Фізика клімату

Юрій Скоренький,
кафедра фізики ТНТУ

Клімат — багаторічний режим погоди.

Основні особливості клімату обумовлюють атмосферний тиск, швидкість і напрямок вітру, температура і вологість повітря, хмарність і атмосферні опади, тривалість сонячної радіації

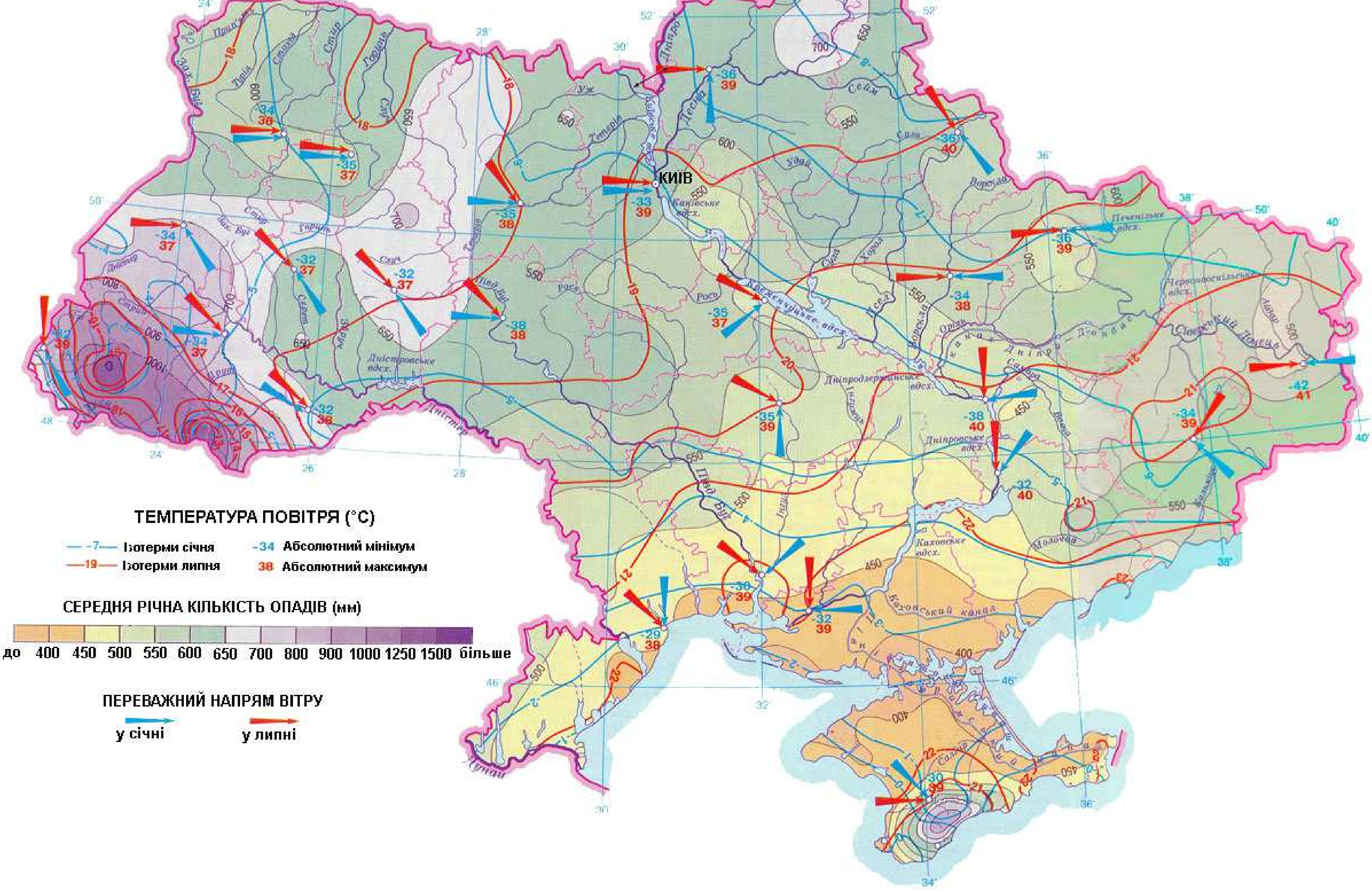
Погода — стан нижнього шару атмосфери

Метеорологія та кліматологія – комплексна наука про Землю, що фізико-математичними методами вивчає:

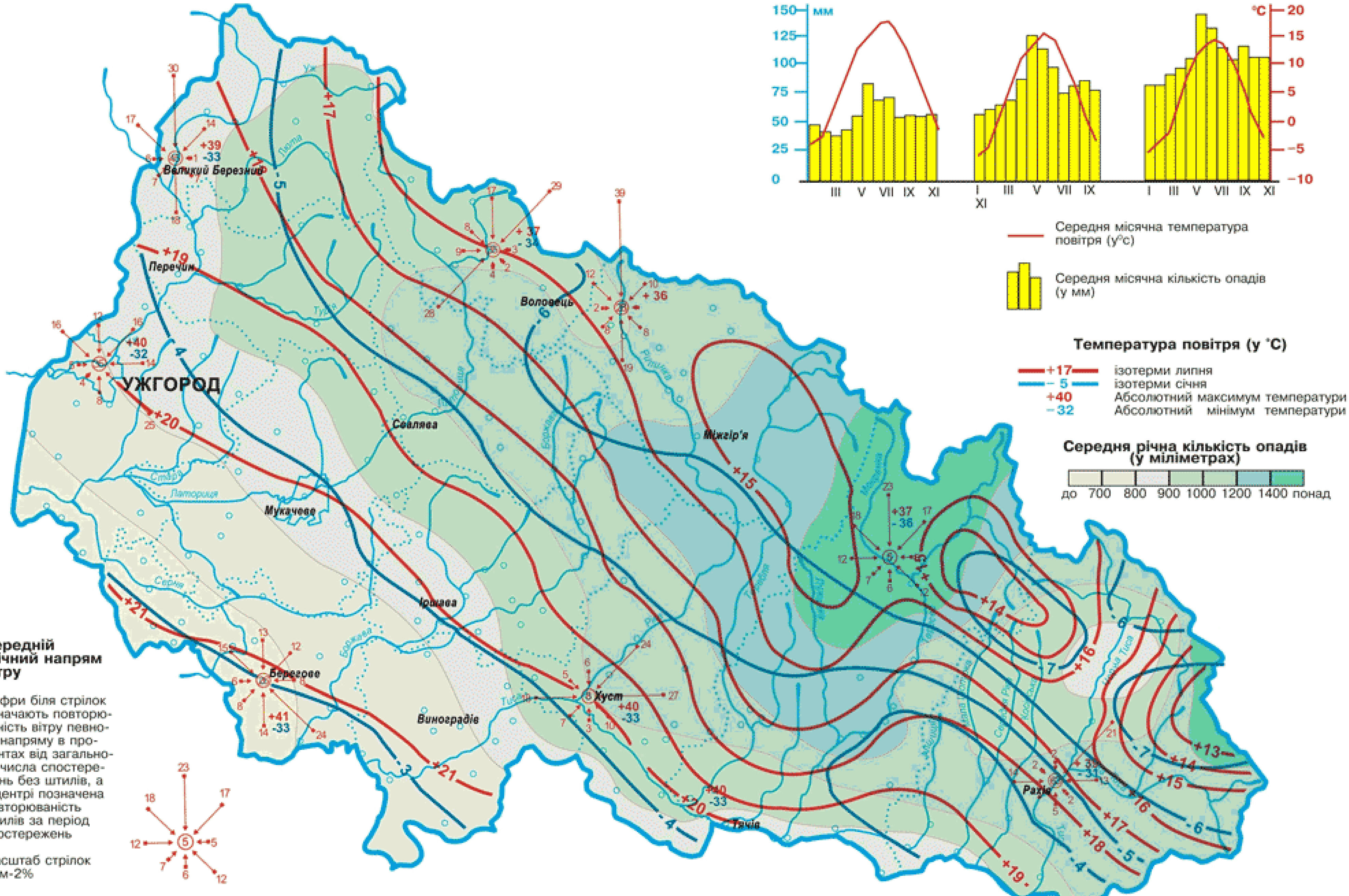
- атмосферні явища та процеси в нижній атмосфері (**метеорологія**);
- фізичні процеси, що відбуваються в атмосфері Землі;
- фізико-математичне моделювання атмосферних процесів;
- зв’язки між характером атмосферних явищ і процесів, що відбуваються на поверхні Землі;
- умови формування при цьому погоди і клімату Землі (**кліматологія**).

КЛІМАТ

Масштаб 1:5 000 000



http://forum.vinograd.info/showthread.php?t=4620&page=2



1. КЛІМАТИЧНА КАРТА

Global Warming I: The Science and Modeling of Climate Change

The University of Chicago

www.coursera.org/learn/global-warming

MITOPENCOURSEWARE
MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY

Subscribe to the OCW Newsletter

Find Courses | About | Give Now | Featured Sites | Search

Home » Courses » Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences » Climate Physics and Chemistry

Climate Physics and Chemistry

COURSE HOME

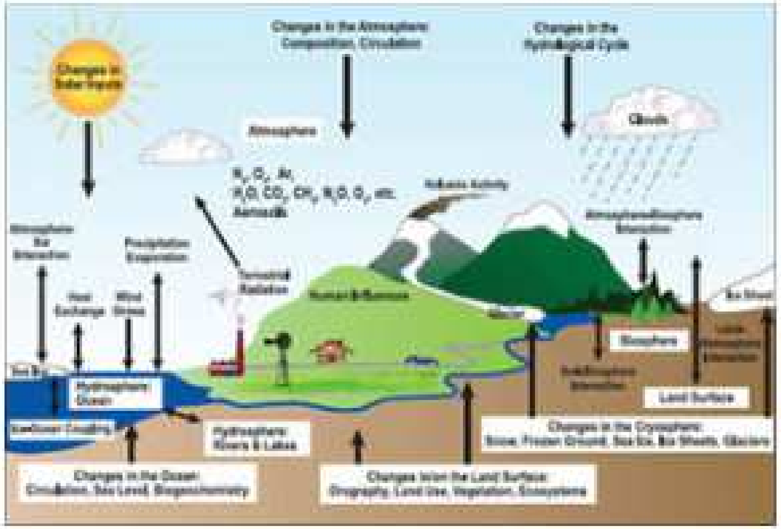
SYLLABUS

READINGS

LECTURE NOTES

ASSIGNMENTS

PROJECTS



Schematic view of the components of the climate system, their processes and interactions. (Image courtesy of IPCC.)

Instructor(s)
Prof. Carl Wunsch
Prof. Edward Boyle
Prof. Kerry Emanuel

MIT Course Number
12.842 / 12.301

As Taught In
Fall 2008

Level
Undergraduate / Graduate

CITE THIS COURSE

Атмосфера визначає клімат таким чином:

- Забезпечує обмін енергію через випромінювання та поглинання електромагнітних хвиль
- Переносить тепло конвекційними потоками
- Впливає на океанські течії

Хімічний склад атмосфери

Gas Name	Chemical Formula	Percent Volume
Nitrogen	N_2	78.08%
Oxygen	O_2	20.95%
*Water	H_2O	0 to 4%
Argon	Ar	0.93%
*Carbon Dioxide	CO_2	0.0360%
Neon	Ne	0.0018%
Helium	He	0.0005%
*Methane	CH_4	0.00017%
Hydrogen	H_2	0.00005%
*Nitrous Oxide	N_2O	0.00003%
*Ozone	O_3	0.000004%

* variable gases

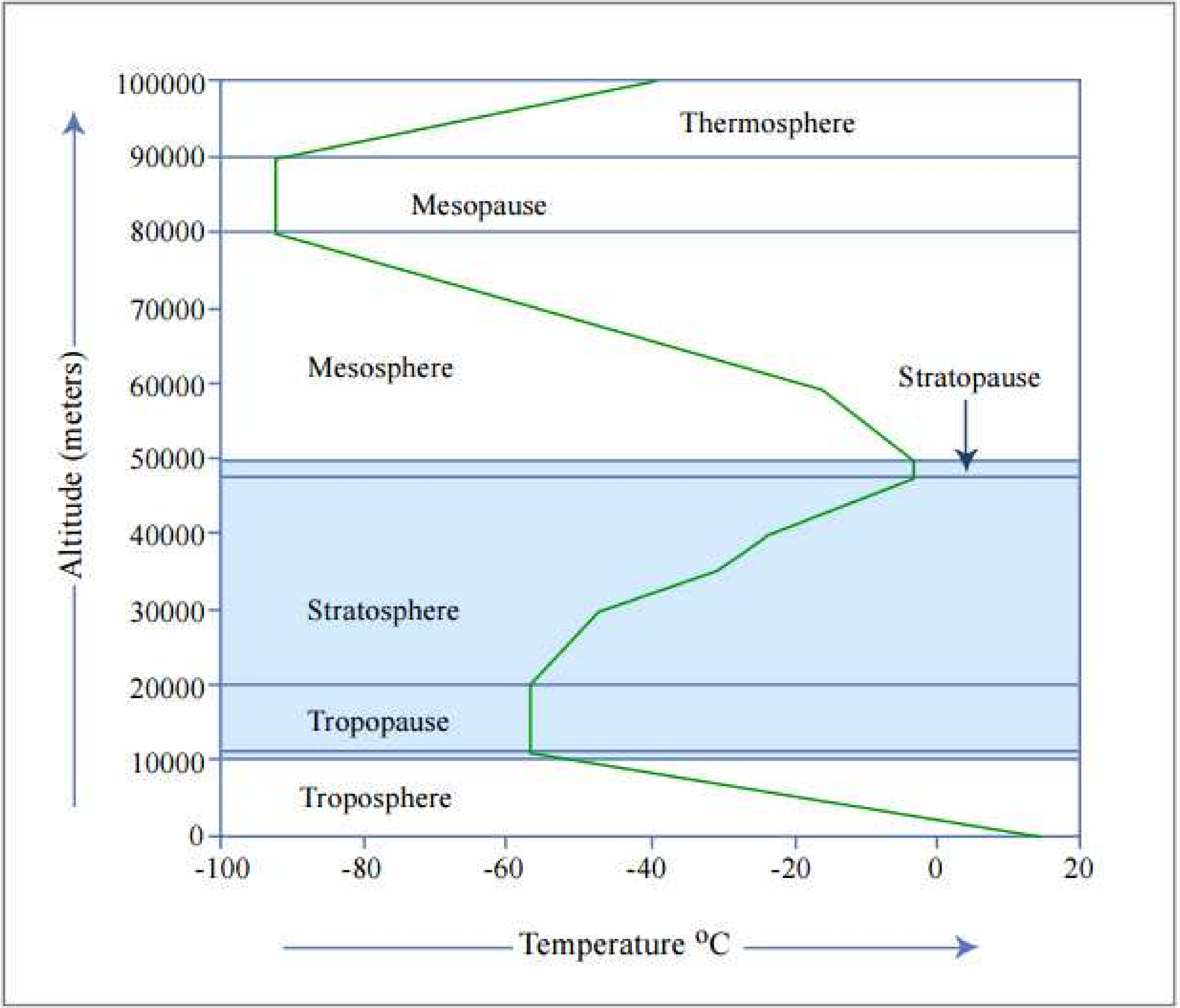
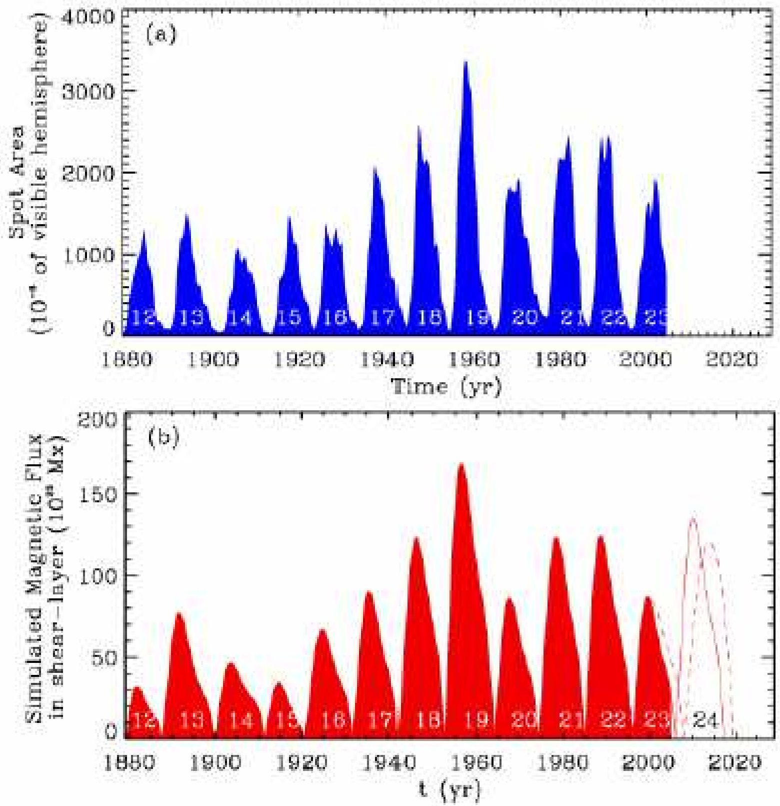


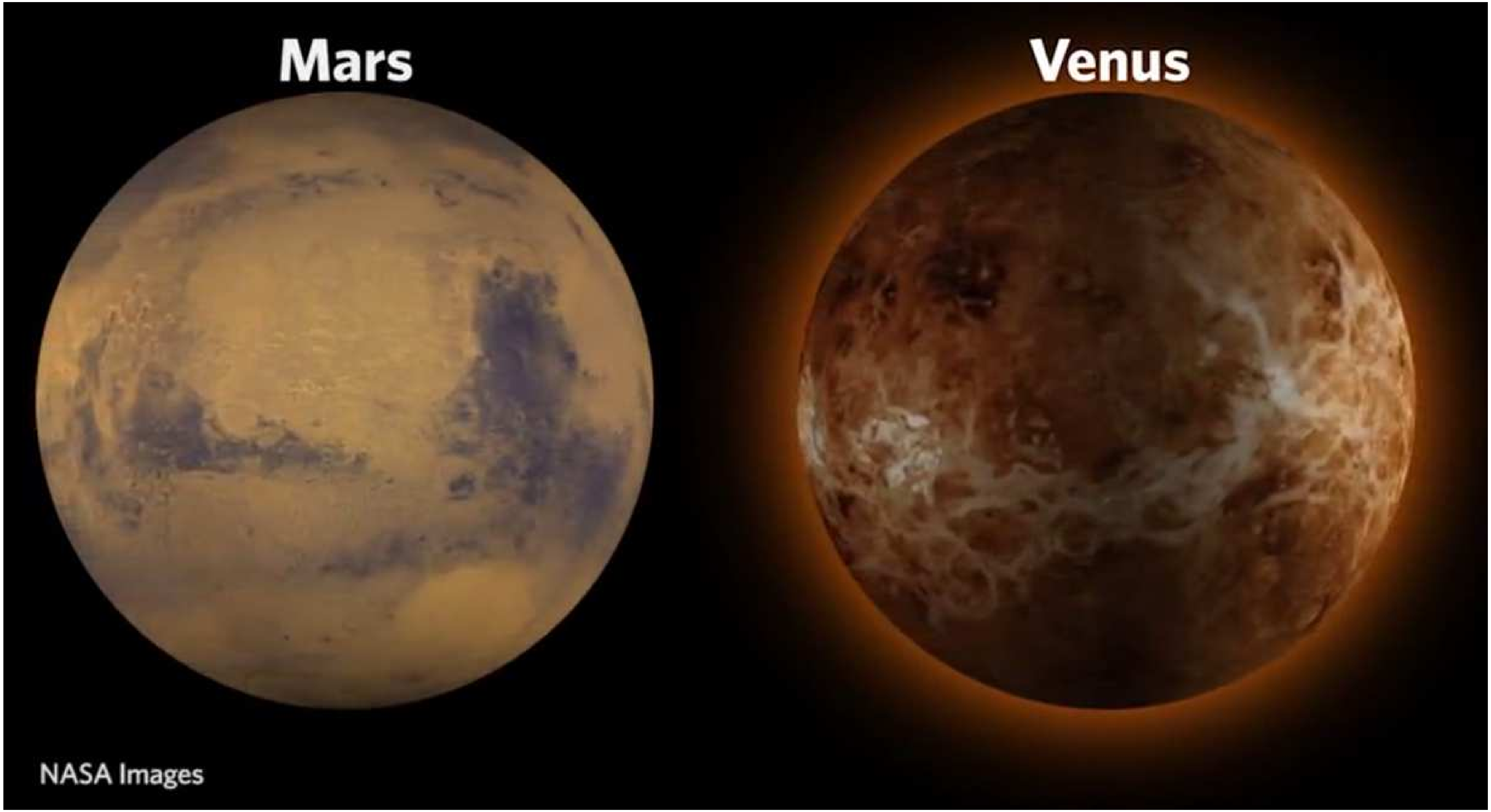
Figure by MIT OpenCourseWare.

Надходження енергії від сонця

Потік енергії 1370 Вт/ кв.м. на середній відстані від Сонця до Землі 150 млн км

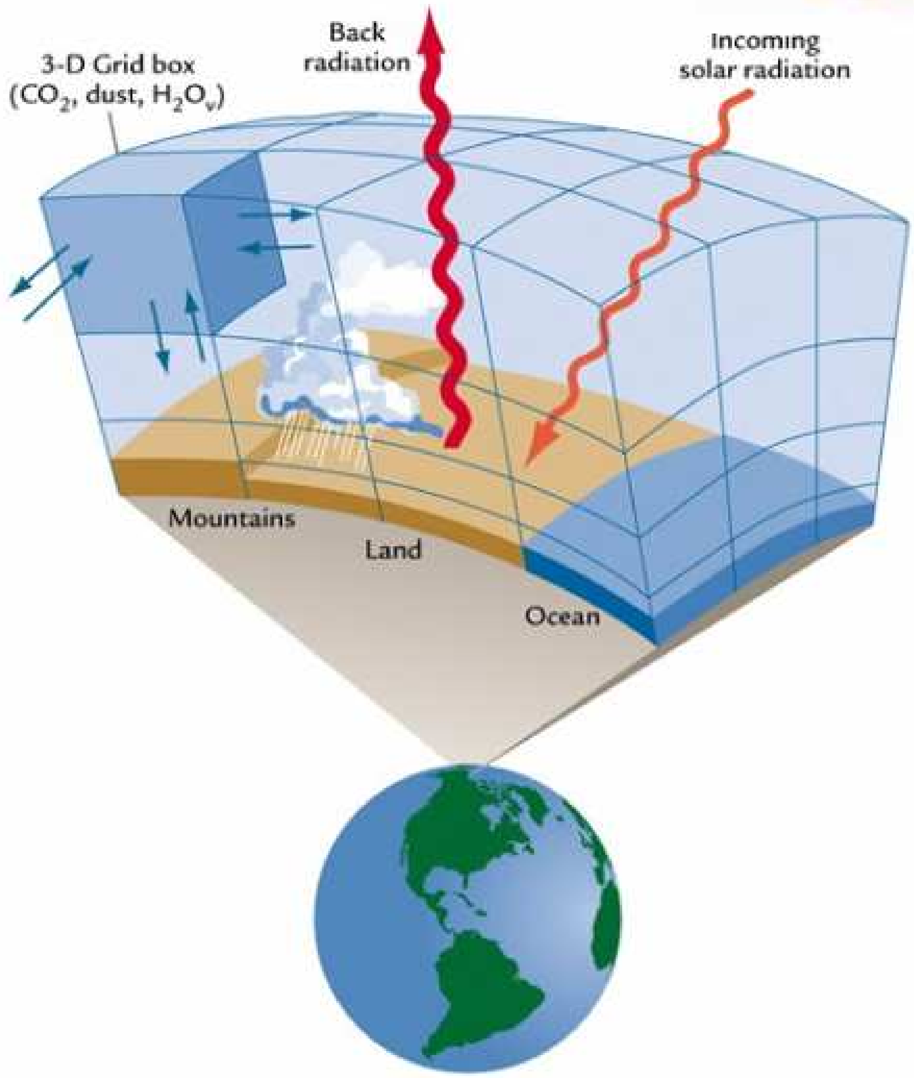


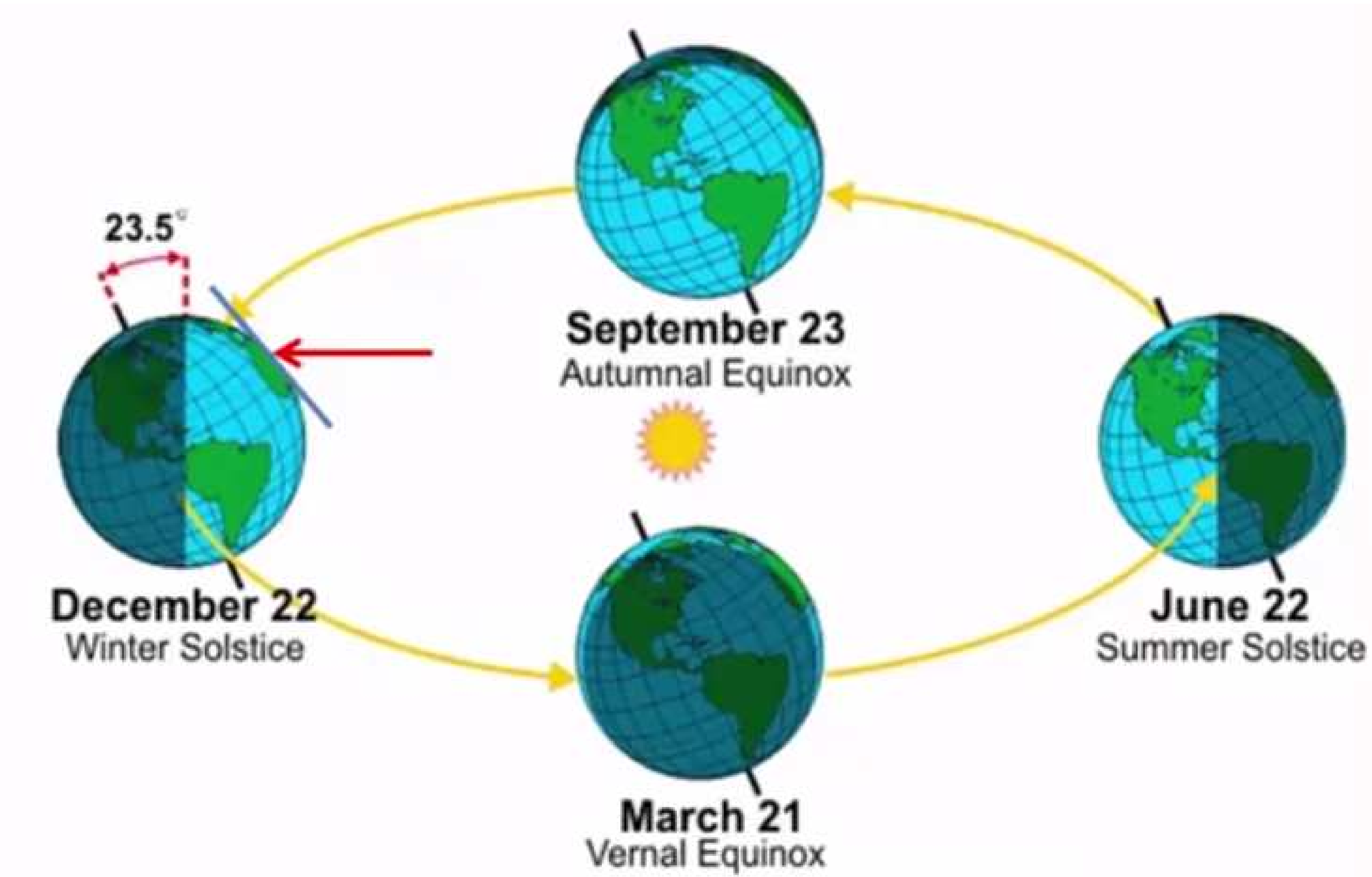
Середня спостережувана температура поверхні Землі =288*K* = 15°*C*

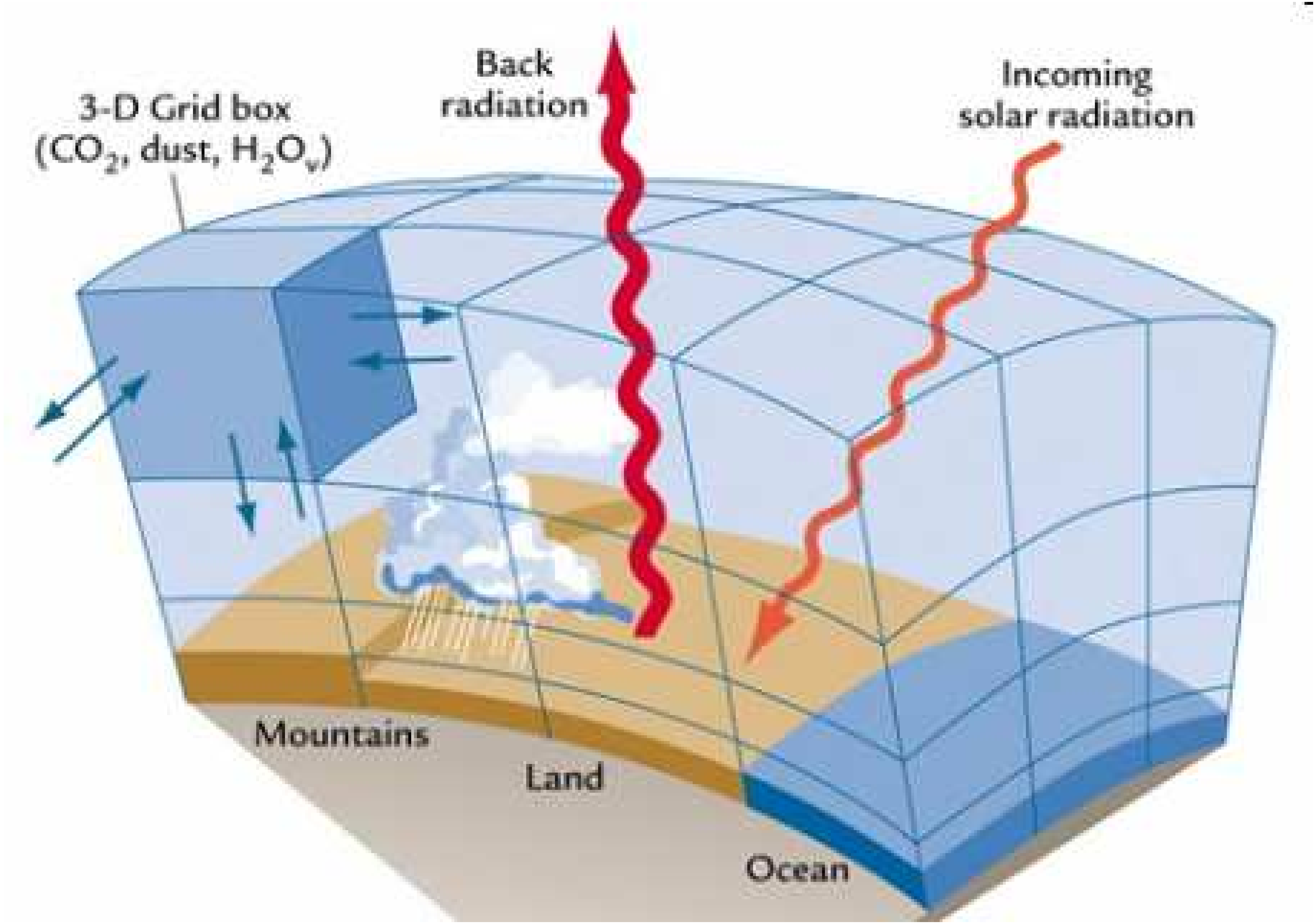

Mars
Venus
NASA Images

Моделі клімату повинні включати:

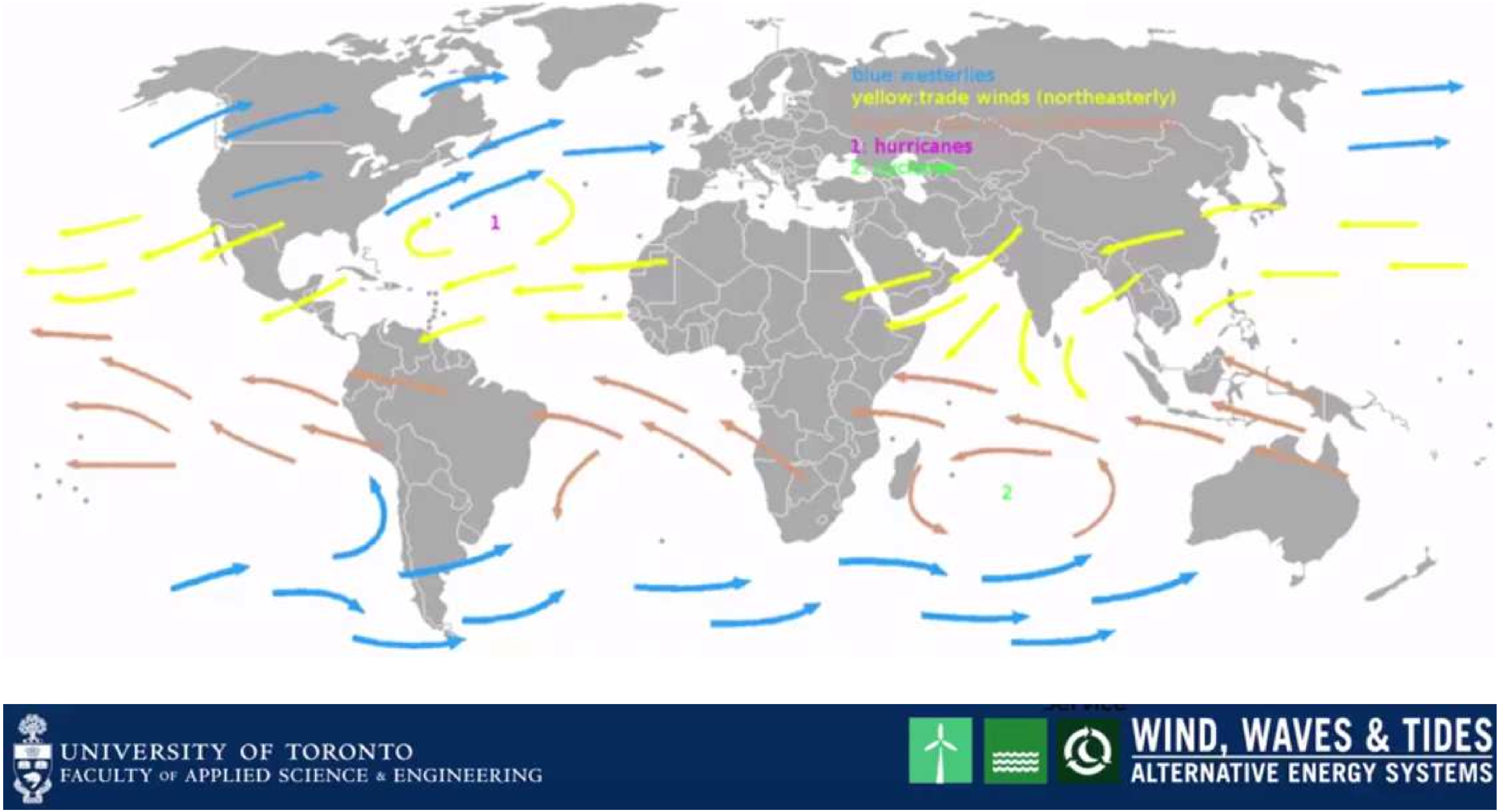
- Атмосферу
- Океан
- поверхню Землі (в т.ч. рельєф)
- льодовий покрив

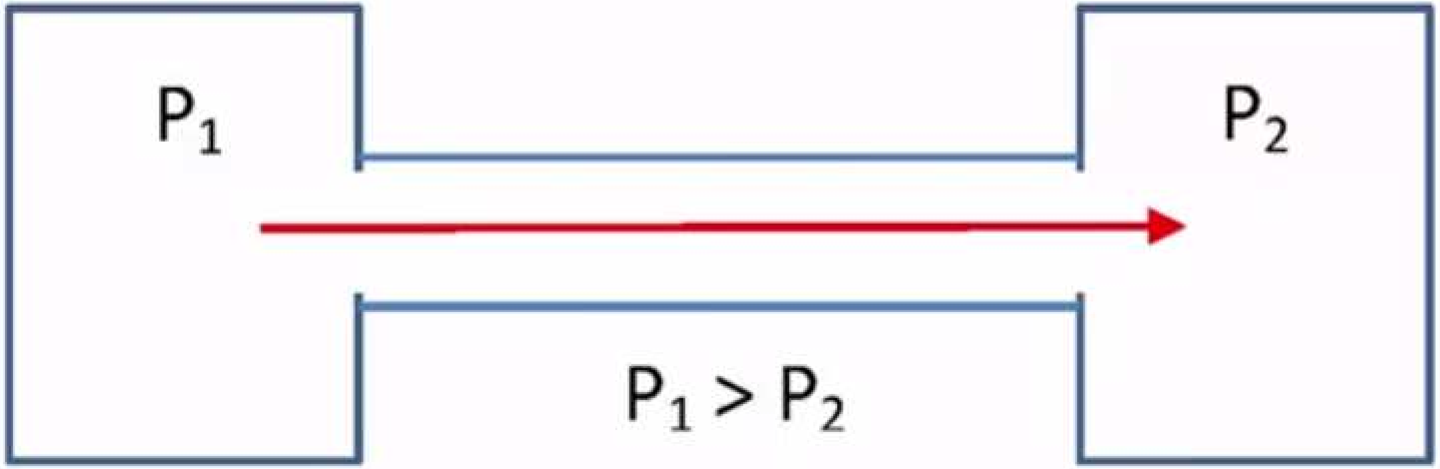



23.5°
September 23
Autumnal Equinox
December 22
Winter Solstice
June 22
Summer Solstice
March 21
Vernal Equinox


Back
radiation
Incoming
solar radiation
3-D Grid box
(CO_2, dust, H_2O_v)
Mountains
Land
Ocean

