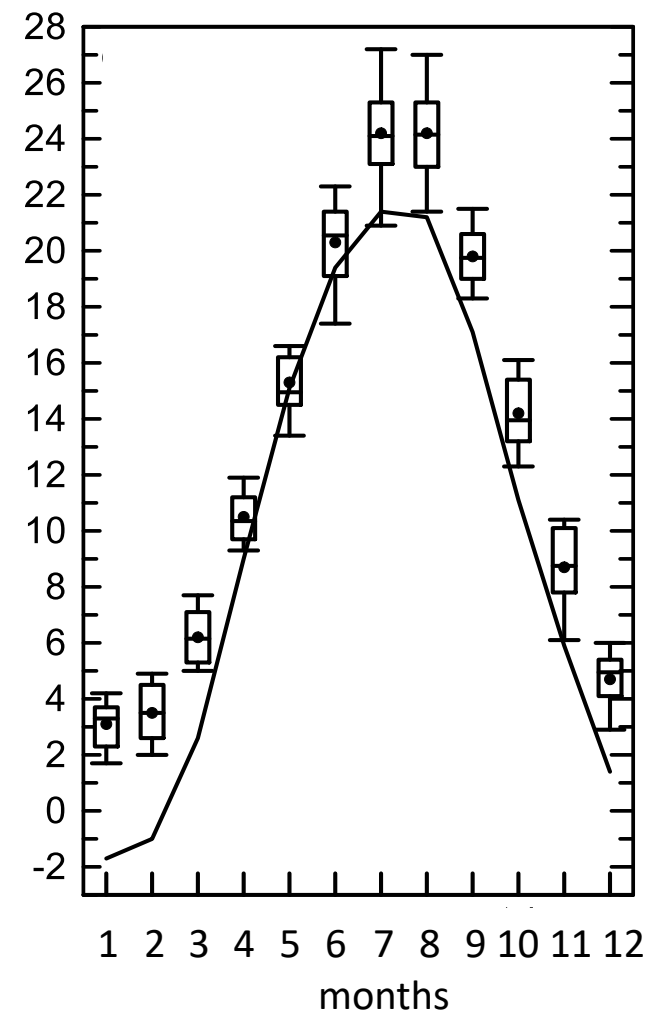
- Різними початковими умовами
- Різними параметризаціями
- Різними моделями
- Різними сценаріями



