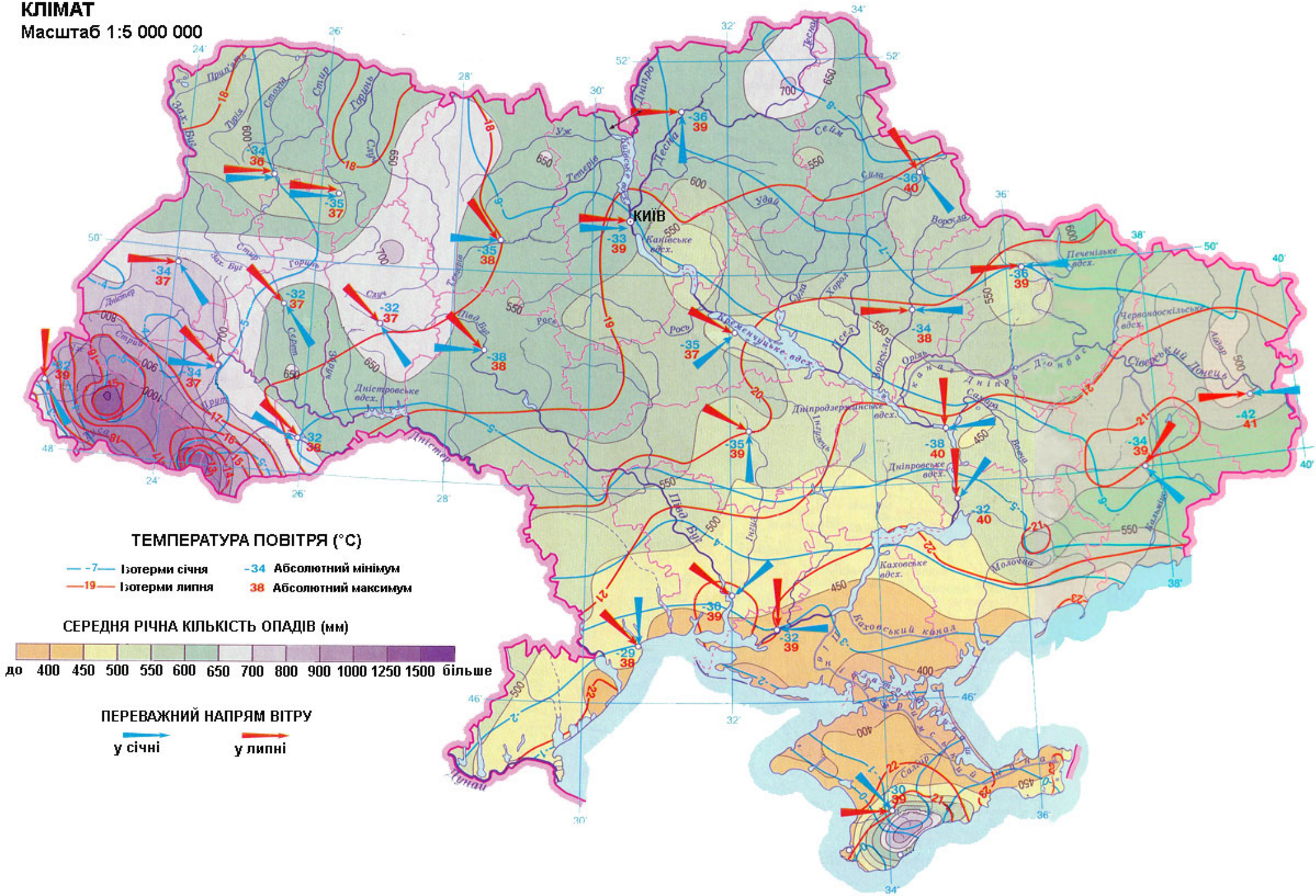

ОНЛАЙН-ПРОЄКТ «МОБІЛЬНІ ЛЕКТОРІЇ»
ФІЗИКА КЛІМАТУ
Physics
Department
Кафедра
фізики
Юрій Скоренький,
кандидат фізико-математичних наук,
доцент, завідувач кафедри фізики
Тернопільського національного технічного
університету імені Івана Пулюя
17 лютого 2021 р., 9:30

КЛІМАТ

Масштаб 1:5 000 000



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**).

Середа	Четвер	П'ятниця	Субота	Неділя	Понеділок	Вівторок
17 лютого	18 лютого	19 лютого	20 лютого	21 лютого	22 лютого	23 лютого
мін. -12° макс. -2°	мін. -18° макс. -3°	мін. -18° макс. -7°	мін. -6° макс. +2°	мін. -4° макс. +2°	мін. -1° макс. +2°	мін. +2° макс. +7°

Погода сьогодні о 08:00

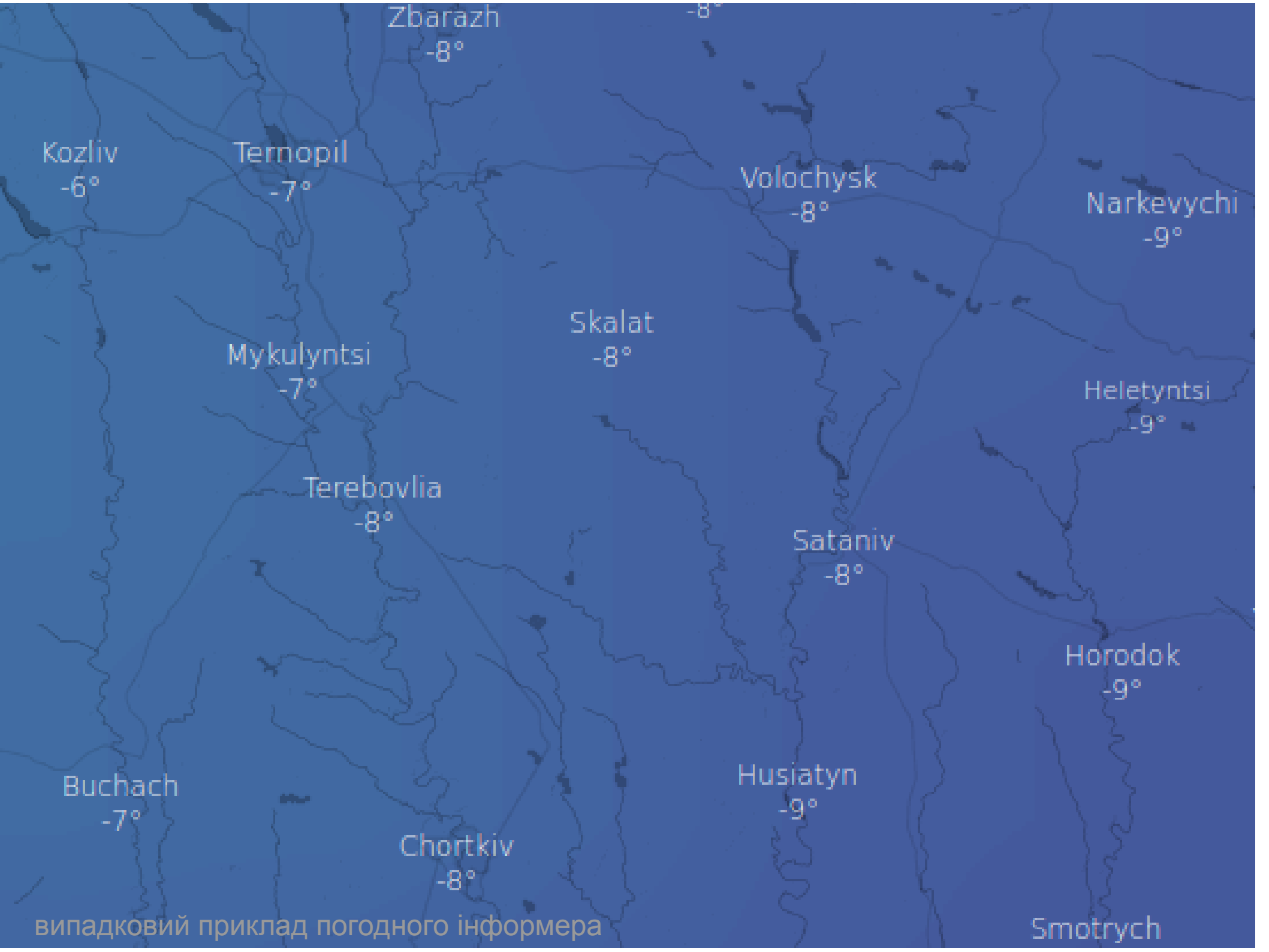
40
20
0
-20
-40

-9°C

Схід 07:20 Захід 17:42

	ніч		ранок		день		вечір	
	2 :00	5 :00	8 :00	11 :00	14 :00	17 :00	20 :00	23 :00
Температура, °C	-12°	-10°	-9°	-6°	-4°	-2°	-3°	-4°
відчувається як	-16°	-15°	-15°	-11°	-8°	-6°	-7°	-9°
Тиск, мм	735	733	732	734	734	734	733	733
Вологість, %	82	87	92	83	82	88	92	93
Вітер, м/сек	↖ 2.0	↑ 3.0	↑ 3.0	↗ 4.1	↗ 3.1	↗ 3.4	→ 3.1	→ 3.5
Ймовірність опадів, %	-	-	-	80	83	87	91	89