Циркуляція атмосферного повітря





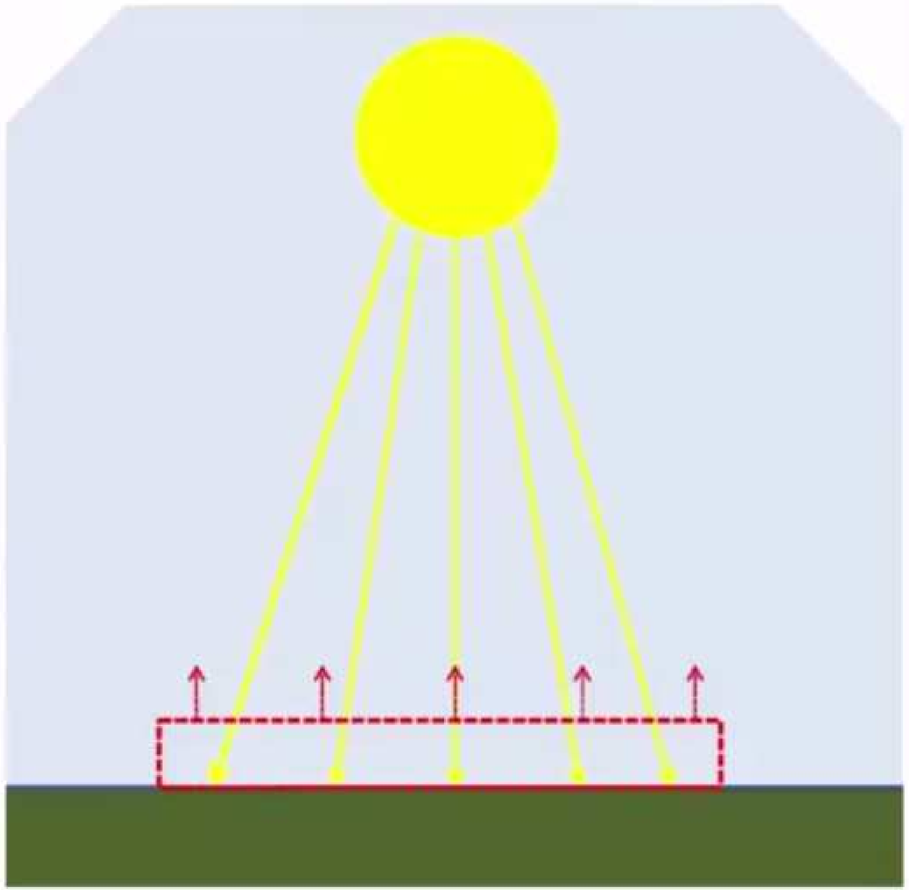
Sun heats the surface

Surface heats adjacent air

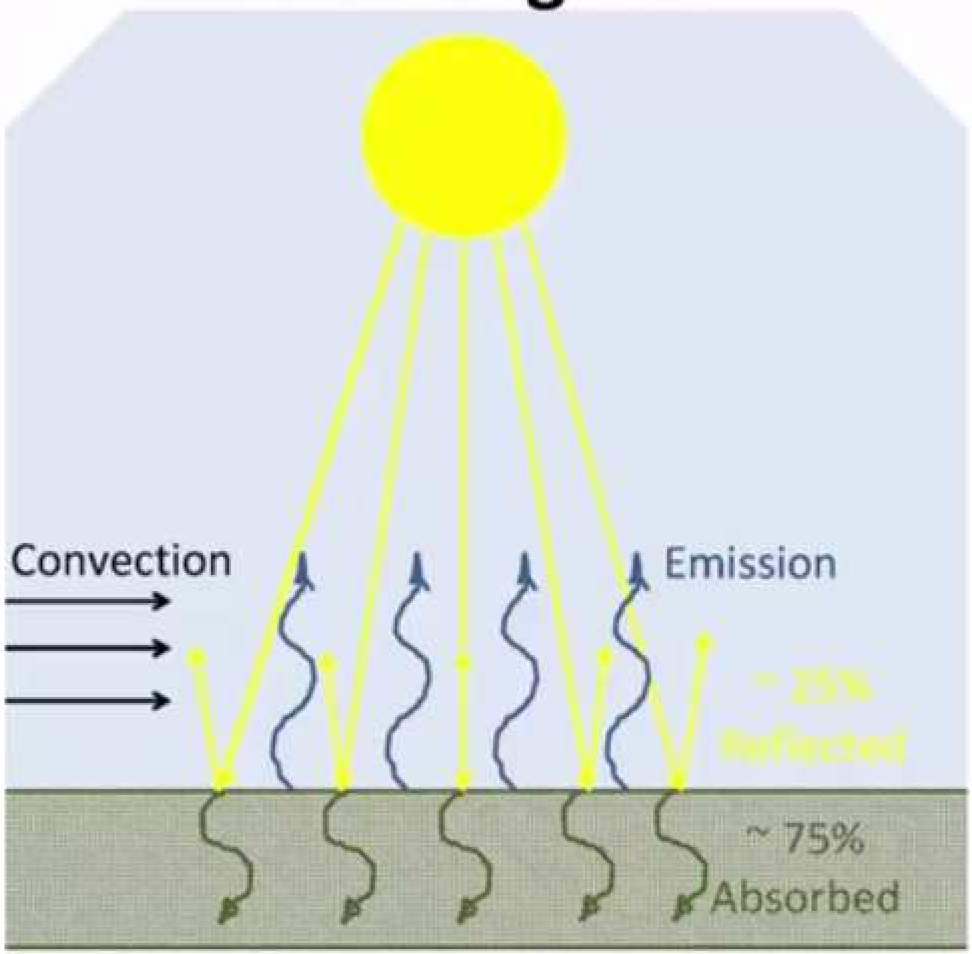
Density $\rho \sim {}^{1}/_{T}$

As air density decreases, it rises

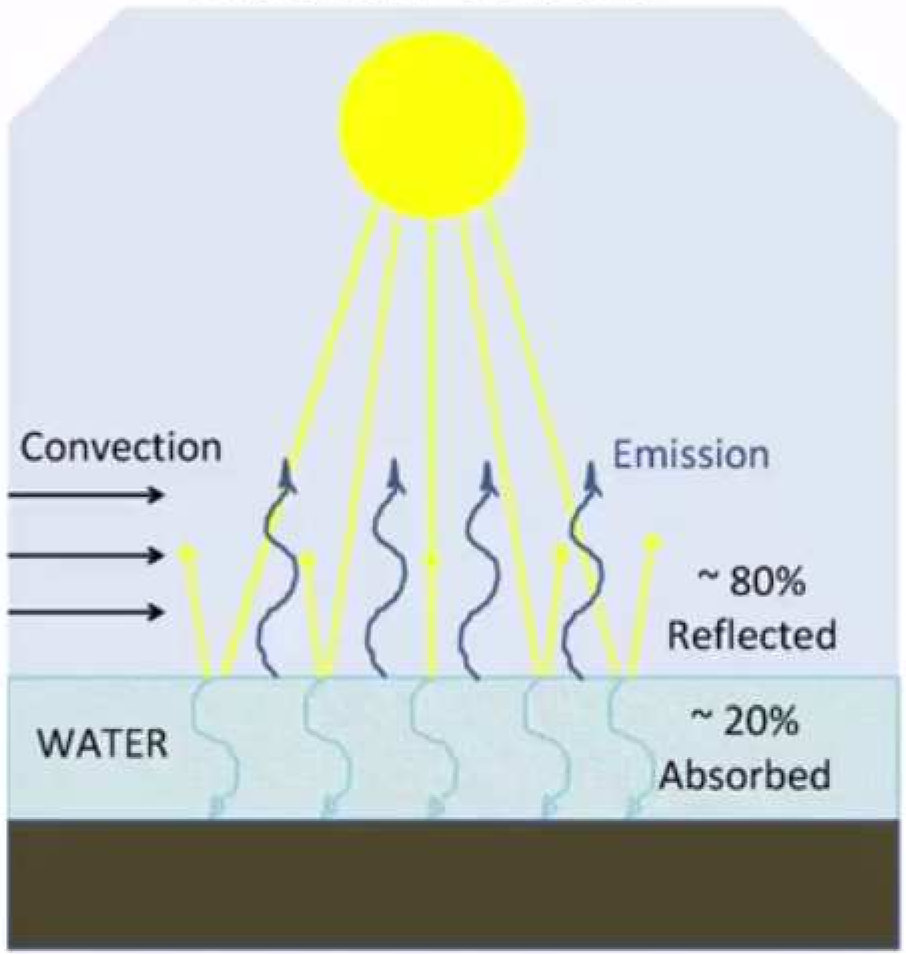
Air heating also reduces the local pressure

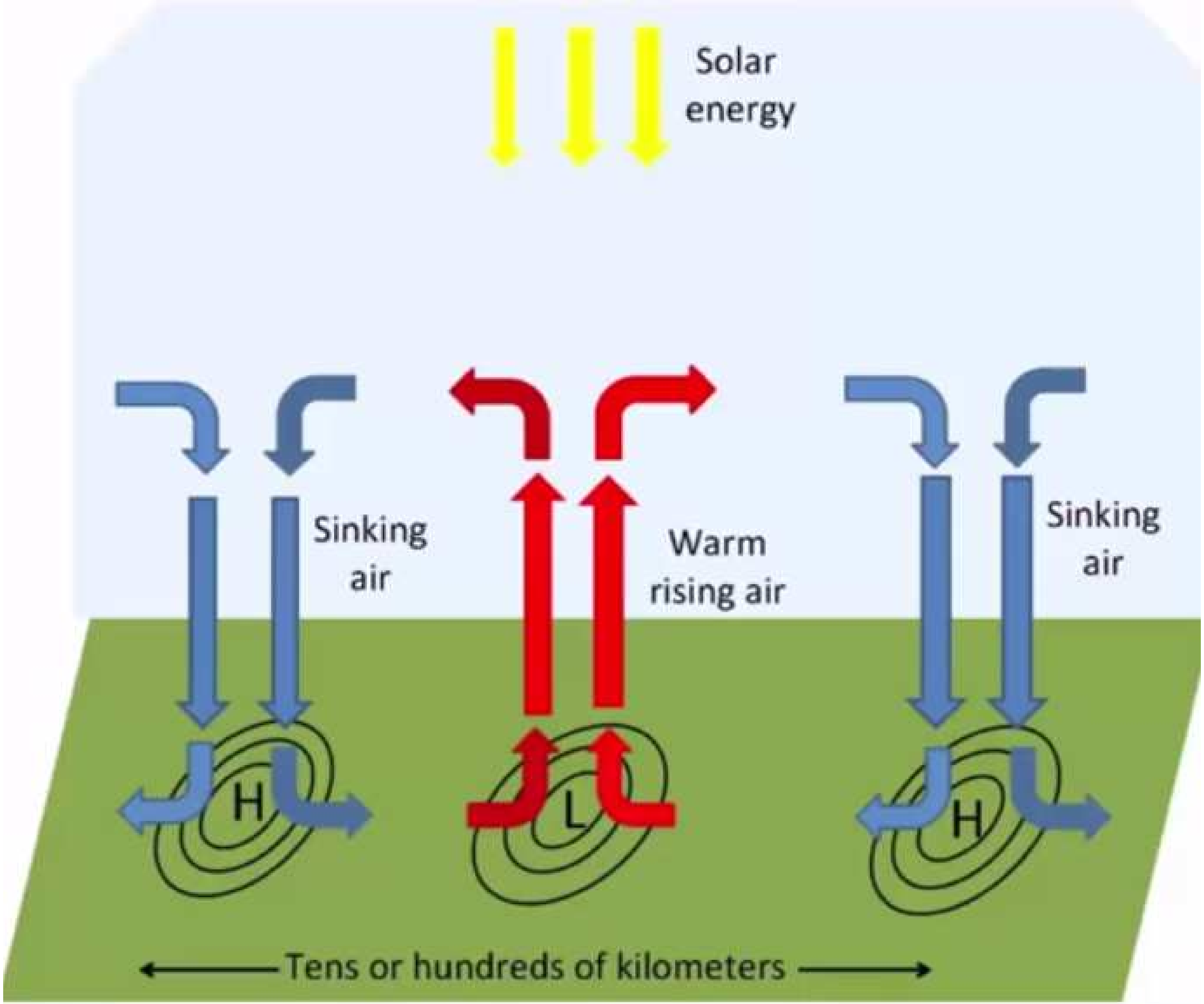


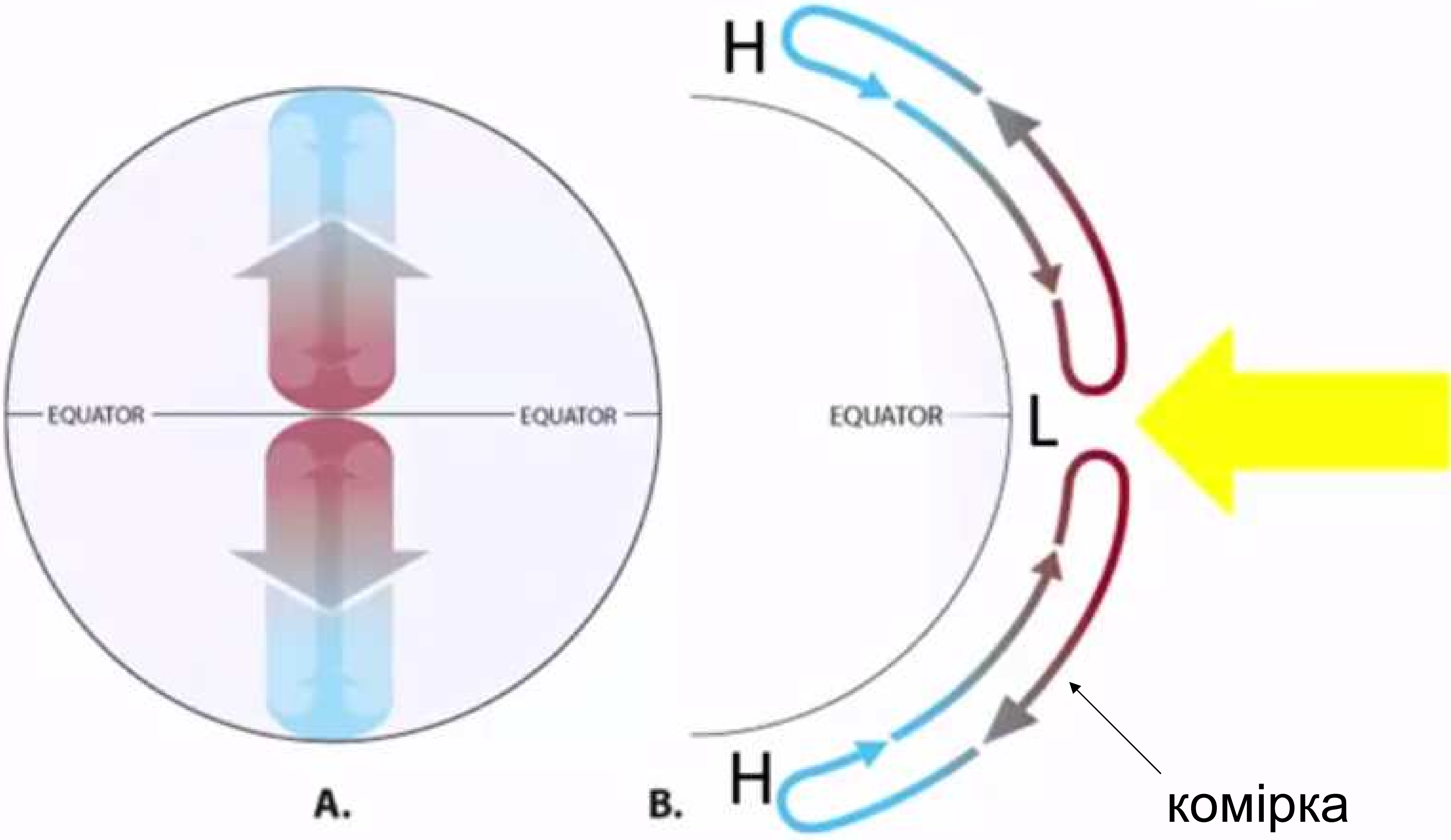
Sun on grass



Sun on water

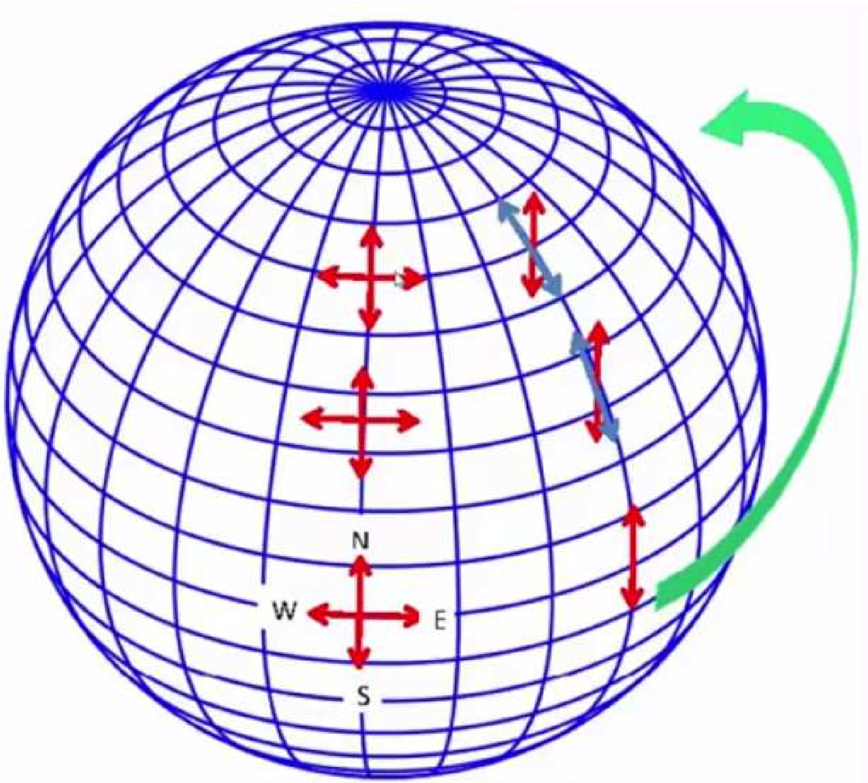


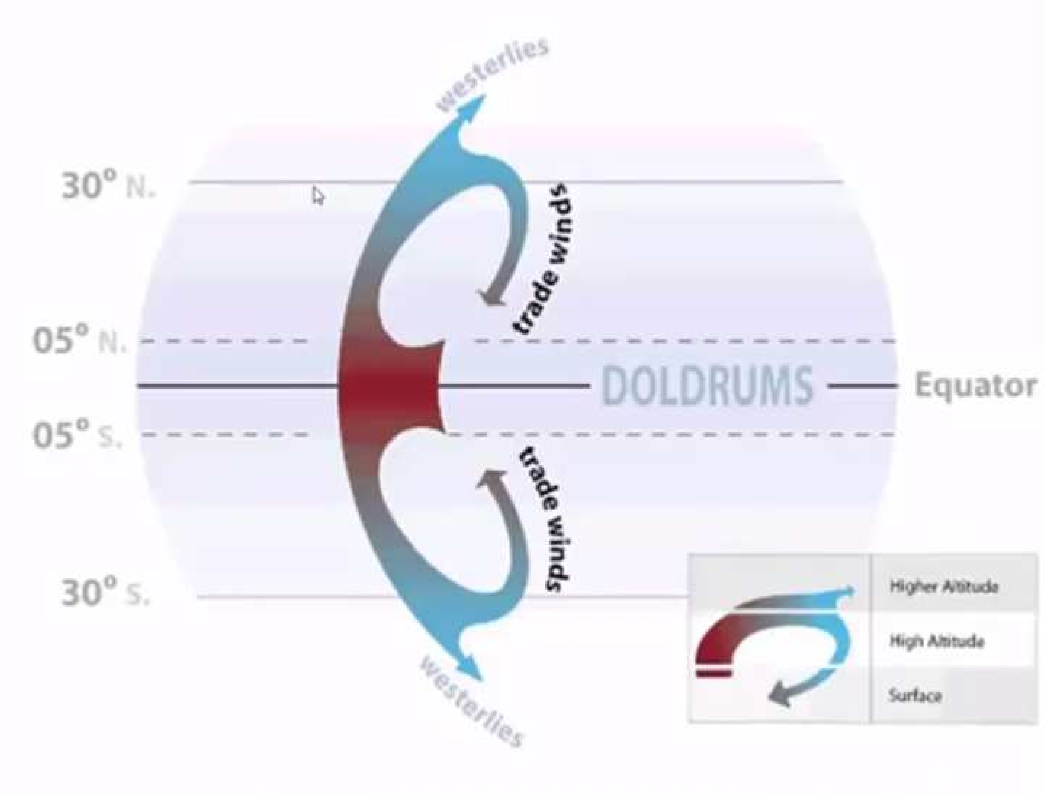

Solar energy
Sinking air
Warm rising air
Sinking air
H
L
H
Tens or hundreds of kilometers



High & low pressure by NOAA Ocean Service Education

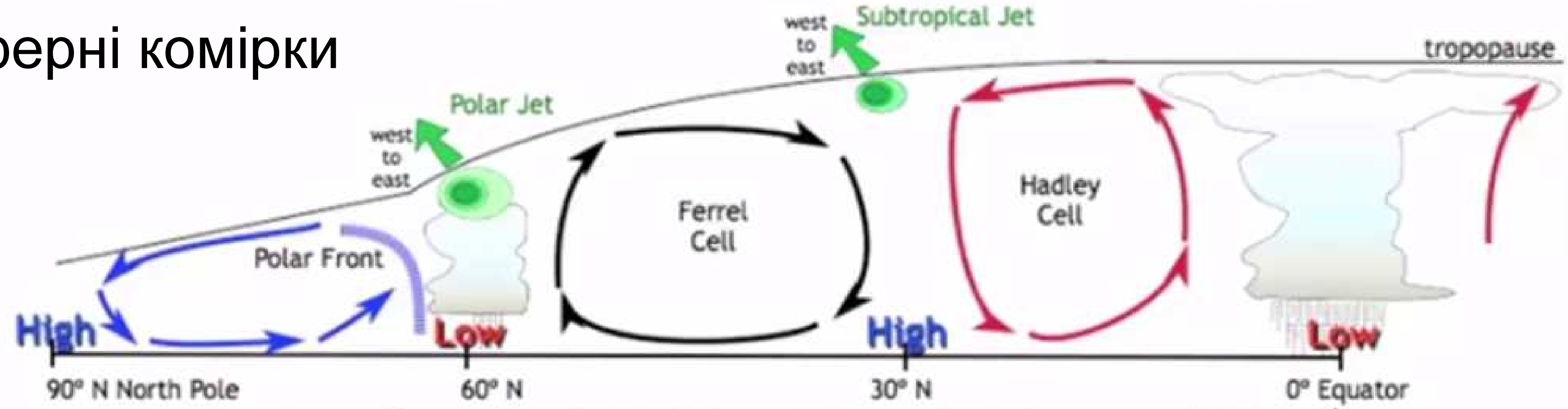
Ефект Коріоліса



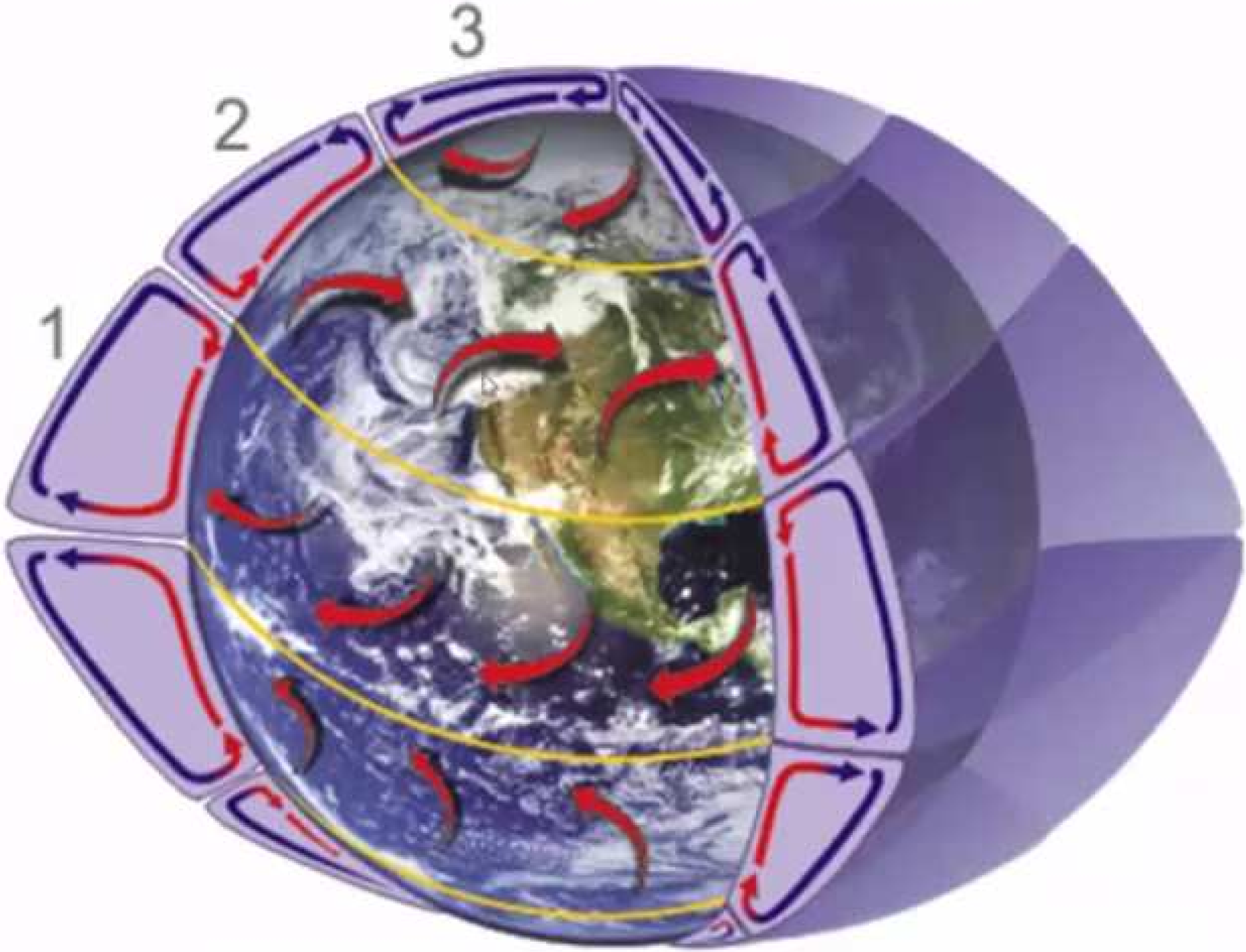


Trade winds by NOAA Ocean Service education

Атмосферні комірки



Center for Multiscale Modeling of Atmospheric Processes (CMMAP)



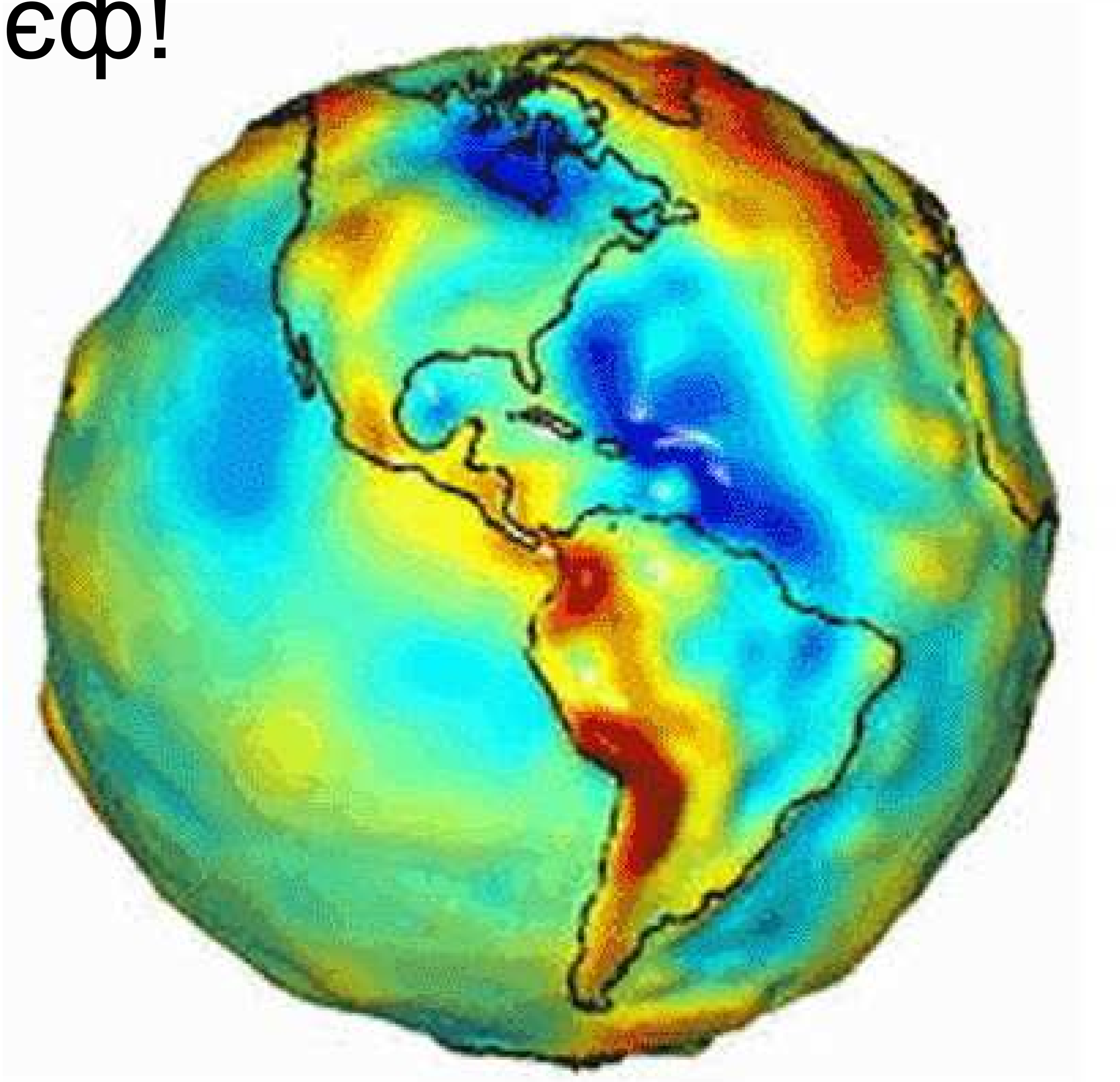
Global Circulation by US National Weather Service

ROSSBY WAVES

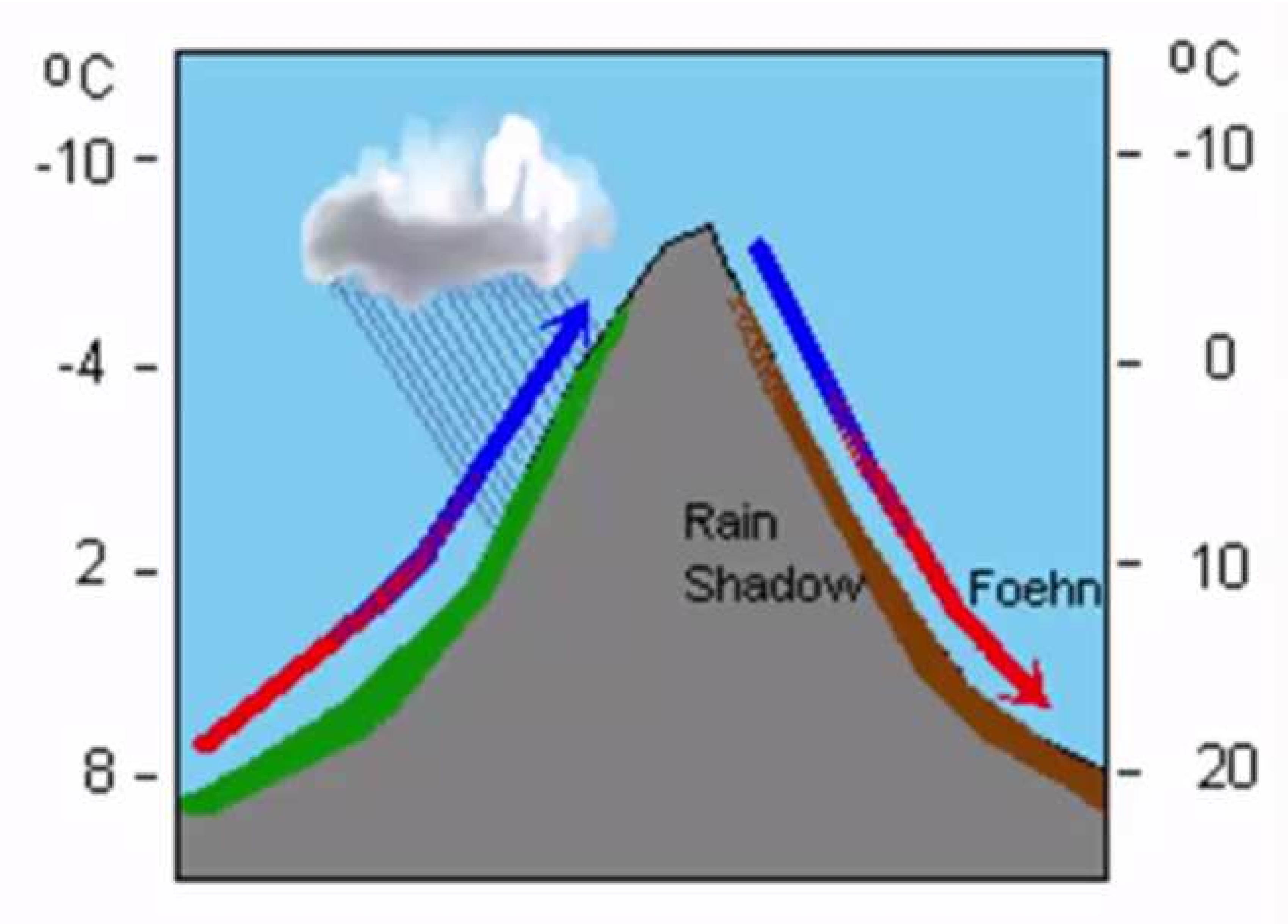
- Rossby waves are a type of inertia wave
  - Associated with pressure systems and the jet stream
  - Causes polar and subtropical jets to meander

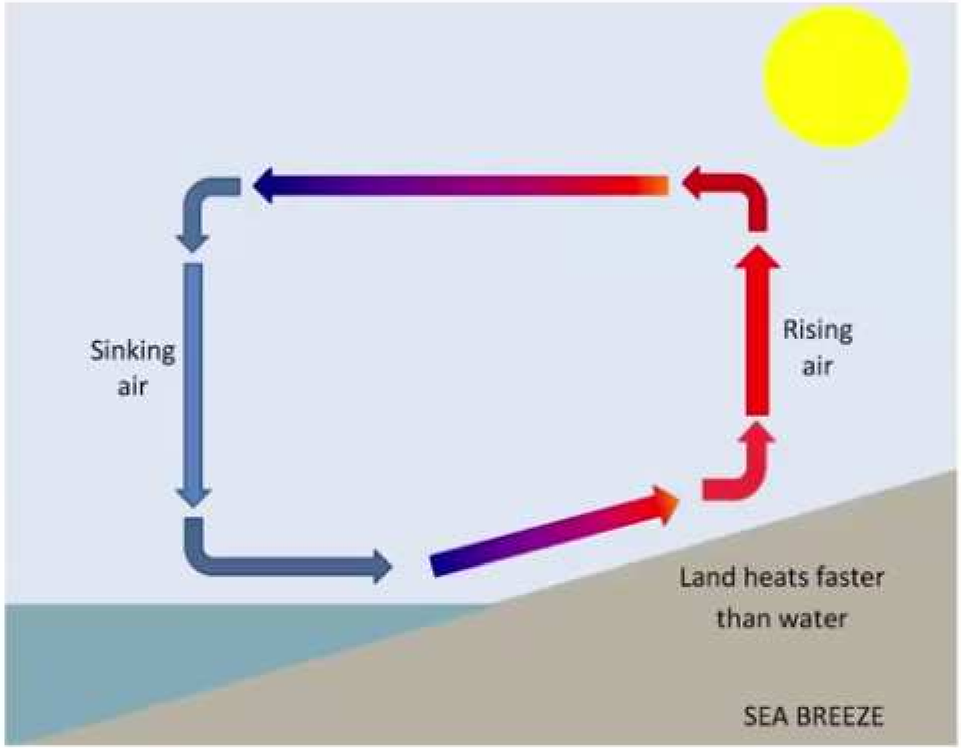
"Jetstream 2" by US National Weather Service

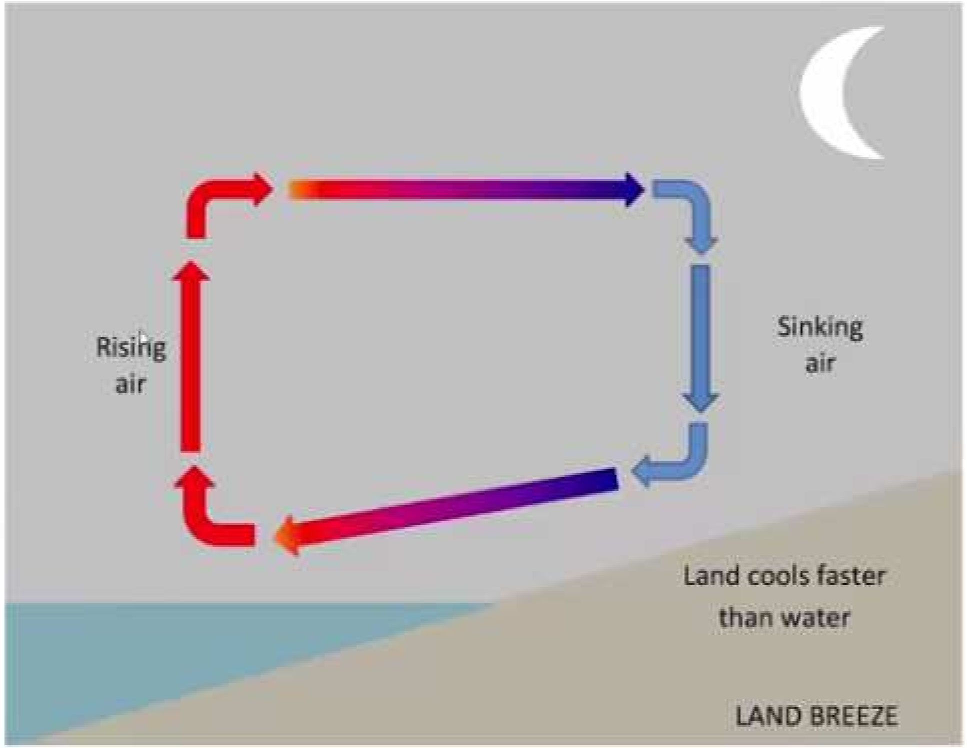
Рельєф!