Моделювання ансамблем



Глобальна приземна температура

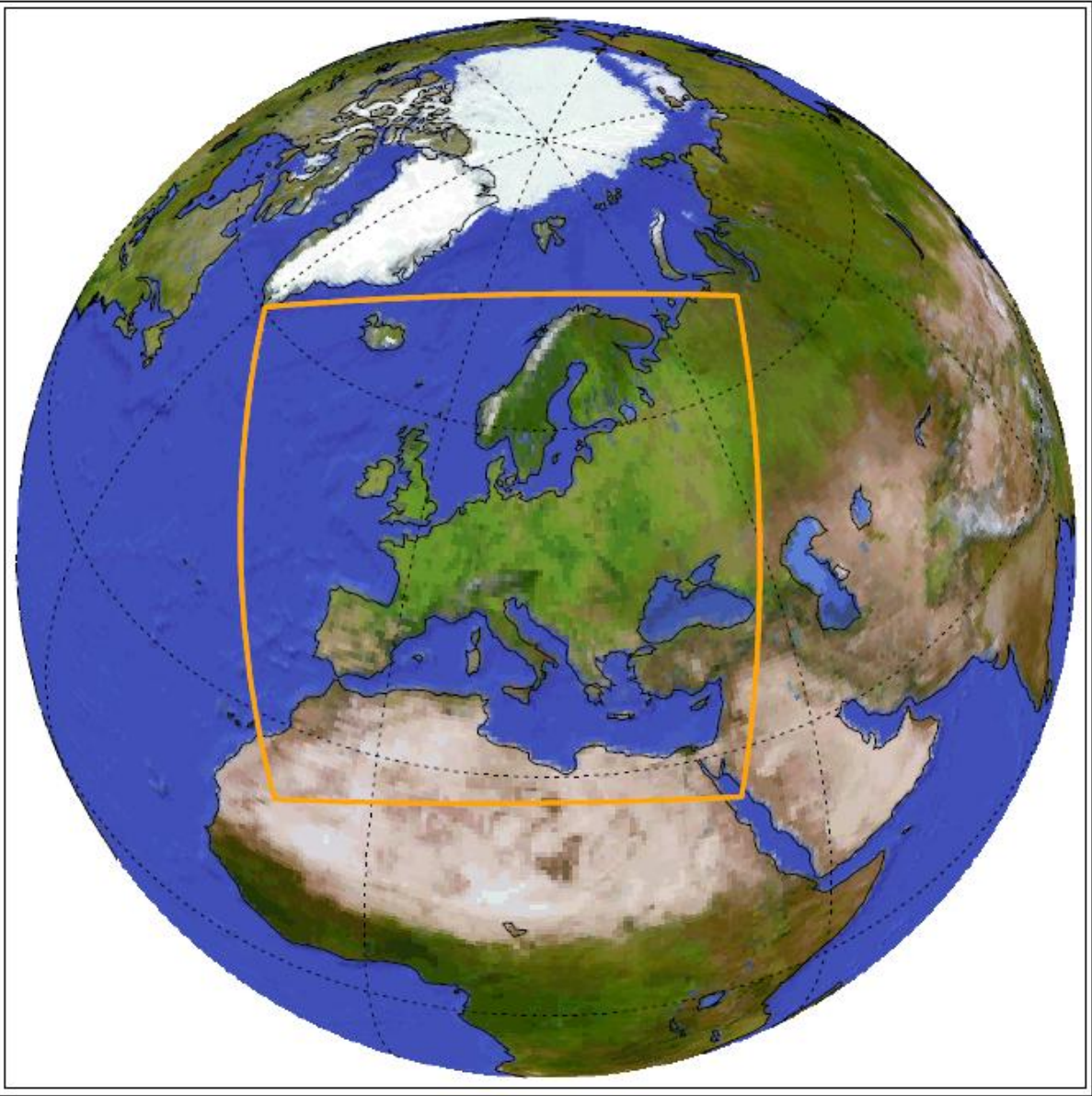


Середньомісячна температура в
Одесі за 30 років

Моделювання ансамблем

Модельні симул

Model run	
CLMcom1	Climate
CLMcom2	
CLMcom3	
CLMcom4	
DMI1	Danish M
DMI2	
KNMI1	Royal Ne
KNMI2	
MPI	Max Plai
SMHI1	Swedish
SMHI2	Hydrolog
SMHI3	
SMHI4	
SMHI5	
CNRM	National
IPSL	Institute



GCM
1-CM5
-EC-EARTH
C-HadGEM2-ES
SM-LR
-EC-EARTH
NorESM1-M
-EC-EARTH
C-HadGEM2-ES
SM-LR
1-CM5
-EC-EARTH
CM5A-MR
C-HadGEM2-ES
SM-LR
1-CM5
CM5A-MR

Моделювання впливу змін клімату

Результати моделювання ансамблем РКМ:

1. Опади
2. Випаровування
3. Температура повітря

Просторове розділення:

0,11 градусів

Просторове охоплення:

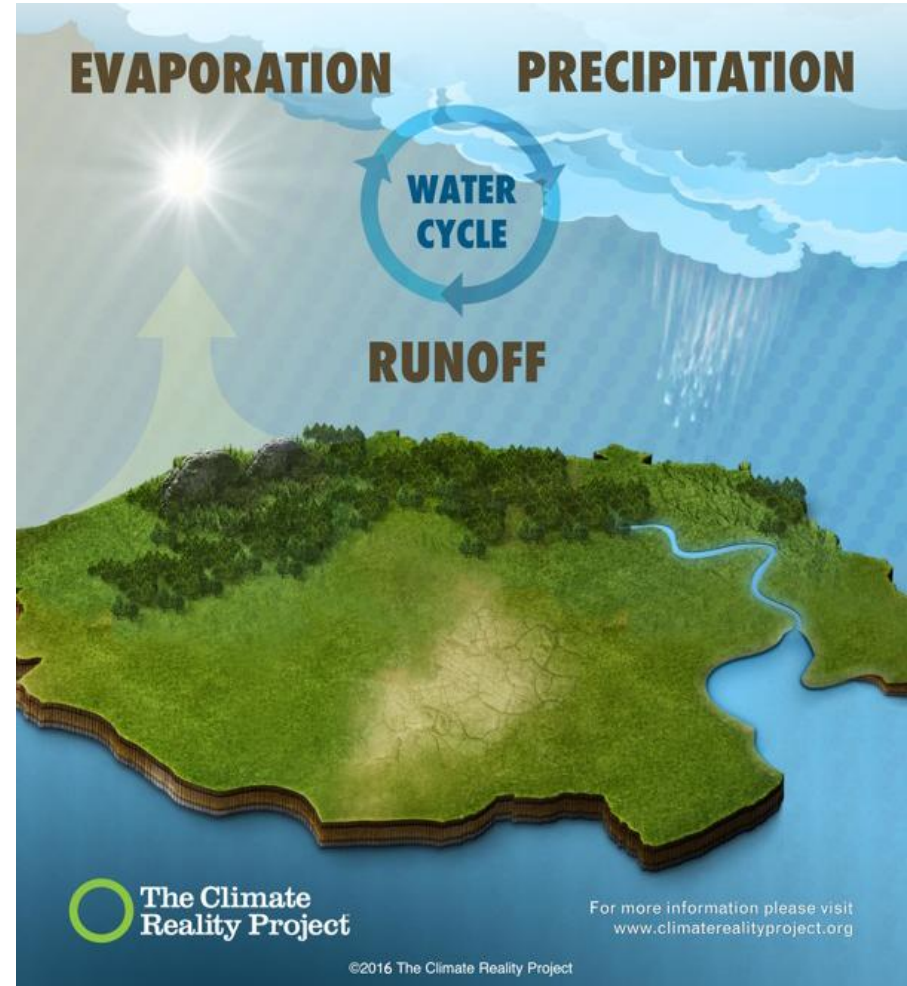
усі вузли сітки усередині водозбору річки

Часовий розподіл:

1 доба або менше

Період у часі:

01/01/2021 – 31/12/2100



Моделювання впливу змін клімату

1) Процедура корекції систематичної похибки (bias)

2) Сценарії SSP2

3) Сценарій SSP1-2.6 (RCP2.6) є так званим «піковим» сценарієм – рівень радіаційного впливу досягає $3,1 \text{ Вт/м}^2$ до 2050 року, але повертається до $2,6 \text{ Вт/м}^2$ до 2100 року.