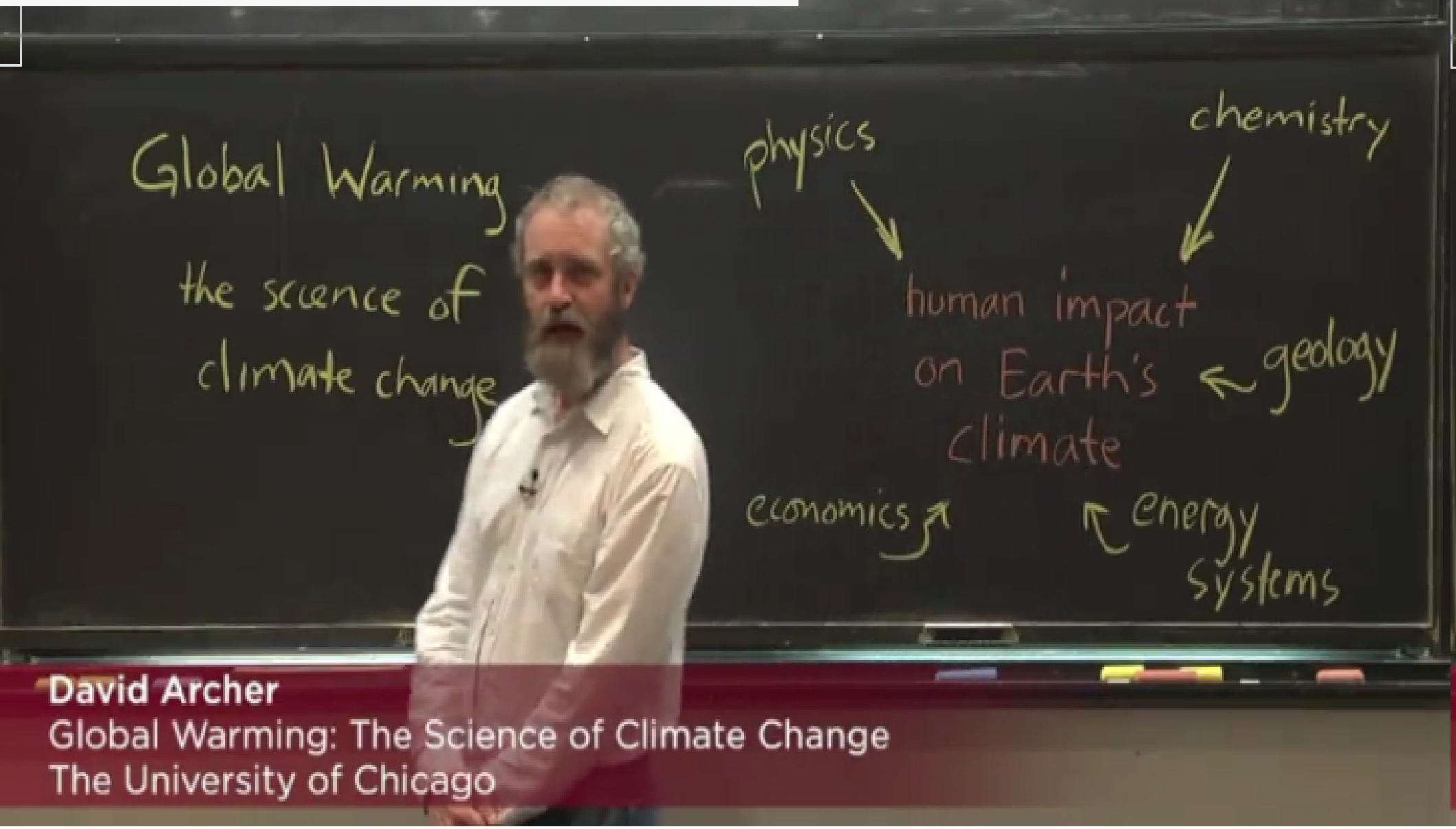
випадковий приклад прогнозу погоди



випадковий приклад погодного інформера

Global Warming I: The Science and Modeling of Climate Change

The University of Chicago



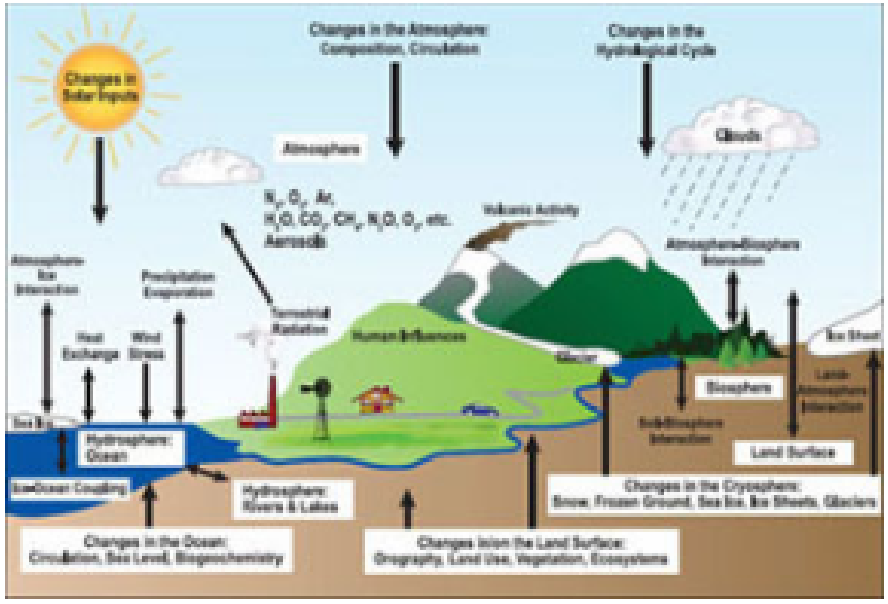
David Archer

Global Warming: The Science of Climate Change

The University of Chicago

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

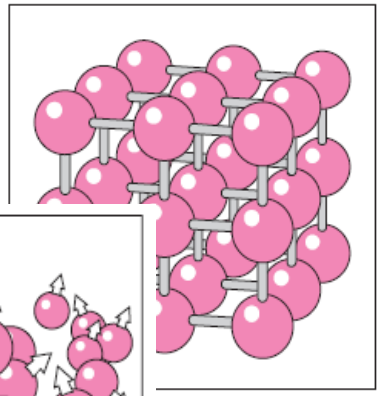
As Taught In
Fall 2008

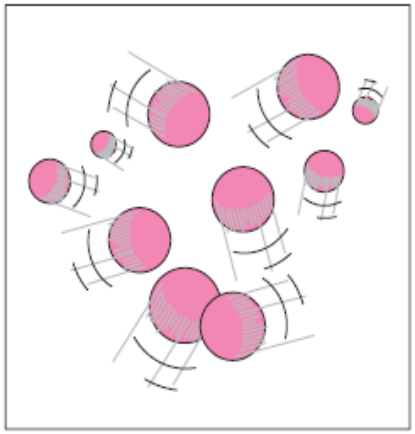
Level
Undergraduate / Graduate

CITE THIS COURSE

Перший закон термодинаміки

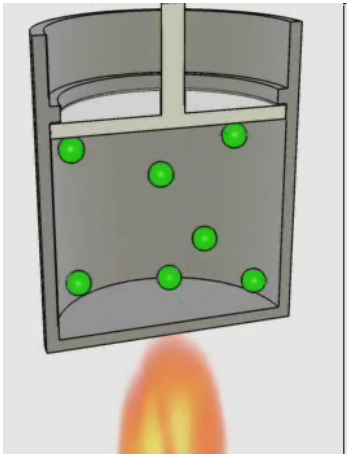
$$Q = \Delta U + A$$





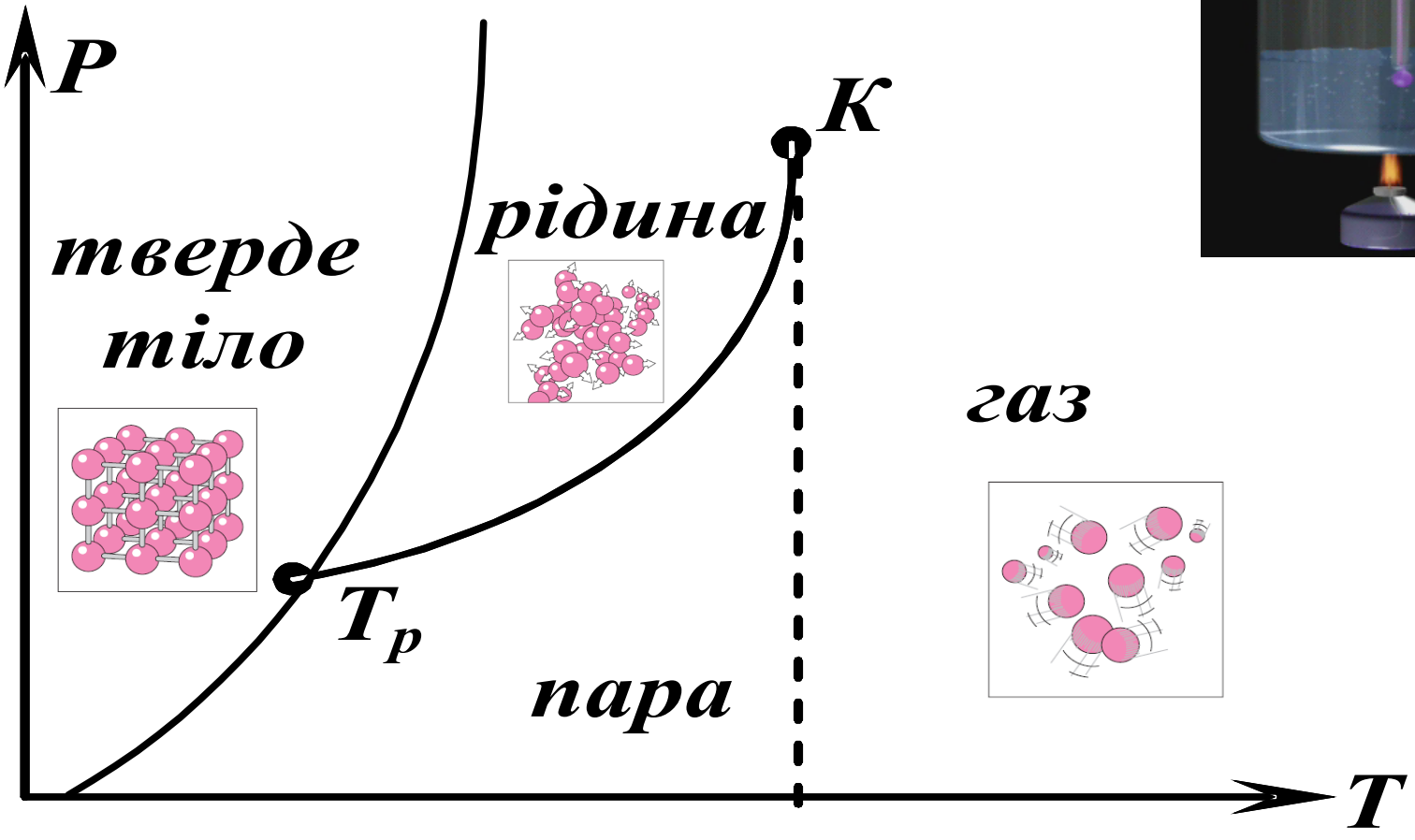
$$Q = \frac{m}{\mu} \cdot C\Delta T$$

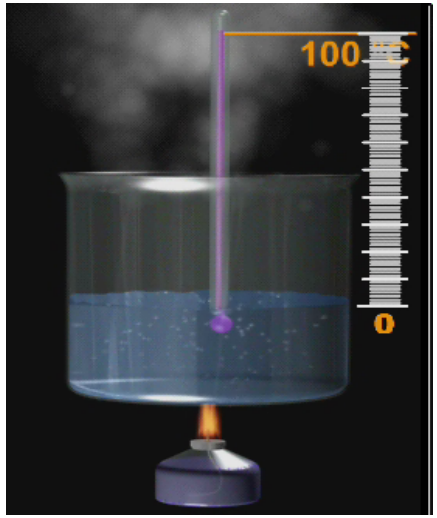
$$A = p \cdot \Delta V$$

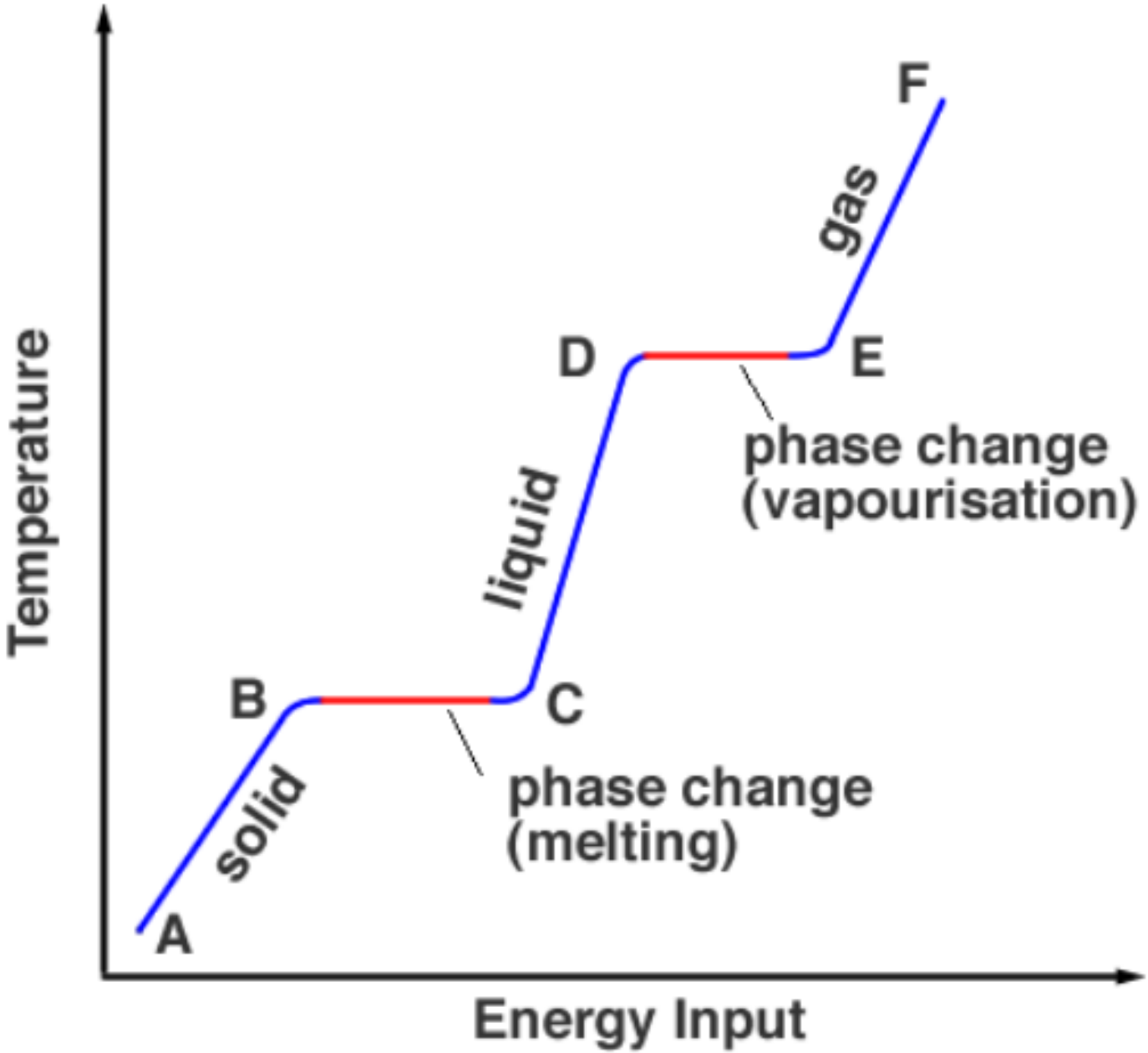


- Фазова діаграма H_2O

$$Q = mL$$







http://www.splung.com/content/sid/6/page/latentheat

Атмосфера визначає клімат таким чином:

- **Забезпечує обмін енергією 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

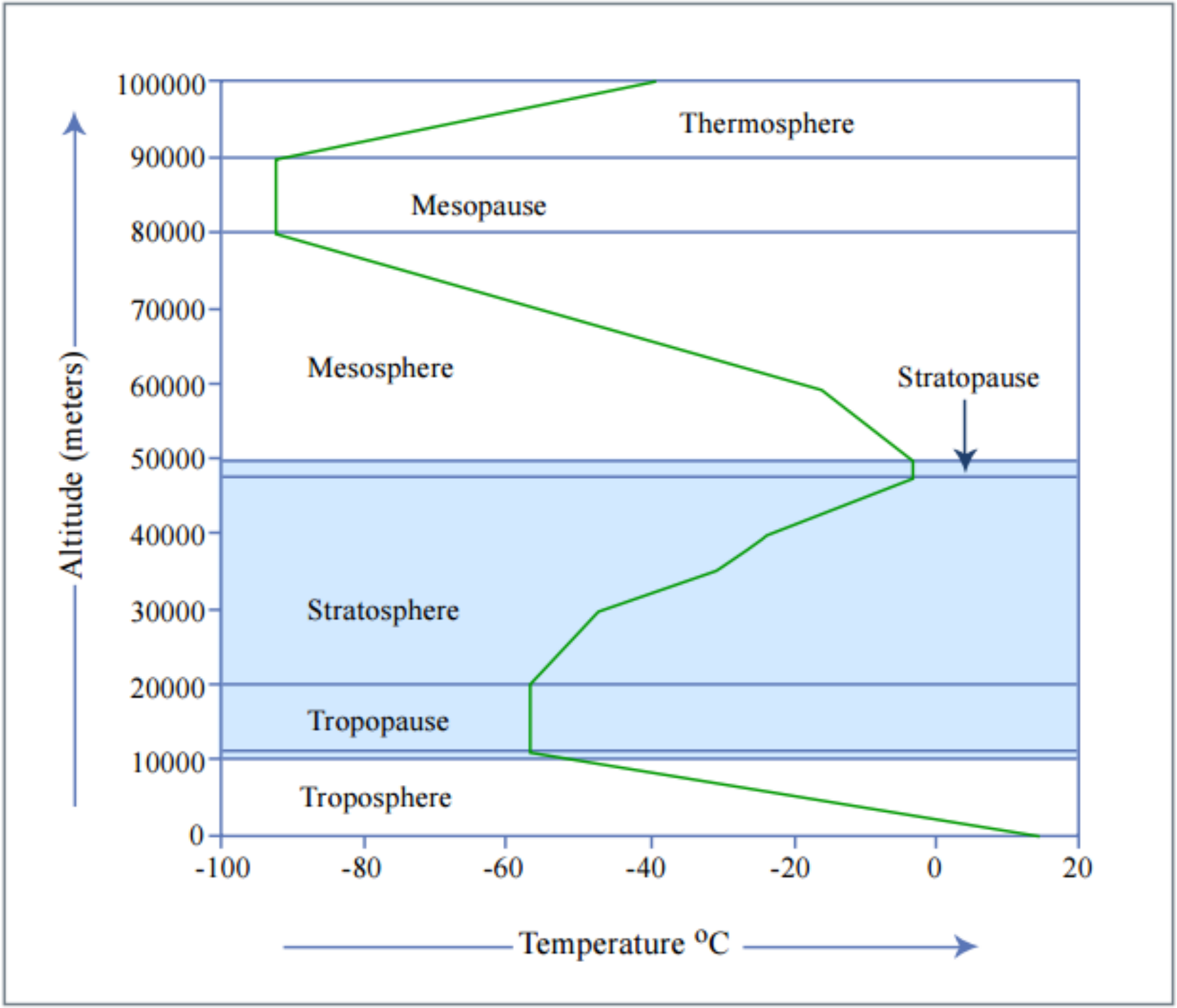
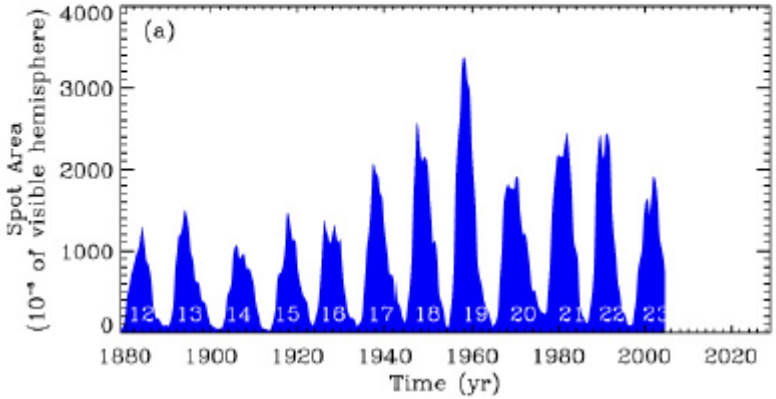


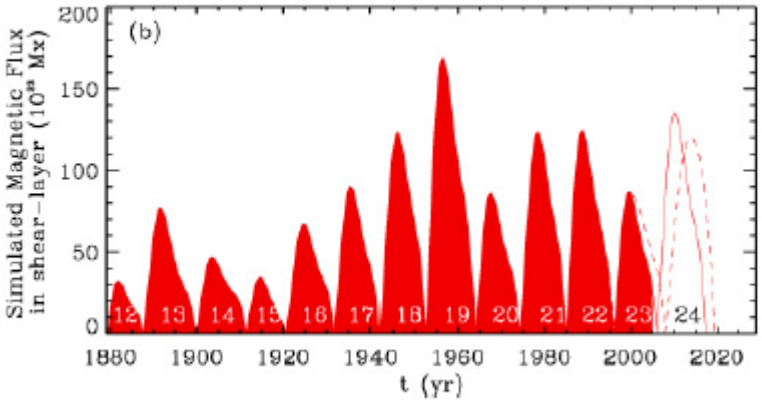
Figure by MIT OpenCourseWare.