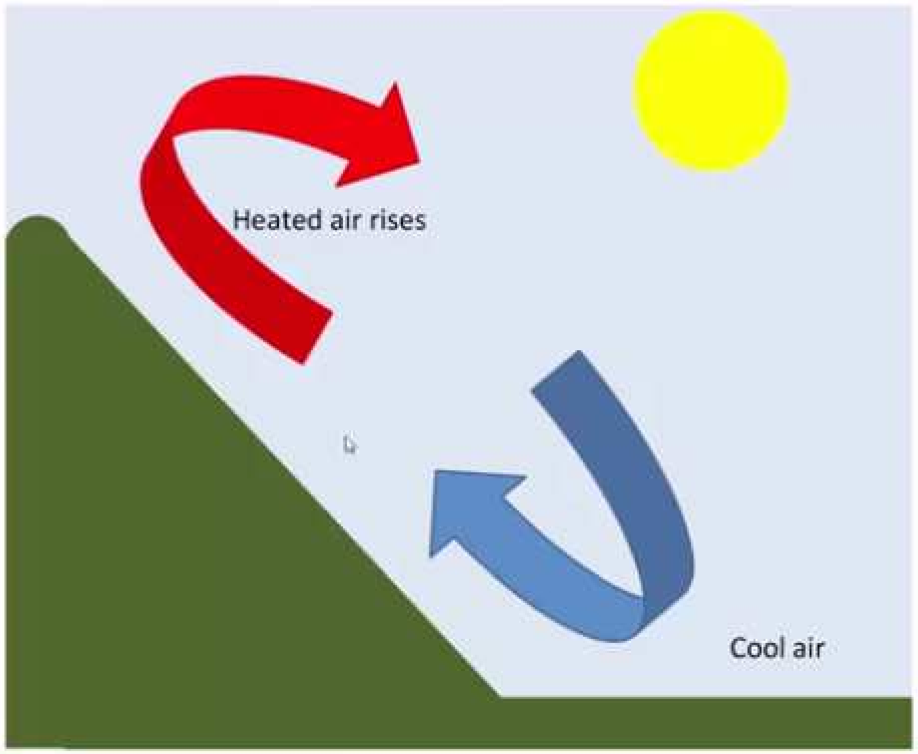


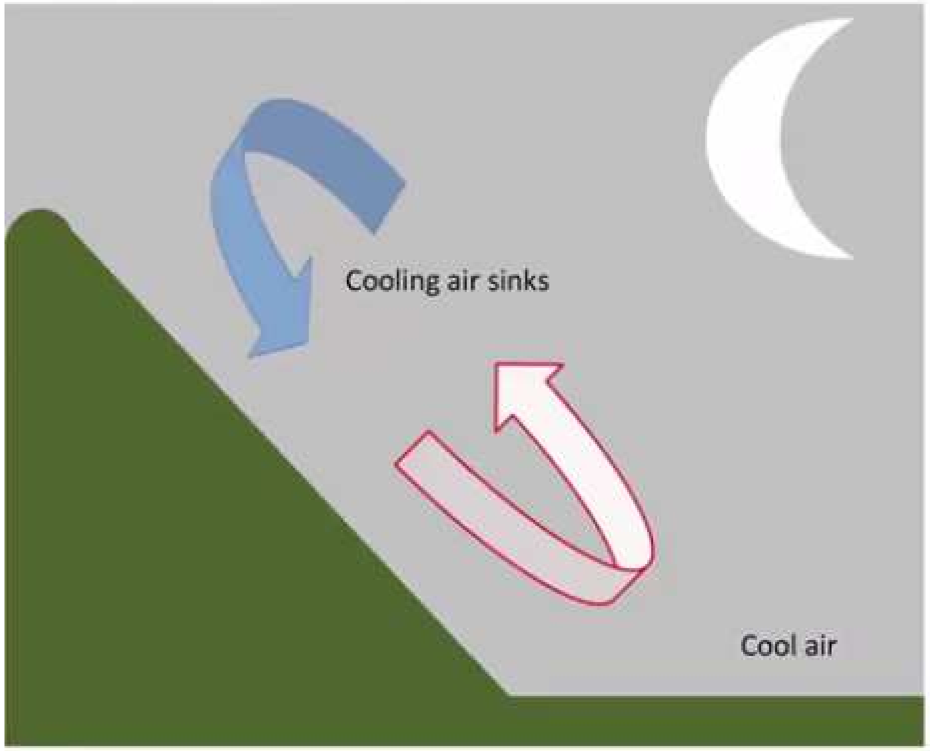
Локальні вітри



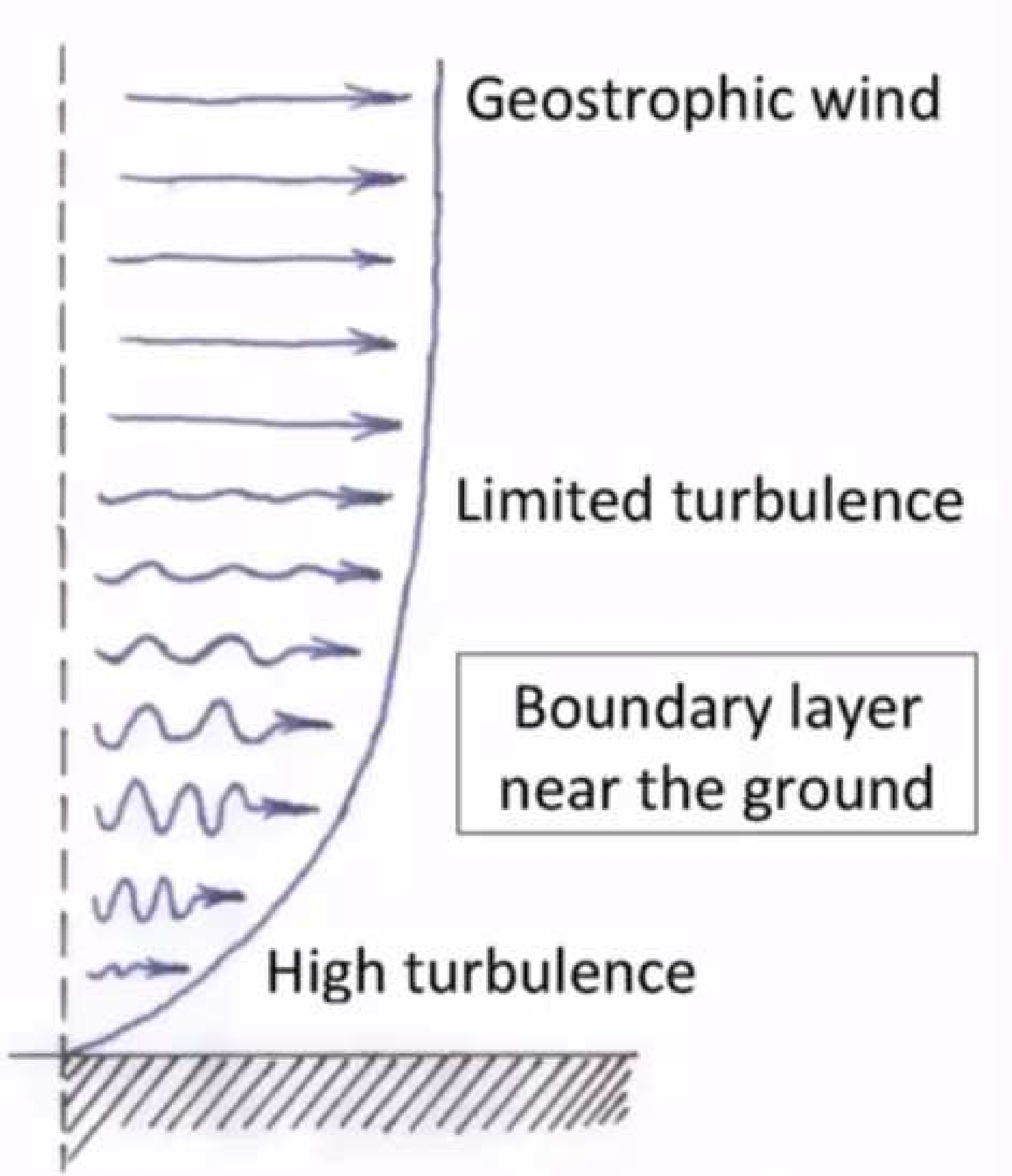

Sinking air
Rising air
Land heats faster than water
SEA BREEZE


Rising air
Sinking air
Land cools faster than water
LAND BREEZE


Heated air rises
Cool air

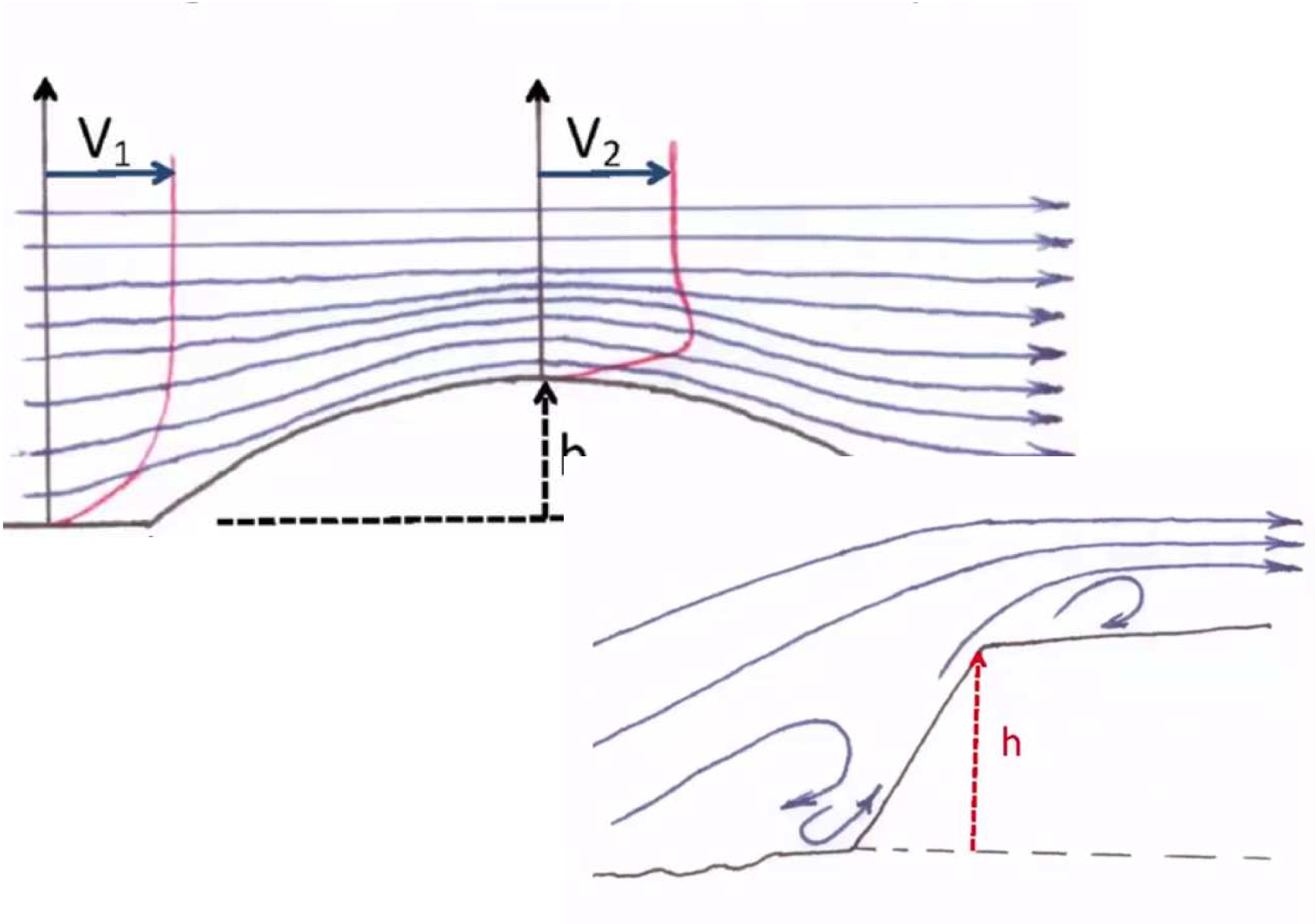

Cooling air sinks
Cool air

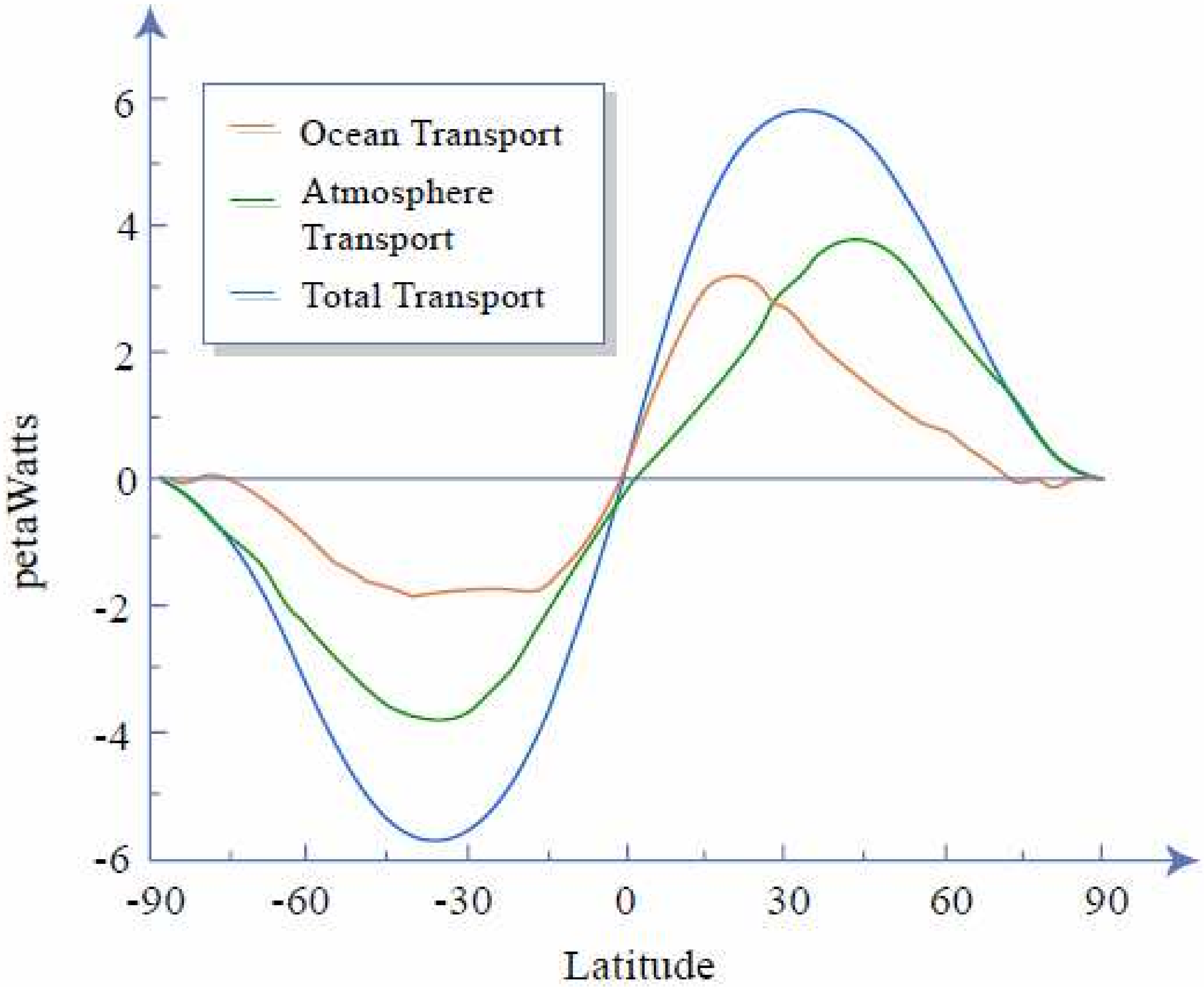
Внутрішнє тертя в газах (і рідинах)



After Grasch and Twele (2002)

Обтікання перешкод

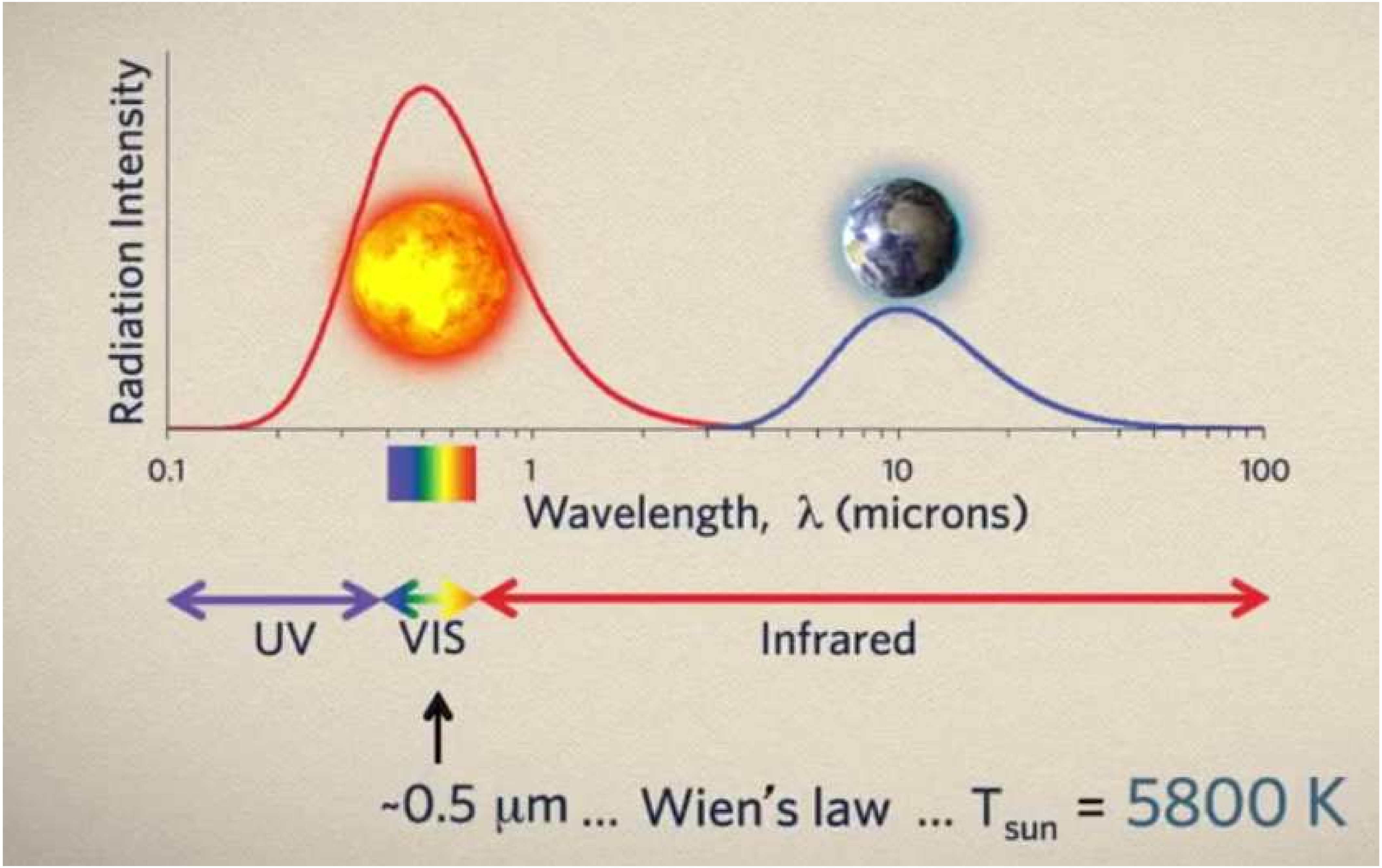


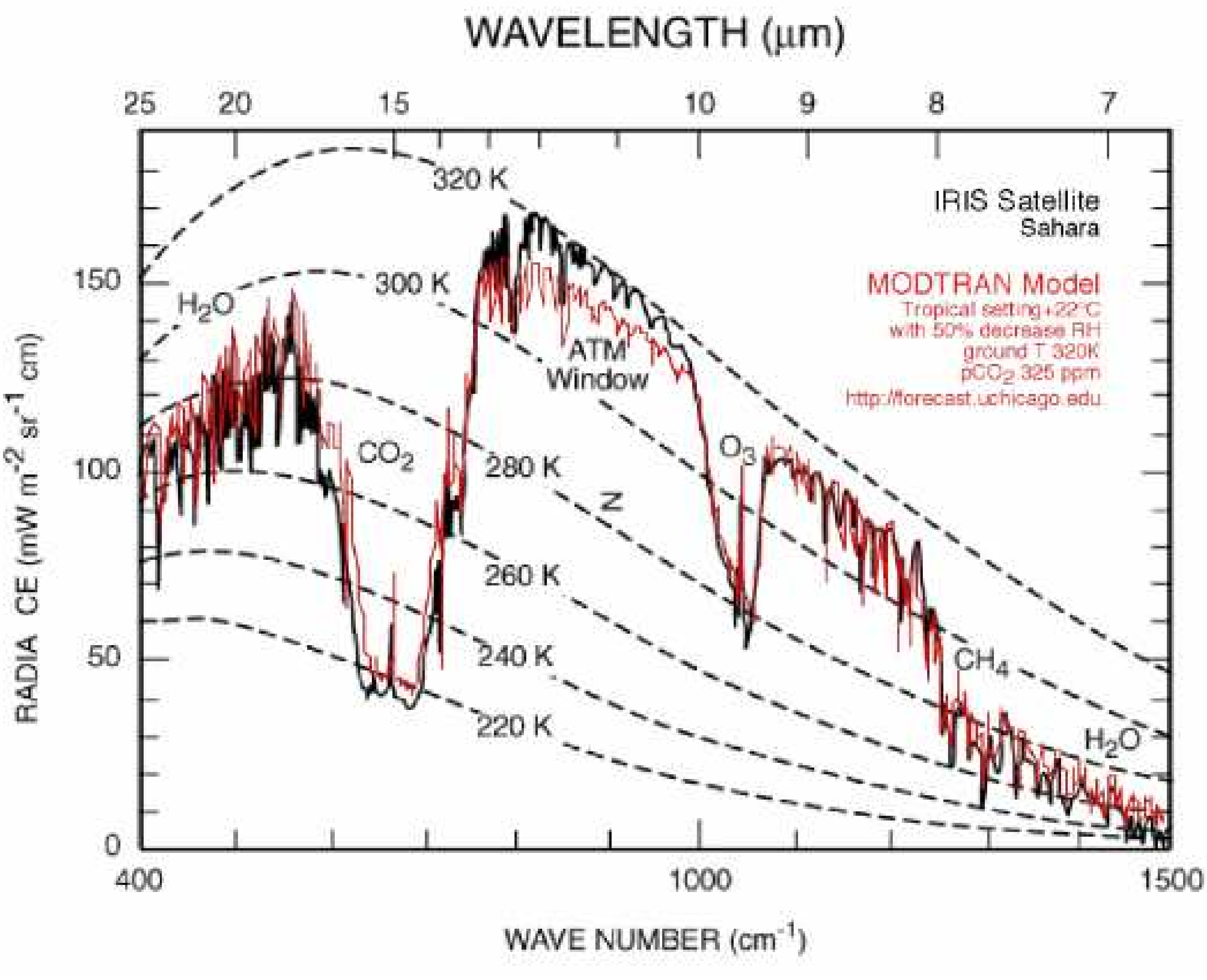


Heat Transport by Oceans and Atmosphere

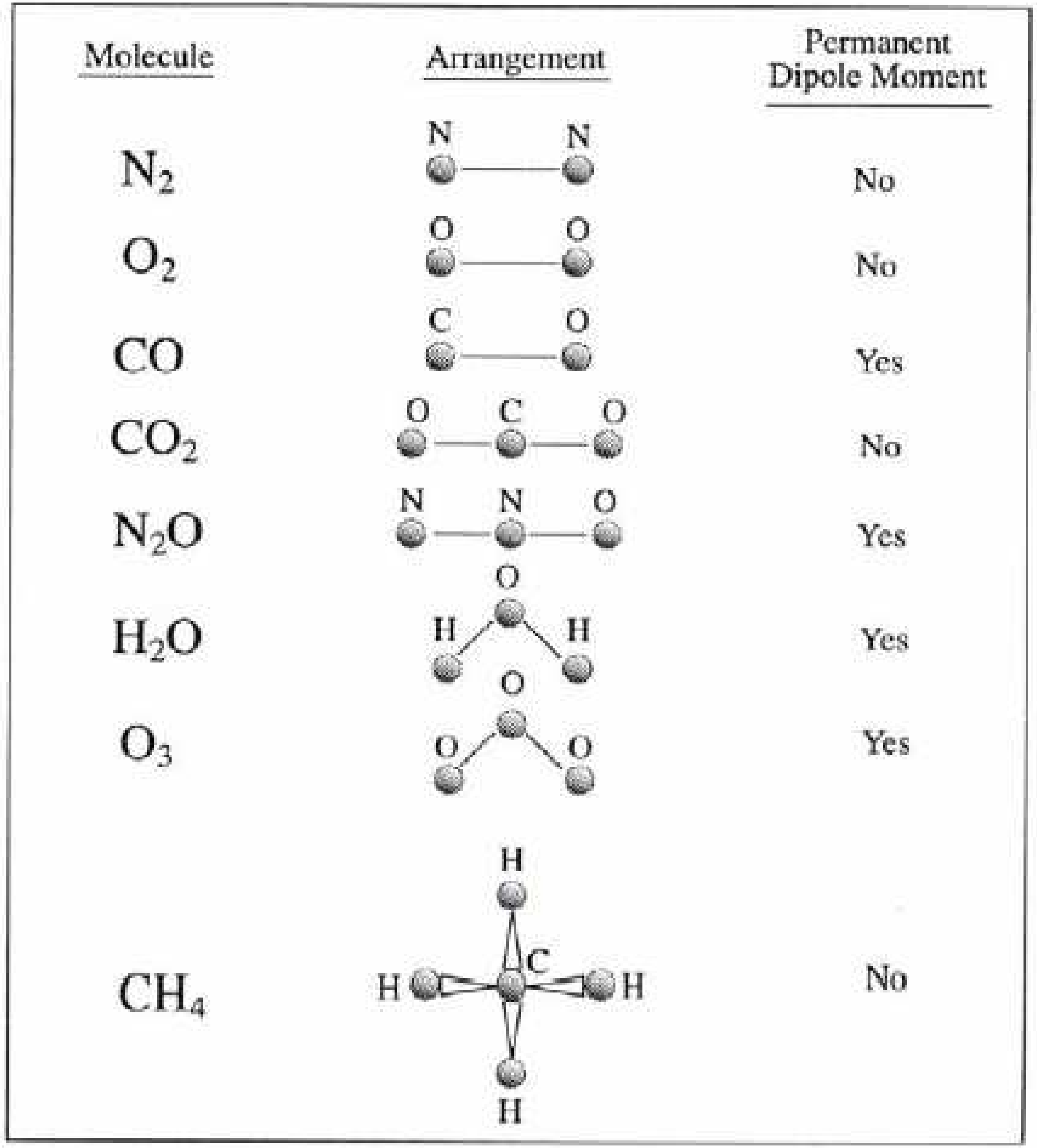
Figure by MIT OpenCourseWare.

Спектри випромінювання Сонця і Землі



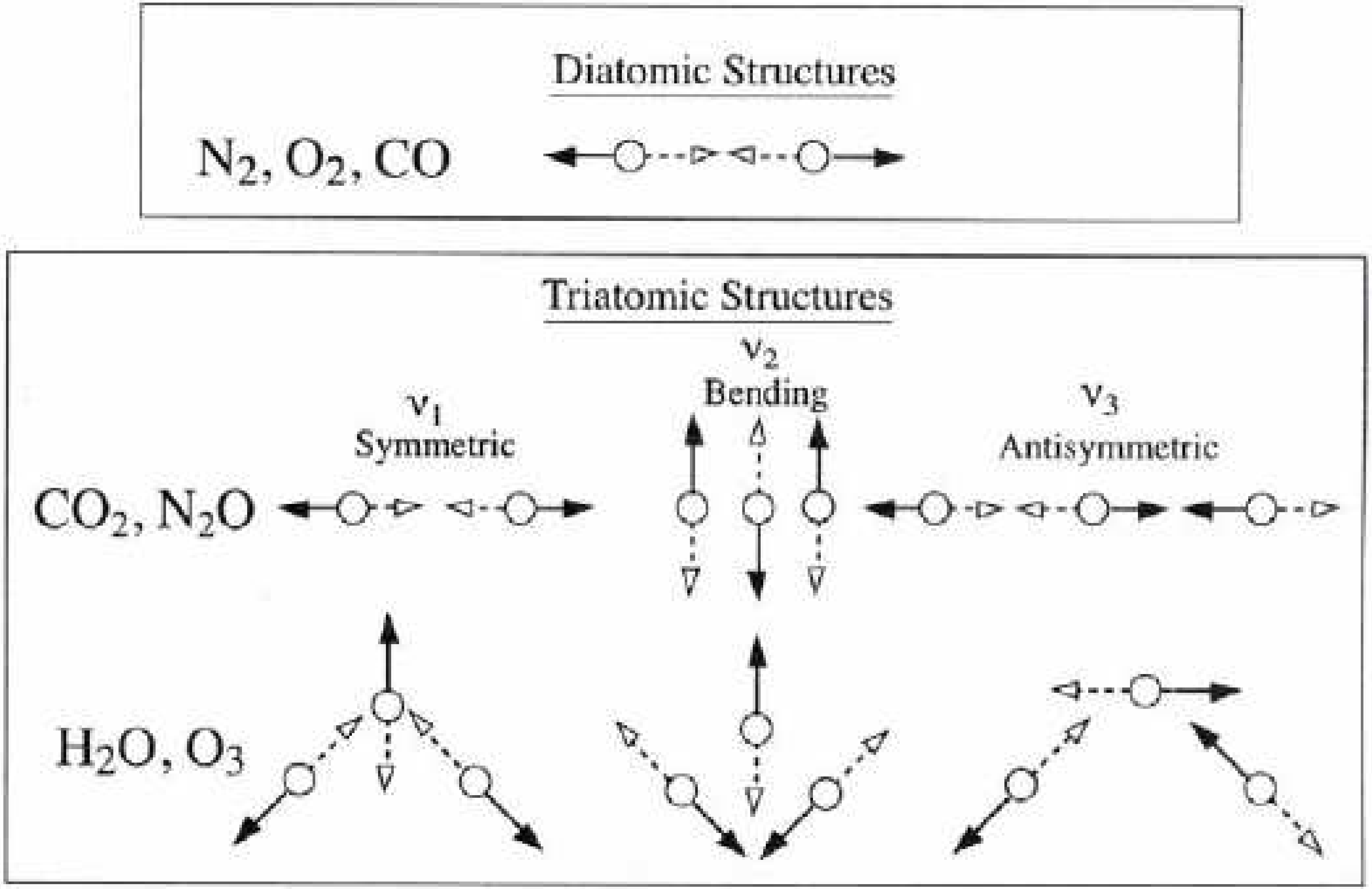


WAVELENGTH (μm)
25
20
15
10
9
8
7
320 K
300 K
280 K
260 K
240 K
220 K
IRIS Satellite
Sahara
MODTRAN Model
Tropical setting+22°C
with 50% decrease RH
ground T 320K
pCO2 325 ppm
http://forecast.uchicago.edu
H2O
CO2
ATM
Window
O3
CH4
H2O
RADIA CE (mW m-2 sr-1 cm)
150
100
50
0
400
1000
1500
WAVE NUMBER (cm-1)



Molecule	Arrangement	Permanent Dipole Moment
N_2		No
O_2		No
CO		Yes
CO_2		No
N_2O		Yes
H_2O		Yes
O_3		Yes
CH_4		No

From "General circulation model development: past, present and future", ed by D. Randall. Academic Press, NY, 1999.



From “General circulation model development: past, present and future”, ed by D. Randall. Academic Press, NY, 1999.

Stefan-Boltzmann's law (very useful!)

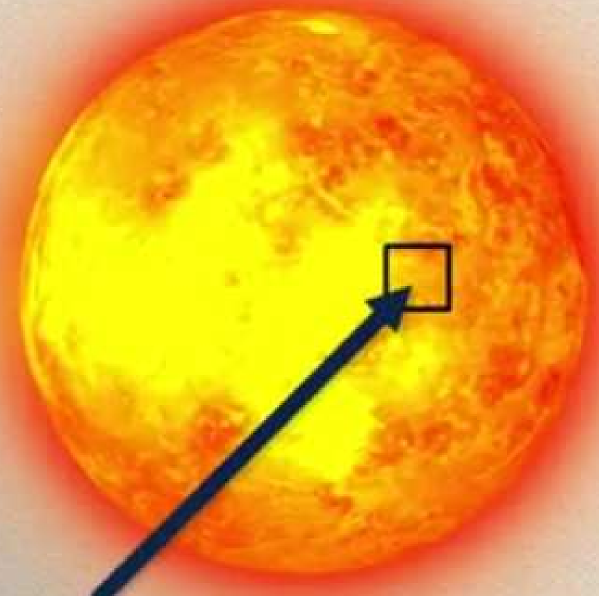
$$F = \sigma T^4$$

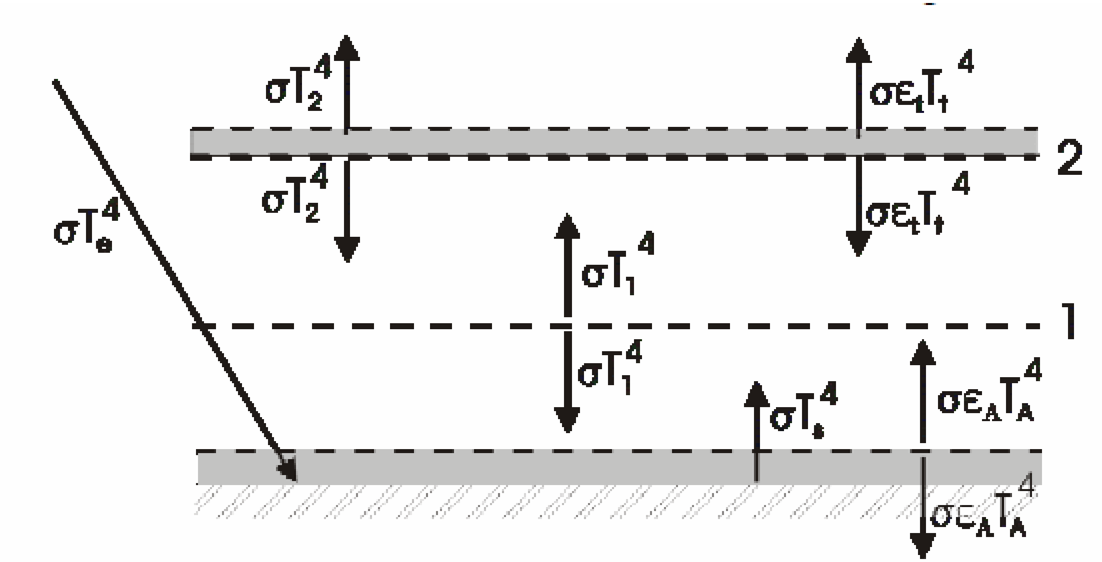
F is the energy emitted, per unit time, per unit area, expressed in W/m² [J/s*m²]

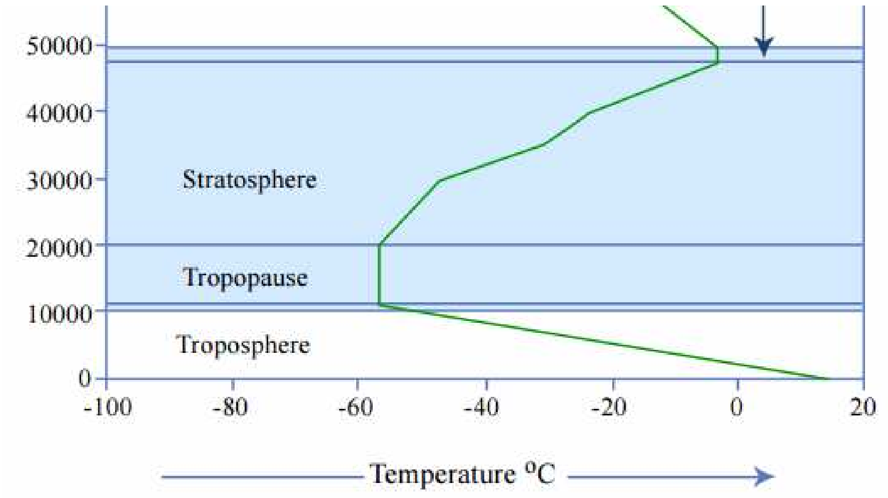
σ is a constant [$5.67 \cdot 10^{-8}$ W/m²K⁴]

T is the absolute temperature (K)

IMAGES: NASA

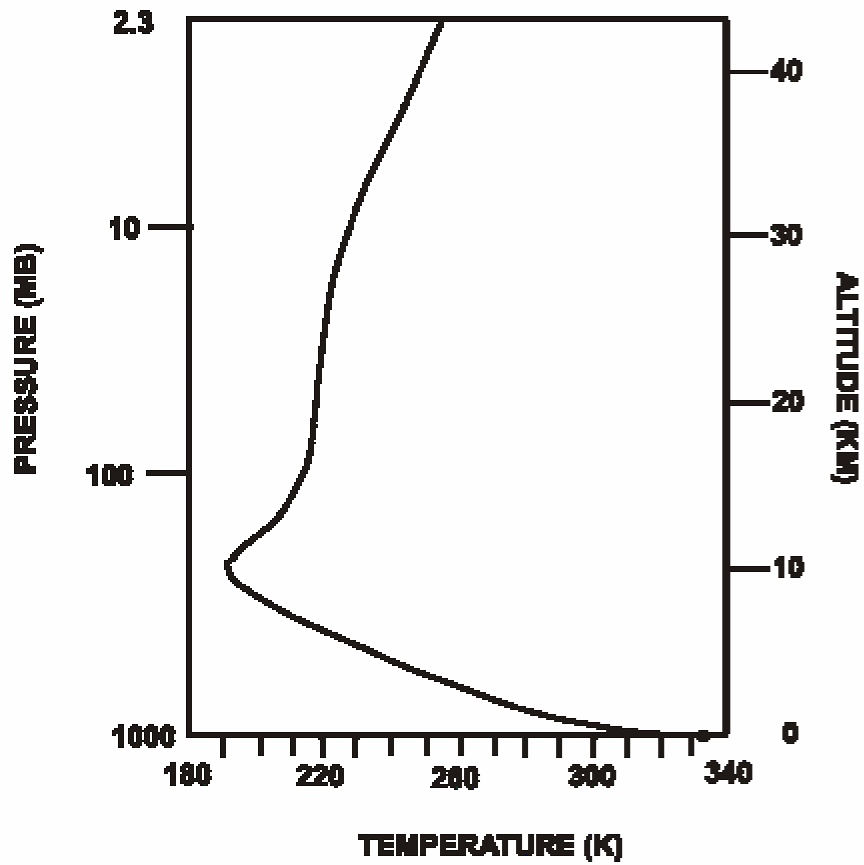




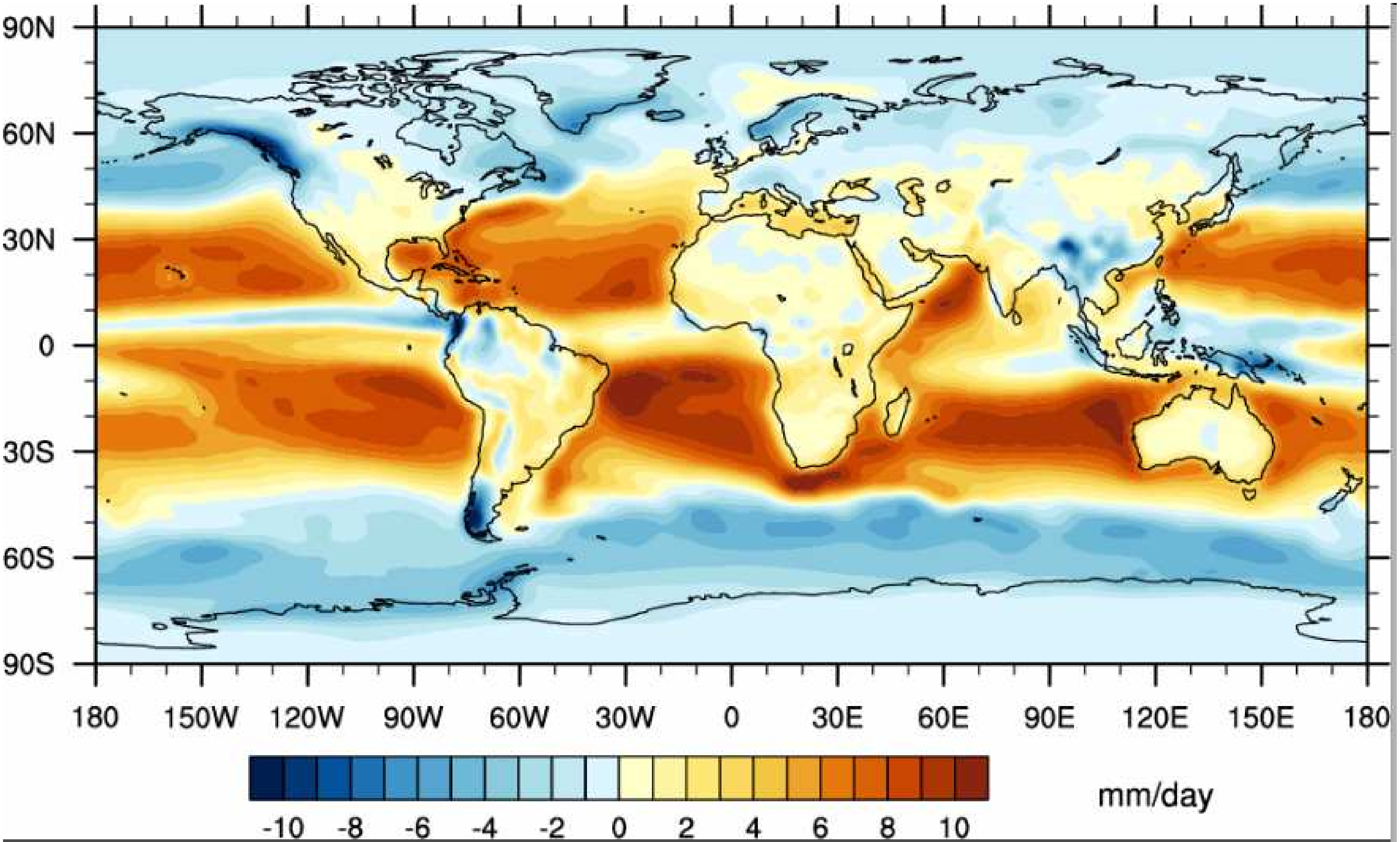


Модель багатошарової атмосфери

Але ця модель не враховує конвекції!