4) Однієї з величин вже досягнуто до 2021 року.

5) Запуск гідроло



- найкращий

Систематична похибка – Одеса, 1970-2005, 76 членів ансамбля

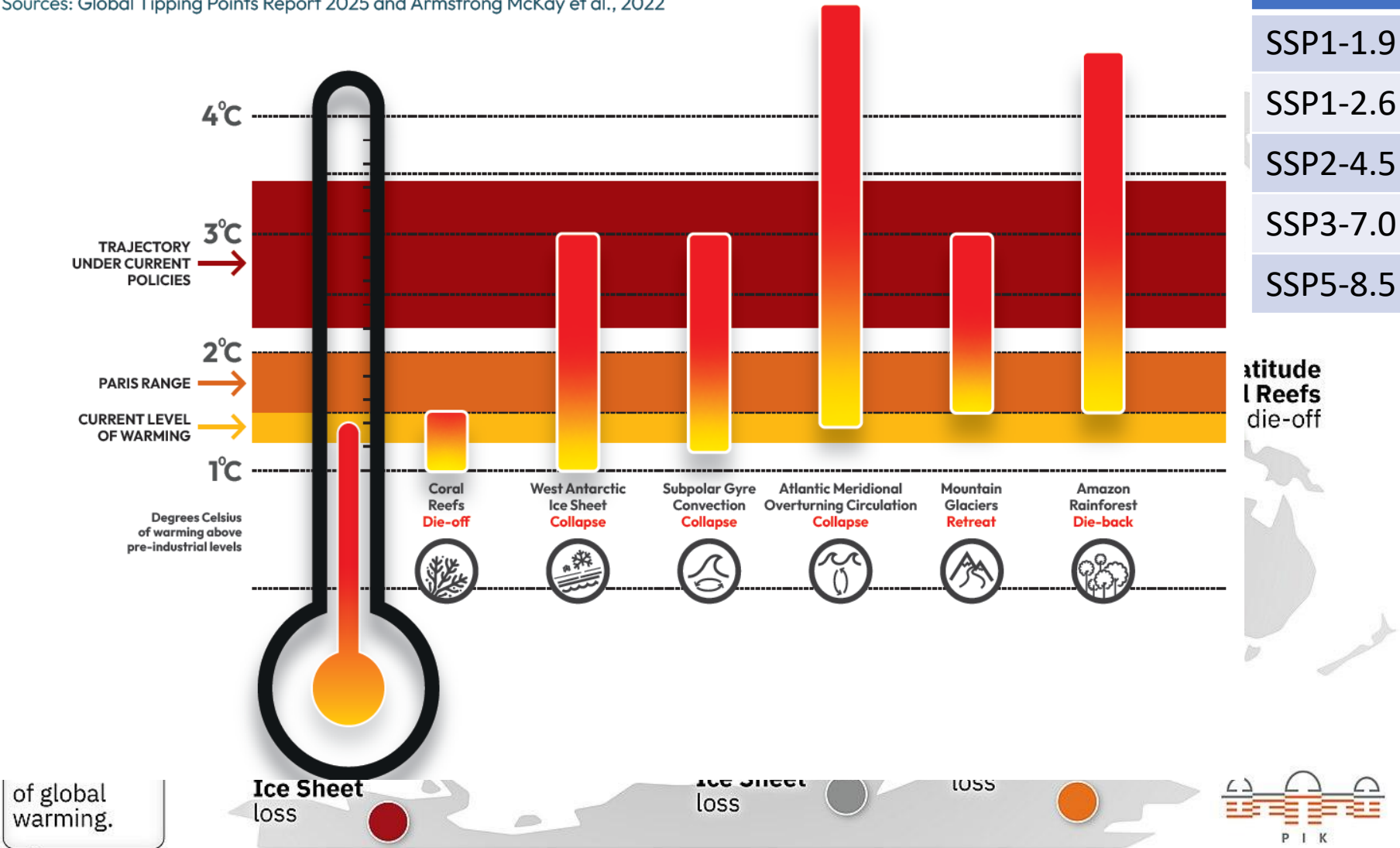
- непоганий підхід (окремі симуляції)

- поганий підхід (середні за ансамблем величини)

Критичні чинники змін клімату

Risks of Earth system tipping points increase with global warming

Sources: Global Tipping Points Report 2025 and Armstrong McKay et al., 2022



Велике дякую за вашу увагу!

Запитання?