Надходження енергії від Сонця

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

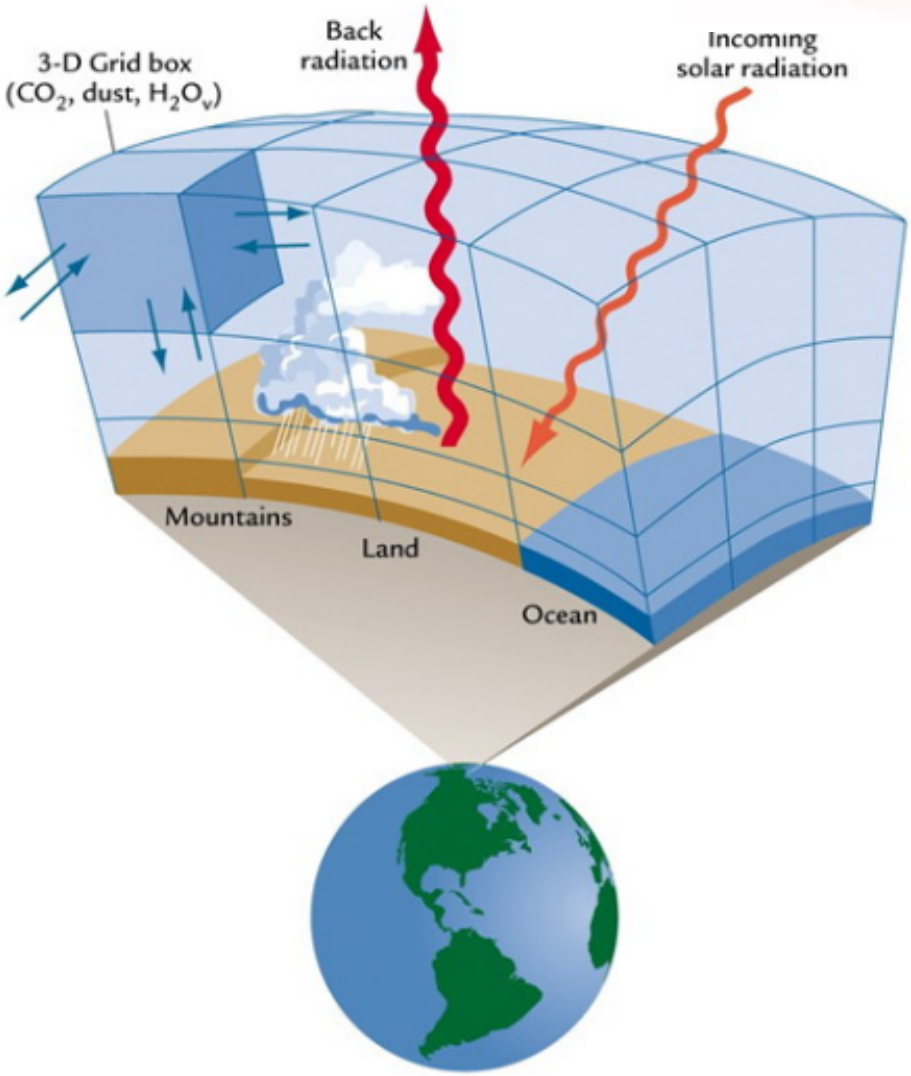


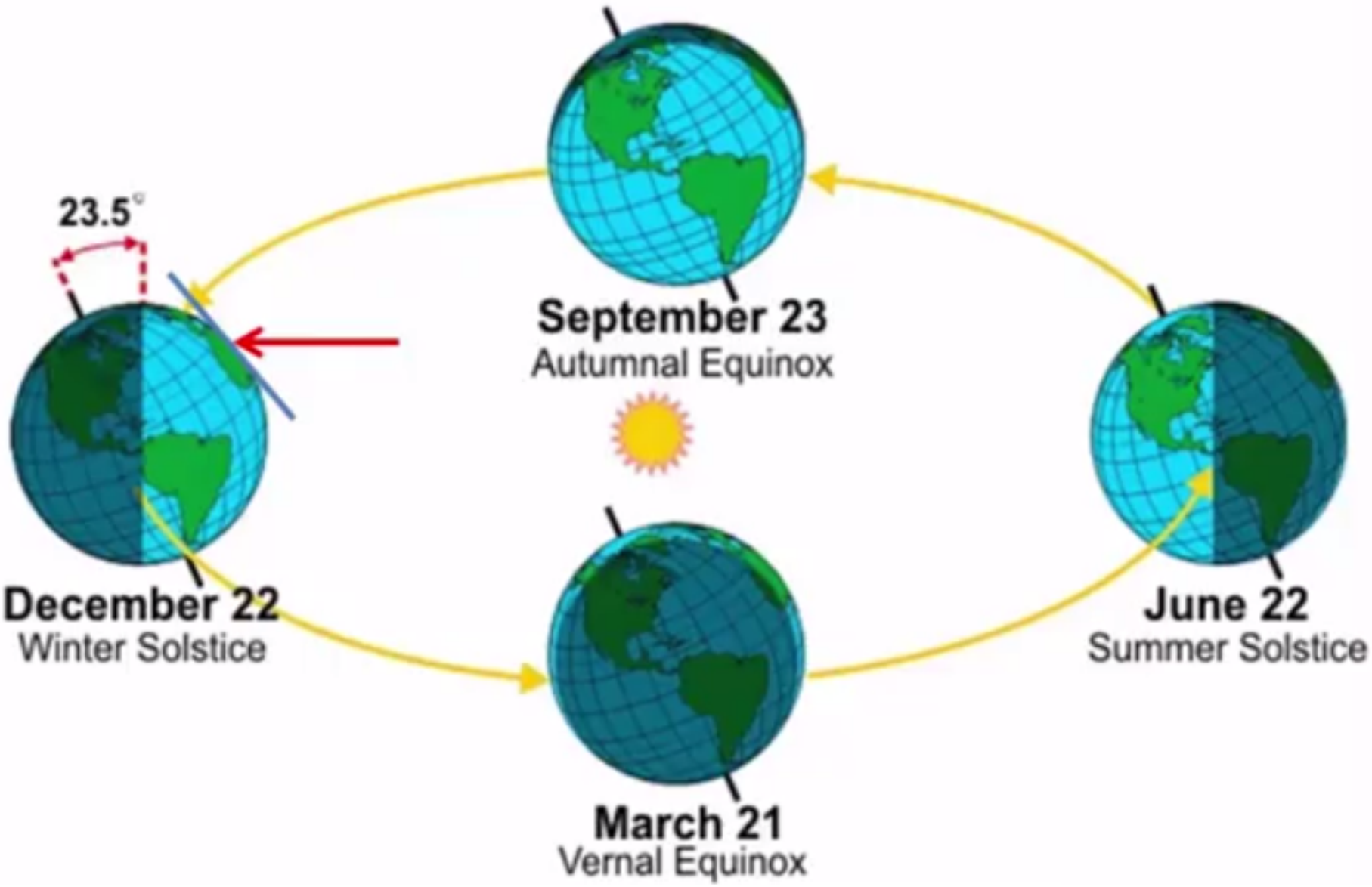
Середня спостережувана температура поверхні Землі =288*K* = 15°*C*

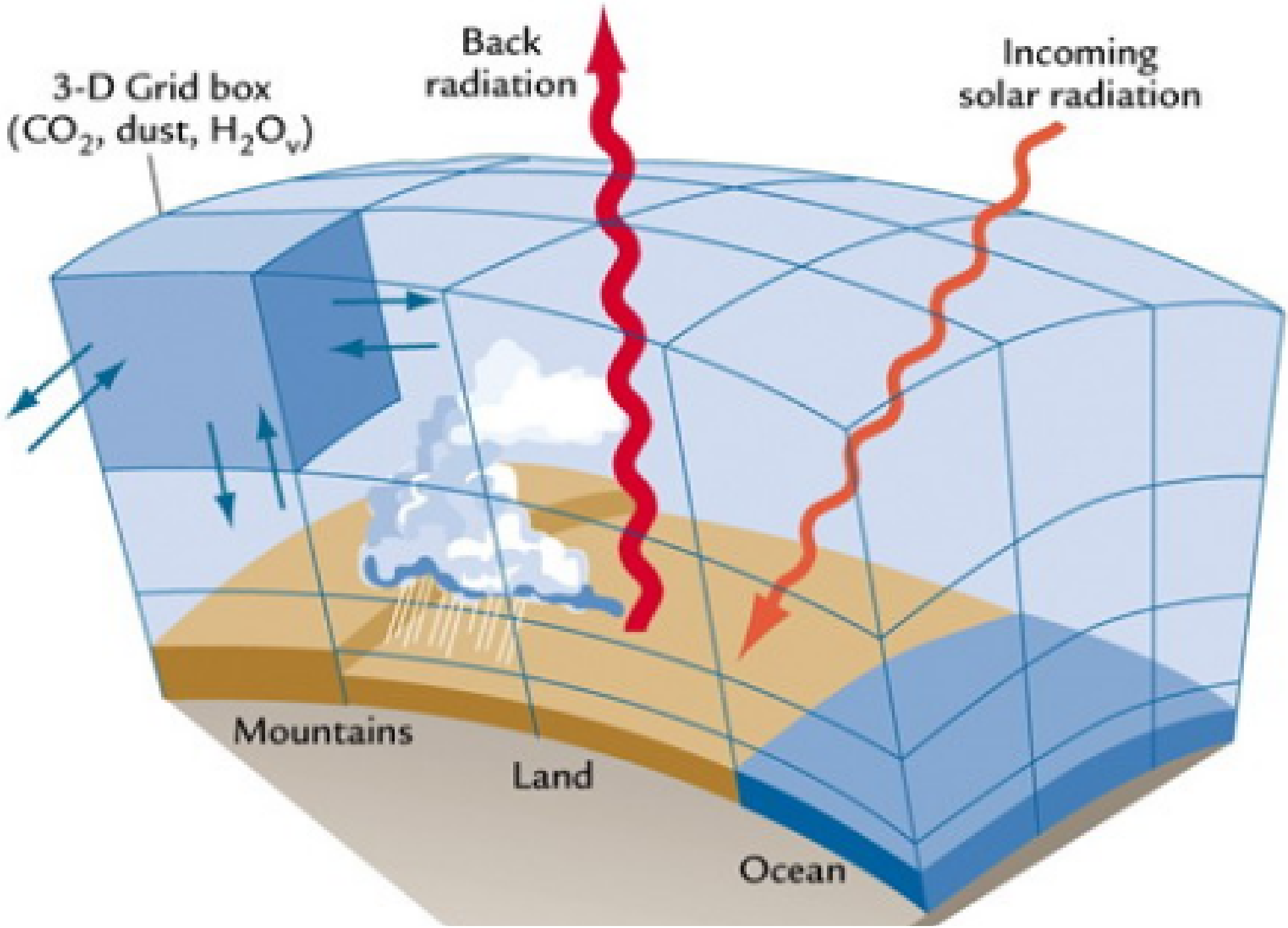


Моделі клімату повинні включати:

- 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


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

КЛІМАТИЧНІ ПОЯСИ ТА ОБЛАСТІ СВІТУ

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

ЕКВАТОРІАЛЬНИЙ ПОЯС

Слабкі нестійкі вітри. Жарко й вологo. Сезонні коливання температури та вологості повітря дуже малі

СУБЕКВАТОРІАЛЬНІ ПОЯСИ

Влітку - екваторіальні, взимку - тропічні повітряні маси. Зима трохи холодніша за літо, але відзначається сухістю. Над океанами виникають тропічні циклони

ТРОПІЧНІ ПОЯСИ

Переважають пасати. Добре помітні сезонні зміни температури повітря, особливо на материках

Області тропічного клімату

1 пустельного
2 вологого

СУБТРОПІЧНІ ПОЯСИ

Влітку - тропічні, взимку - помірні повітряні маси. Значні сезонні відміни температури повітря та опадів. Можливі снігопади

Області субтропічного клімату

3 континентального
4 середземномор-ського
5 мусонного
6 з рівномірним зволоженням

ПОМІРНІ ПОЯСИ

Вітри західні. На материках взимку - сніговий покрив. На океанах Південної півкулі зустрічається плавуча крига

Області помірного клімату

7 континентального
8 помірно континентального
9 морського
10 мусонного

СУБАРКТИЧНИЙ І СУБАНТАРКТИЧНИЙ ПОЯСИ

Влітку - помірні, взимку - арктичні й антарктичні повітряні маси. Великі сезонні коливання температури повітря. На материках - суцільне поширення багаторічної мерзлоти ґрунту. На океанах - плавуча крига

Клімат субарктичний

Клімат субантарктичний з прохолодним вологим літом і морозною зимою

АРКТИЧНИЙ І АНТАРКТИЧНИЙ ПОЯСИ

Дуже морозна зима та холодне літо. Опадів випадає мало

Клімат арктичний

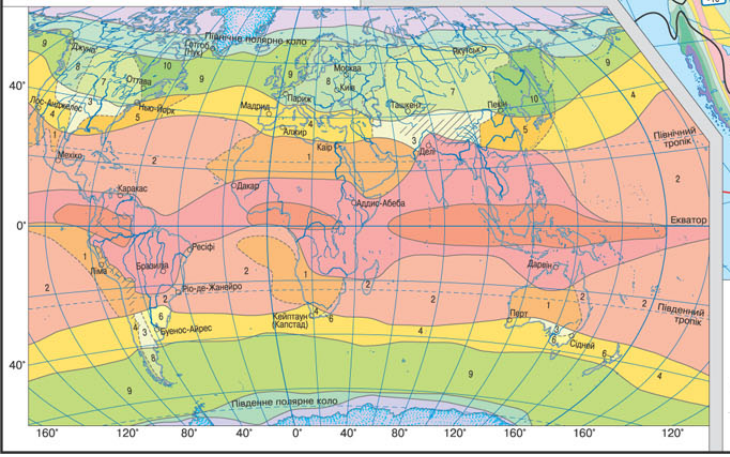
Клімат антарктичний з найморознішою на земній кулі зимою

Межі кліматичних поясів

Межі кліматичних областей

Області високогірного клімату

КЛІМАТИЧНА КАРТА



УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

СЕРЕДНЬОРІЧНА КІЛЬКІСТЬ ОПАДІВ У МІЛІМЕТРАХ

до 100 250 500 1000 2000 3000 понад

Лінії рівної кількості опадів (ізогієти)