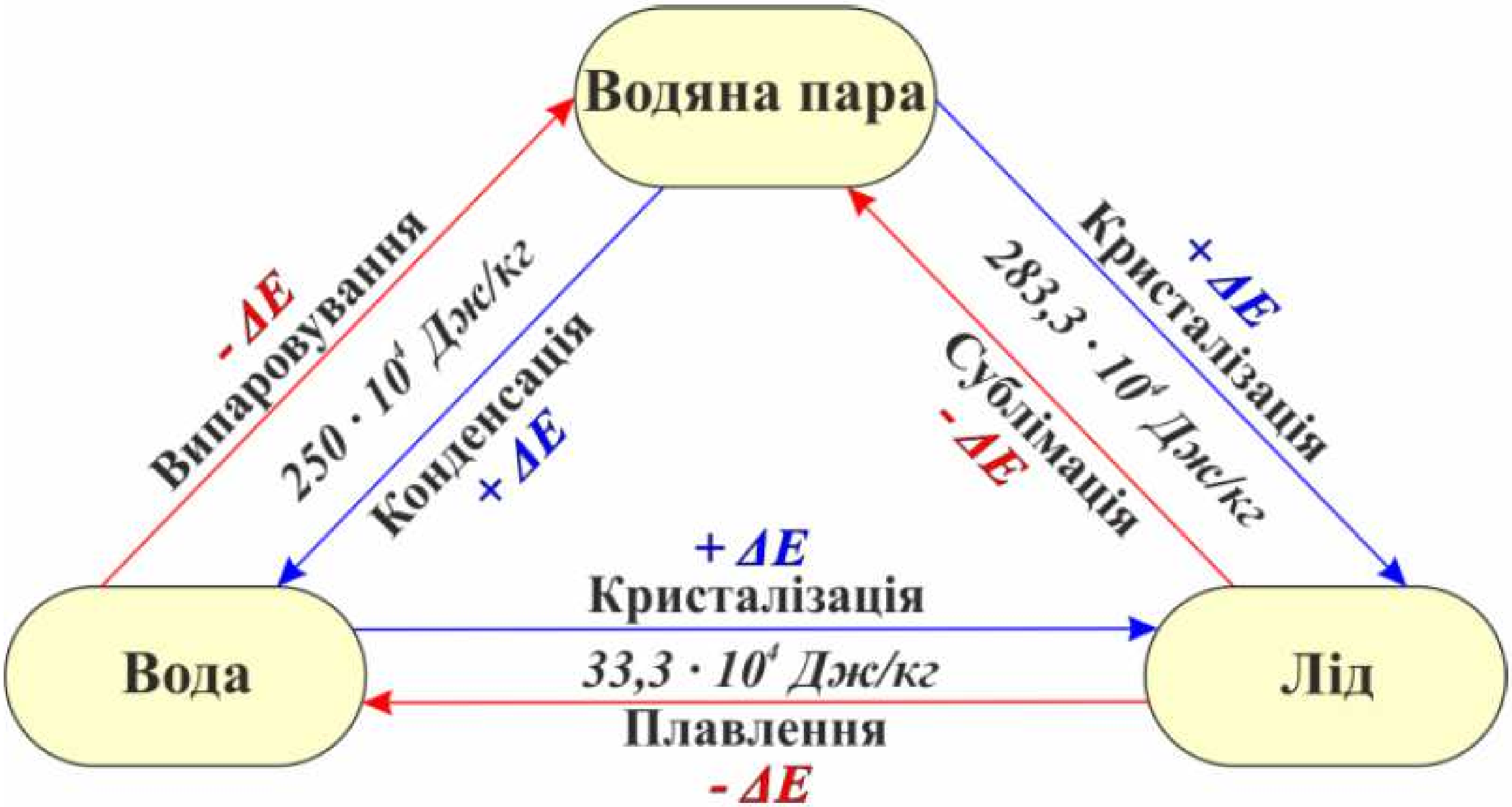


Characteristics of atmospheric moisture transport

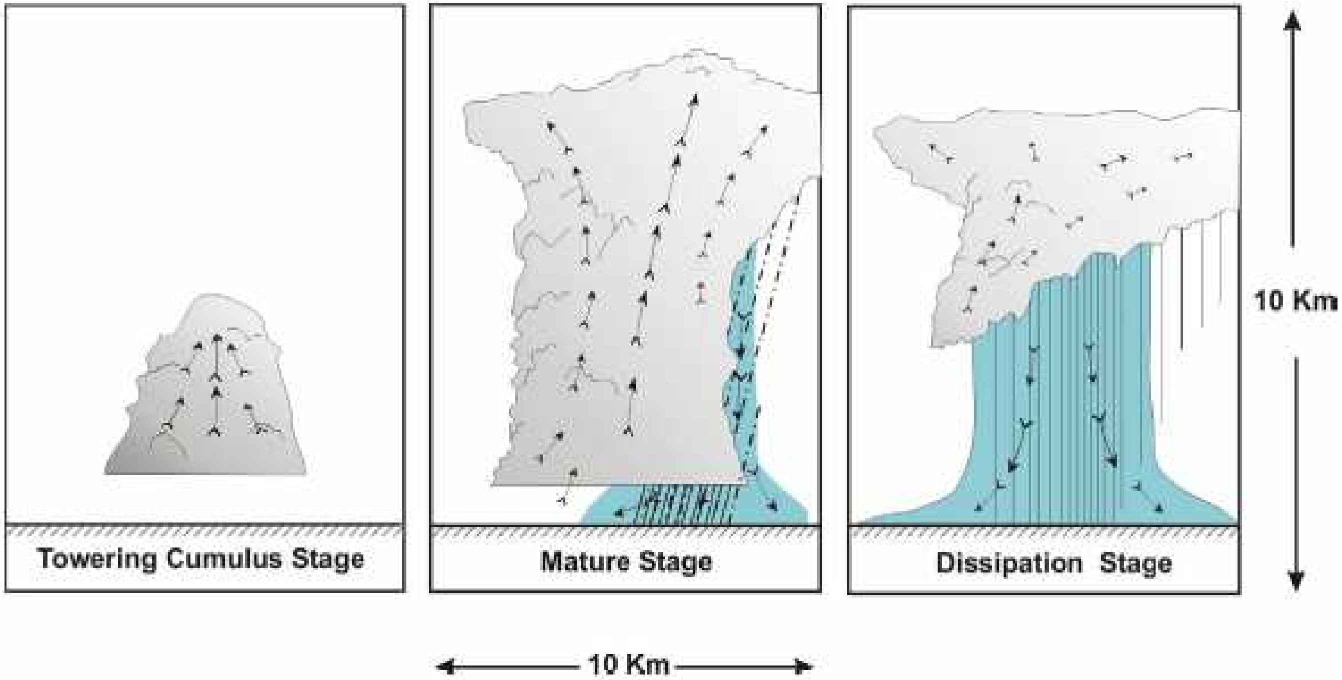


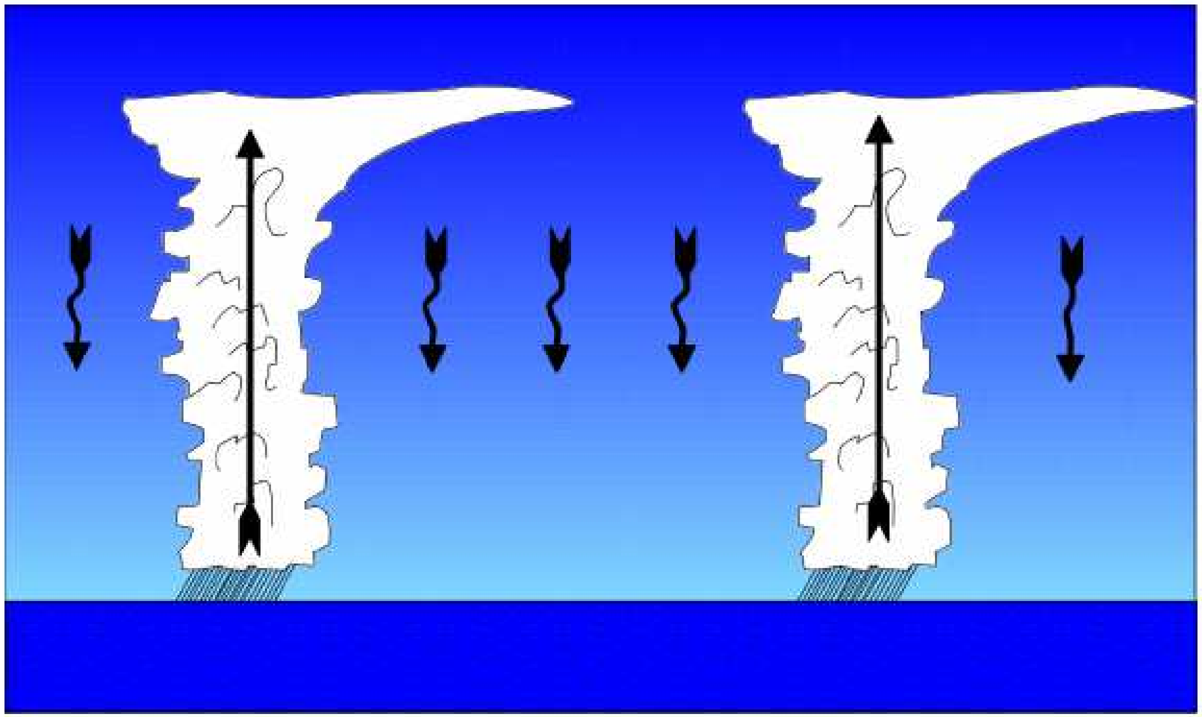
Climatological mean evaporation minus precipitation

http://www.iac.ethz.ch/group/atmospheric-dynamics/focus/vapour-and-isotopes.html

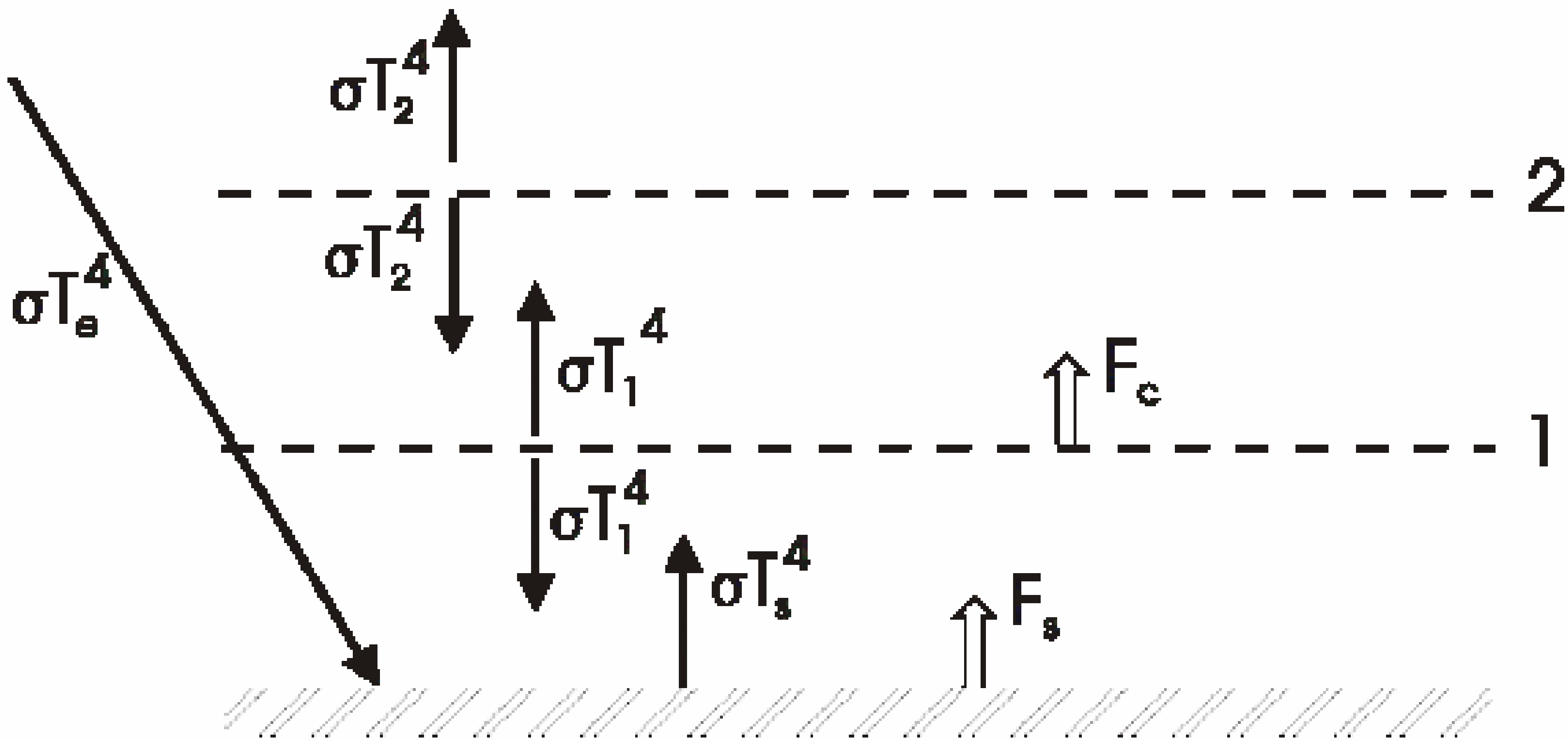


Водяна пара
Вода
Лід
- ΔE
Випаровування
250 · 10⁴ Дж/кг
Конденсація
+ ΔE
+ ΔE
Кристалізація
283,3 · 10⁴ Дж/кг
Сублімація
- ΔE
+ ΔE
Кристалізація
33,3 · 10⁴ Дж/кг
Плавлення
- ΔE

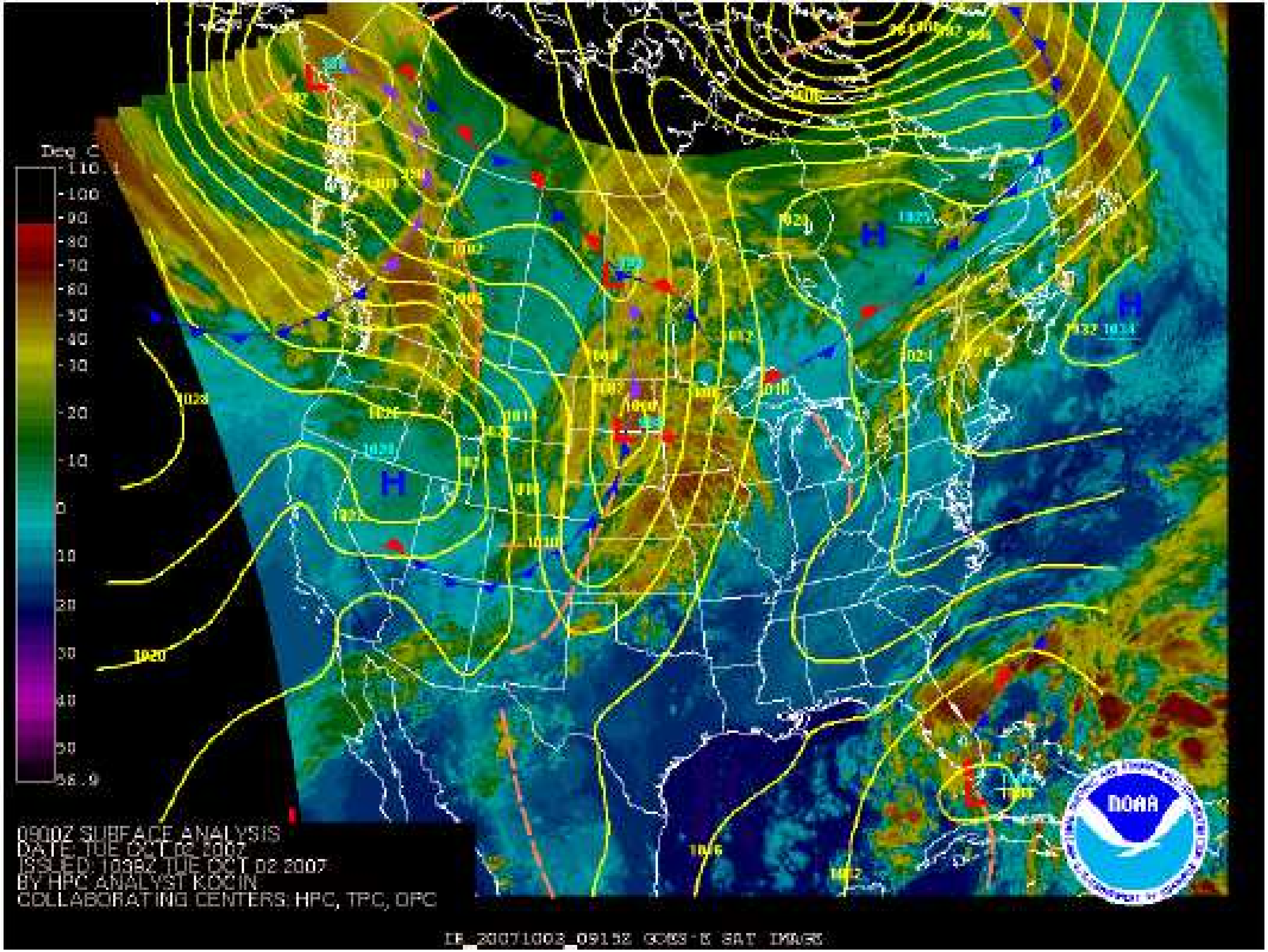

Towering Cumulus Stage
Mature Stage
Dissipation Stage
10 Km
10 Km



Проста радіаційно-конвекційна модель



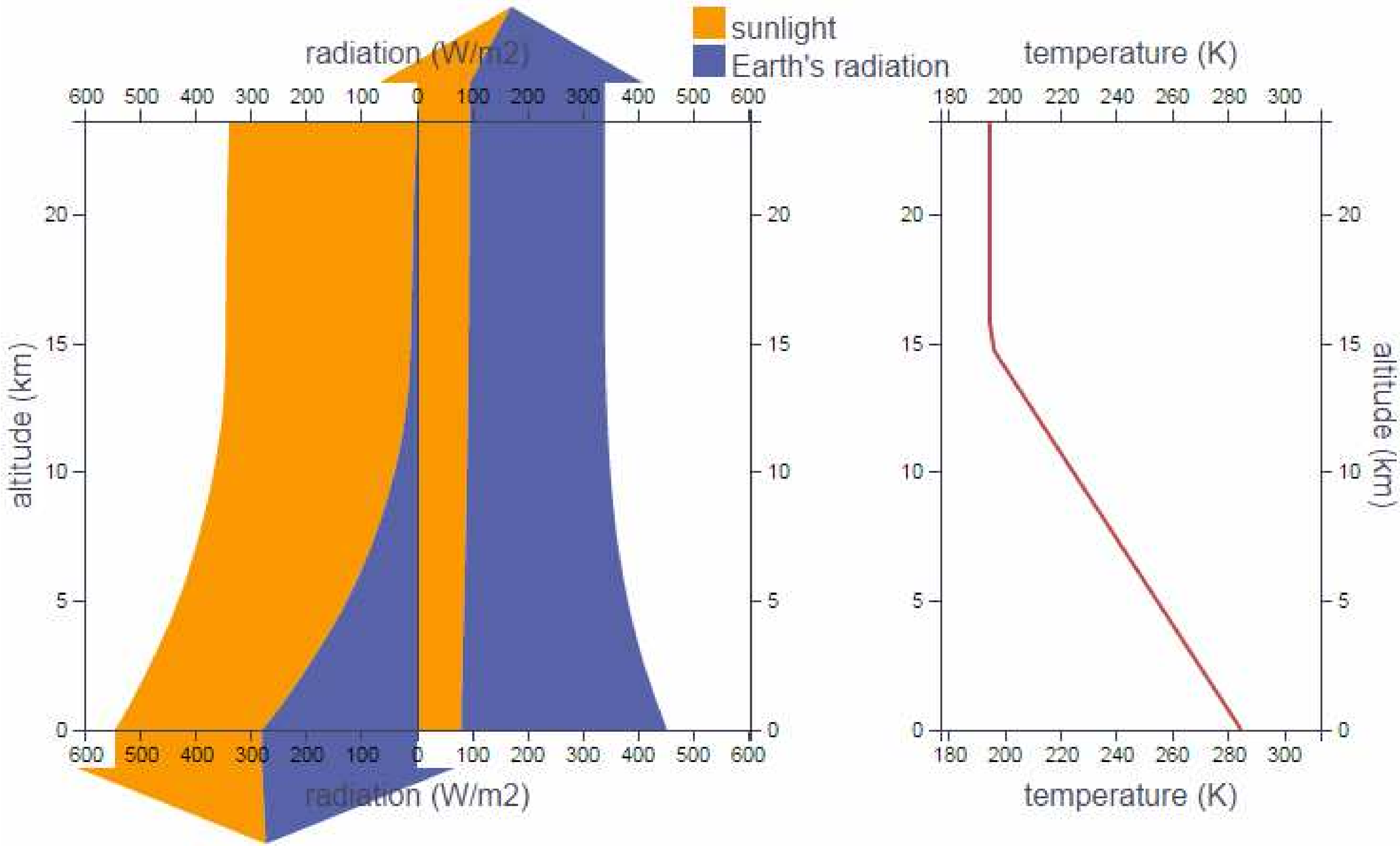
Example of surface pressure distribution



The **RRTM** model simulates the flow of electromagnetic radiation in and out of the Earth.

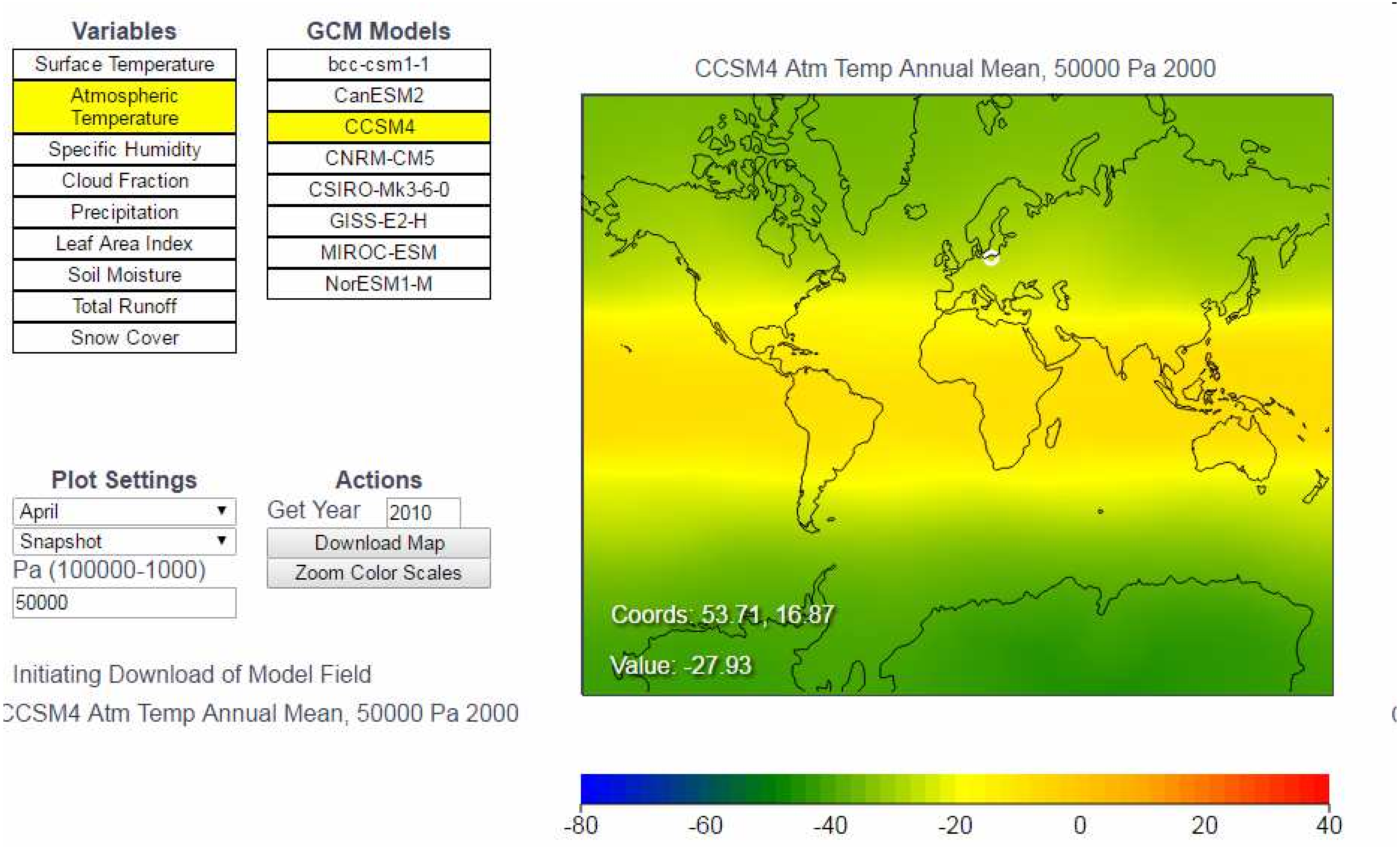
```
model_data["Tbound"] = [float(model_data["Ts"]) - min(float(alt),float(model_data["tropopause"])) * float(model_data["lapseRate"]) for alt
model_data["T"] = number_of_layers * [0]
model_data["lev"] = number_of_layers * [0]
for i in range(number_of_layers):
    if i == 0:
        T = (float(model_data["Ts"]) + float(model_data["Tbound"][0])) / 2
        model_data["T"][0] = T
        deltaZ = model_data["altitude"][i] * 1e3
        model_data["lev"][0] = ps * numpy.exp(-g * deltaZ / (T * R))
    else:
        T = (float(model_data["Tbound"][i-1]) + float(model_data["Tbound"][i])) / 2
        model_data["T"][i] = T
        deltaZ = (model_data["altitude"][i] - model_data["altitude"][i-1]) * 1e3
        model_data["lev"][i] = model_data["lev"][i-1] * numpy.exp(-g * deltaZ / (T * R))

# model_data["lev"][number_of_layers-1] = min(model_data["lev"][number_of_layers-1], 13)

sys.stderr.write(str(model_data["lev"]))
def equilibrium_pressure(T):
    return 6.1094 * exp(17.625 * (T - 273.15) / (T - 30.11))

model_data["h2o"] = [(equilibrium_pressure(T) / model_data['lev'][i]) * (float(model_data['relativeHumidity']) / 100.0) for (i,T) in enumer
# same sw albedo all around
model_data['asdif'] = model_data['asdir']
model_data['aldir'] = model_data['asdir']
model_data['aldif'] = model_data['asdir']
```

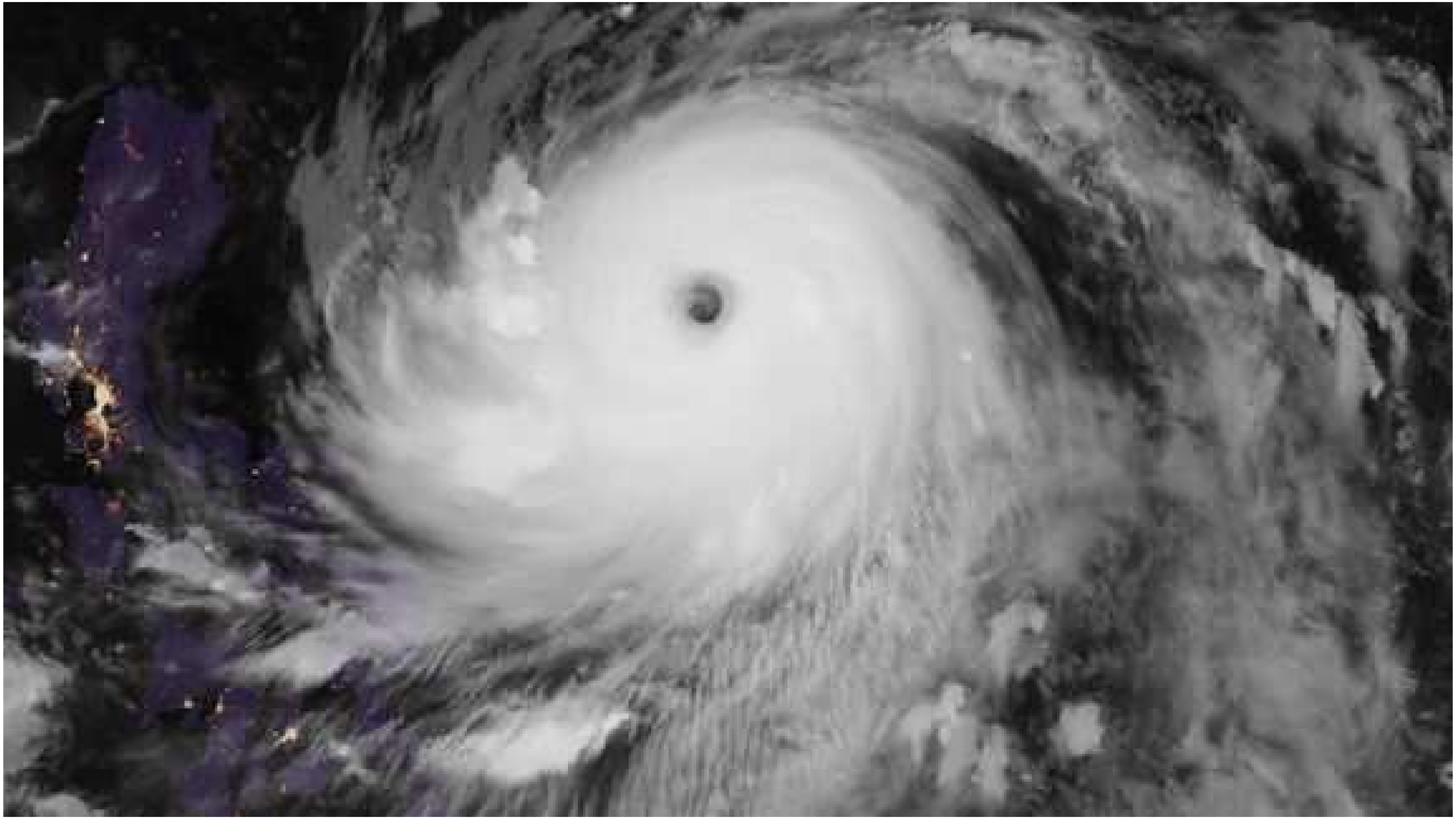
https://github.com/jsbj/rrtm/blob/master/cgi-bin/rrtm/rrtm.py



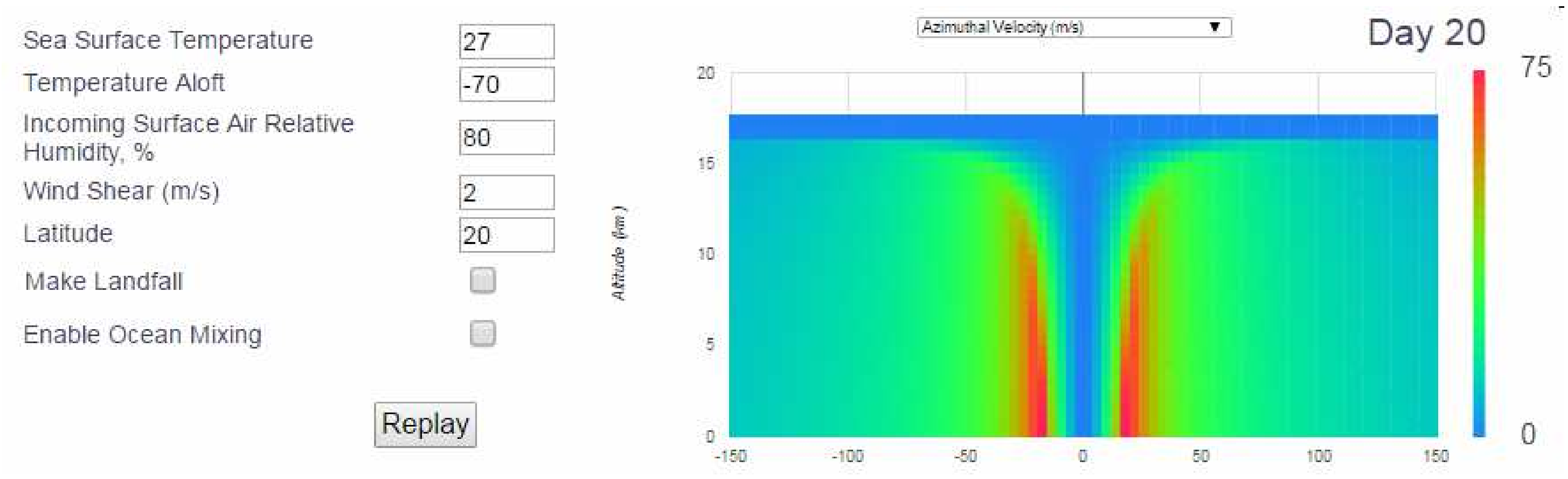
http://climatemodels.uchicago.edu/rrtm/

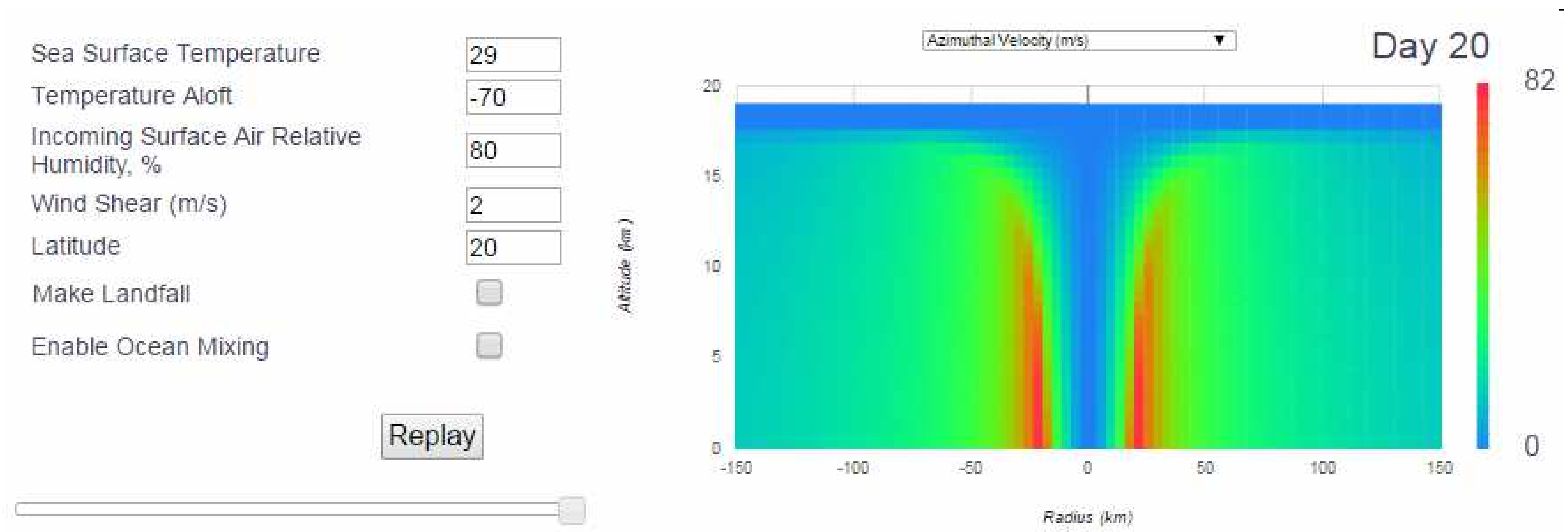
http://climatemodels.uchicago.edu/maps/

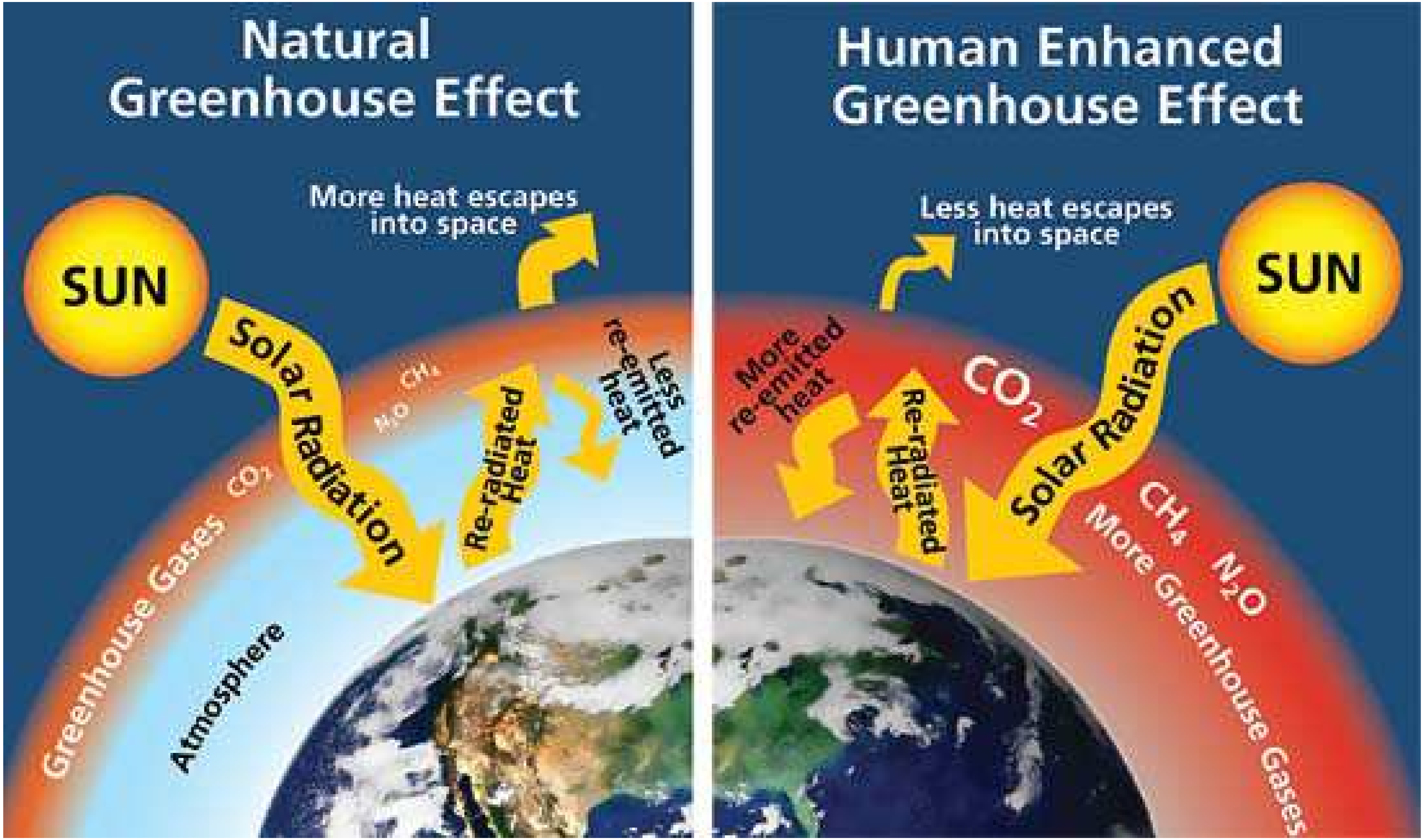




http://climatemodels.uchicago.edu/hurricane/







http://climatechange.lta.org/get-started/learn/co2-methane-greenhouse-effect/

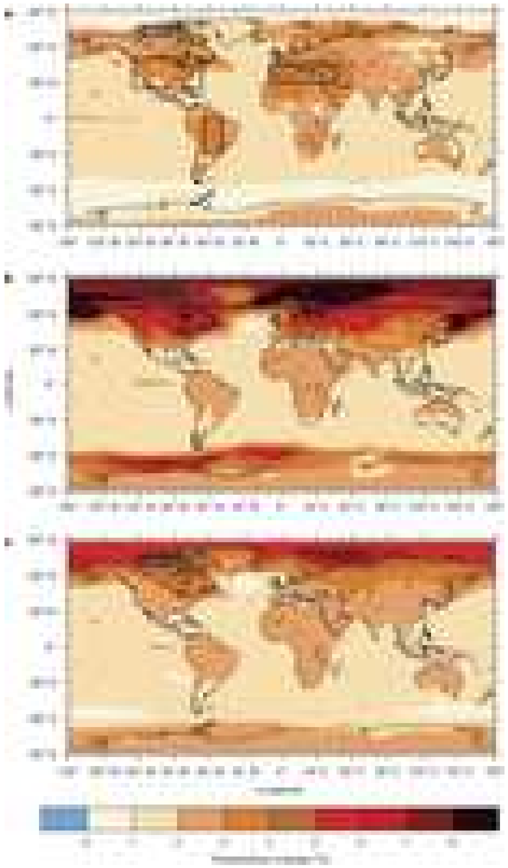
日本語要約

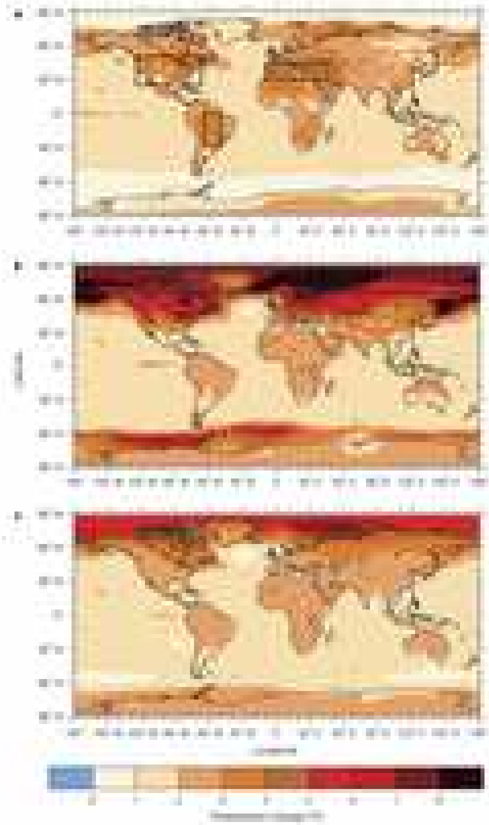
Allowable CO_2 emissions based on regional and impact-related climate targets

Sonia I. Seneviratne, Markus G. Donat, Andy J. Pitman, Reto Knutti & Robert L. Wilby

Affiliations | Contributions | Corresponding author

Nature **529**, 477–483 (28 January 2016) | doi:10.1038/nature16542





Local changes associated with a global warming of 2 °C are shown for hottest daytime temperature (T_{XX}) (**a**), annual coldest night-time temperature (T_{Nn}) (**b**), and mean temperature (T_{mean}) (**c**). The analysis is based on RCP8.5 scenario simu...

Carbon Dioxide Measurements
NOAA CMDL Carbon Cycle Greenhouse Gases

ocw.mit.edu

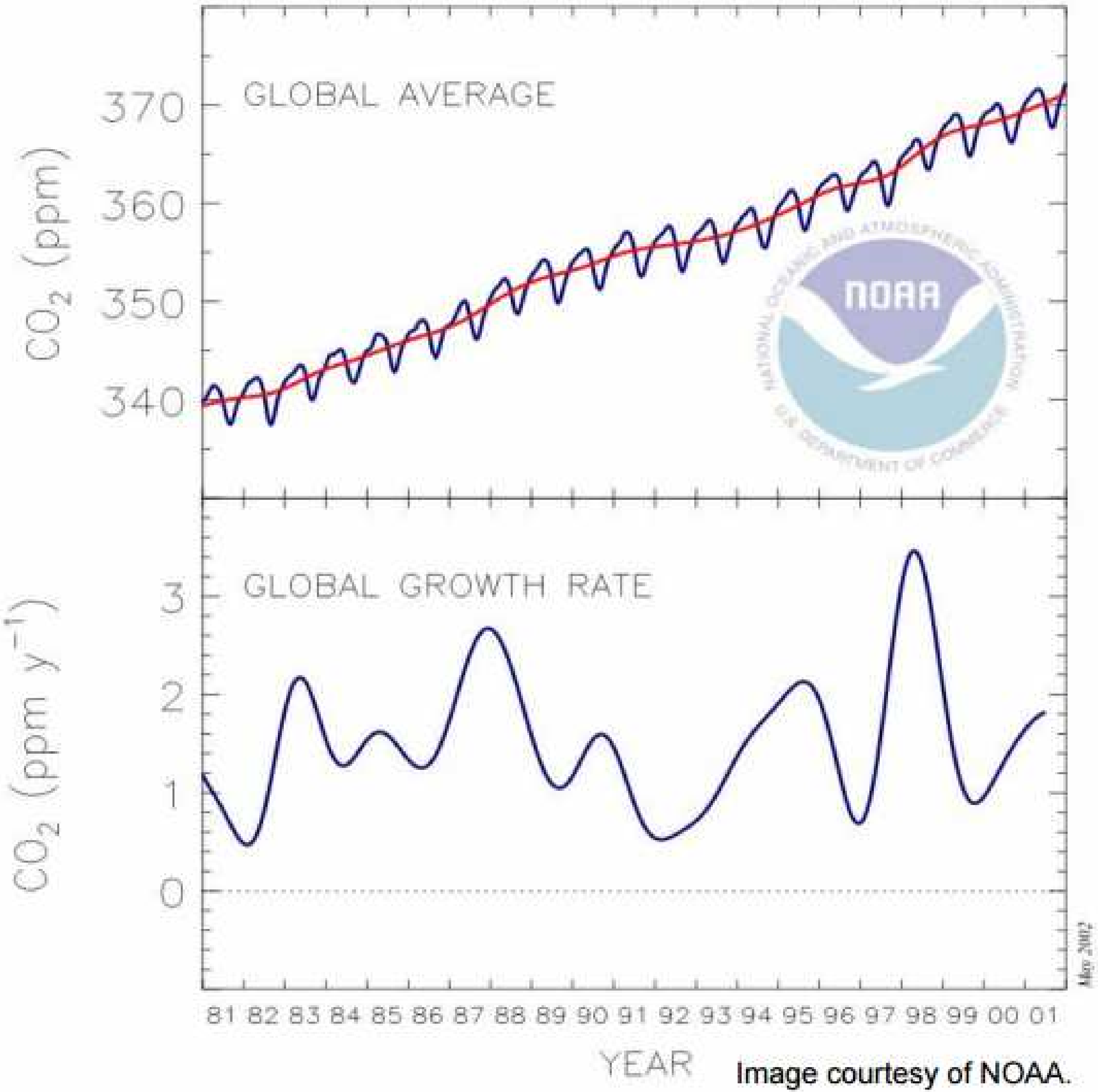
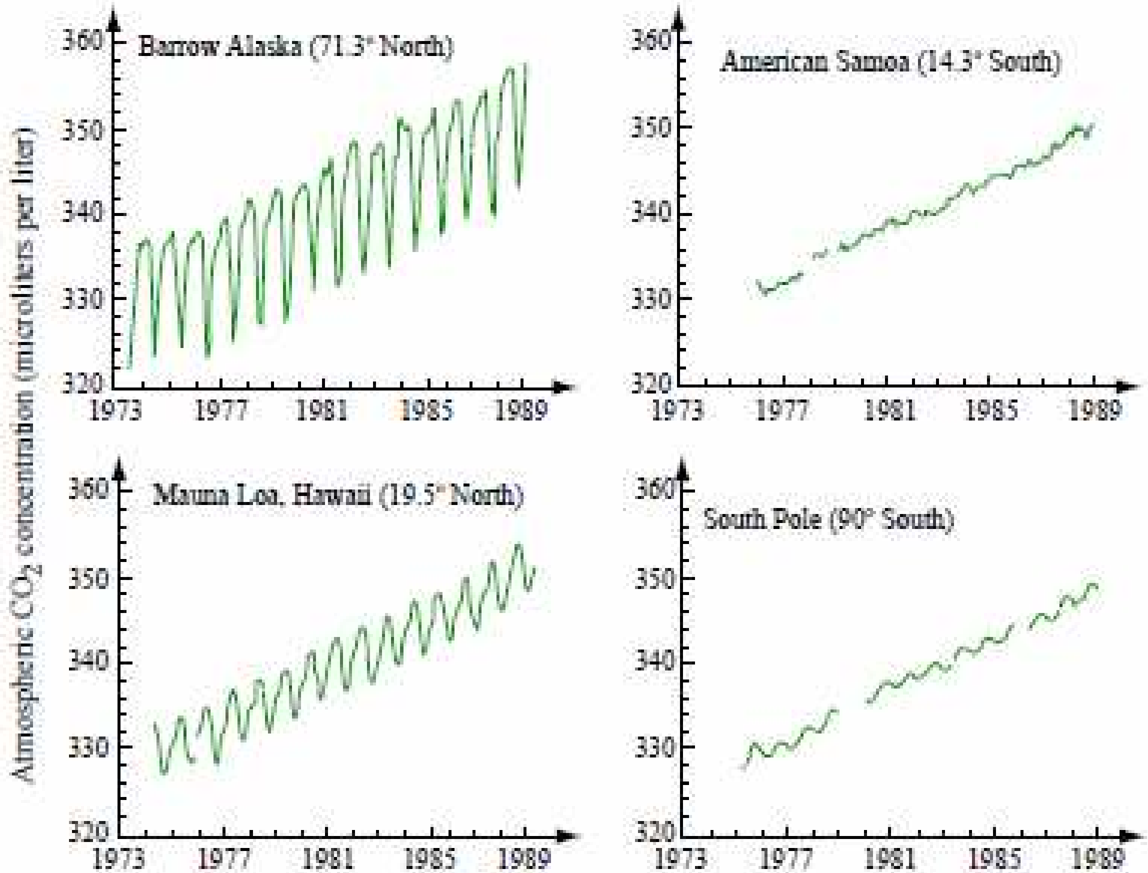


Image courtesy of NOAA.

Top: Global average atmospheric carbon dioxide mixing ratios (blue line) determined using measurements from the NOAA CMDL cooperative air sampling network. The red line represents the long-term trend.

Spatial variability of atmospheric CO_2



Seasonal cycles of atmospheric CO_2 concentrations are illustrated by measurements from four monitoring stations where the National Oceanic and Atmospheric Administration takes continuous readings. Analysis of the measurements shows that seasonal cycles in the Northern Hemisphere-which reflect the dominance of photosynthesis in the summer and plant respiration in the winter-seem to be increasing in amplitude. This may be a result of global warming. The dots represent monthly averages. The data are from Peterson et al. 1986; Komhyr et al. 1989; Thoning, Tans and Komhyr 1989; Waterman et al. 1989; and Gillette et al. 1987.

Figure by MIT OpenCourseWare.

Global CO_2 emissions from fossil-fuel burning, cement production, and gas flaring

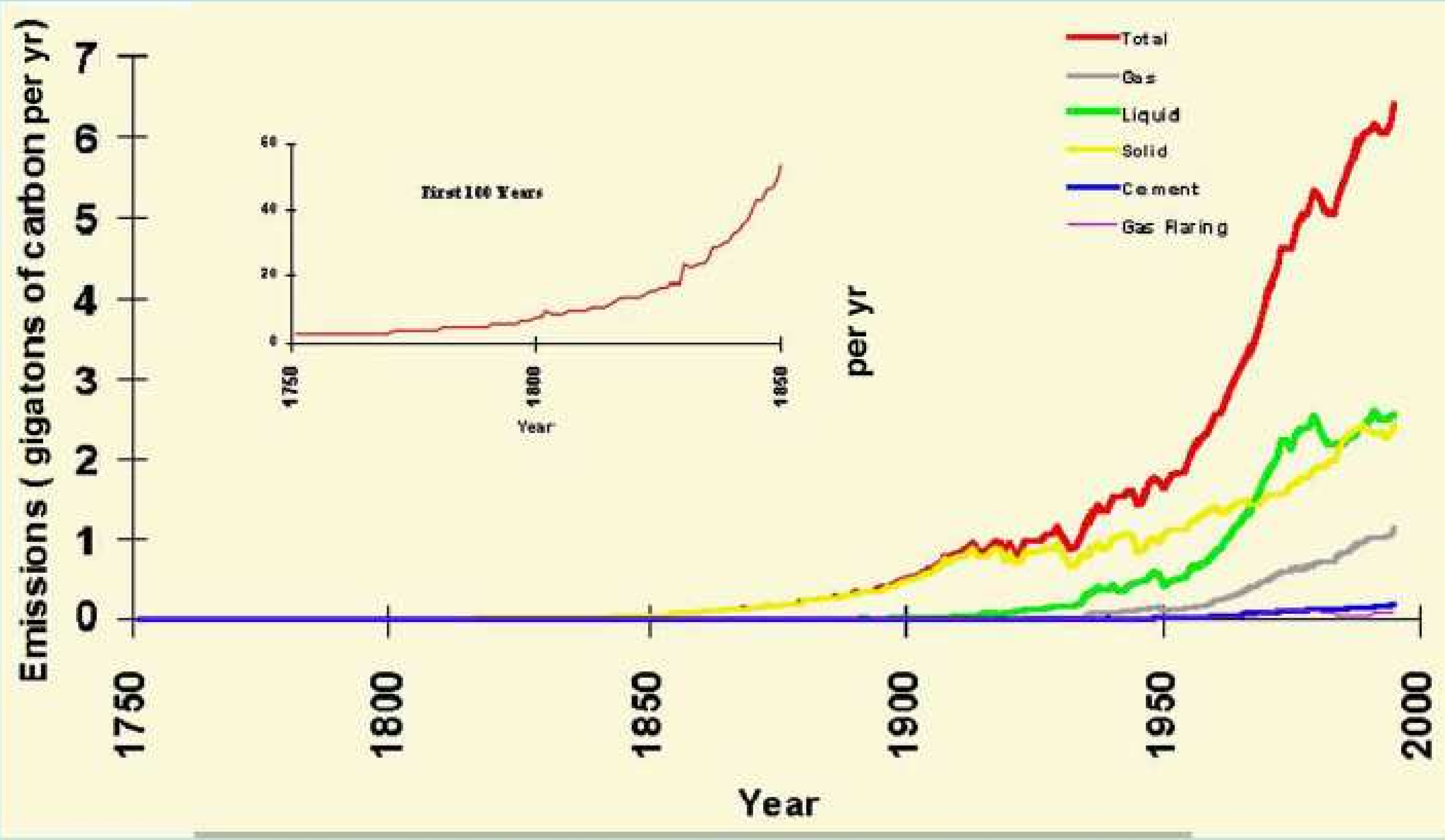


Image courtesy of DOE

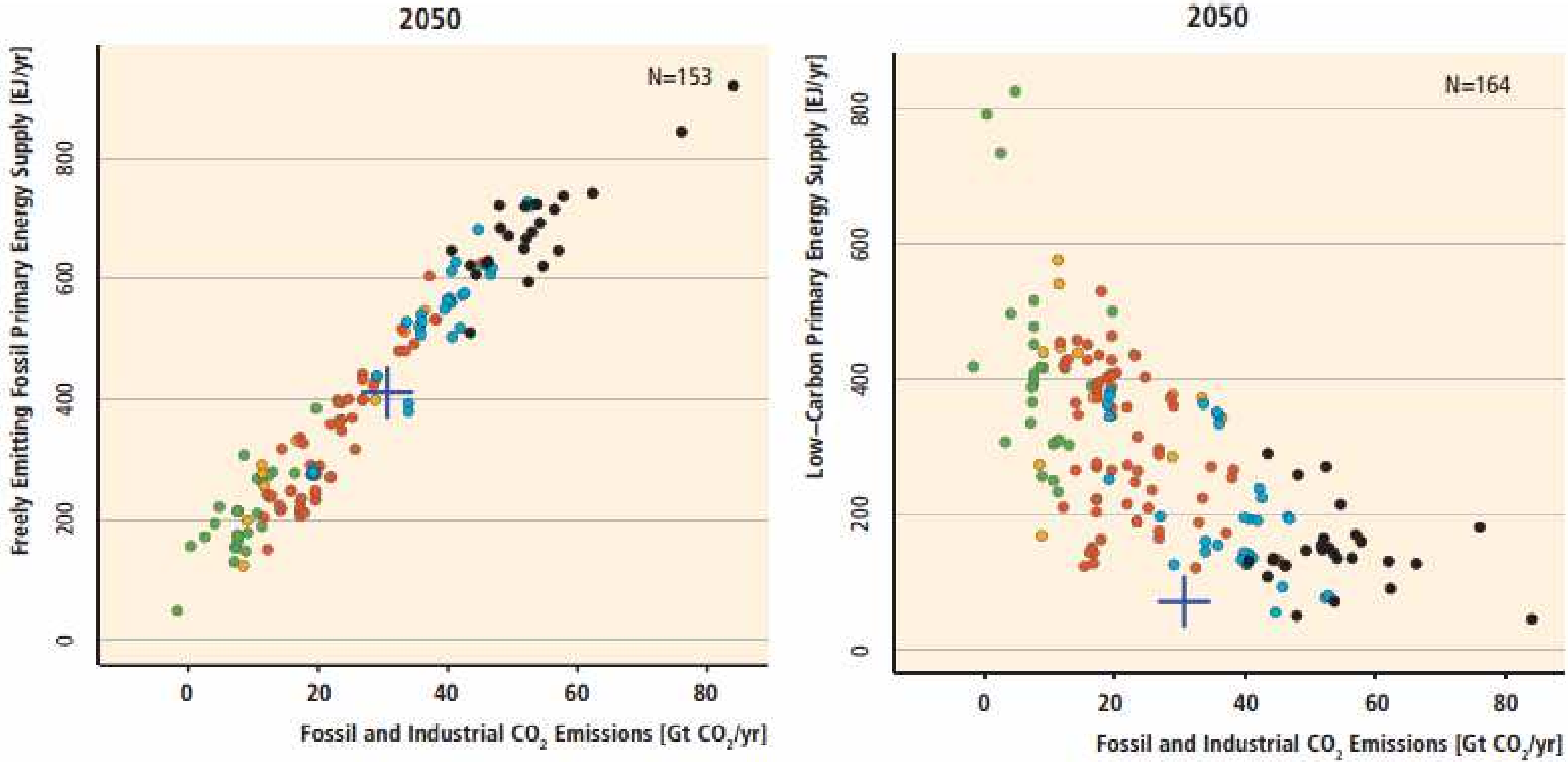
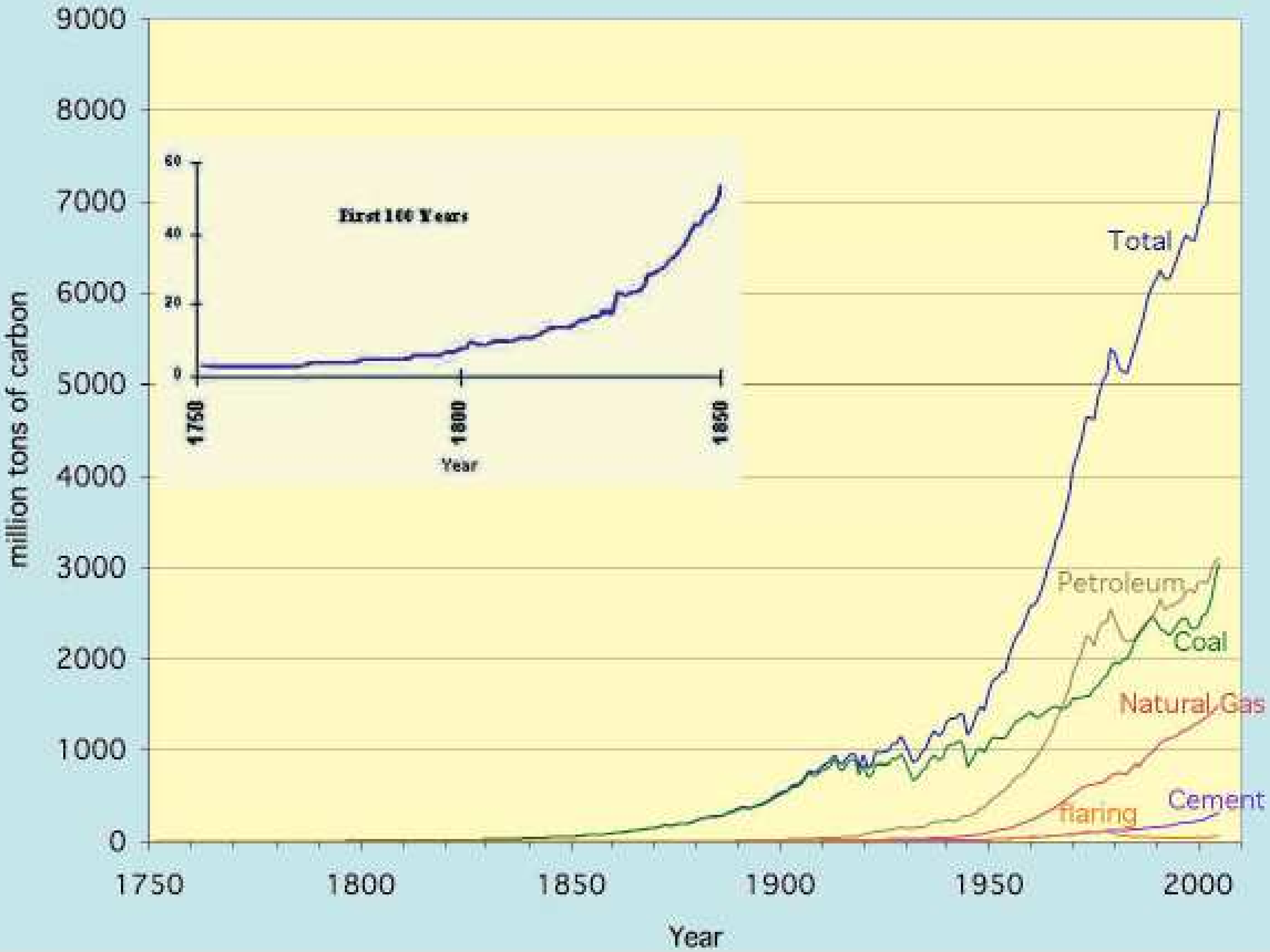


Figure TS.10.2 | Global freely emitting fossil fuel (left panel; direct equivalent) and low-carbon primary energy supply (right panel; direct equivalent) in 164 long-term scenarios in 2050 as a function of fossil and industrial CO_2 emissions. Low-carbon energy refers to energy from RE, fossil energy with CCS, and nuclear energy. Colour coding is based on categories of atmospheric CO_2 concentration level in 2100. The blue crossed lines show the relationship in 2007. Pearson's correlation coefficients for the two data sets are 0.97 (freely emitting fossil) and -0.68 (low-carbon energy). For data reporting reasons, only 153 scenarios and 161 scenarios are included in the freely-emitting fossil and low-carbon primary energy results shown here, respectively, as opposed to the full set of 164 scenarios. [Figure 10.4, right panel, Figure 10.5, right panel]

Anthropogenic CO_2 emissions through 2005



Methane Measurements

NOAA CMDL Carbon Cycle Greenhouse Gases

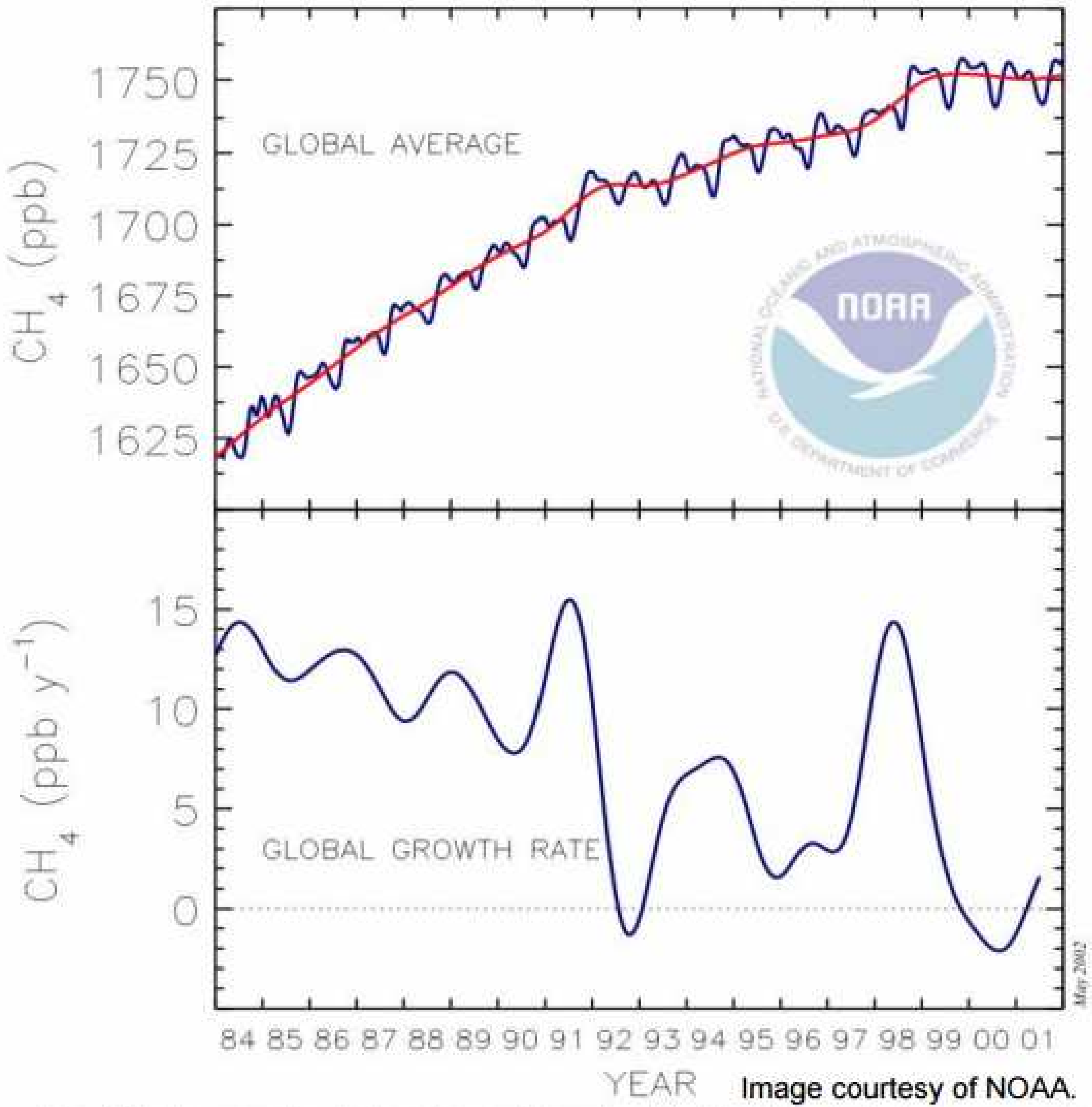
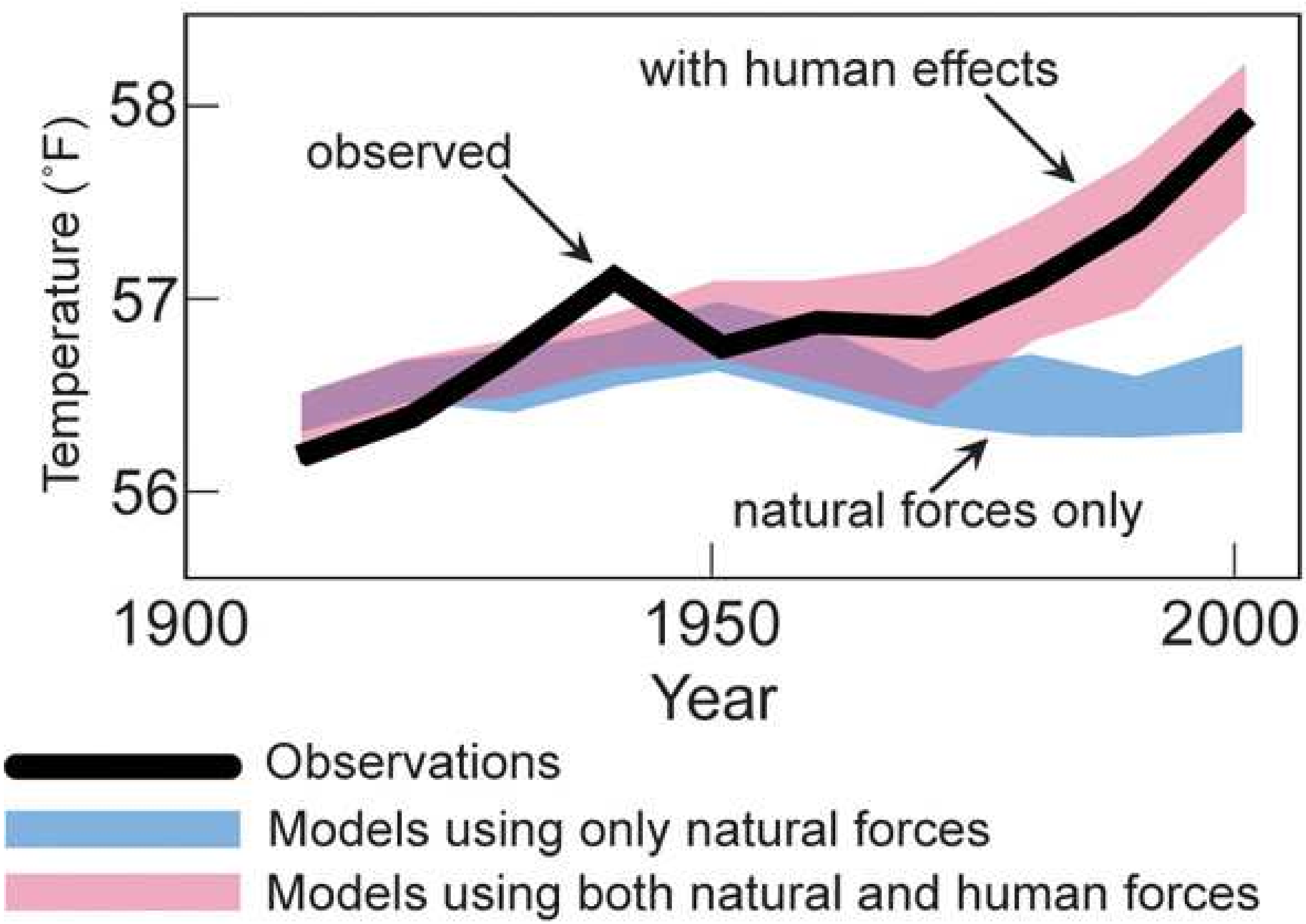
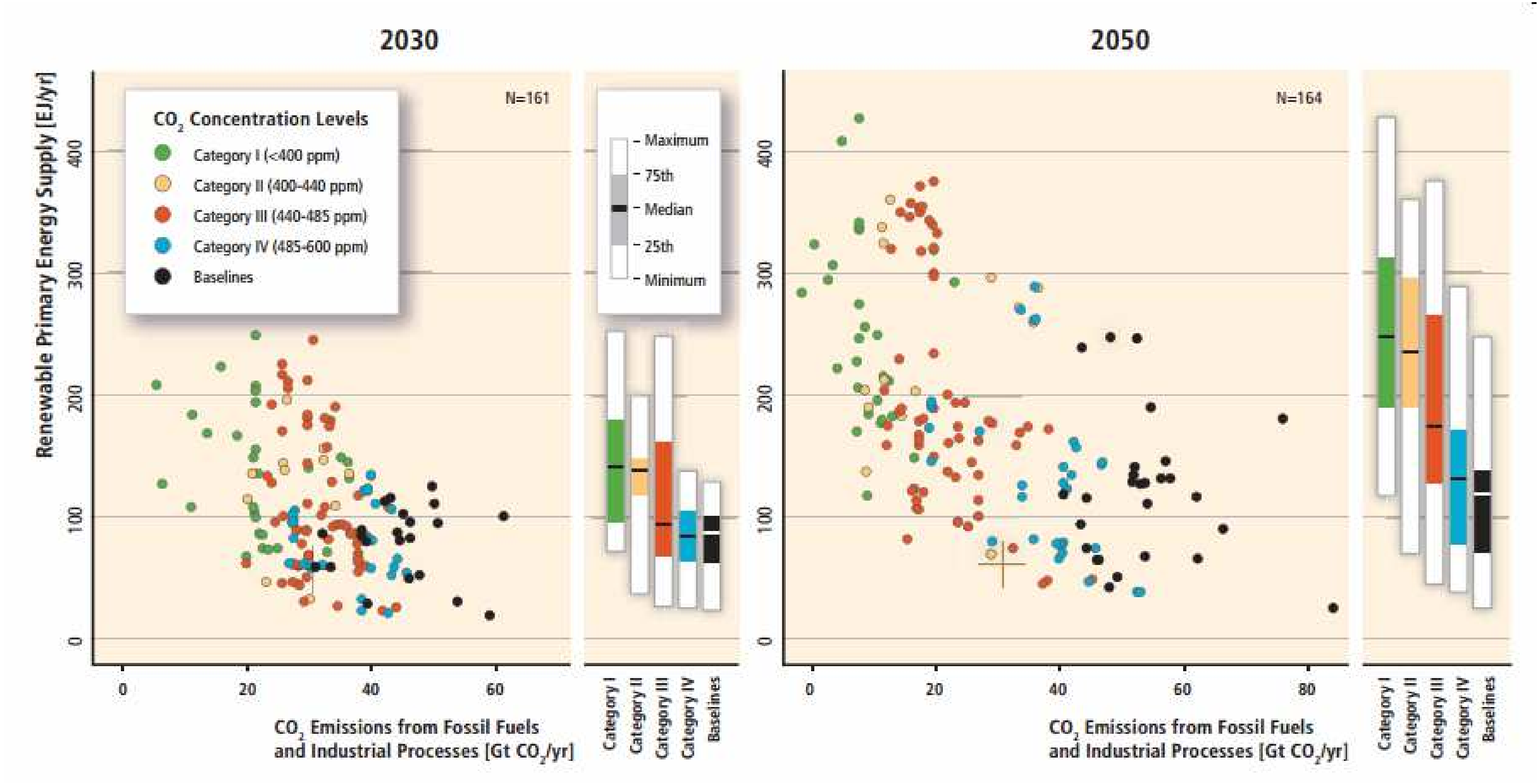


Image courtesy of NOAA.