ТЕМПЕРАТУРА ПОВІТРЯ В ГРАДУСАХ ЦЕЛЬСІЯ

Ізотерми липня

+16° — найтеплішого місяця року у Північній півкулі

-16° — найхолоднішого місяця року у Південній півкулі

Ізотерми січня

-16° — найхолоднішого місяця року у Північній півкулі

+16° — найтеплішого місяця року у Південній півкулі

+58° Найвища абсолютна температура

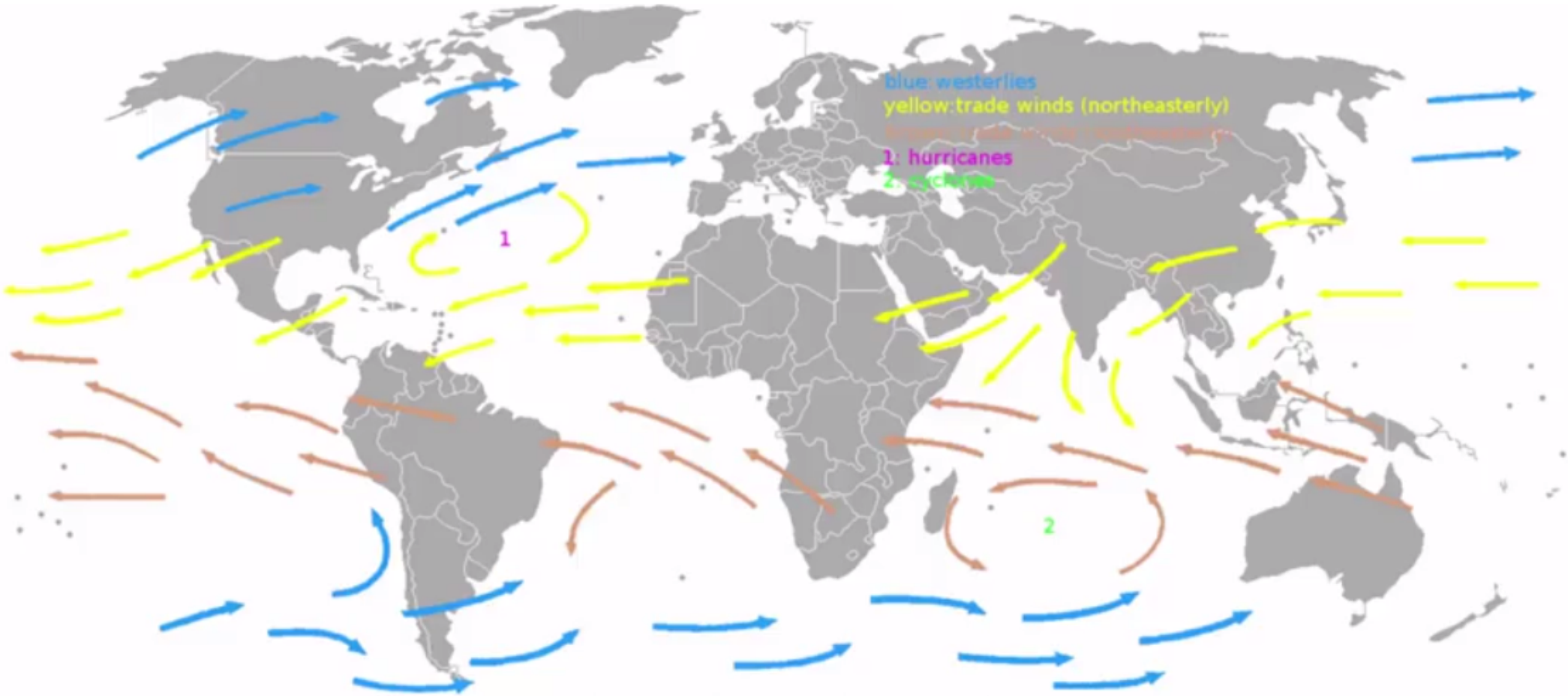
-70° Найнижча абсолютна температура

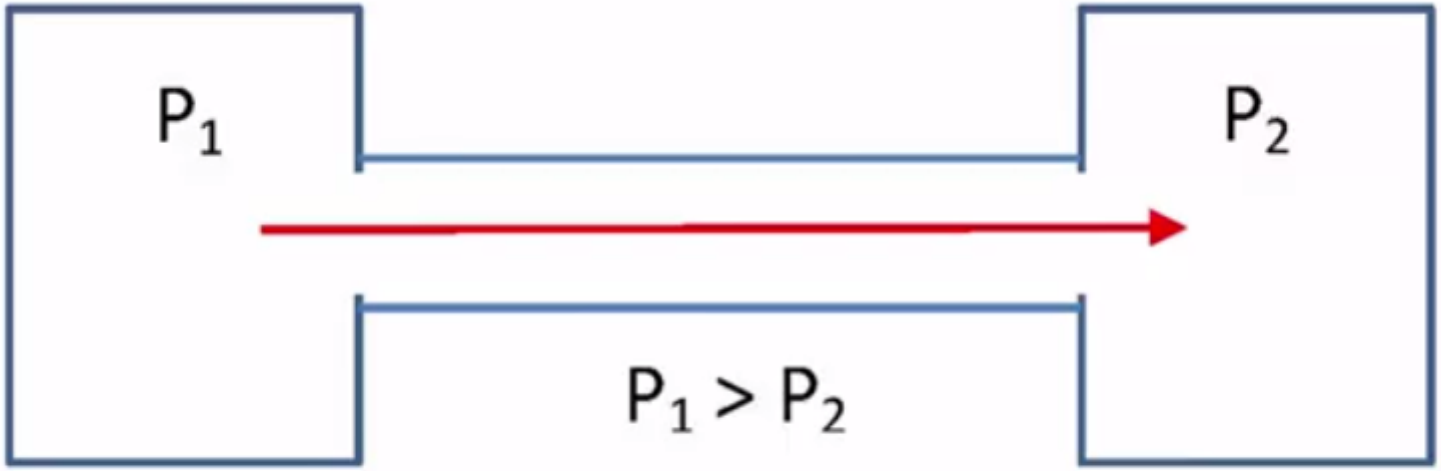
	постійні	у липні	у січні
Області високого тиску повітря	В	В	В
Області низького тиску повітря	Н	Н	Н