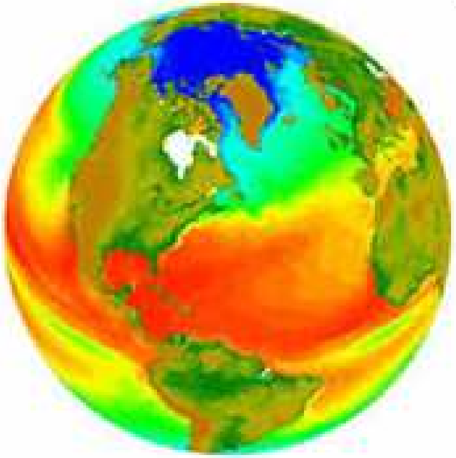
Top: Global average atmospheric methane mixing ratios (blue line) determined using measurements from the NOAA CMDL cooperative air sampling network. The red line represents the long-term trend.

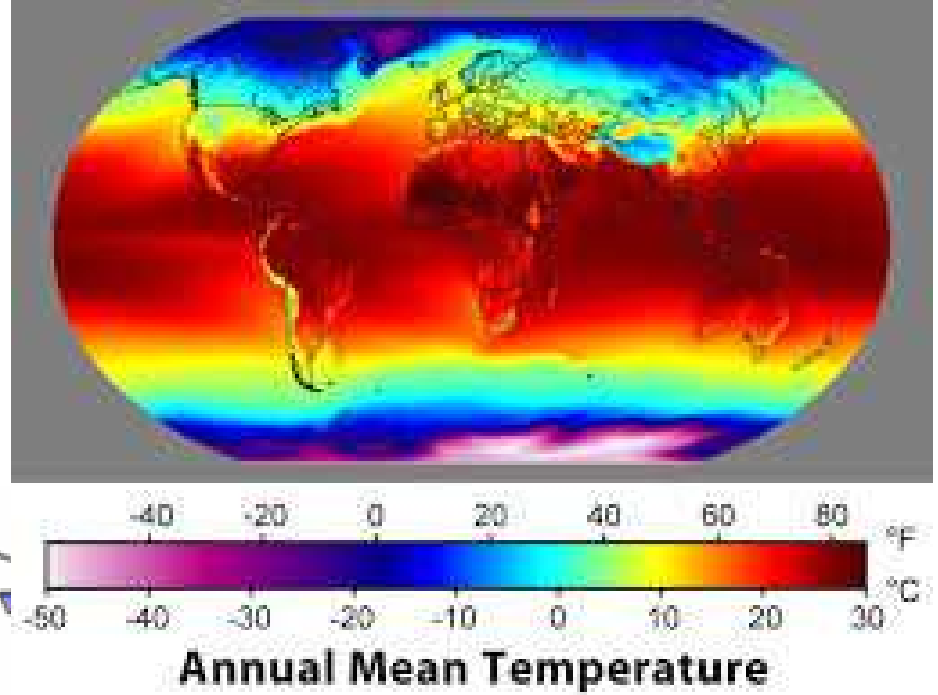


http://climatechange.lta.org/get-started/learn/co2-methane-greenhouse-effect/

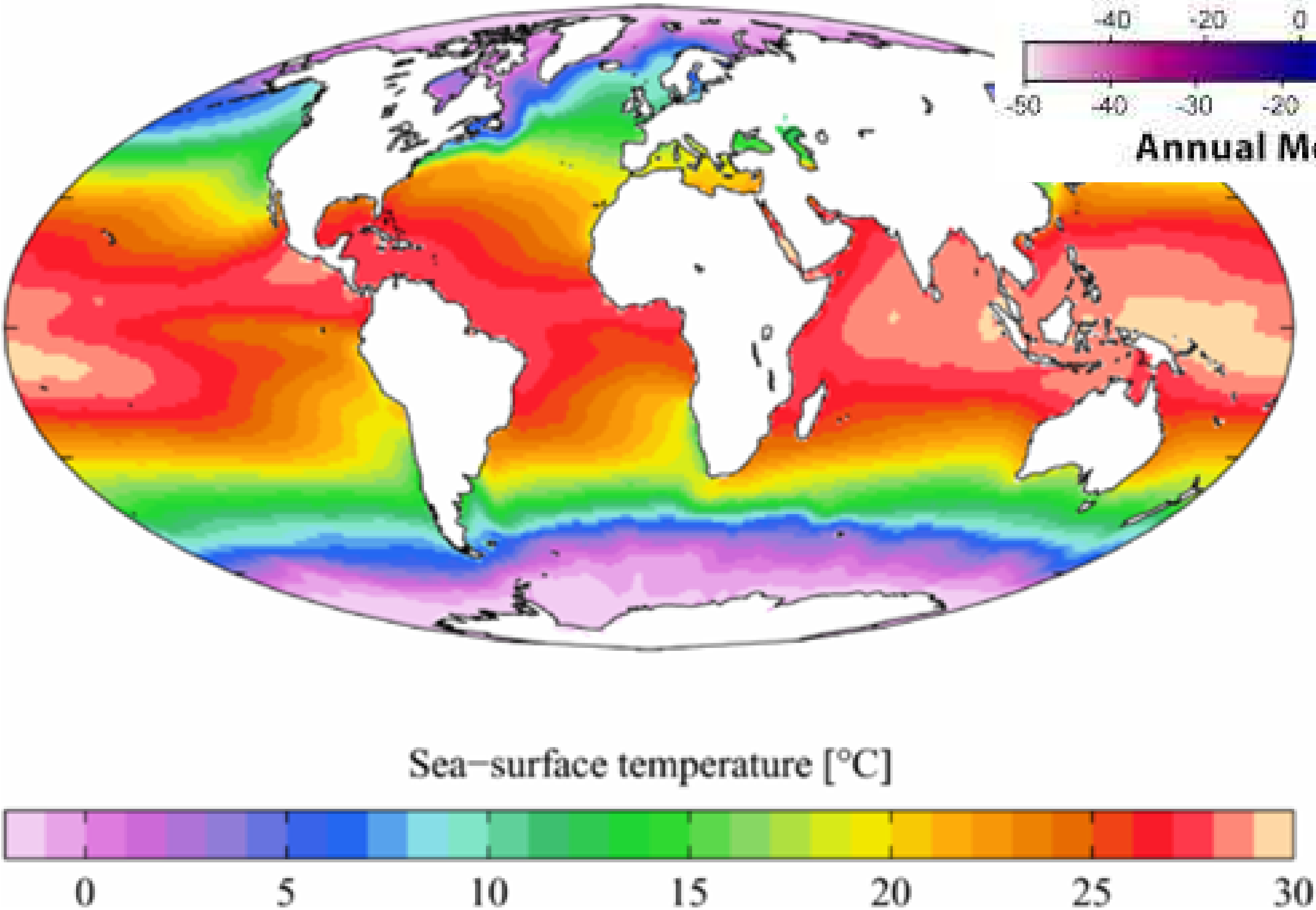


www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/SRREN_FD_SPM_final.pdf





-40 -20 0 20 40 60 80 °F
°C
-50 -40 -30 -20 -10 0 10 20 30
Annual Mean Temperature



Sea−surface temperature [°C]
0 5 10 15 20 25 30

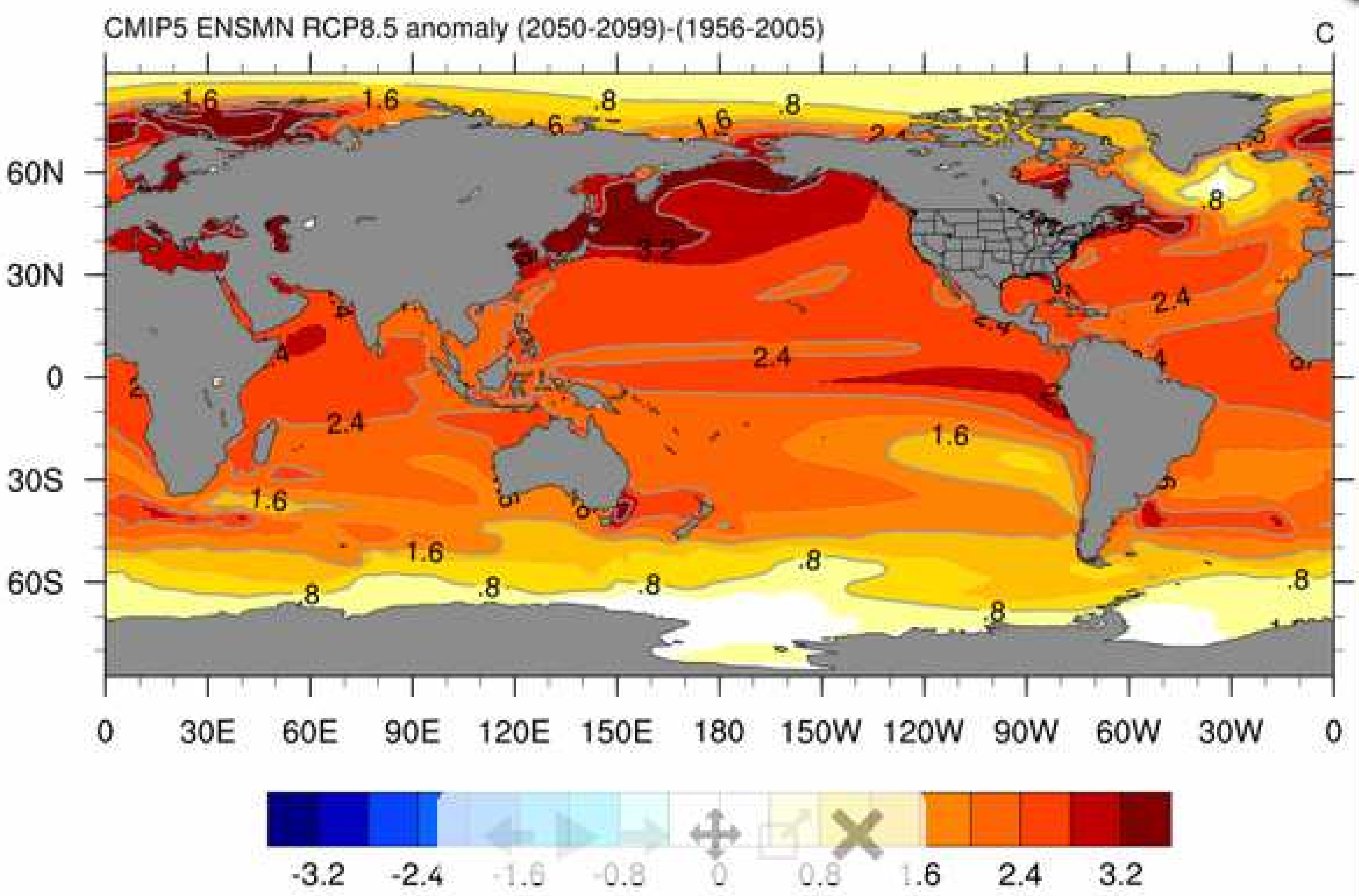


Image 1 of 1

Sample map showing changes in the mean sea surface temperature for the latter half of the 21st century. The ocean warming is greatest in the northern Hemisphere where changes are more than 3 celsius. Weaker warming is seen in the North Atlantic and the Southern Ocean.

Earth System Research Laboratory
Physical Sciences Division

https://www.esrl.noaa.gov/psd/ipcc/

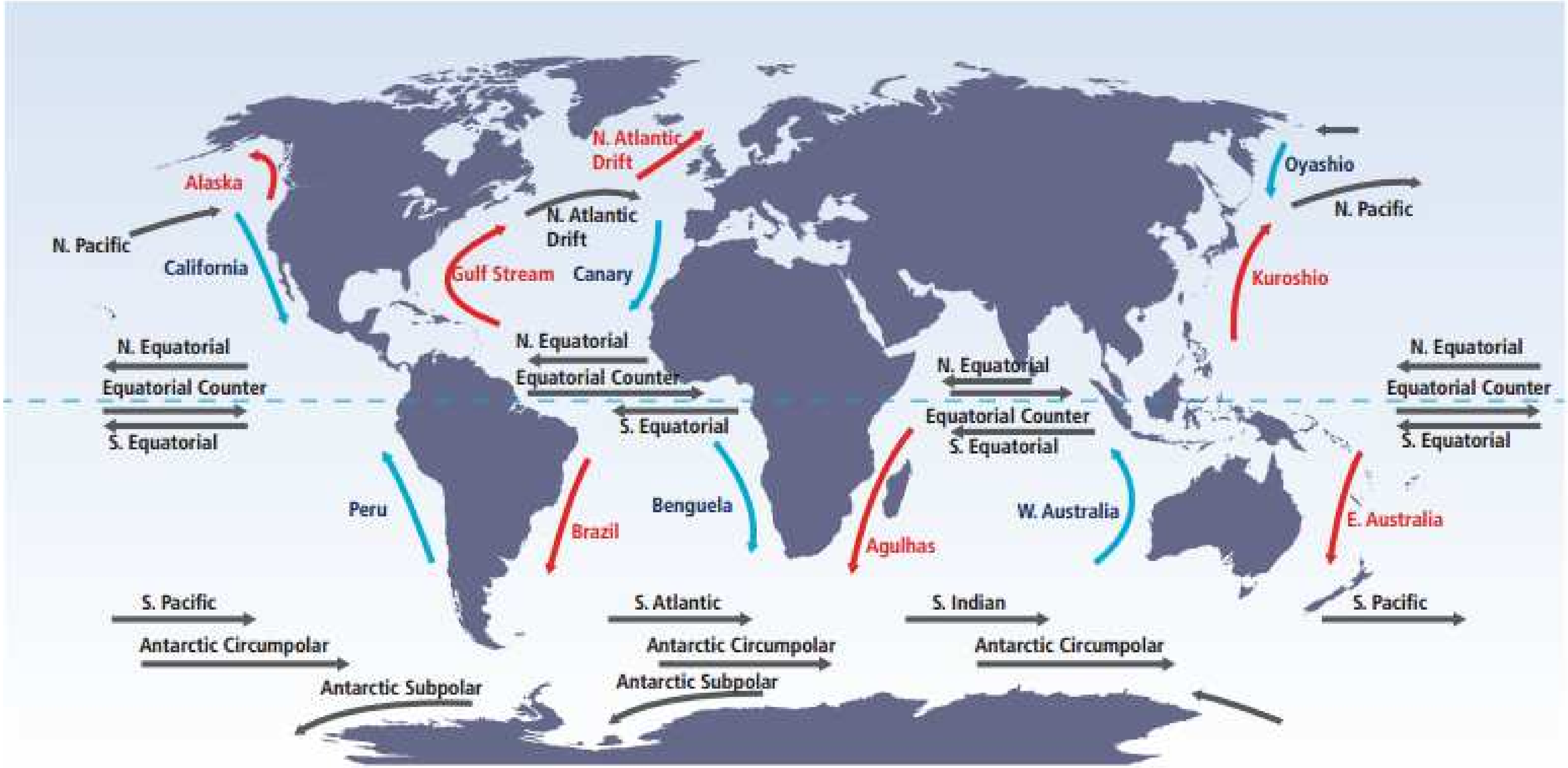


Figure TS.6.1d | Global distribution of various ocean energy resources: (d) Ocean currents. [Figure 6.3]

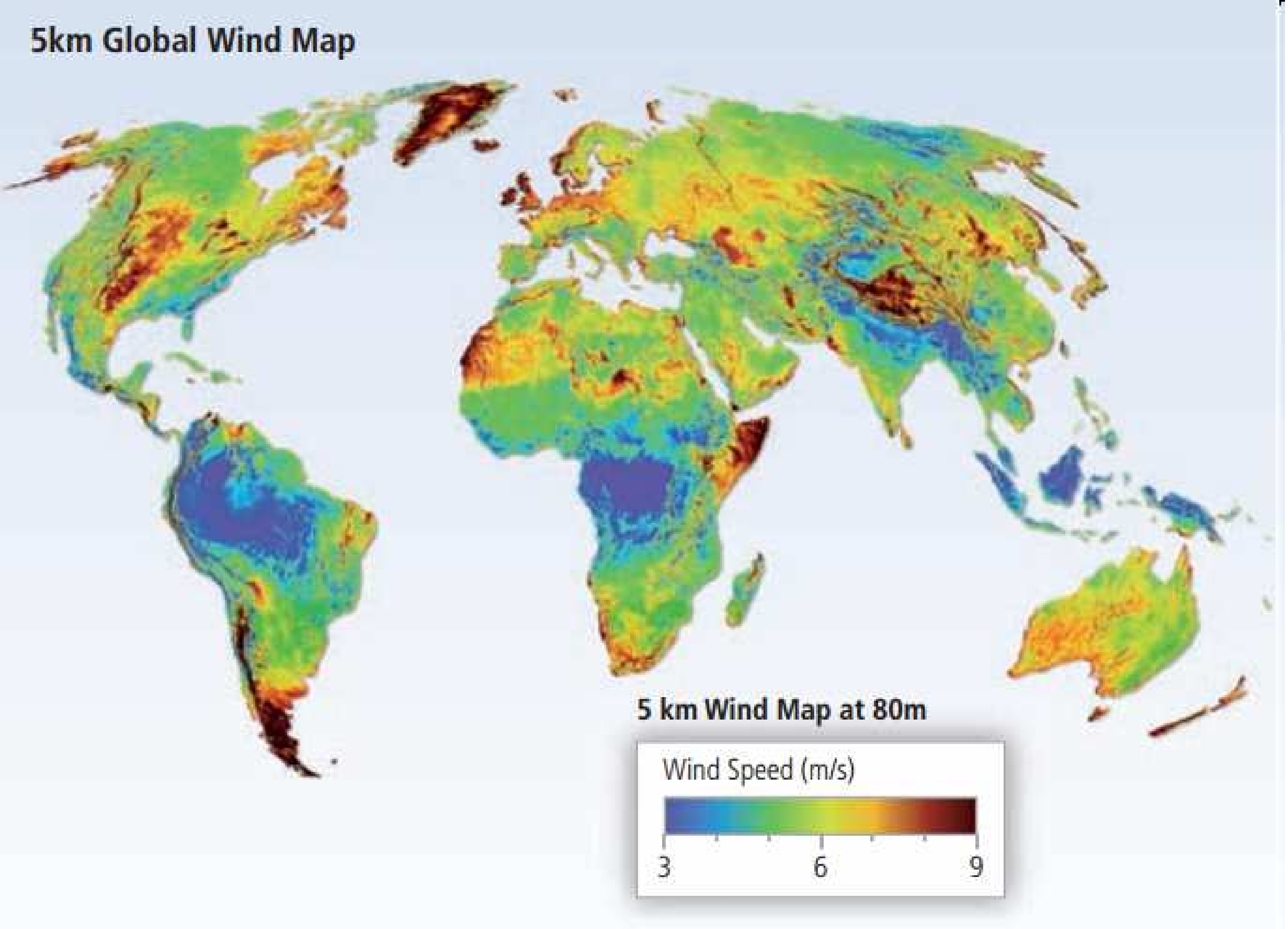
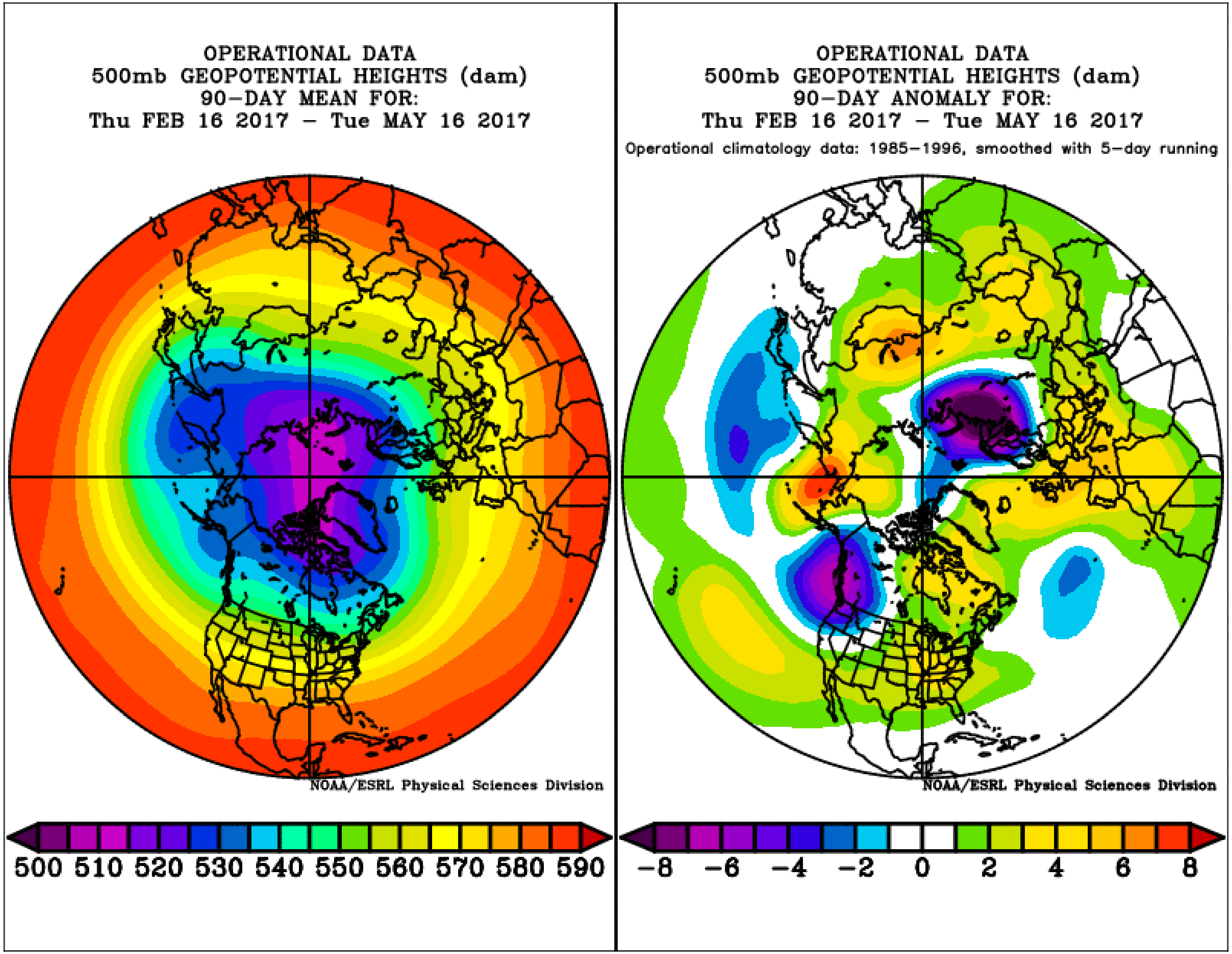
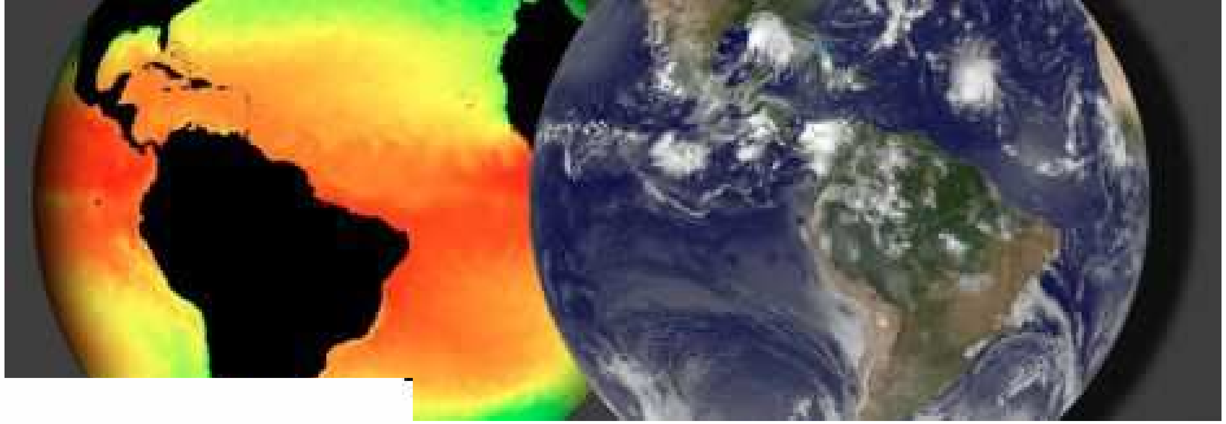


Figure TS.7.1 | Example global wind resource map with 5 km x 5 km resolution. [Figure 7.1]

Global Circulation: Means & Anomalies



www.esrl.noaa.gov/psd/map/



2. Model setup

The model used in the present study, PEQUOD, solves the forced dissipative baroclinic quasi-geostrophic (QG) potential vorticity (PV) equation on a beta plane in a square basin (e.g., Berloff, 2005a, 2005b). The main setup is similar to the one used in Porta Mana and Zanna (2014, PMZ14). The model is composed of three isopycnal layers with thicknesses H_m (with $m = 1, 2, 3$ for the upper, middle and bottom layer, respectively). For each layer m, the prognostic equation solved for the potential vorticity q is given by

$$\frac{Dq_m}{Dt} = \frac{\partial q_m}{\partial t} + \mathbf{u}_m \cdot \nabla q_m = \mathcal{D}_m + F_m^{\text{wind}} + F_m^{\text{eddy}}, \tag{1}$$

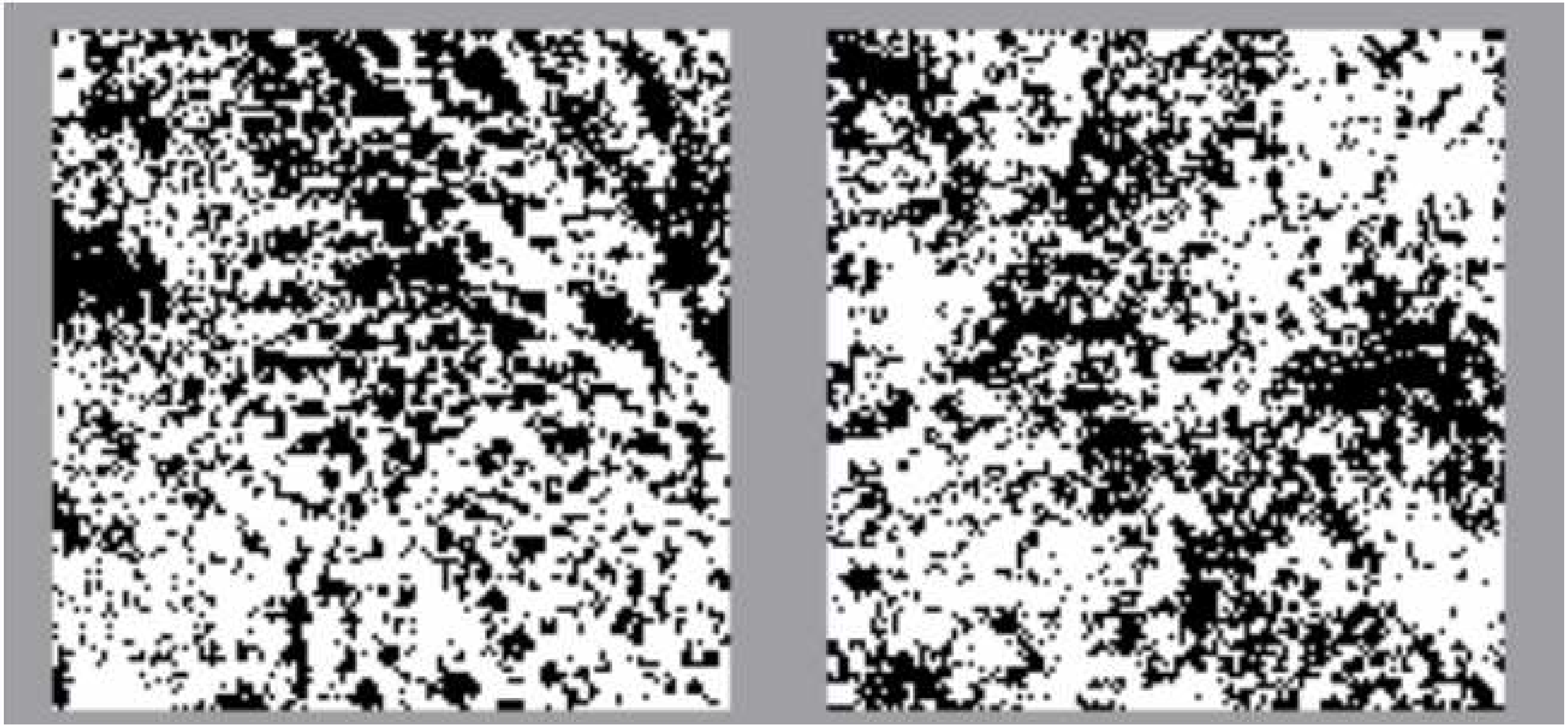
with

$$q_m = \nabla^2 \psi_m + \beta y + \frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{f_0^2}{N^2}\frac{\partial \psi_m}{\partial z}\right). \tag{2}$$

The planetary vorticity is $f = f_0 + \beta y$, $\nabla = (\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y})$ is the horizontal gradient, N is the Brunt–Väisälä frequency of the mean density stratification and ψ is the streamfunction derived from the non-divergent velocity such that $\mathbf{u}_m = (-\frac{\partial \psi_m}{\partial y}, \frac{\partial \psi_m}{\partial x})$.

www2.physics.ox.ac.uk/research/climate-and-ocean-physics

Комп’ютерне моделювання хмарності 0,6 бала



Зображення, отримане з супутника   Результат імітаційного моделювання

Поле розміру 200 км* 200км
Роздільна здатність 1 км

http://www.earth.ox.ac.uk/~laurez/files/Zanna-et-al-2017.pdf

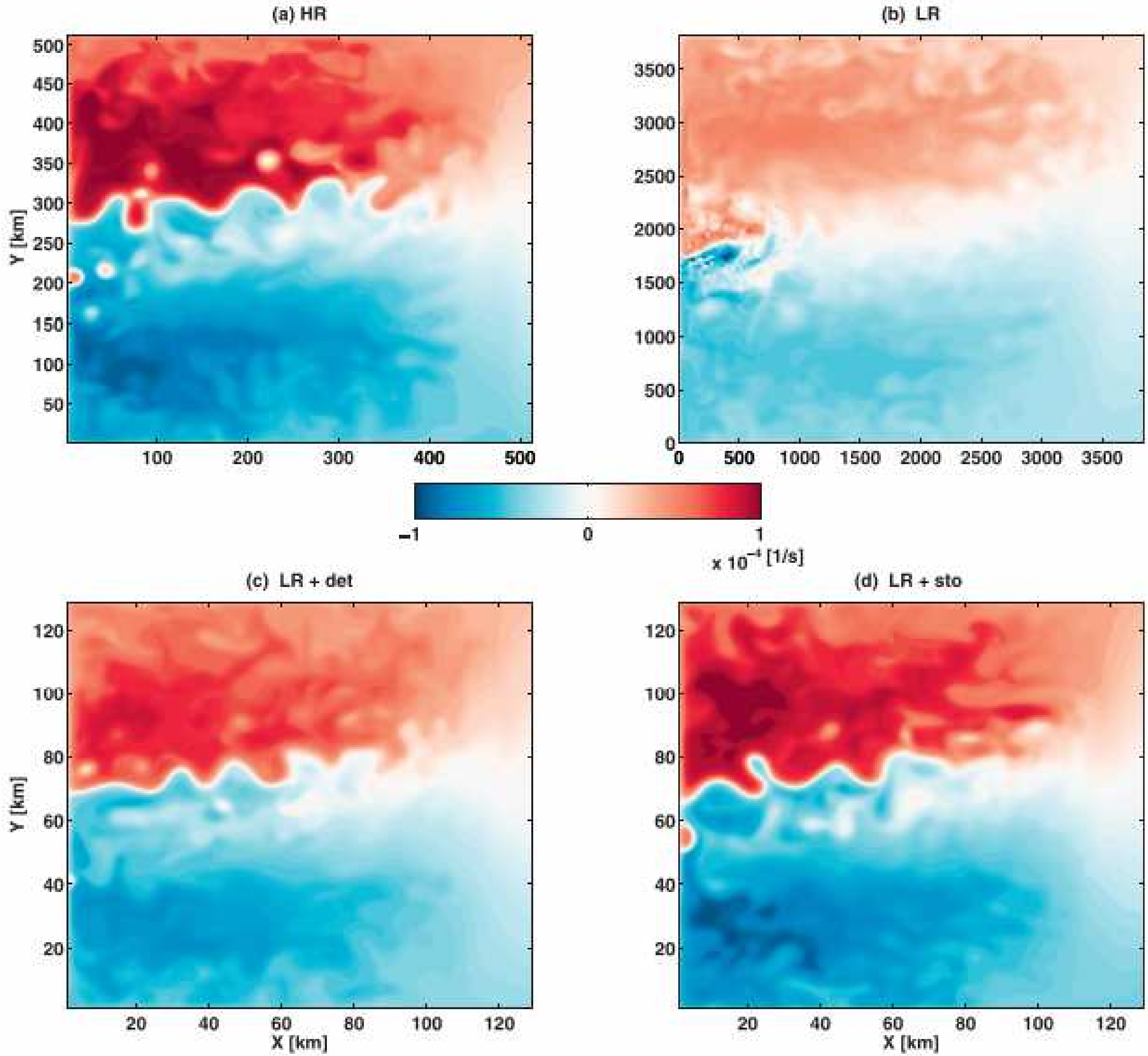
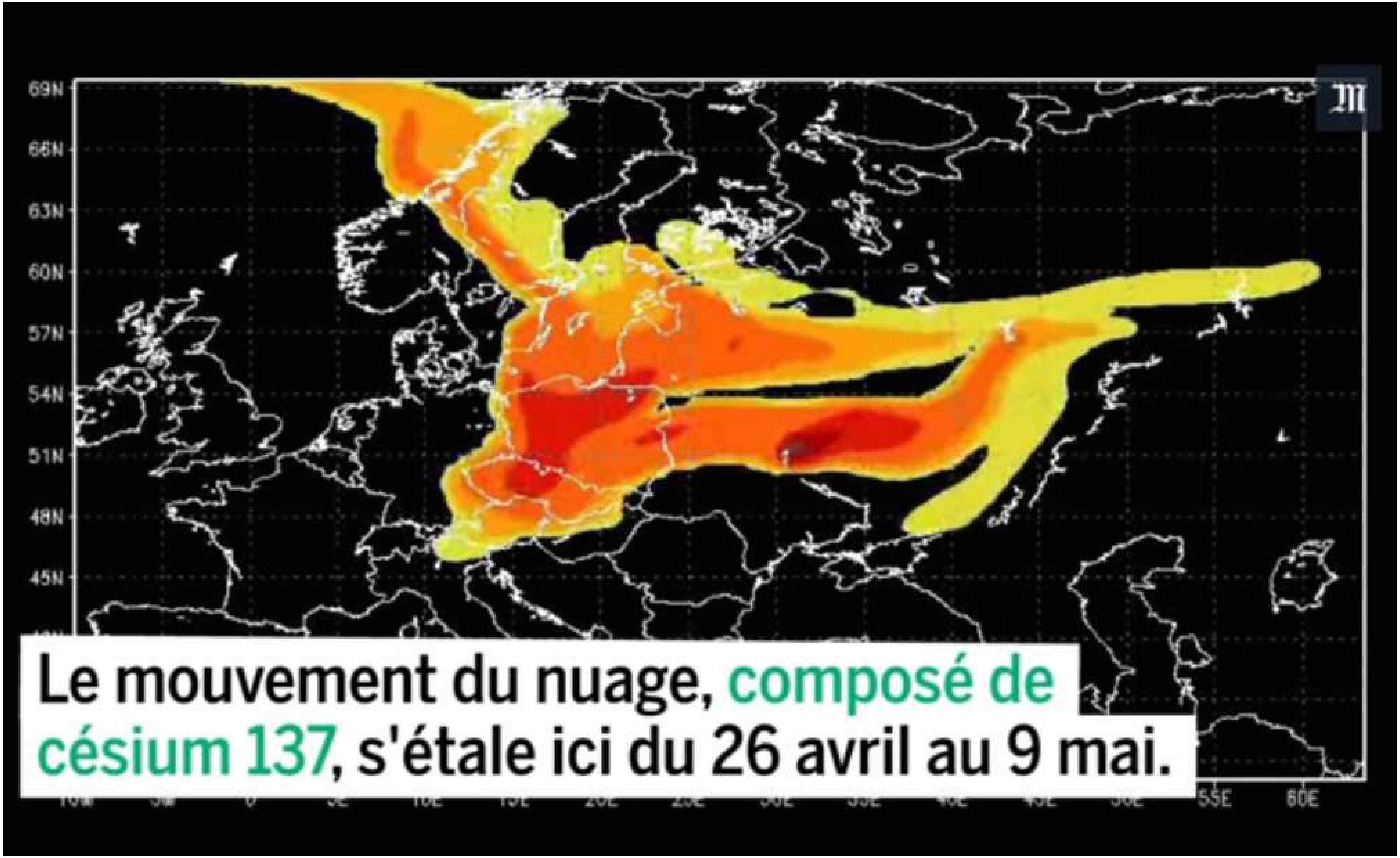