ПЕРЕВАЖНИЙ НАПРЯМ ВІТРУ

у липні

у січні


blue:westerlies
yellow:trade winds (northeasterly)
1: hurricanes
1
2



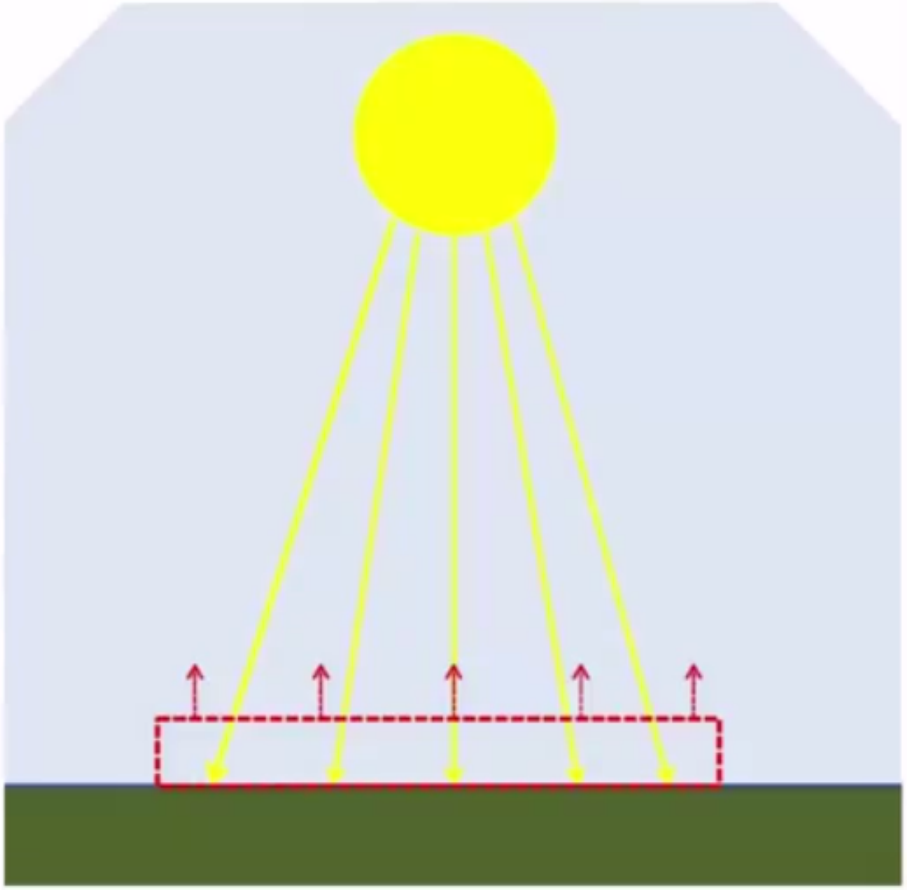
Sun heats the surface

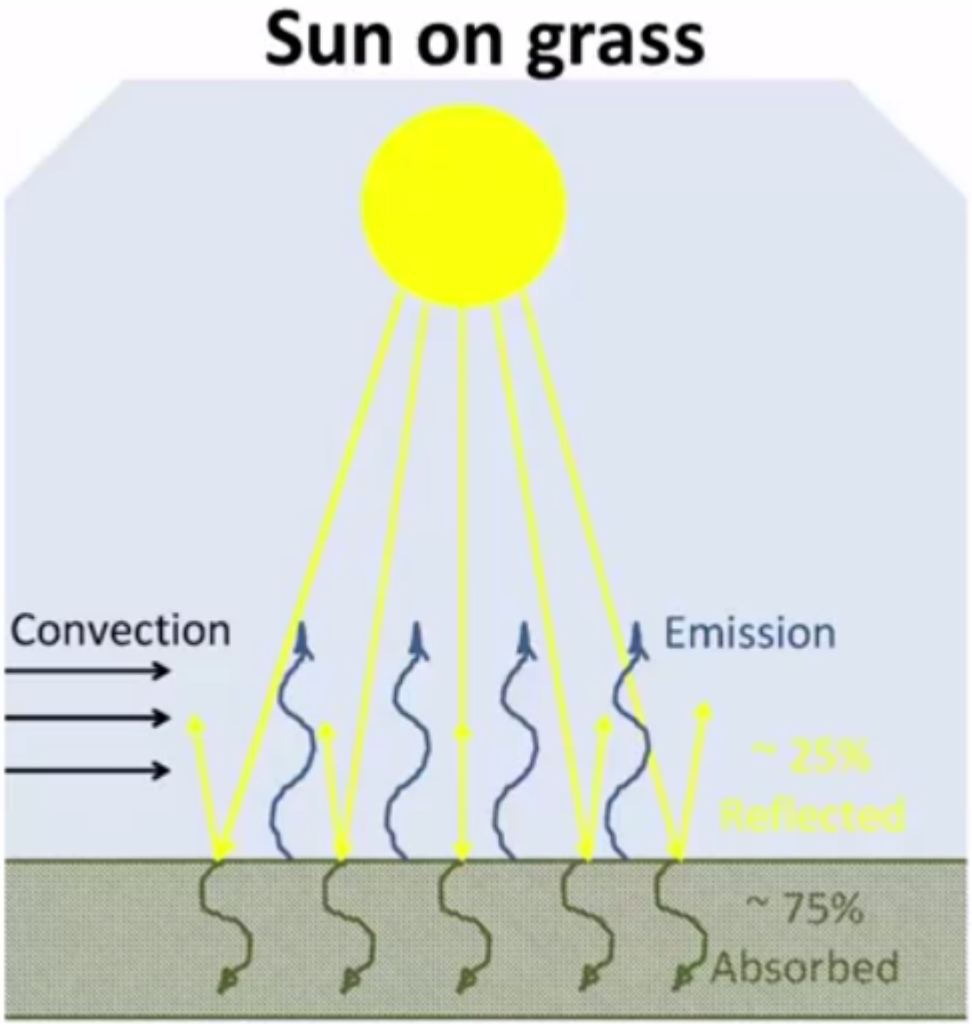
Surface heats adjacent air

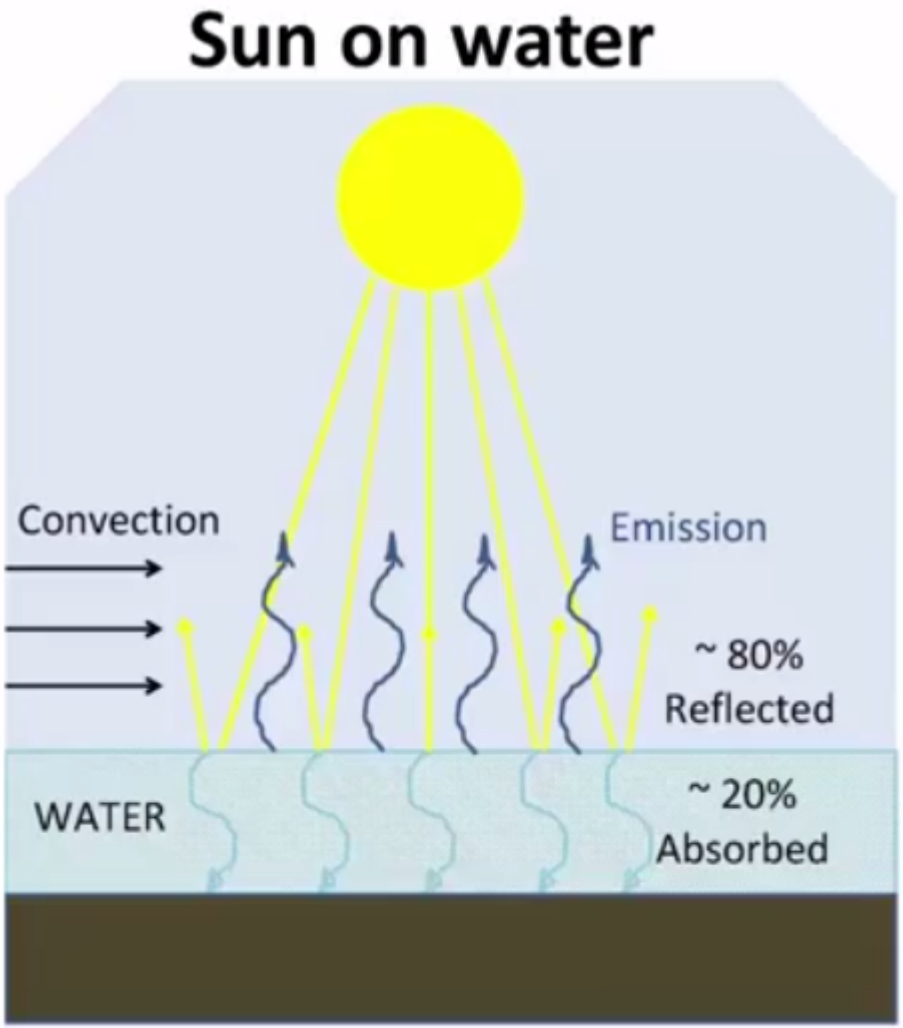
Density $\rho \sim {}^{1}/_{T}$

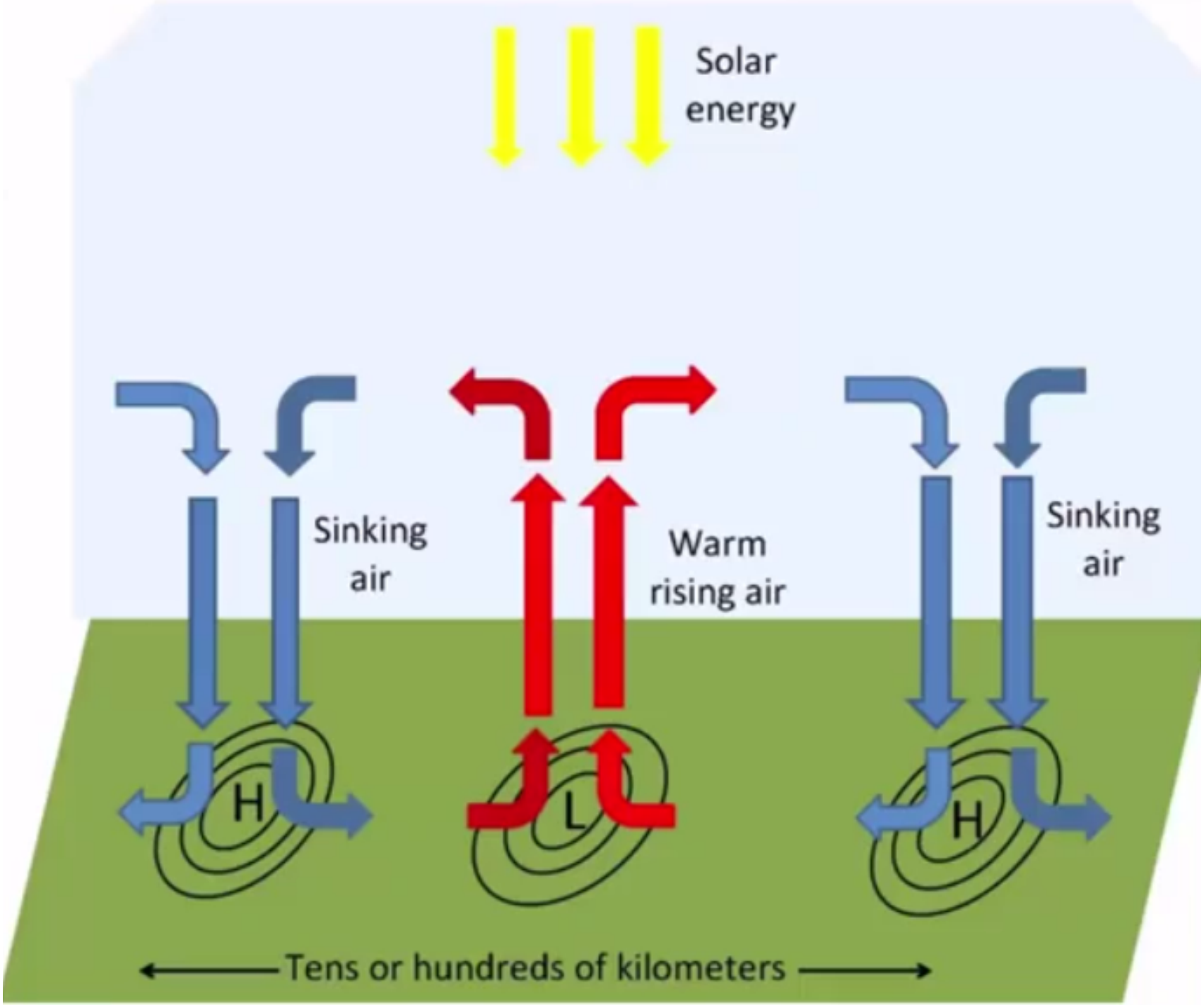
As air density decreases, it rises

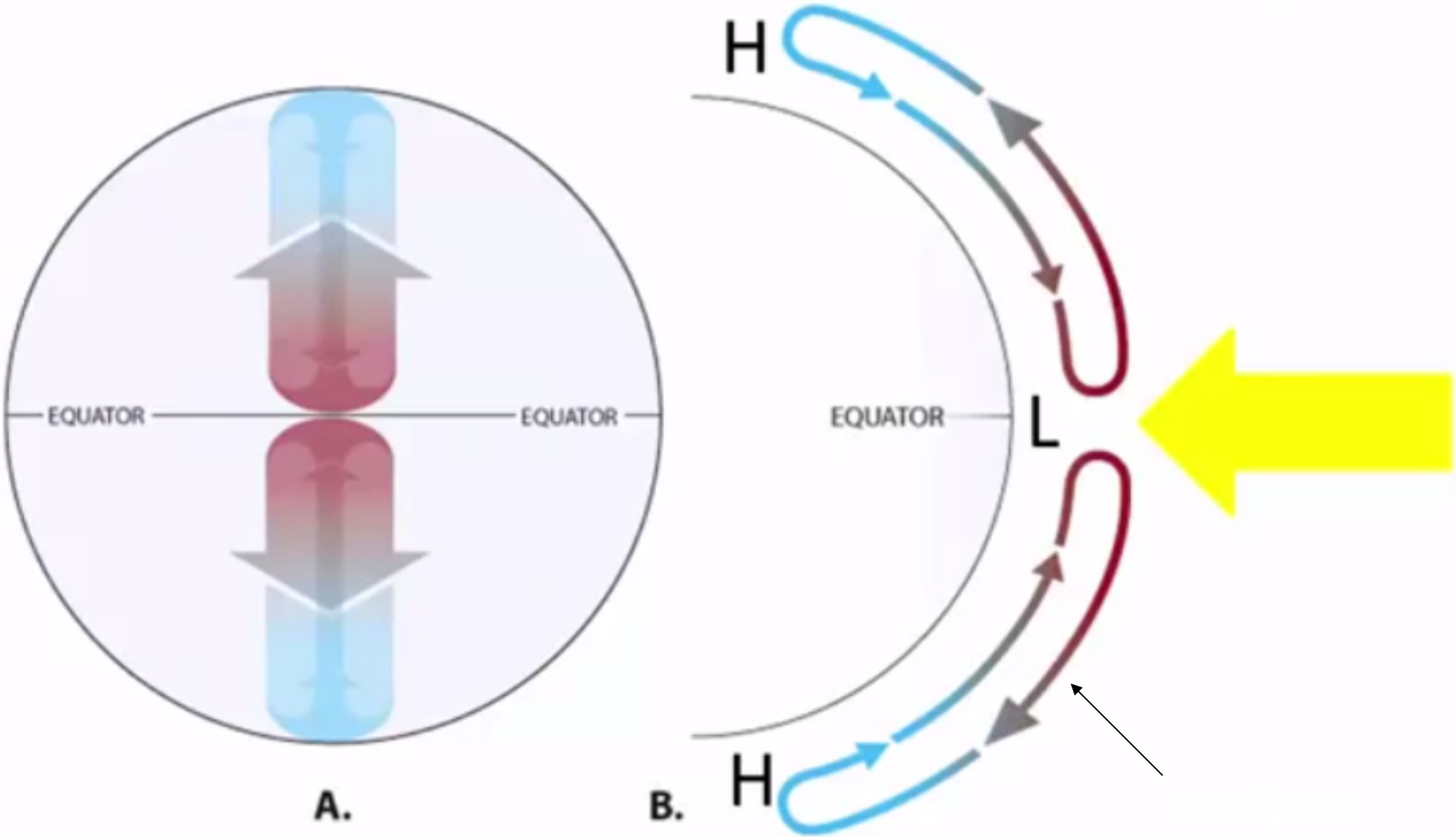
Air heating also reduces the local pressure