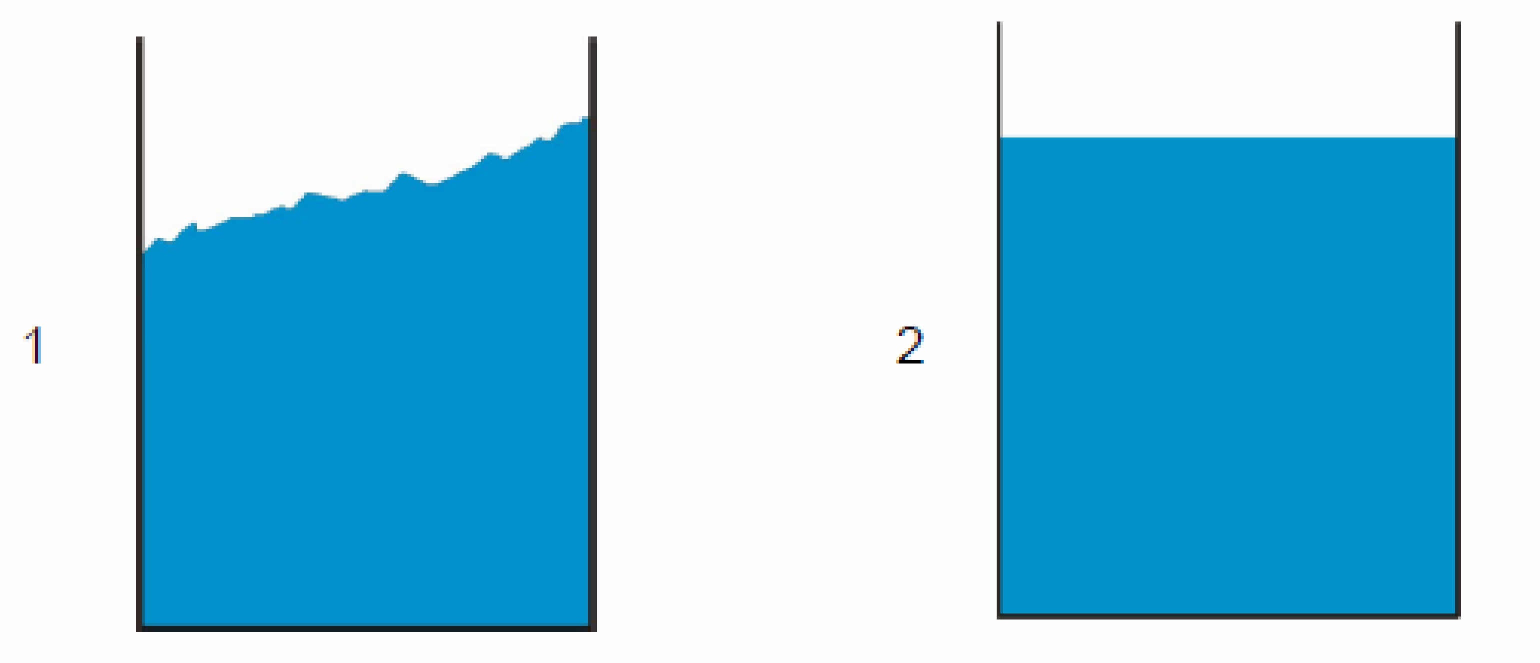
Fig. 2. Snapshots of potential vorticity, q, in the upper layer for the model runs at horizontal resolutions of (a) 7.5 km (eddy resolving model), (b) 30 km ting model) with $F_m^{eddy} = 0$; (c) 30 km (eddy permitting model) with the deterministic parametrization, $F_m^{eddy} \neq 0$; (d) 30 km (eddy permitting model) with

Поширення радіоактивної хмари після Чорнобильської катастрофи

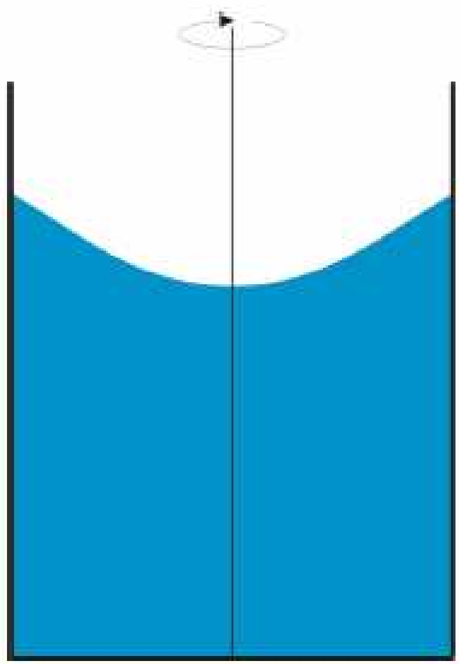


La progression du nuage de Tchernobyl en une minute: youtu.be/k7BamEttHXo

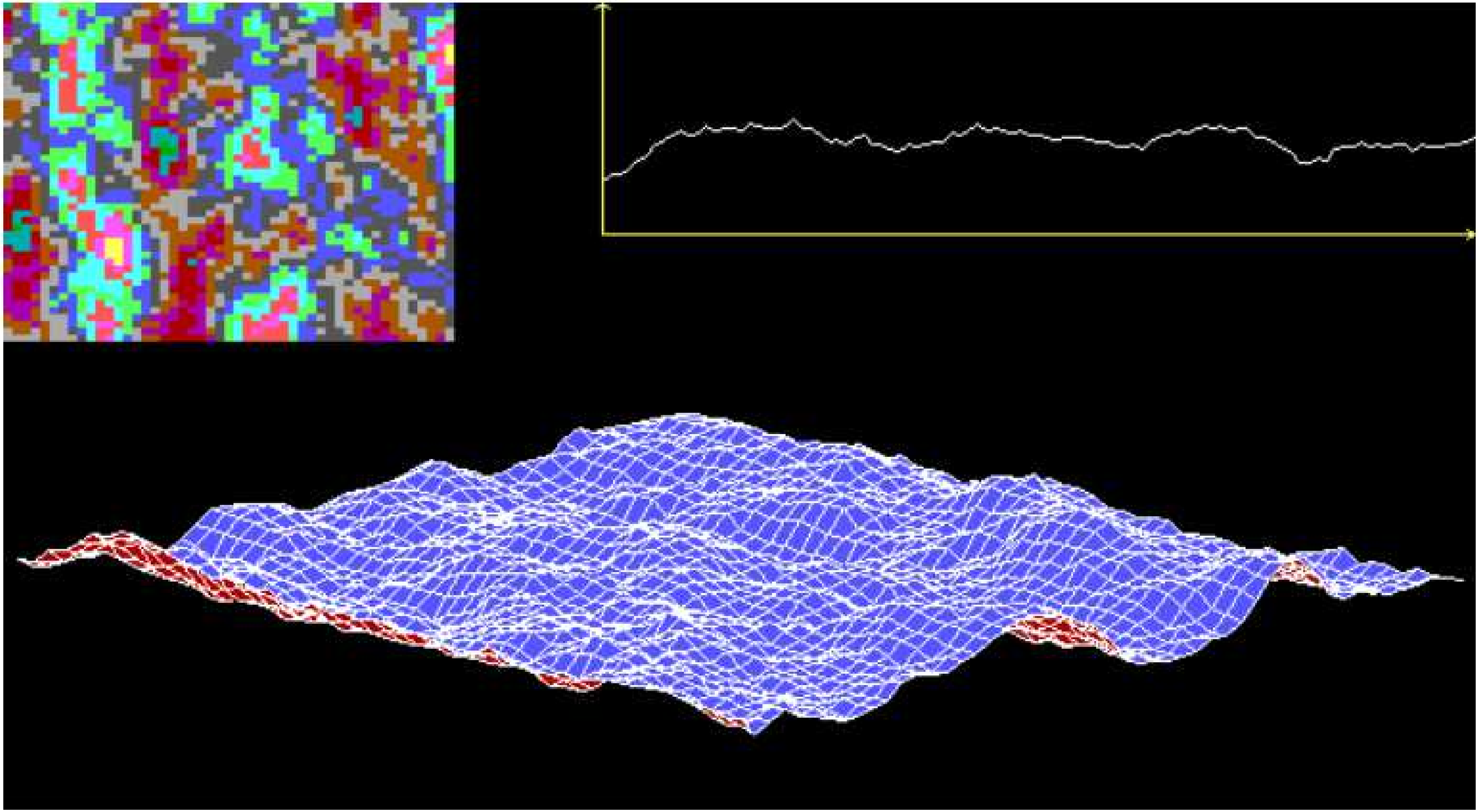
Рівень рідини ...



при обертанні



Модель морської поверхні з хвилями, створеними вітром



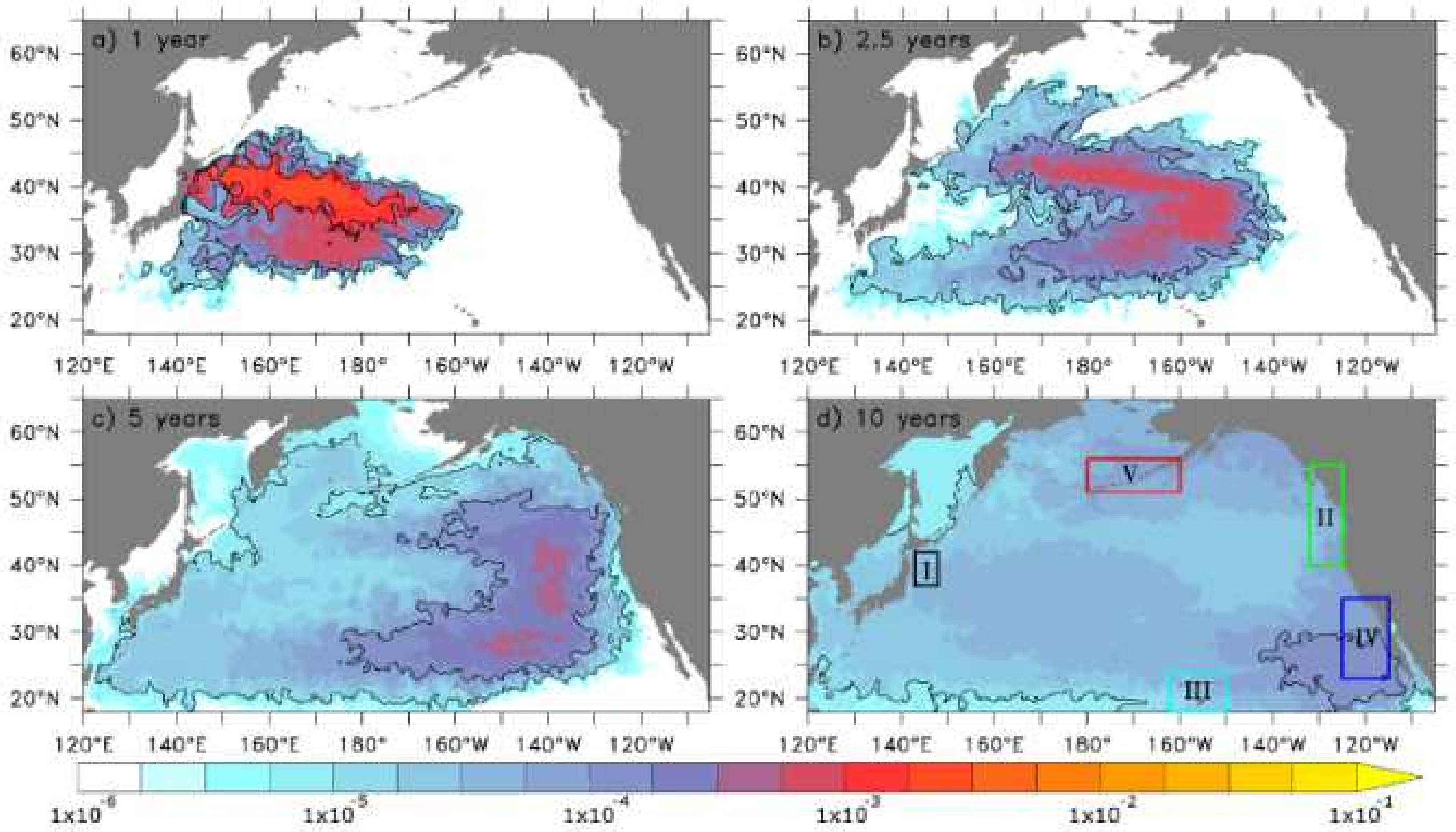
Environmental Research Letters

LETTER • OPEN ACCESS • IOPSELECT

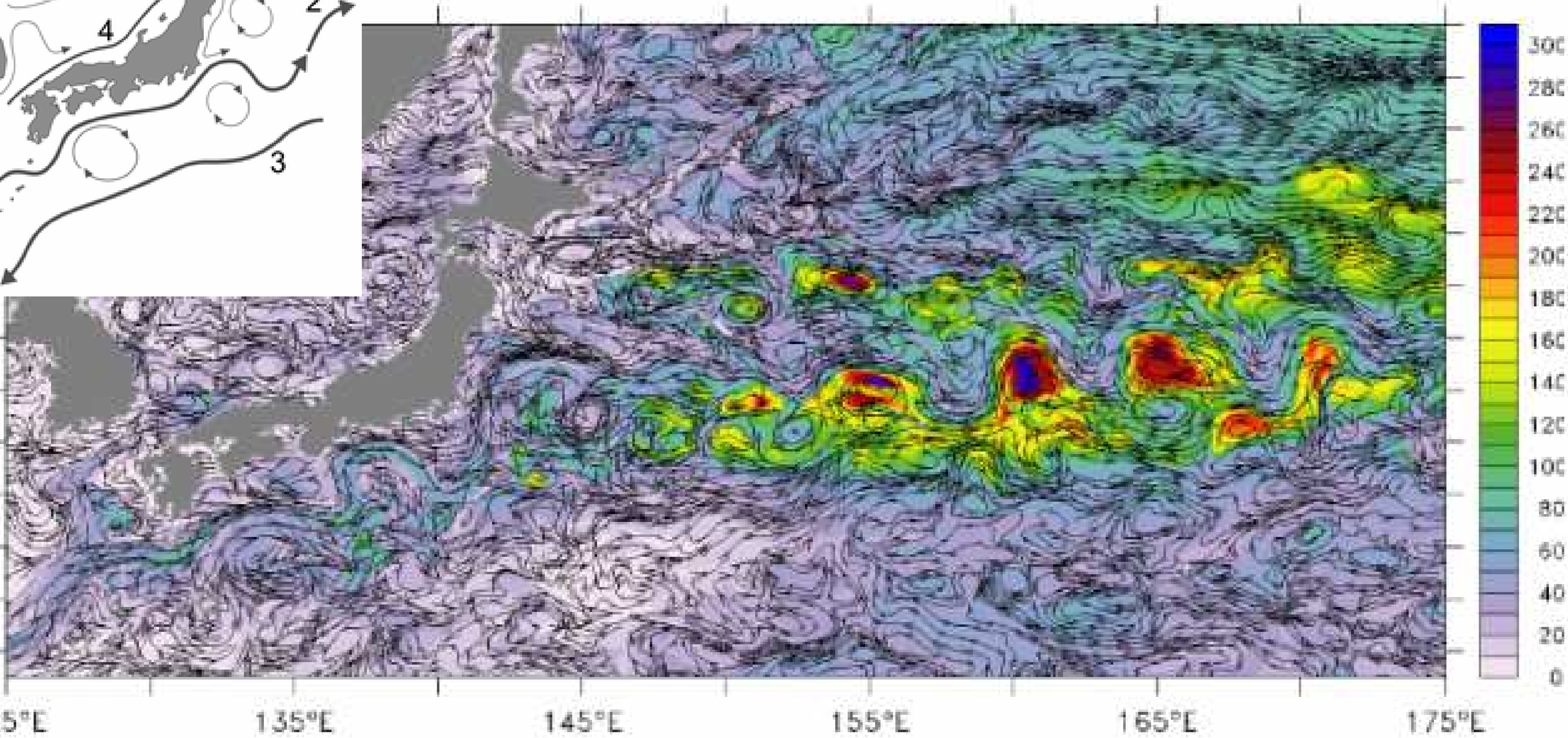
Model simulations on the long-term dispersal of ^{137}Cs released into the Pacific Ocean off Fukushima

Erik Behrens[1], Franziska U Schwarzkopf[1], Joke F Lübbecke[2] and Claus W Böning[1]

Published 9 July 2012 • 2012 IOP Publishing Ltd
Environmental Research Letters, Volume 7, Number 3



Течія Куросіо несе радіоактивні ізотопи після аварії на АЕС Фукусіма

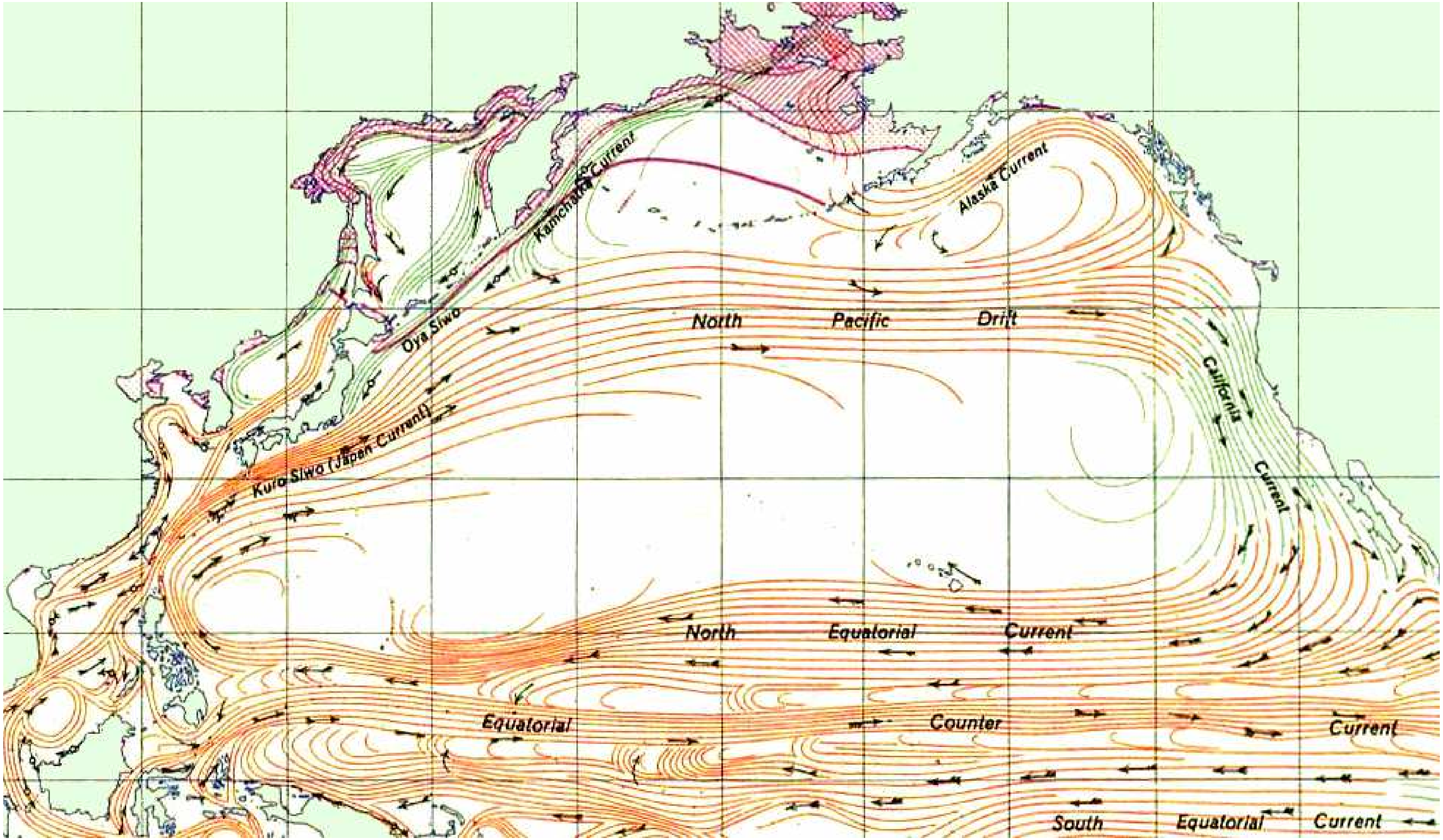


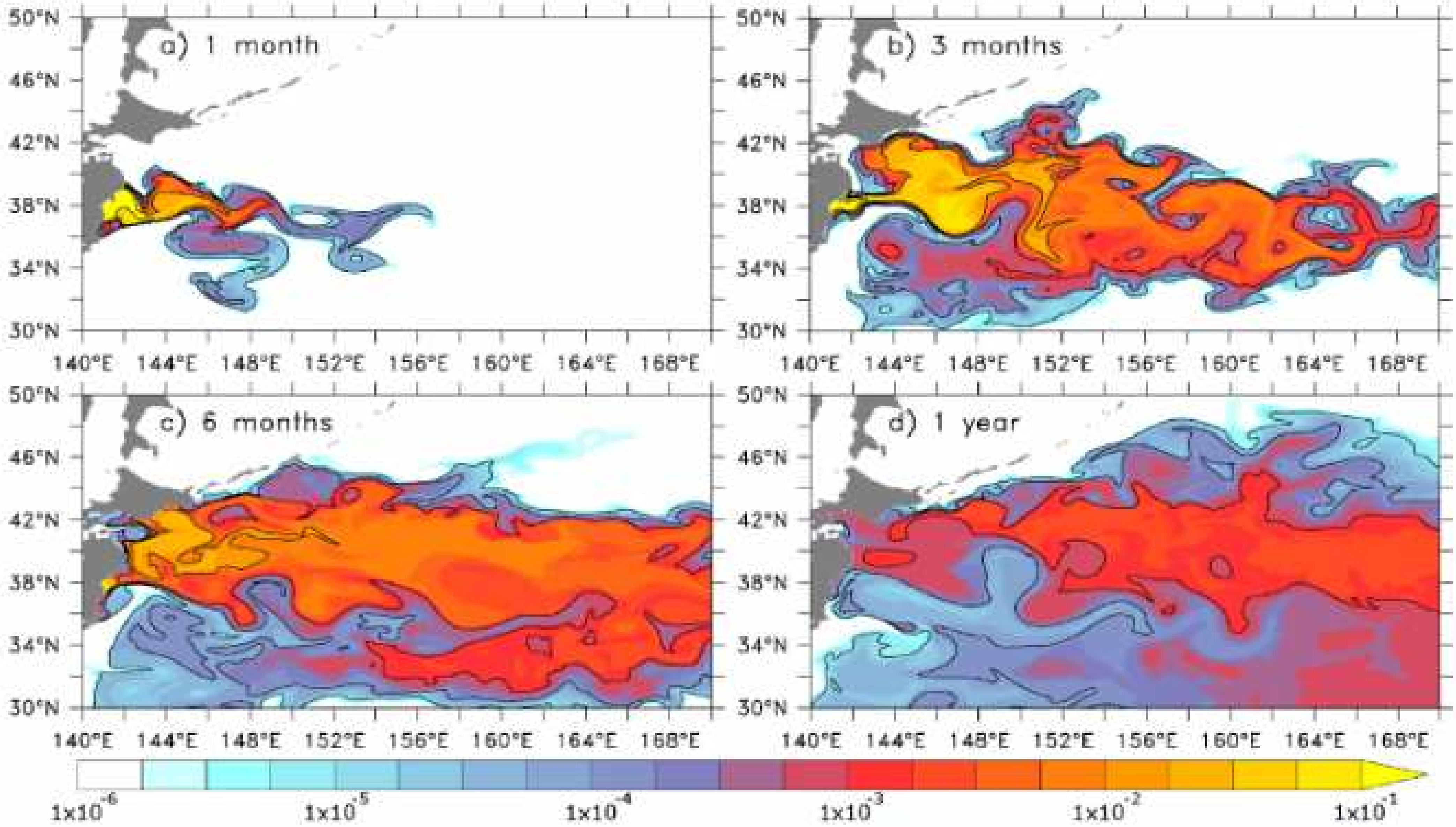
Zoom In Zoom Out Reset image size

Figure 1. Snapshot of the high-resolution (0.1°) model field, taken at the end of the tracer injection period (end of April, model year 0): shading indicates the thickness of the surface mixed layer (in m); contouring illustrates the surface velocity field indicated by local stream lines.

http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/7/3/034004

Течії на півночі Тихого океану

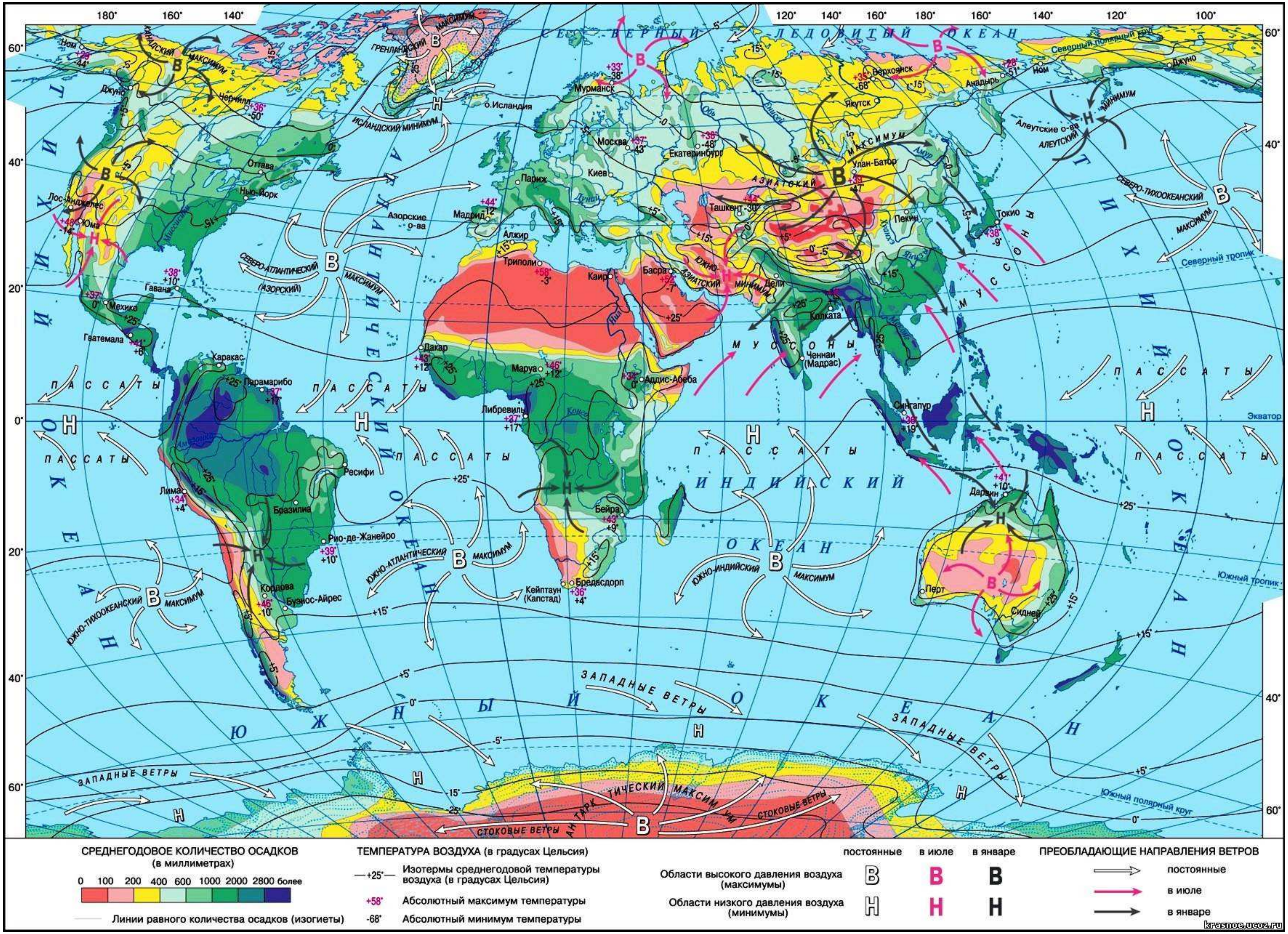




Zoom In Zoom Out Reset image size

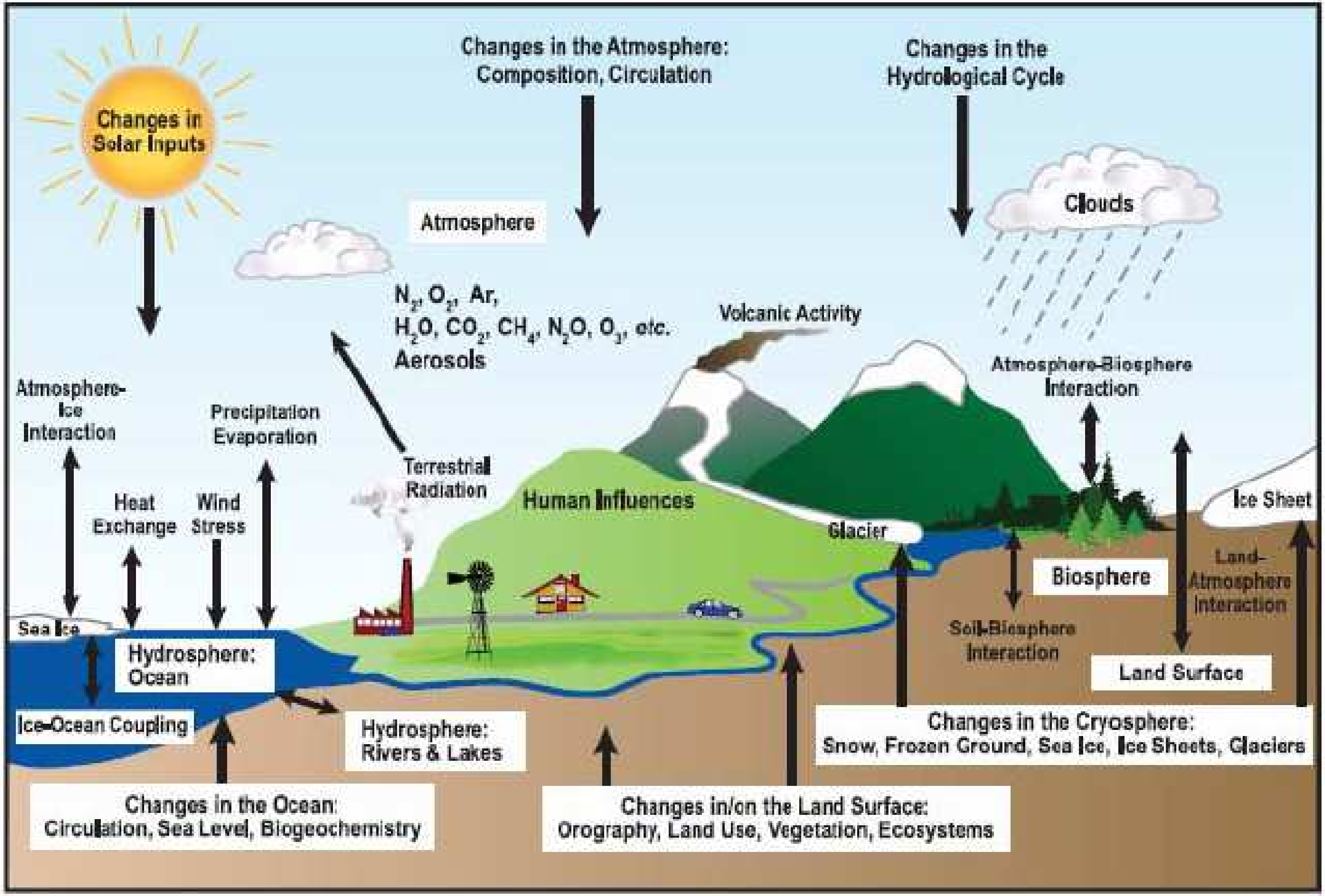
Figure 3. Sequence of relative surface tracer concentration during the first year from the 0.1° model simulation; contour lines mark power of 10 intervals.

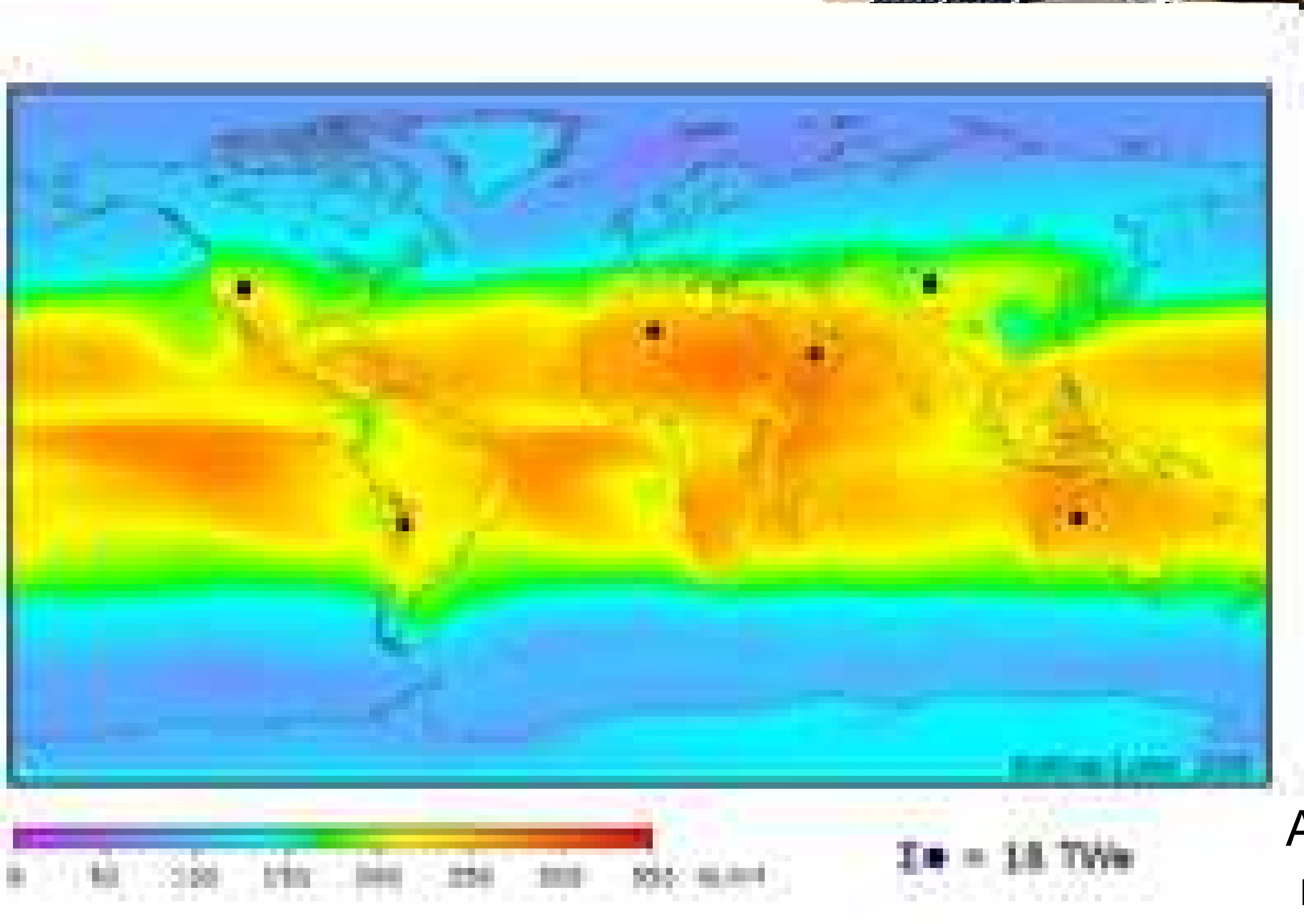
youtu.be/vAU00aL-_ic



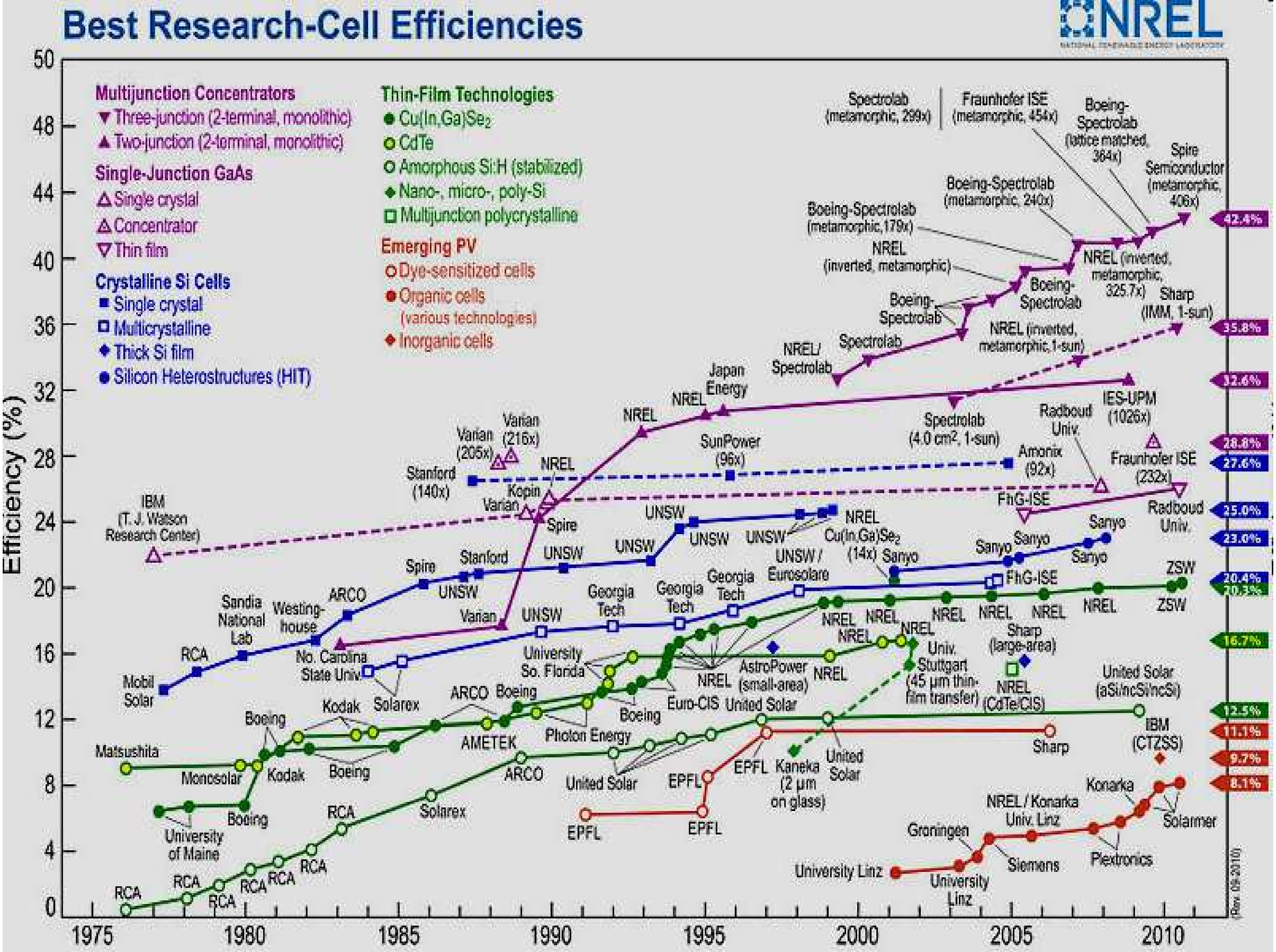
СЕВЕРНЫЙ ЛЕДОВИТЫЙ ОКЕАН
ТИХИЙ ОКЕАН
АТЛАНТИЧЕСКИЙ ОКЕАН
ИНДИЙСКИЙ ОКЕАН
ОКЕАН
ЮЖНЫЙ ОКЕАН
ПАССАТЫ
МУССОНЫ
ЗАПАДНЫЕ ВЕТРЫ
СТОКОВЫЕ ВЕТРЫ
ГРЕНЛАНДСКИЙ МАКСИМУМ
КАНАДСКИЙ МАКСИМУМ
ИСЛАНДСКИЙ МИНИМУМ
АЗИАТСКИЙ МАКСИМУМ
ЮЖНО-АЗИАТСКИЙ МИНИМУМ
АЛЕУТСКИЙ МИНИМУМ
СЕВЕРО-ТИХООКЕАНСКИЙ МАКСИМУМ
СЕВЕРО-АТЛАНТИЧЕСКИЙ (АЗОРСКИЙ) МАКСИМУМ
ЮЖНО-АТЛАНТИЧЕСКИЙ МАКСИМУМ
ЮЖНО-ИНДИЙСКИЙ МАКСИМУМ
ЮЖНО-ТИХООКЕАНСКИЙ МАКСИМУМ
АНТАРКТИЧЕСКИЙ МАКСИМУМ
Экватор
Северный тропик
Южный тропик
Северный полярный круг
Южный полярный круг
о.Исландия
Азорские о-ва
Алеутские о-ва
Ном
Джуно
Черчилл
Оттава
Нью-Йорк
Лос-Анджелес
Юма
Гавана
Мехико
Гватемала
Каракас
Парамарибо
Лима
Бразилиа
Ресифи
Рио-де-Жанейро
Кордова
Буэнос-Айрес
Мурманск
Москва
Екатеринбург
Киев
Париж
Мадрид
Алжир
Триполи
Каир
Басра
Ташкент
Дели
Колката
Ченнаи (Мадрас)
Дакар
Маруа
Аддис-Абеба
Либревиль
Бейра
Кейптаун (Капстад)
Бредасдорп
Верхоянск
Якутск
Анадырь
Улан-Батор
Пекин
Токио
Сингапур
Дарвин
Перт
Сидней
СРЕДНЕГОДОВОЕ КОЛИЧЕСТВО ОСАДКОВ (в миллиметрах)
0 100 200 400 600 1000 2000 2800 более
Линии равного количества осадков (изогиеты)
ТЕМПЕРАТУРА ВОЗДУХА (в градусах Цельсия)
+25° Изотермы среднегодовой температуры воздуха (в градусах Цельсия)
+58° Абсолютный максимум температуры
-68° Абсолютный минимум температуры
постоянные
в июле
в январе
Области высокого давления воздуха (максимумы)
Области низкого давления воздуха (минимумы)
ПРЕОБЛАДАЮЩИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ВЕТРОВ
постоянные
в июле
в январе
krasnoe.ucoz.ru