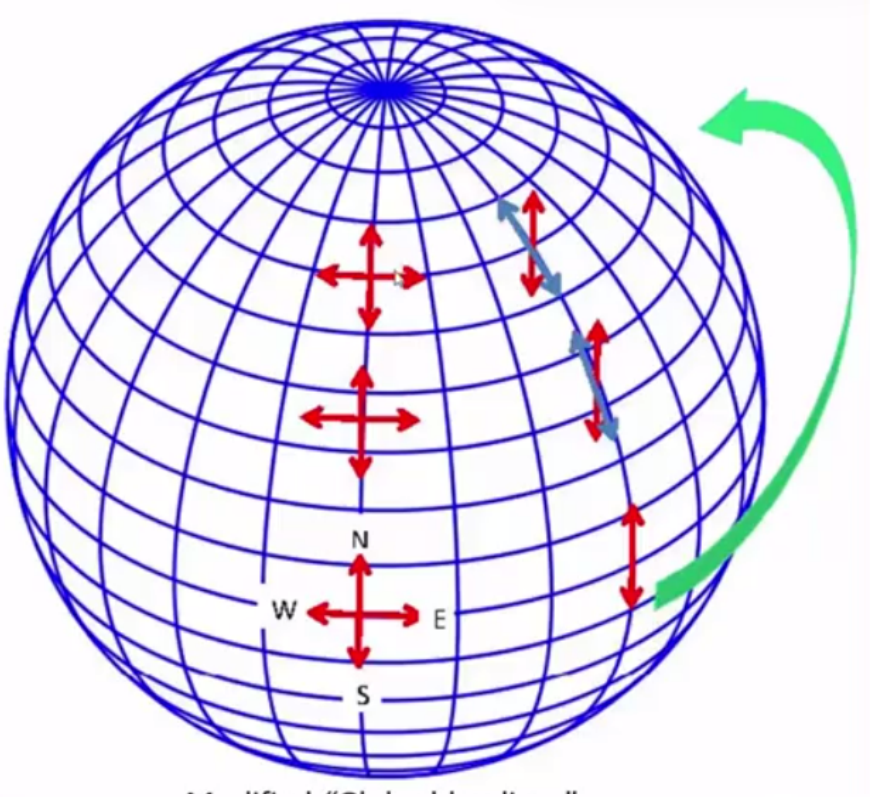

Sun on grass
Convection
Emission
~ 25%
Reflected
~ 75%
Absorbed

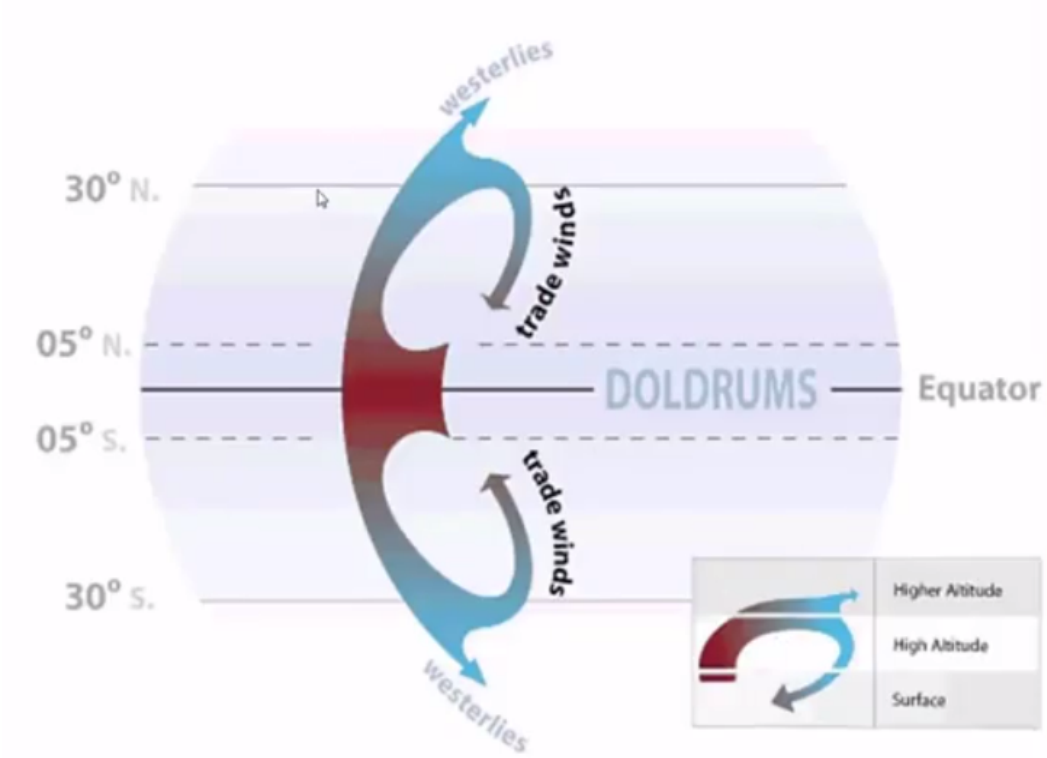

Sun on water
Convection
Emission
~ 80%
Reflected
WATER
~ 20%
Absorbed


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

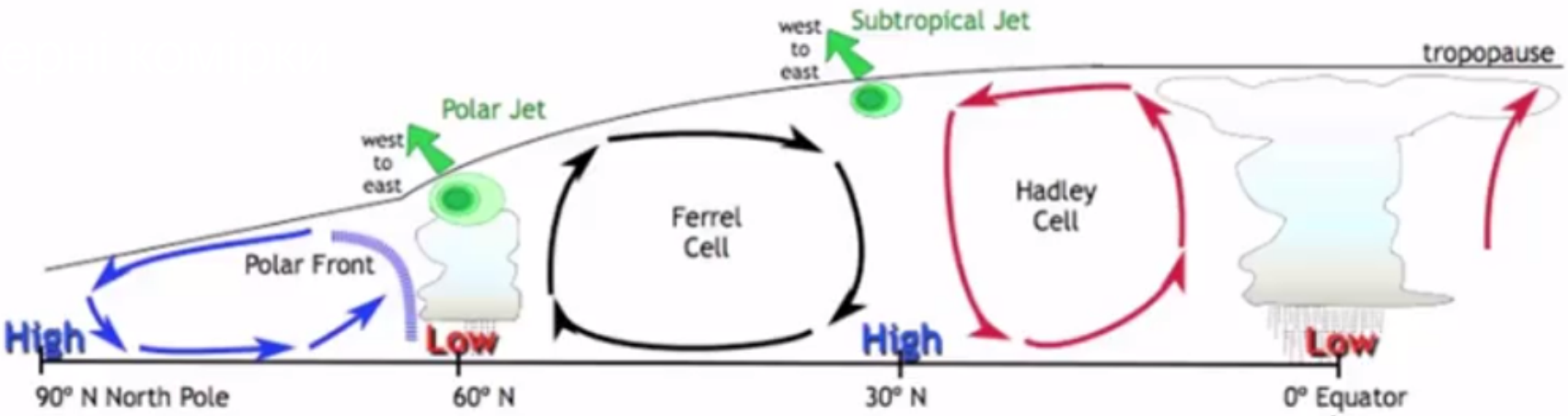


High & low pressure by NOAA Ocean Service Education

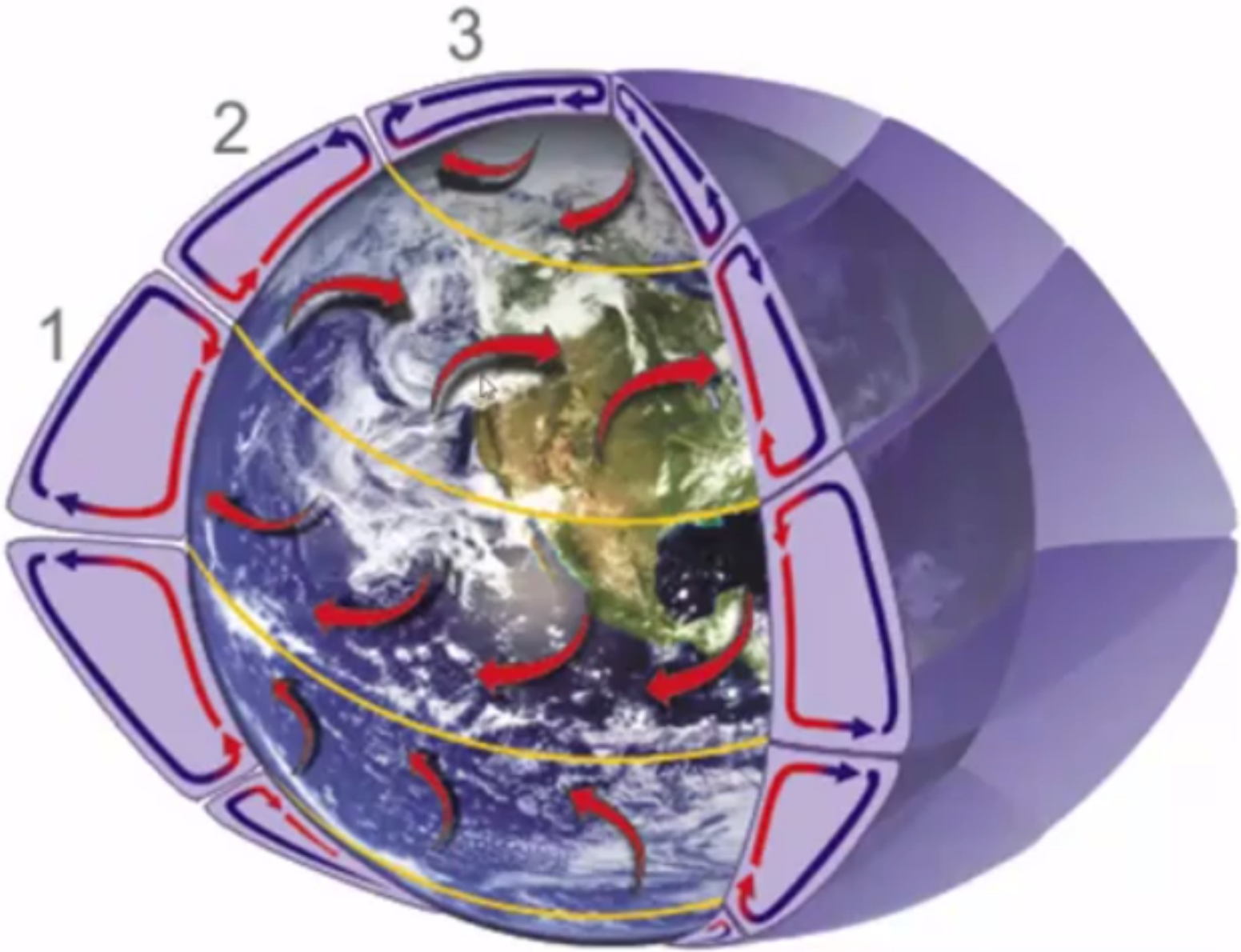




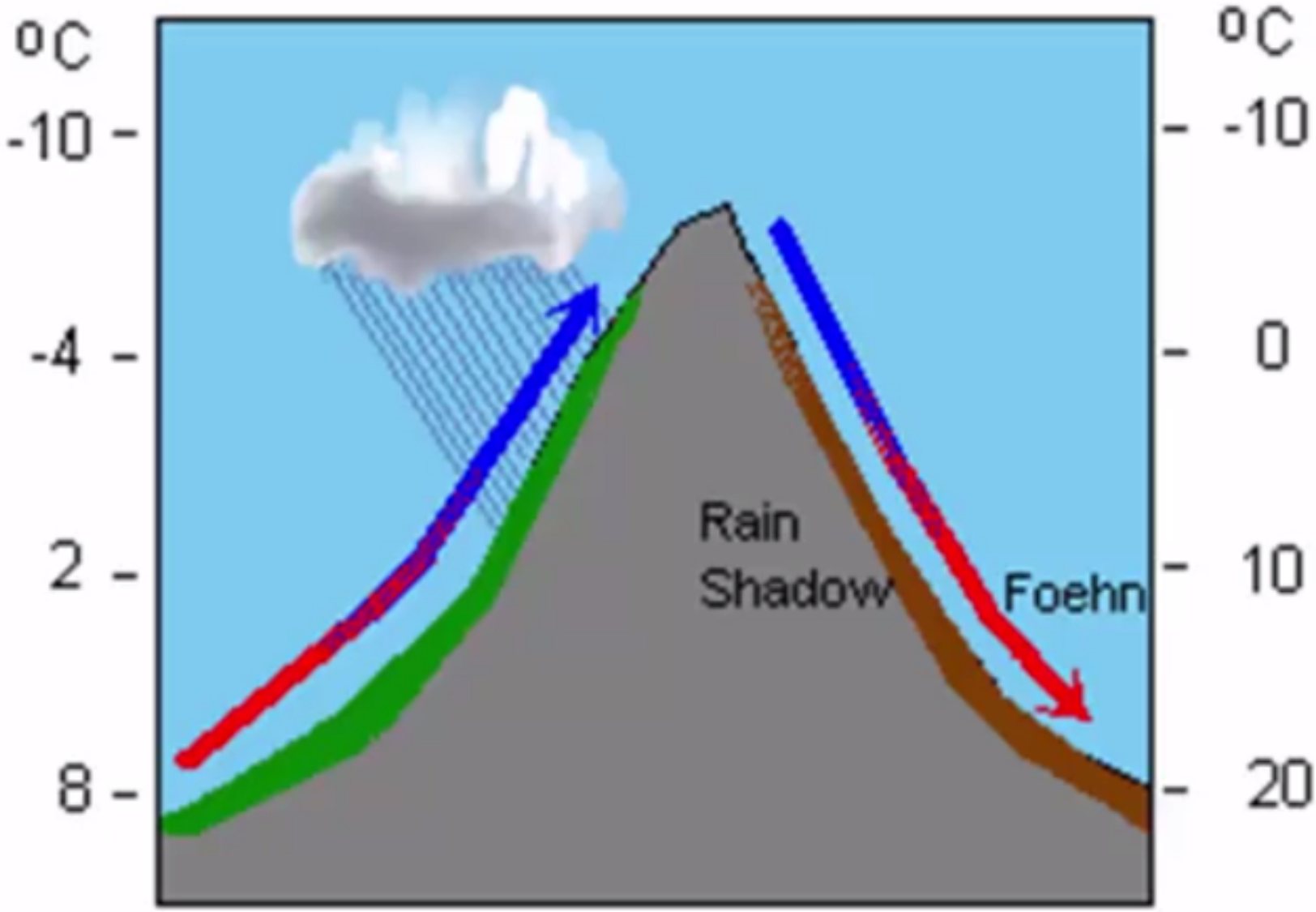
Trade winds by NOAA Ocean Service education

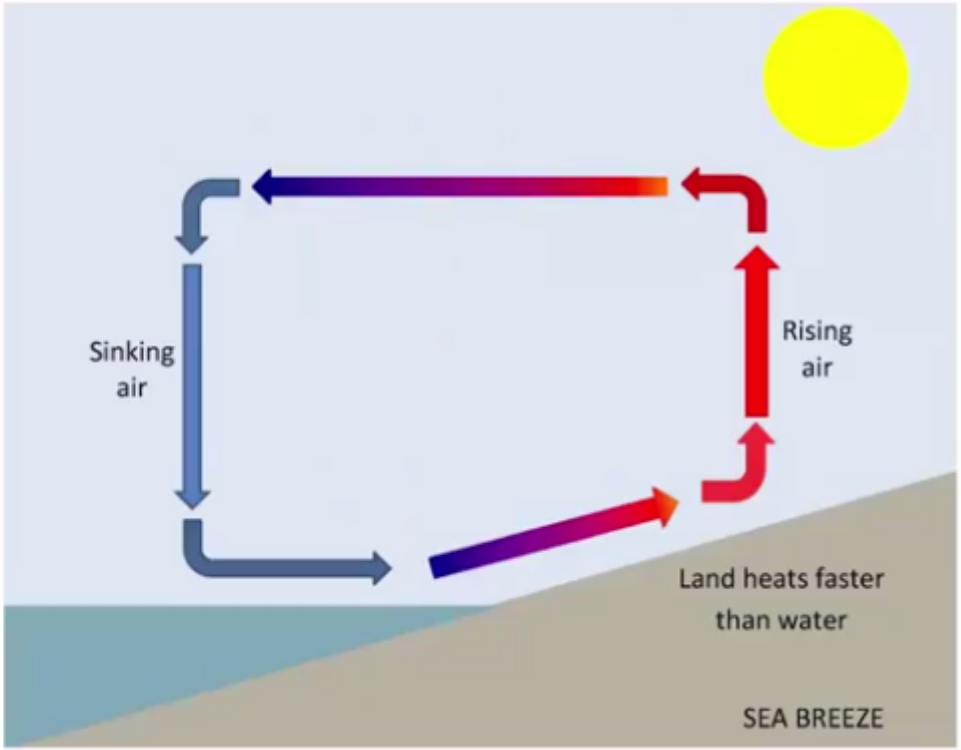


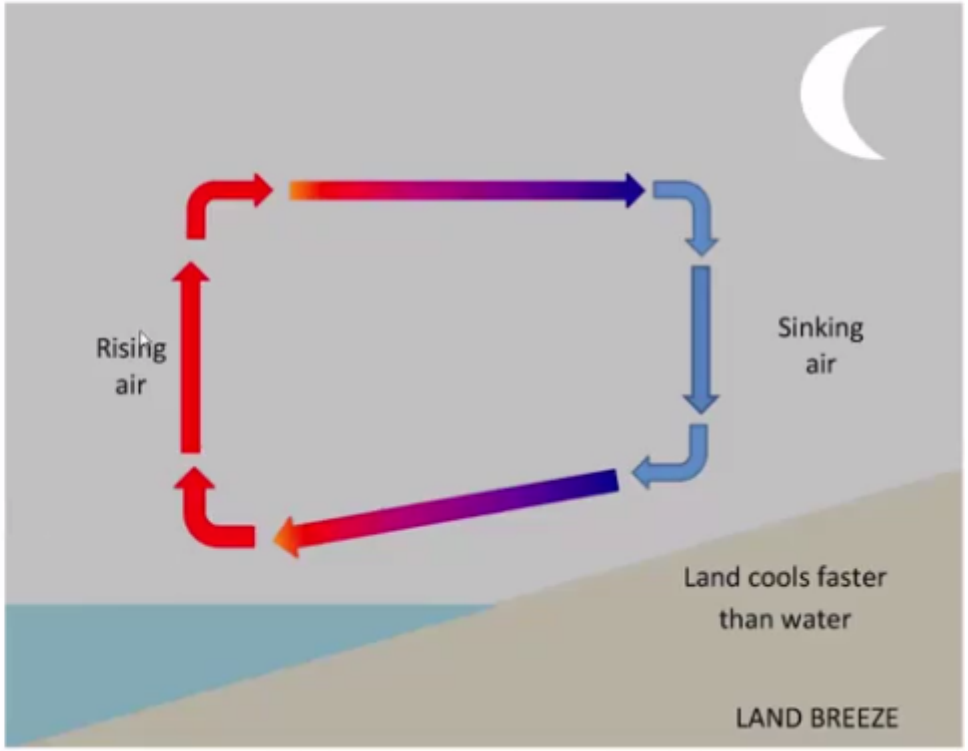
Center for Multiscale Modeling of Atmospheric Processes (CMMAP)

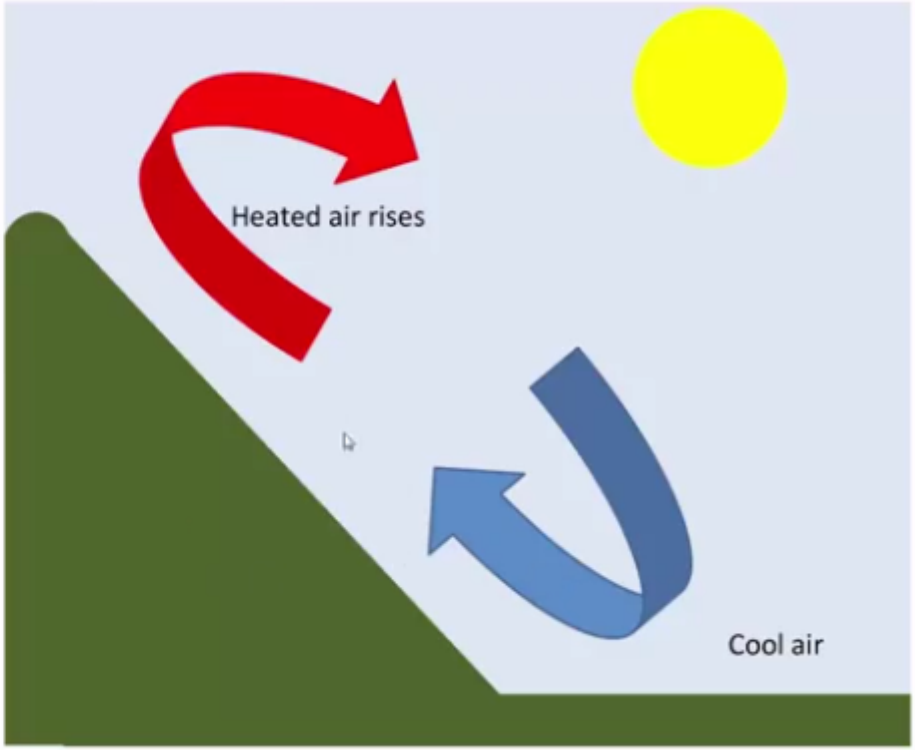


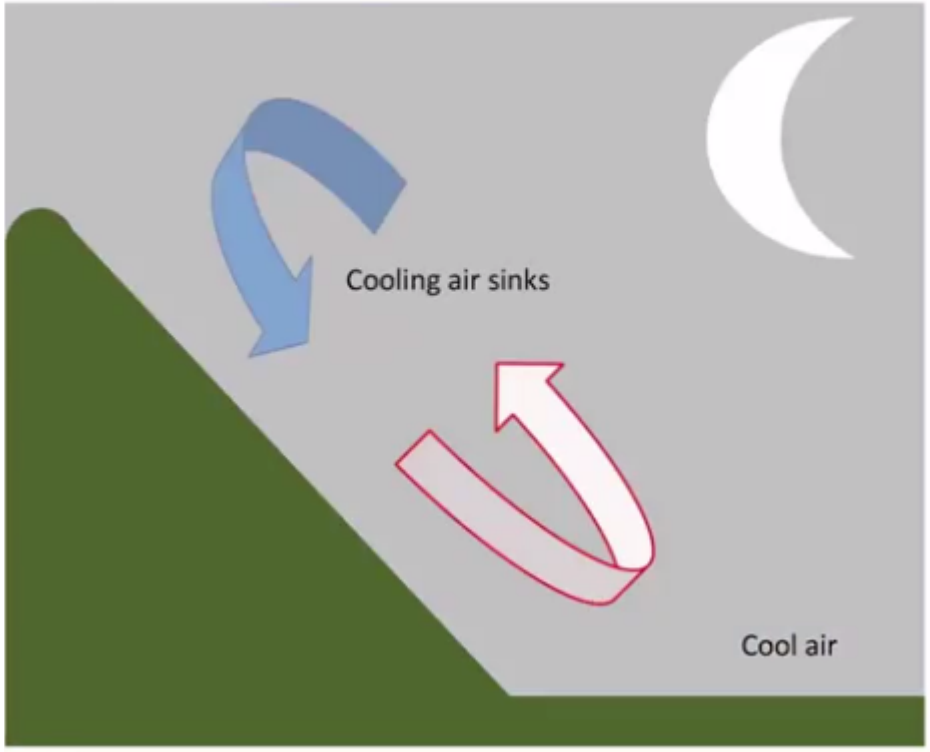
Global Circulation by US National Weather Service

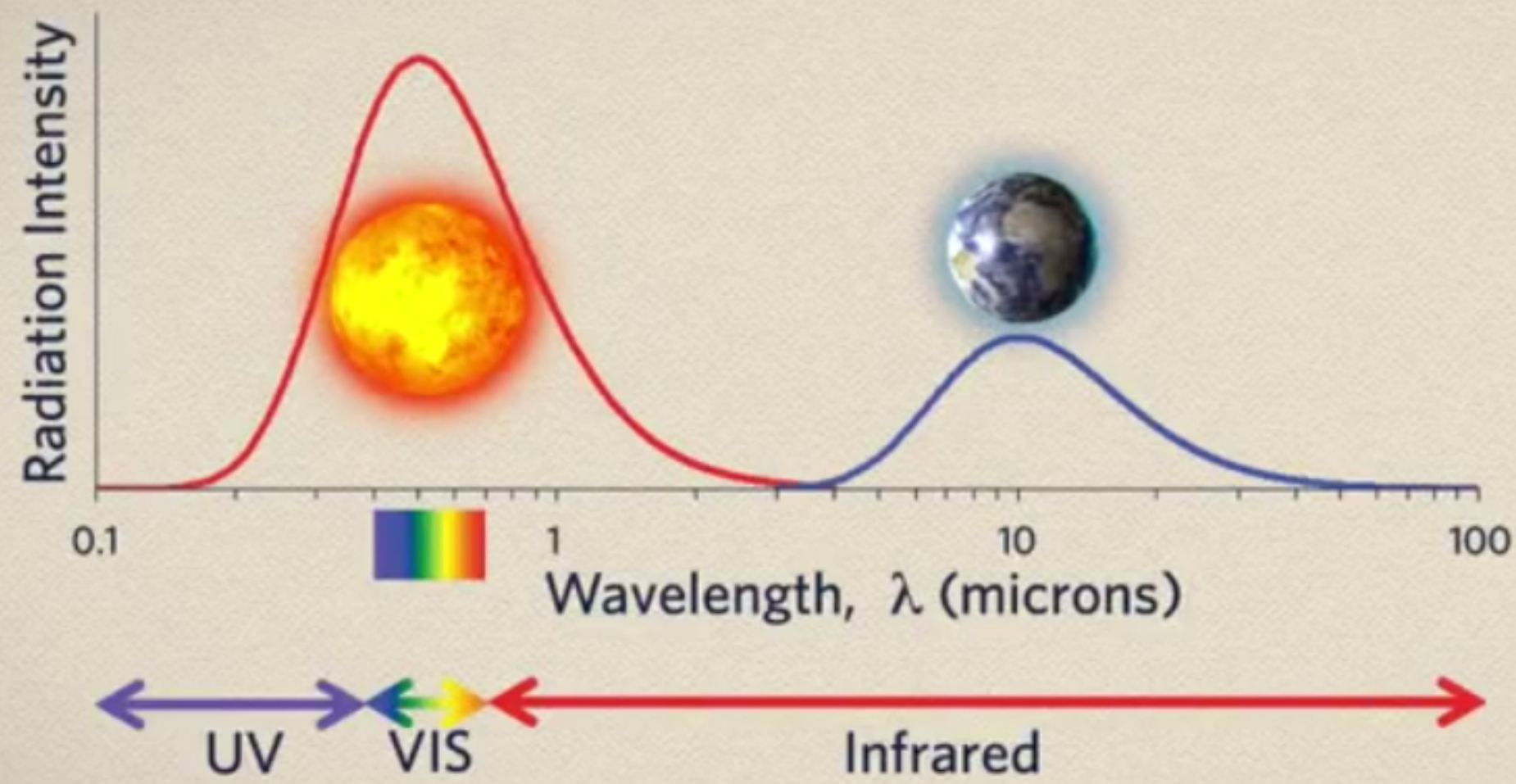

°C
-10
-4
2
8
°C
-10
0
10
20
Rain
Shadow
Foehn


Sinking air
Rising air
Land heats faster than water
SEA BREEZE

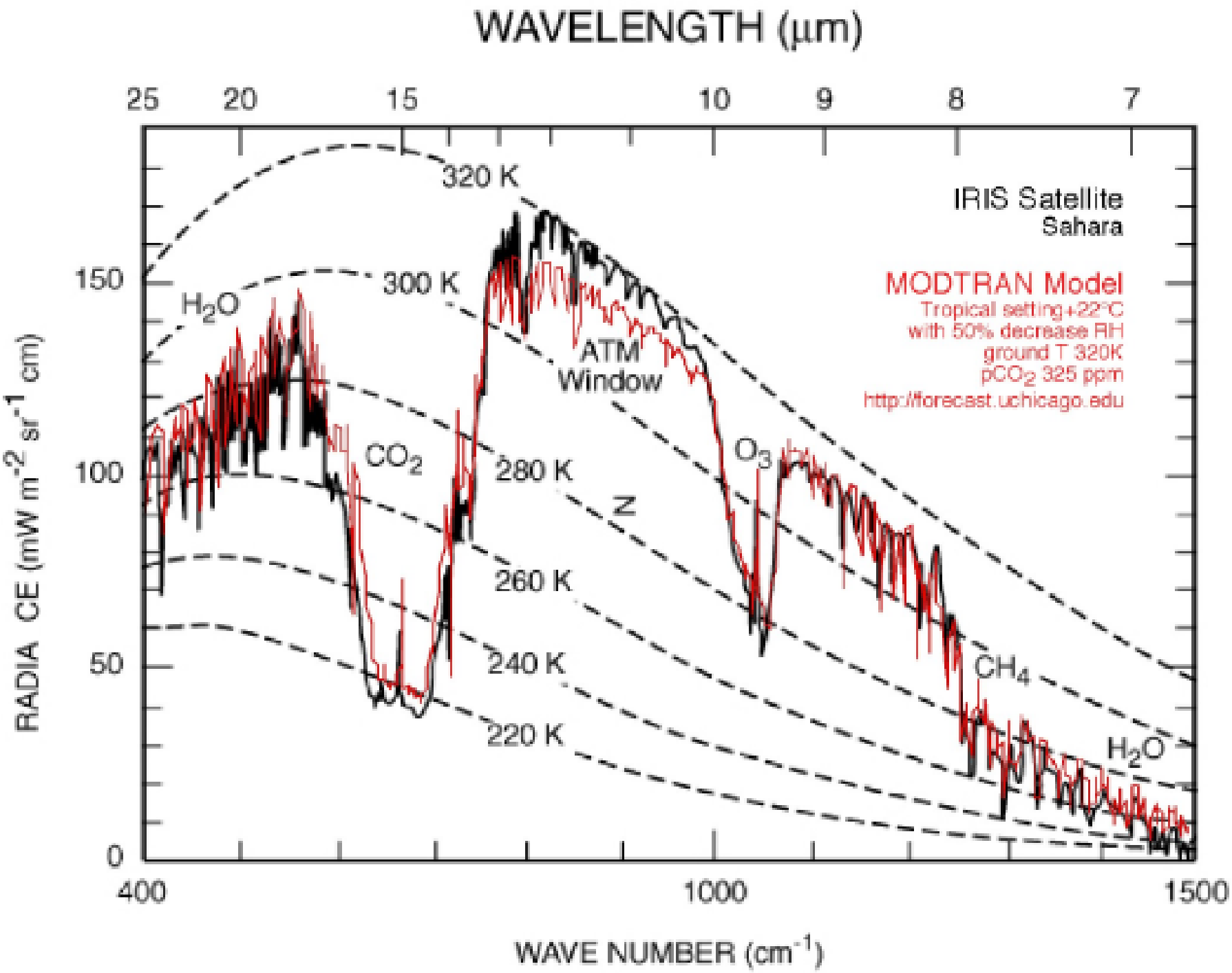

Rising air
Sinking air
Land cools faster than water
LAND BREEZE

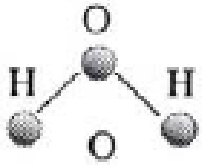
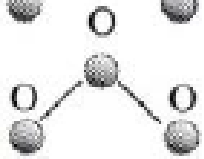
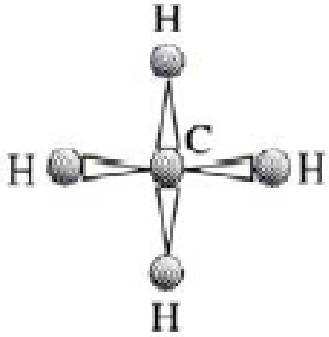

Heated air rises
Cool air


Cooling air sinks
Cool air



~0.5 μm ... Wien's law ... T_{sun} = 5800 K


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

Diatomic Structures

N_2, O_2, CO

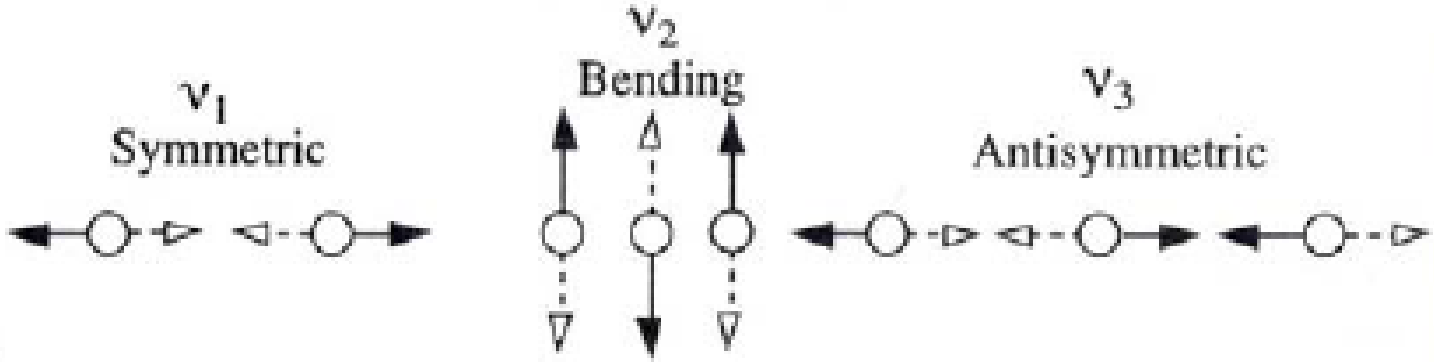
Triatomic Structures

ν_1 Symmetric

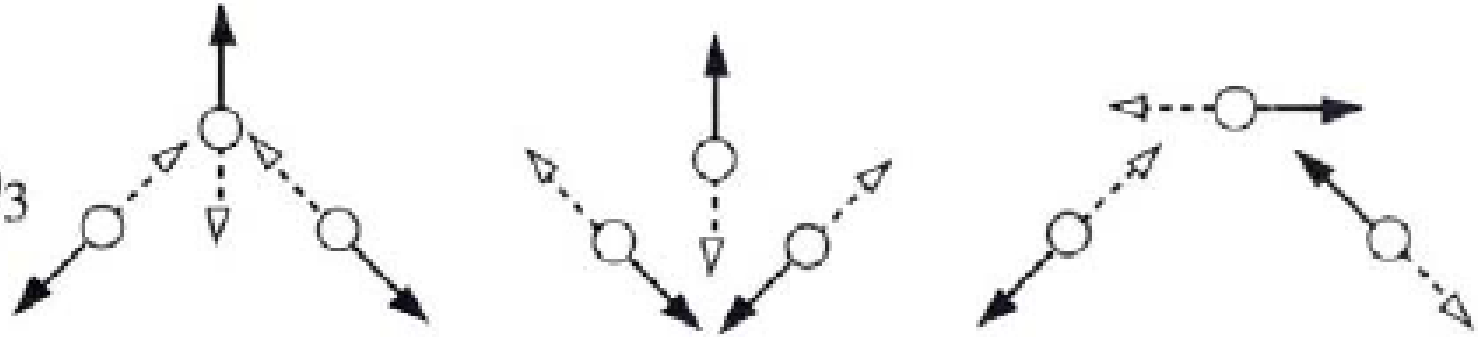
ν_2 Bending

ν_3 Antisymmetric

CO_2, N_2O



H_2O, O_3



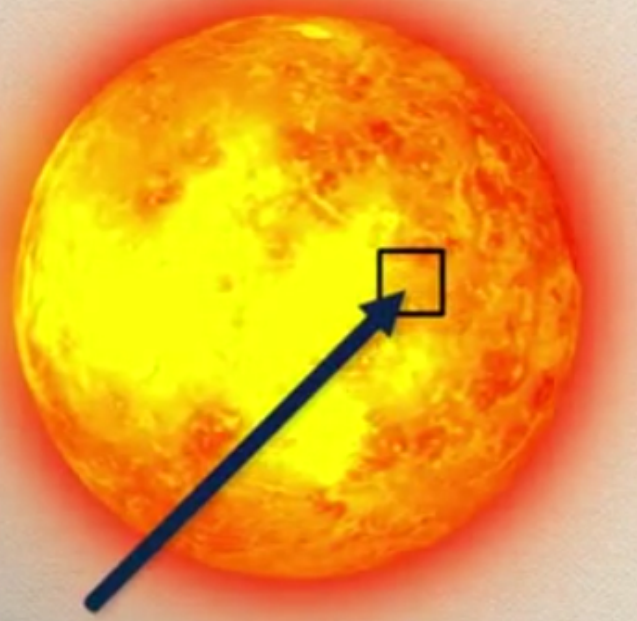
Stefan-Boltzmann's law (very useful!)

$$F = \sigma T^4$$

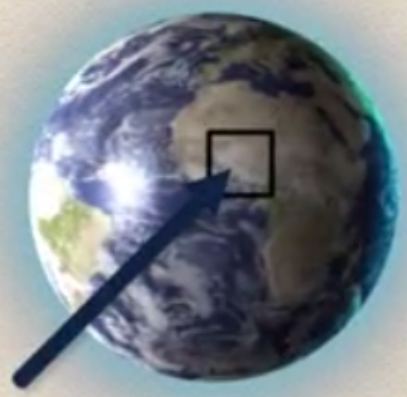
F is the energy emitted, per unit time, per unit area, expressed in W/m^2 $[J/s*m^2]$

σ is a constant $[5.67*10^{-8}\ W/m^2K^4]$

T is the absolute temperature (K)