Forcings and Feedbacks in Climate Models





A **solar cell** made from a
 monocrystalline silicon
wafer



Best Research-Cell Efficiencies
NREL
Multijunction Concentrators
Three-junction (2-terminal, monolithic)
Two-junction (2-terminal, monolithic)
Single-Junction GaAs
Single crystal
Concentrator
Thin film
Crystalline Si Cells
Single crystal
Multicrystalline
Thick Si film
Silicon Heterostructures (HIT)
Thin-Film Technologies
Cu(In,Ga)Se2
CdTe
Amorphous Si:H (stabilized)
Nano-, micro-, poly-Si
Multijunction polycrystalline
Emerging PV
Dye-sensitized cells
Organic cells (various technologies)
Inorganic cells
Efficiency (%)
42.4%
35.8%
32.6%
28.8%
27.6%
25.0%
23.0%
20.4%
20.3%
16.7%
12.5%
11.1%
9.7%
8.1%
(Rev. 09-2010)

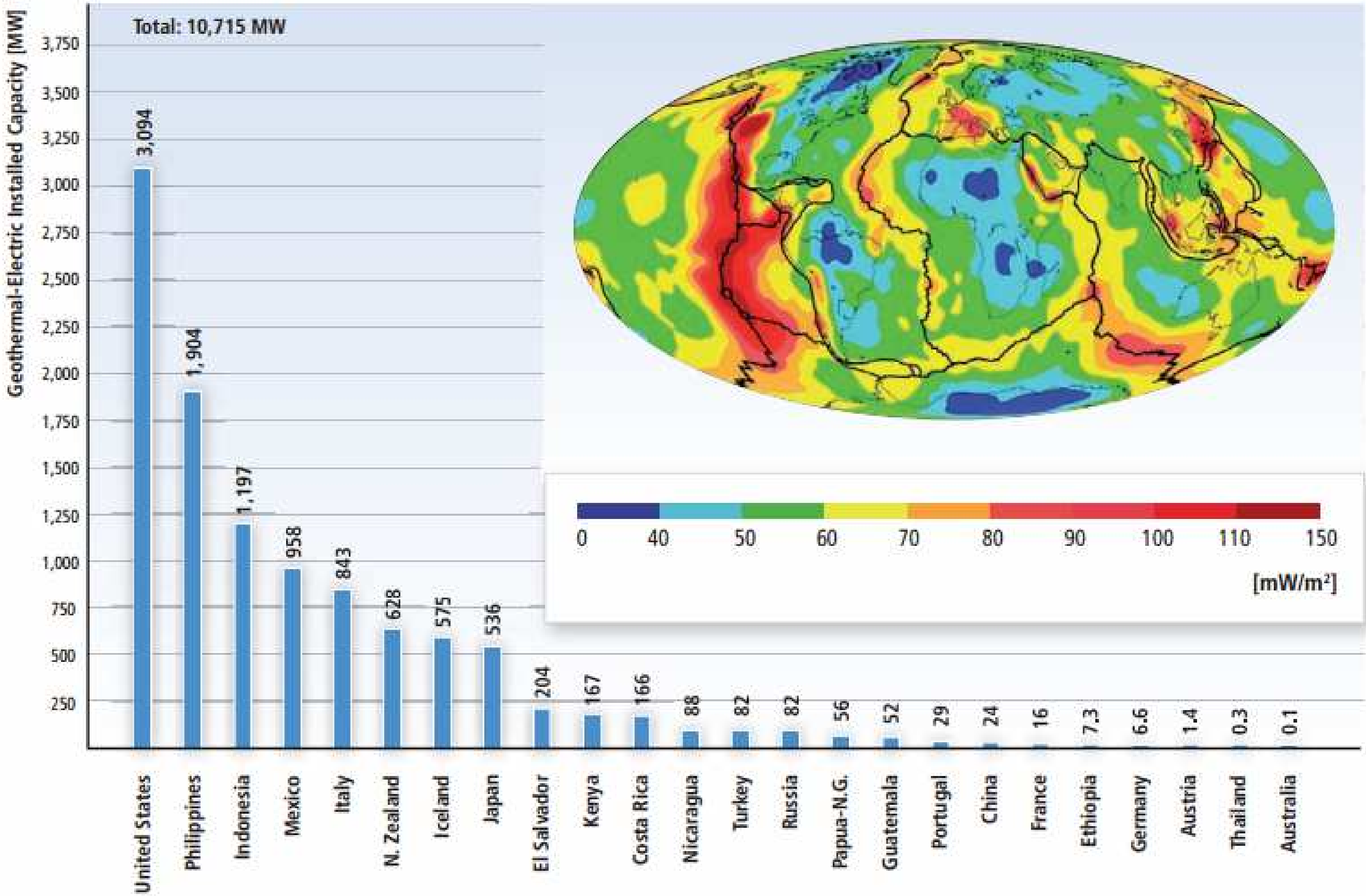
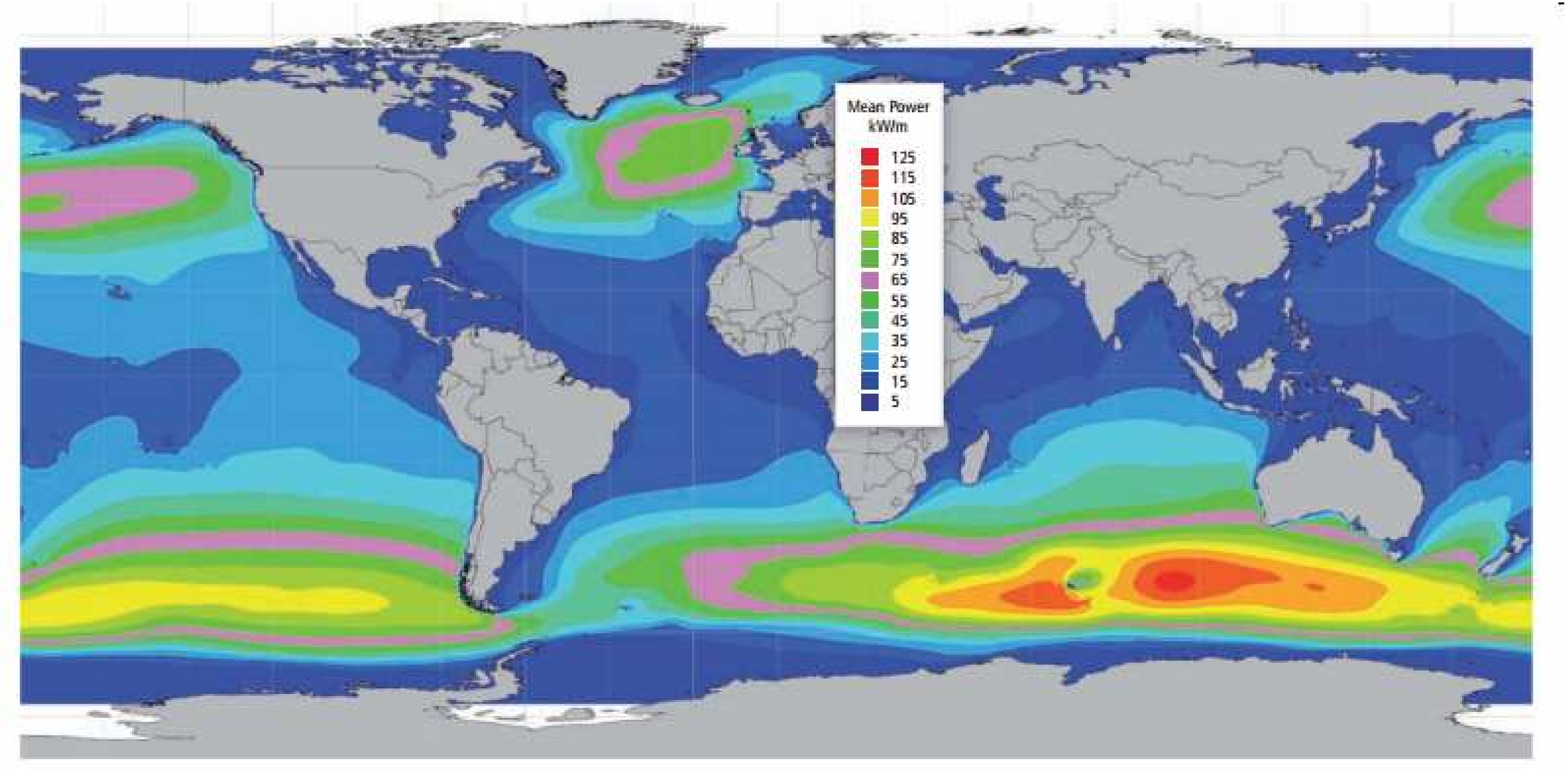


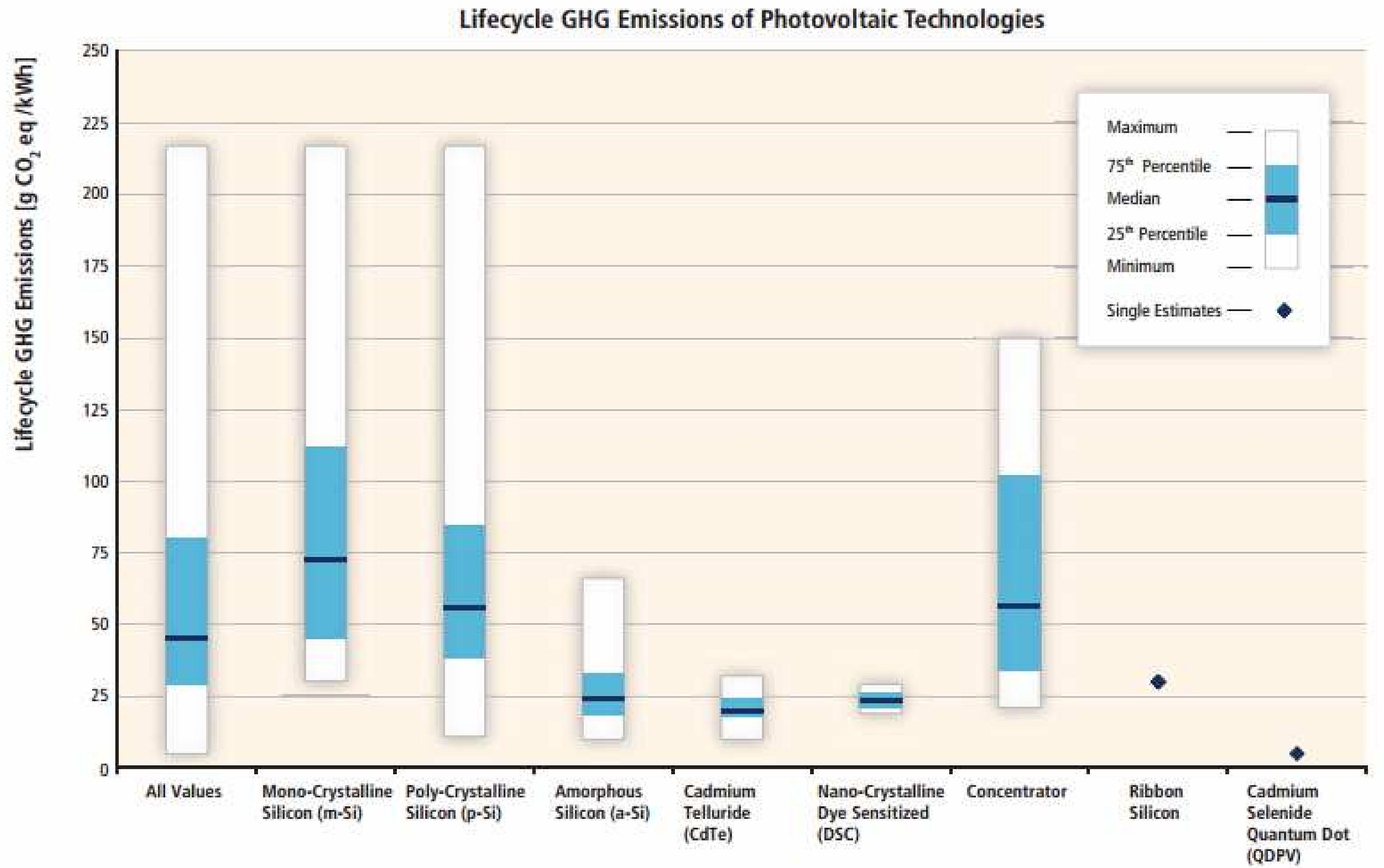
Figure TS.4.3 | Geothermal electric installed capacity by country in 2009. Figure shows worldwide average heat flow in mW/m^2 and tectonic plate boundaries. [Figure 4.5]

www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/SRREN_FD_SPM_final.pdf

Global distribution of various ocean energy resources: (a) Wave power



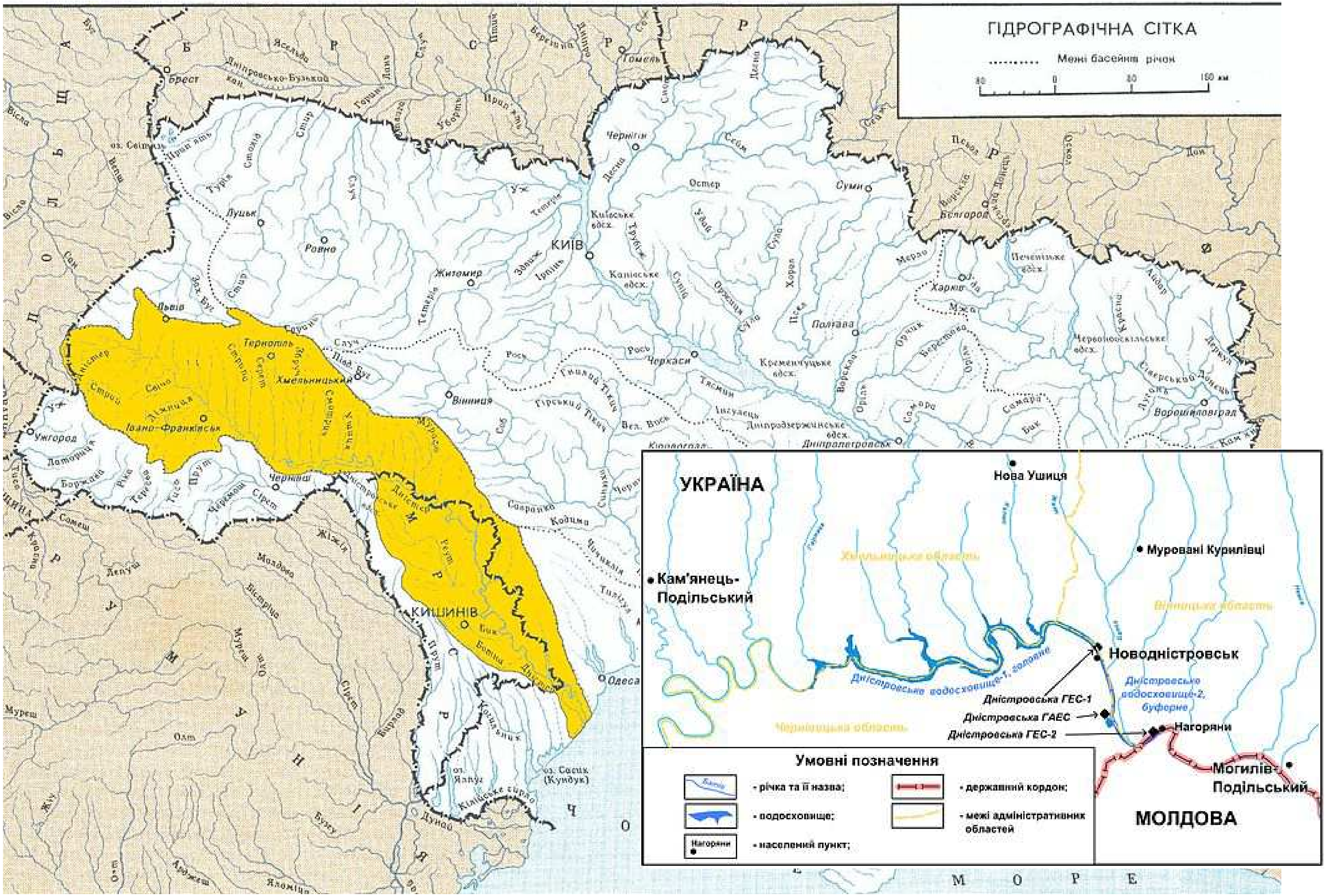
www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/SRREN_FD_SPM_final.pdf



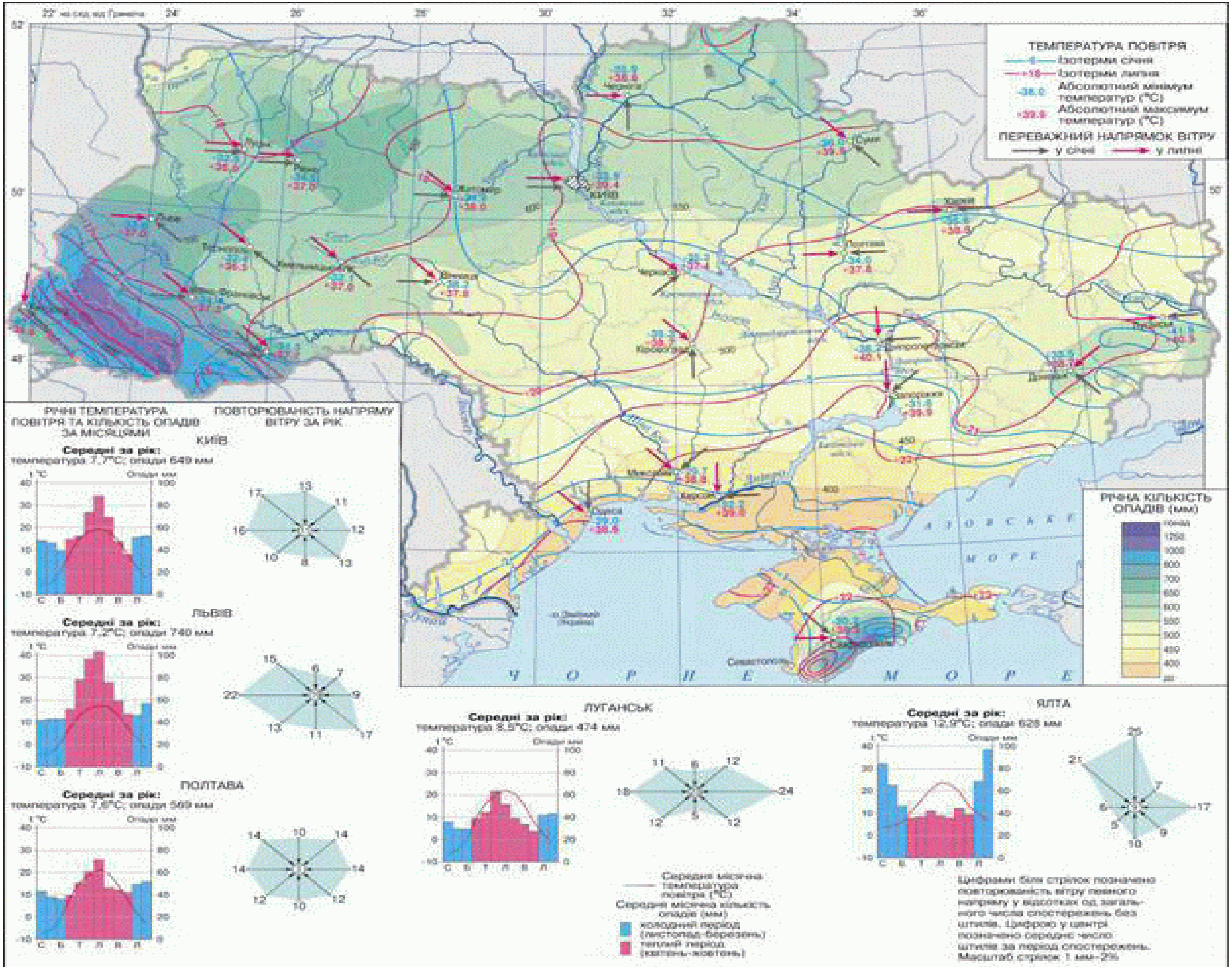
	All Values	Mono-Crystalline Silicon (m-Si)	Poly-Crystalline Silicon (p-Si)	Amorphous Silicon (a-Si)	Cadmium Telluride (CdTe)	Nano-Crystalline Dye Sensitized (DSC)	Concentrator	Ribbon Silicon	Cadmium Selenide Quantum Dot (QDPV)
Estimates:	124	30	56	12	13	4	6	2*	1
References:	26	9	15	3	3	1	2	2	1

*same value

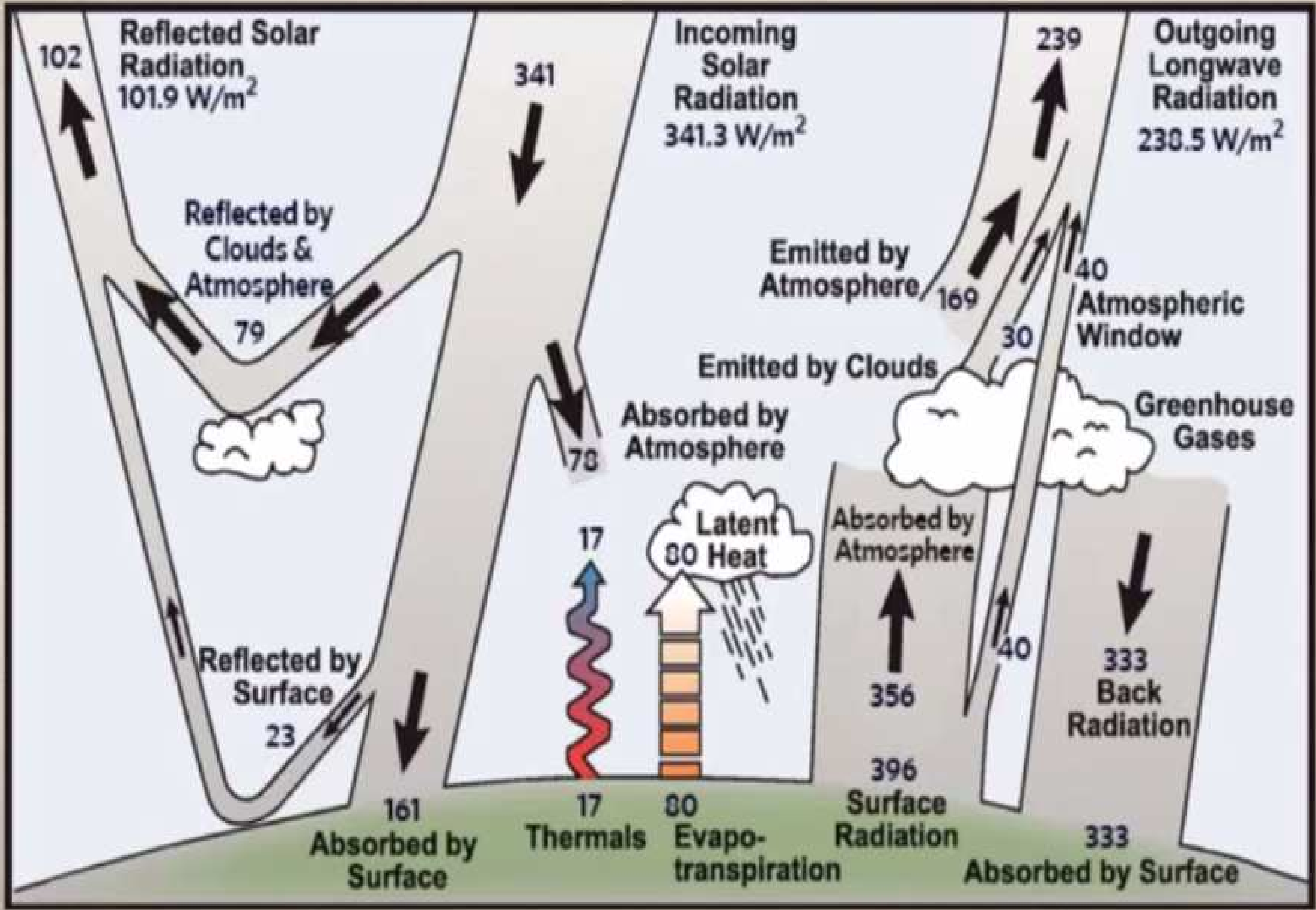
www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/SRREN_FD_SPM_final.pdf



commons.wikimedia.org/wiki/File:Басейн_Дністра.jpg

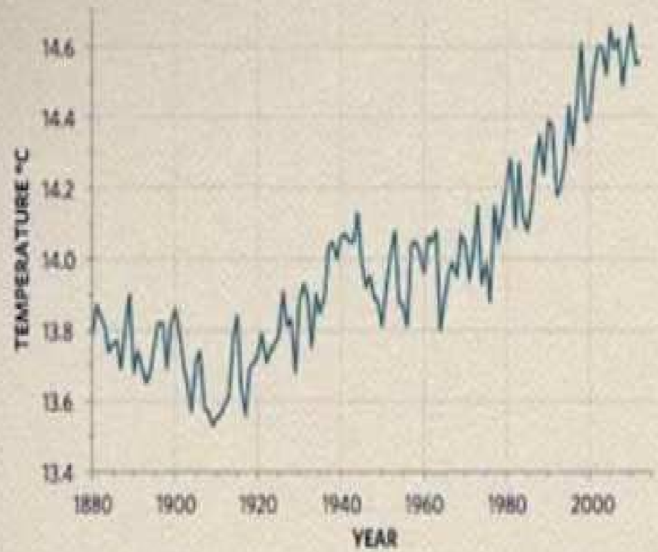

22° на схід від Гринвіча
24°
26°
28°
30°
32°
34°
36°
52°
50°
48°
ТЕМПЕРАТУРА ПОВІТРЯ
Ізотерми січня
Ізотерми липня
Абсолютний мінімум температур (°C)
Абсолютний максимум температур (°C)
ПЕРЕВАЖНИЙ НАПРЯМОК ВІТРУ
у січні
у липні
Київ
Чернігів
Суми
Житомир
Харків
Полтава
Черкаси
Вінниця
Львів
Кіровоград
Дніпропетровськ
Запоріжжя
Донецьк
Миколаїв
Херсон
Одеса
Сімферополь
Севастополь
о. Зміїний (Україна)
АЗОВСЬКЕ МОРЕ
ЧОРНЕ МОРЕ
РІЧНА КІЛЬКІСТЬ ОПАДІВ (мм)
РІЧНІ ТЕМПЕРАТУРА ПОВІТРЯ ТА КІЛЬКІСТЬ ОПАДІВ ЗА МІСЯЦЯМИ
ПОВТОРЮВАНІСТЬ НАПРЯМУ ВІТРУ ЗА РІК
КИЇВ
Середні за рік:
температура 7,7°C; опади 649 мм
ЛЬВІВ
Середні за рік:
температура 7,2°C; опади 740 мм
ПОЛТАВА
Середні за рік:
температура 7,6°C; опади 569 мм
ЛУГАНСЬК
Середні за рік:
температура 8,5°C; опади 474 мм
ЯЛТА
Середні за рік:
температура 12,9°C; опади 628 мм
t °C
Опади мм
С Б Т Л В Л
Середня місячна температура повітря (°C)
Середня місячна кількість опадів (мм)
холодний період (листопад-березень)
теплий період (квітень-жовтень)
Цифрами біля стрілок позначено повторюваність вітру певного напряму у відсотках од загального числа спостережень без штилів. Цифрою у центрі позначено середнє число штилів за період спостережень. Масштаб стрілок 1 мм–2%

Earth's Annual Energy Budget



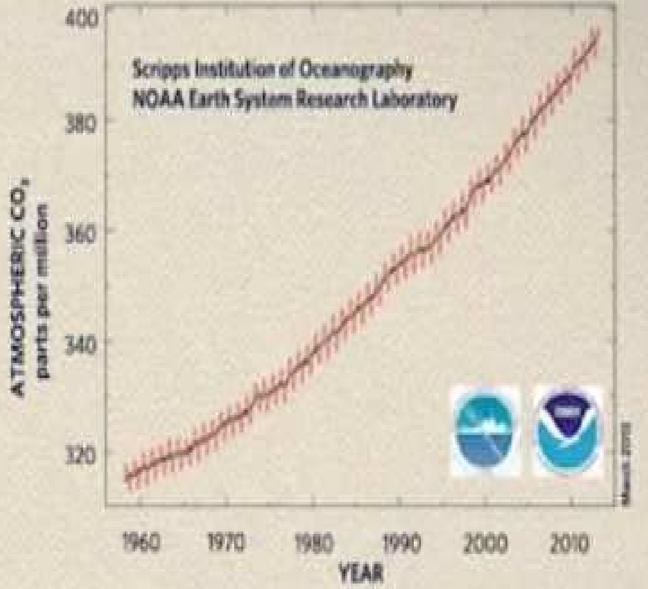
Observations: Recent

AVERAGE GLOBAL SURFACE TEMPERATURE



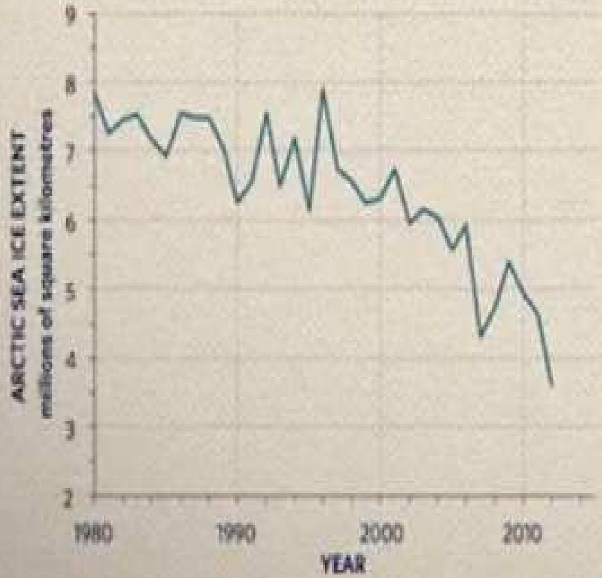
DATA: NASA GISS

ATMOSPHERIC CO_2 AT MAUNA LOA OBSERVATORY



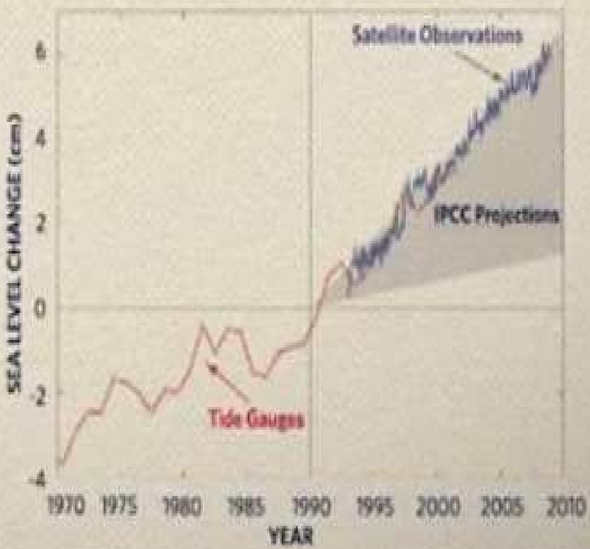
NOAA, EARTH SYSTEM RESEARCH LABORATORY

SEPTEMBER ARCTIC SEA ICE EXTENT



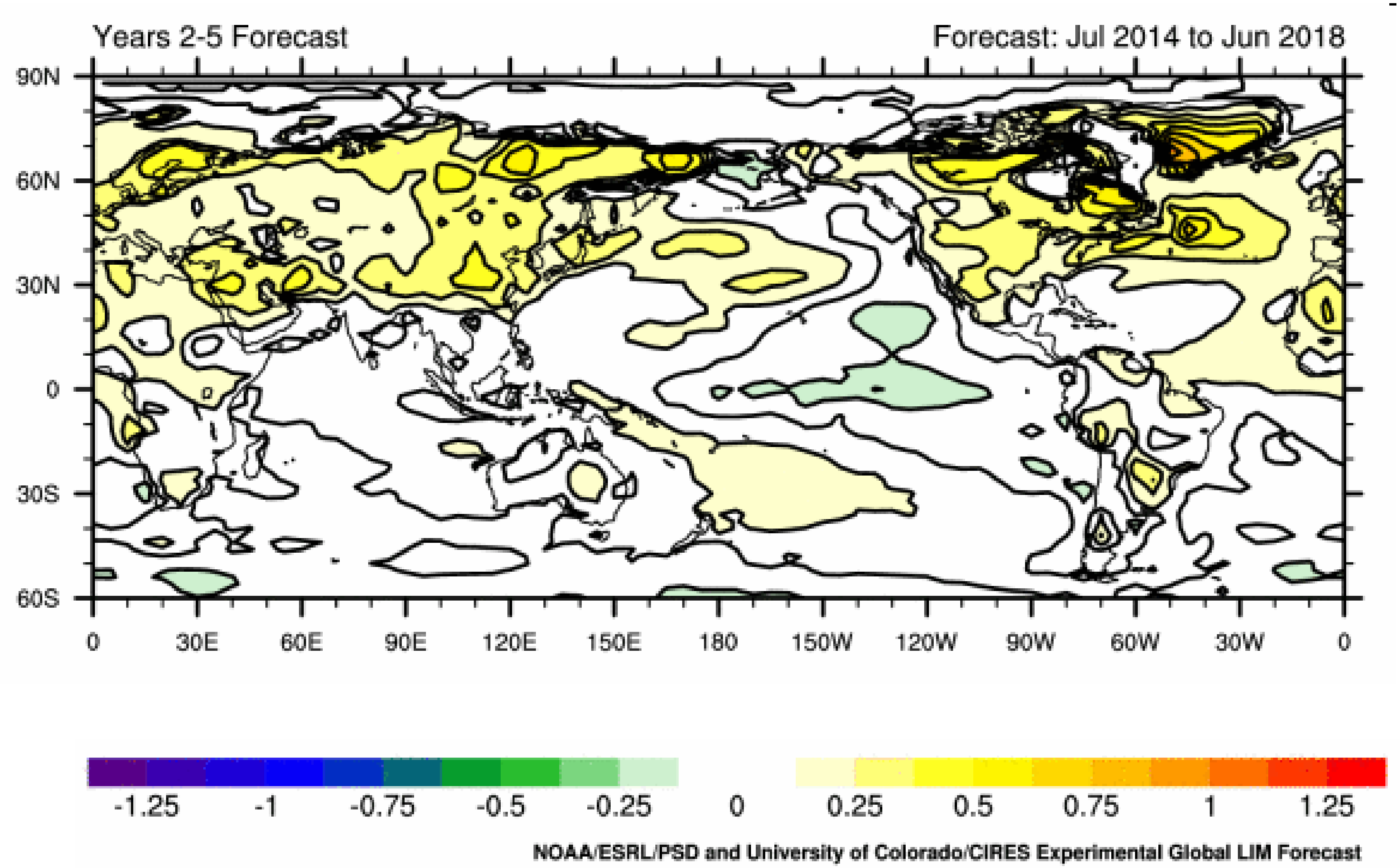
DATA: NSIDC

OBSERVED SEA LEVEL RISE VS IPCC PROJECTIONS



COPENHAGEN DIAGNOSIS 2009
HTTP://SKS.TO/MODEL

Experimental NOAA/ESRL PSD and University of Colorado/CIRES Forecast



https://www.esrl.noaa.gov/psd/forecasts/decadal/Forecast.Maps.html

Використані джерела

C2SM Center for Climate Systems Modeling

WMO ICSU UNEP IOC GCOS GLOBAL CLIMATE OBSERVING SYSTEM

www.wmo.int

www.iac.ethz.ch/group/climate-physics.html

ETH zürich

Department of Environmental Systems Science

Institute for Atmospheric and Climate Science

coursera

Global Warming I: The Science and Modeling of Climate Change

The University of Chicago

MIT OPENCOURSEWARE

MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY

AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY 1919

UNIVERSITY OF OXFORD

www.geomar.de/

GEOMAR

fwee.org/environment/how-

FWEE Foundation for Water & Energy Education

National Centre for Atmospheric Science

NATURAL ENVIRONMENT RESEARCH COUNCIL

NOAA Earth System Research Laboratory

Physical Sciences Division

Conservation in a Changing Climate

bankwatch.org/documents/DPSP_study_final.pdf

Dniester Pump Storage Plant: project risks

SPECIAL REPORT OF THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE

ipcc WMO UNEP

WIKIMEDIA COMMONS

HALOE HALOGEN OCCULTATION EXPERIMENT

Union of Concerned Scientists

Science for a healthy planet and safer world

SCIENCELIFE

UNIVERSITY OF TORONTO

FACULTY OF APPLIED SCIENCE & ENGINEERING

WIND, WAVES & TIDES

ALTERNATIVE ENERGY SYSTEMS

Вечір науки
у ТНТУ-2017

physics.tntu.edu.ua/news/

ФЕСТИВАЛЬ
НАУКИ

Всеукраїнський
фестиваль
науки - 2018