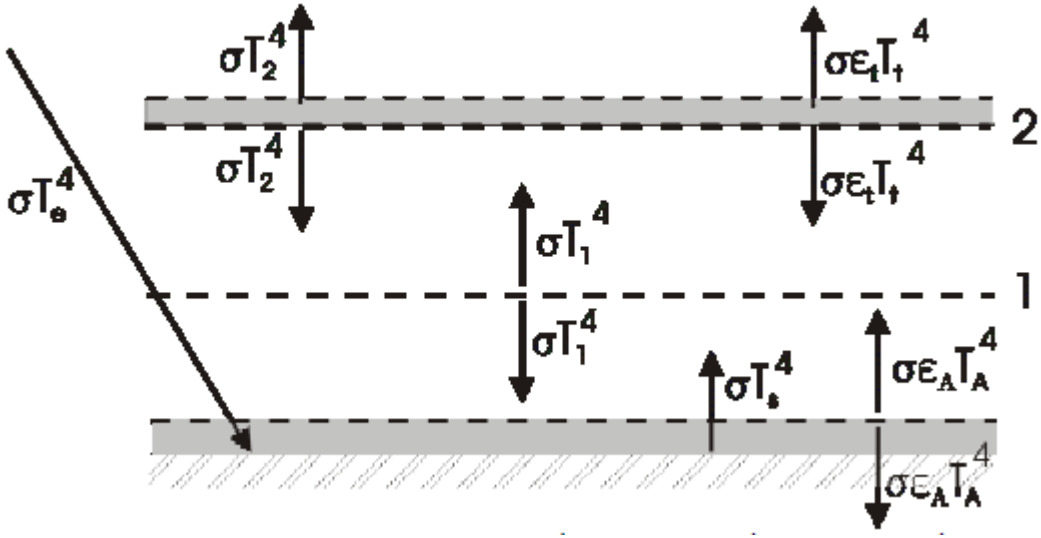


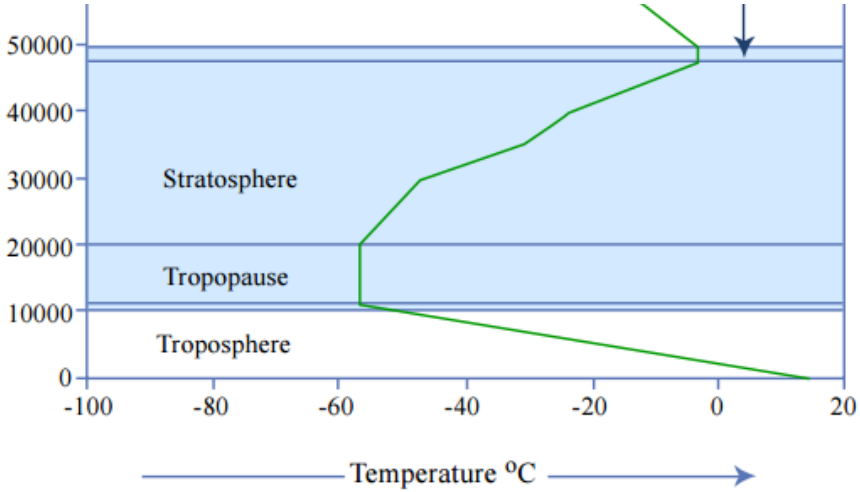
64 million W/m^2



240 W/m^2

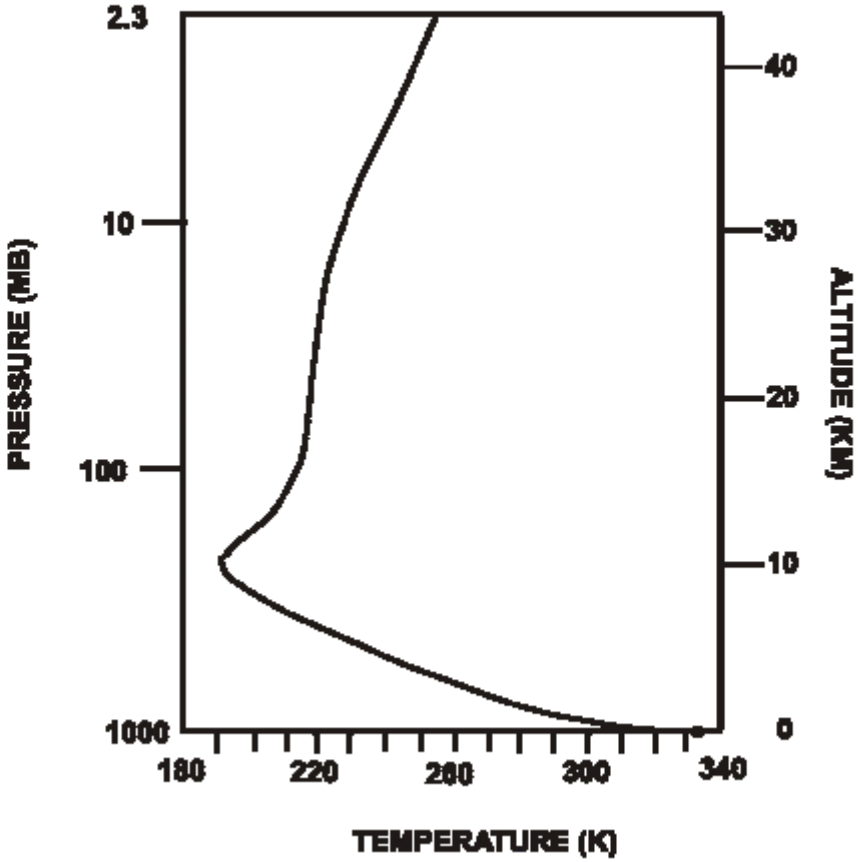
IMAGES: NASA



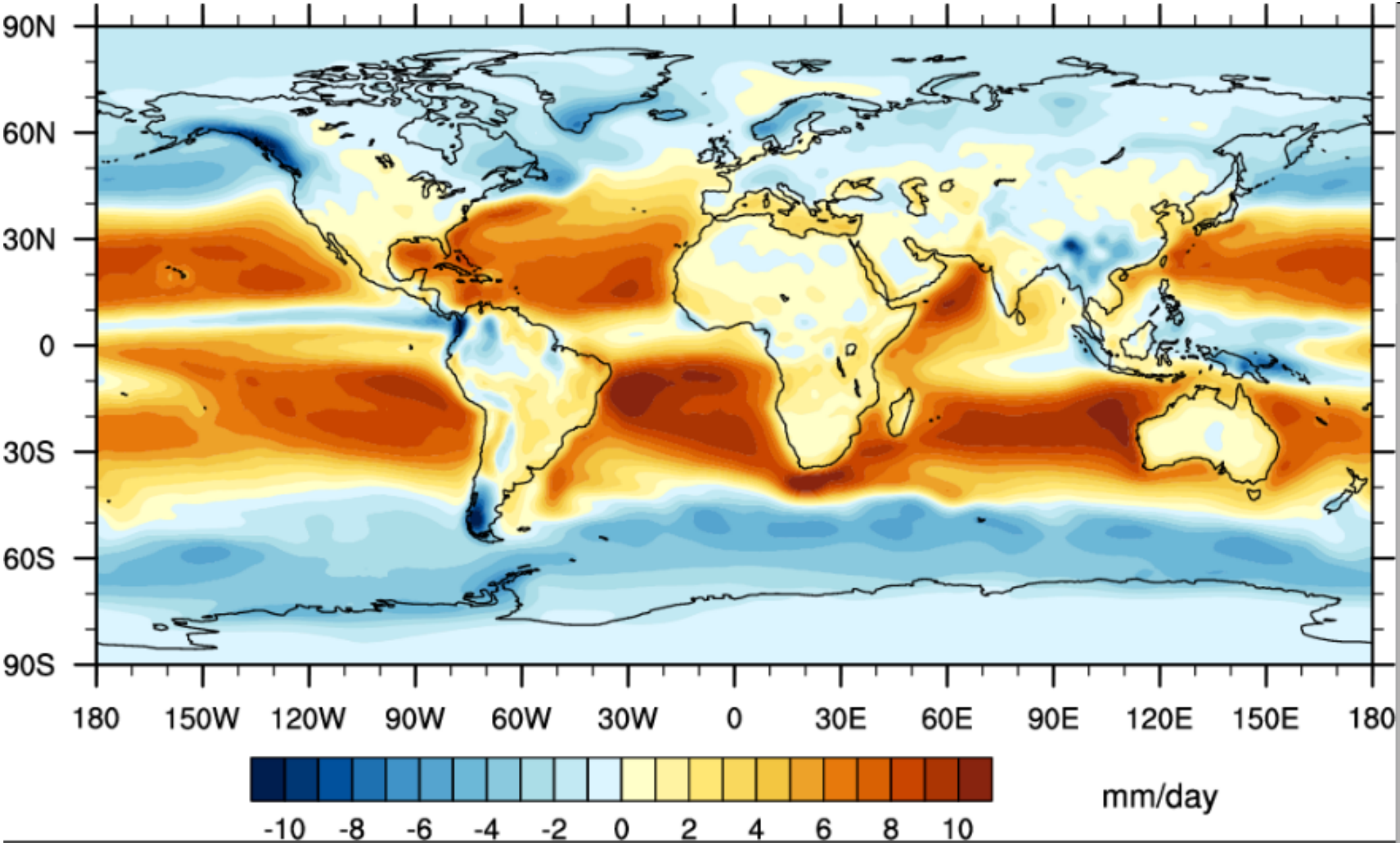


Модель багатошарової атмосфери

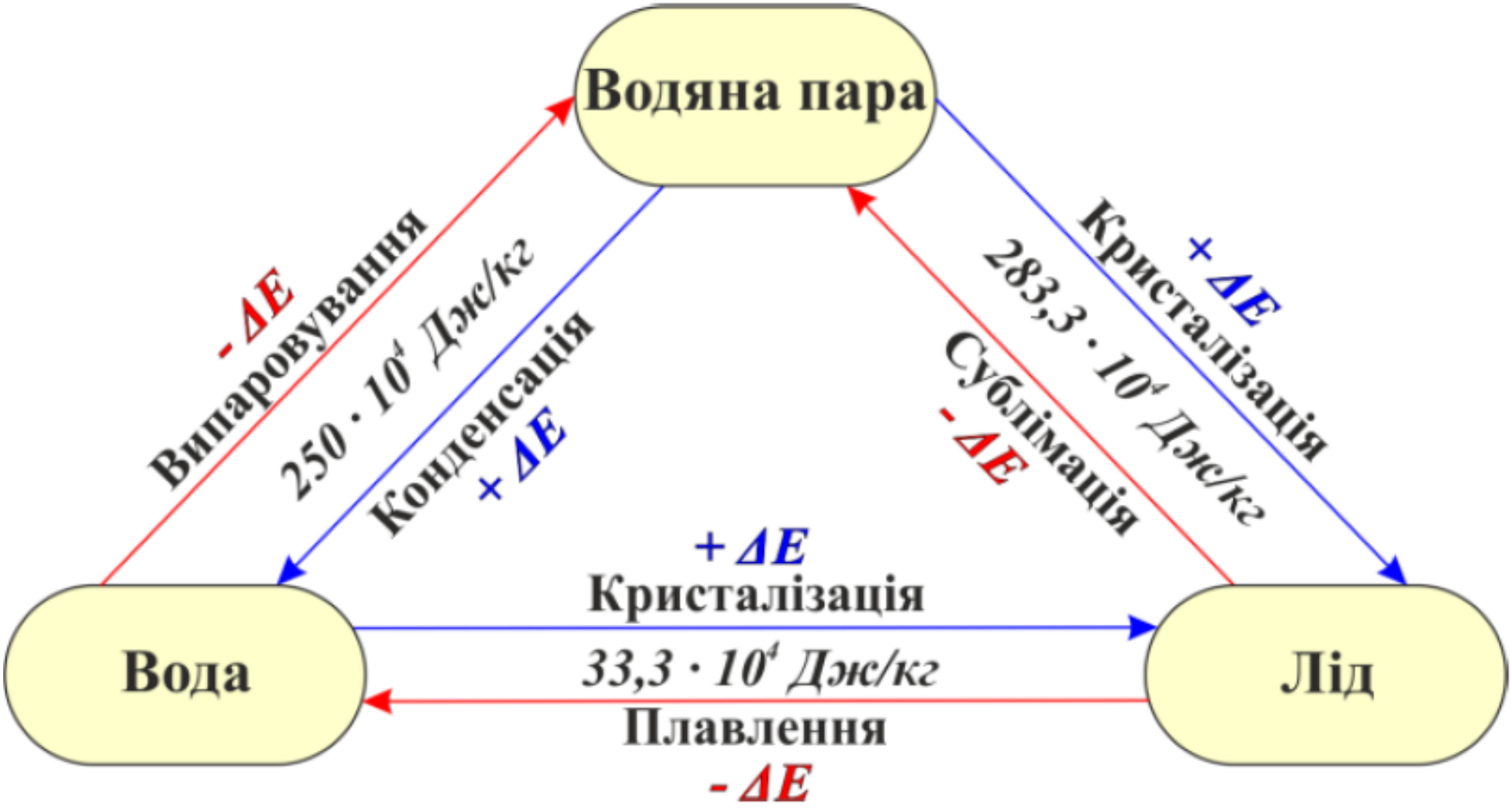
Але ця модель не враховує конвекції!



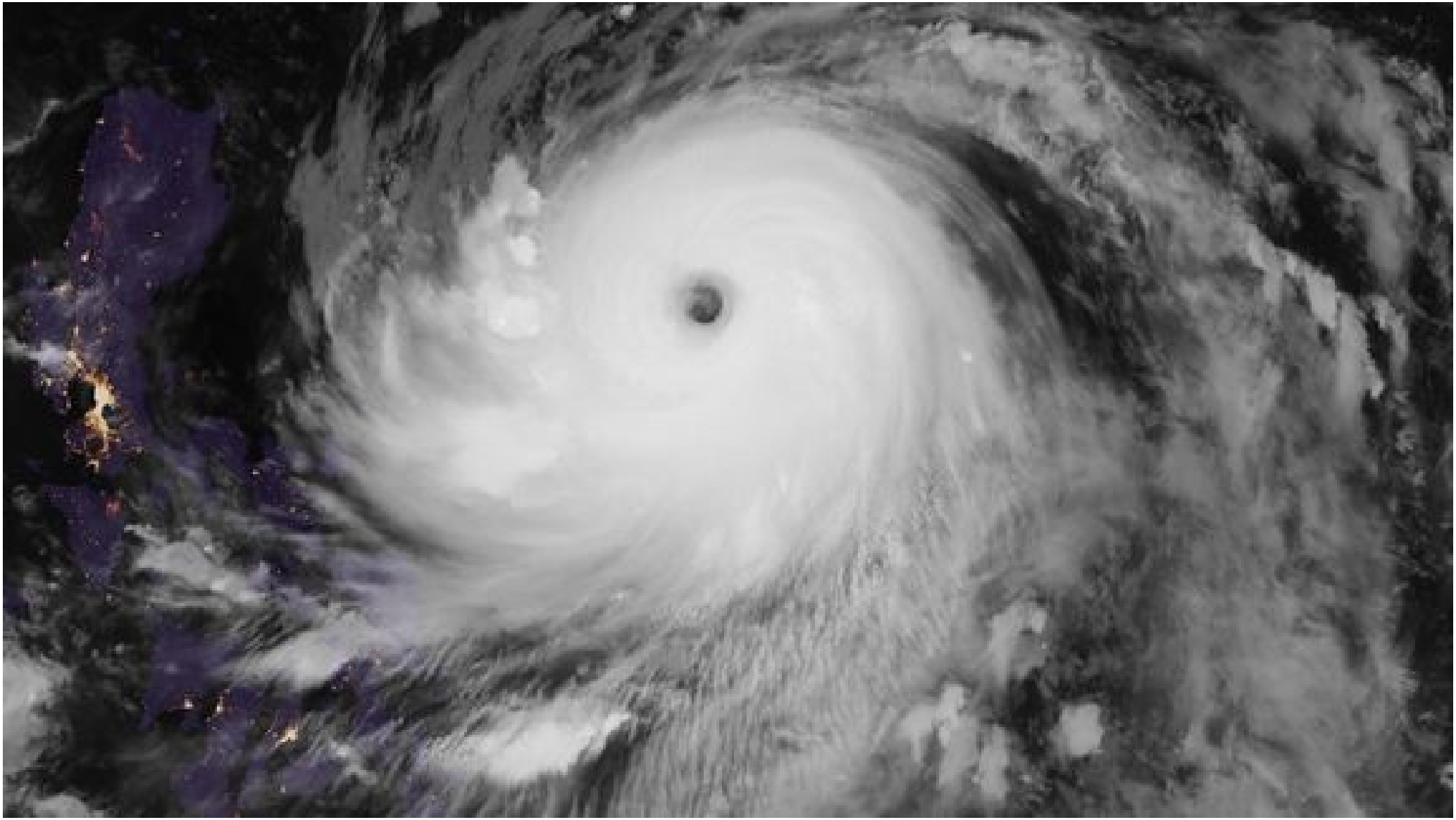
Characteristics of atmospheric moisture transport



Climatological mean evaporation minus precipitation


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

Циклон чи ураган?



Ураган – тропічний шторм, який сформувався над північною частиною Атлантичного океану чи північно-східною частиною Тихого океану.
Циклони формуються над південною частиною Тихого океану та Індійським океаном.
Тайфуни формуються над північно-східною частиною Тихого океану.

https://www.bbc.com/news/science-environment-45519964

Hubblecast 123 Light: Jupiter's Great Red Spot

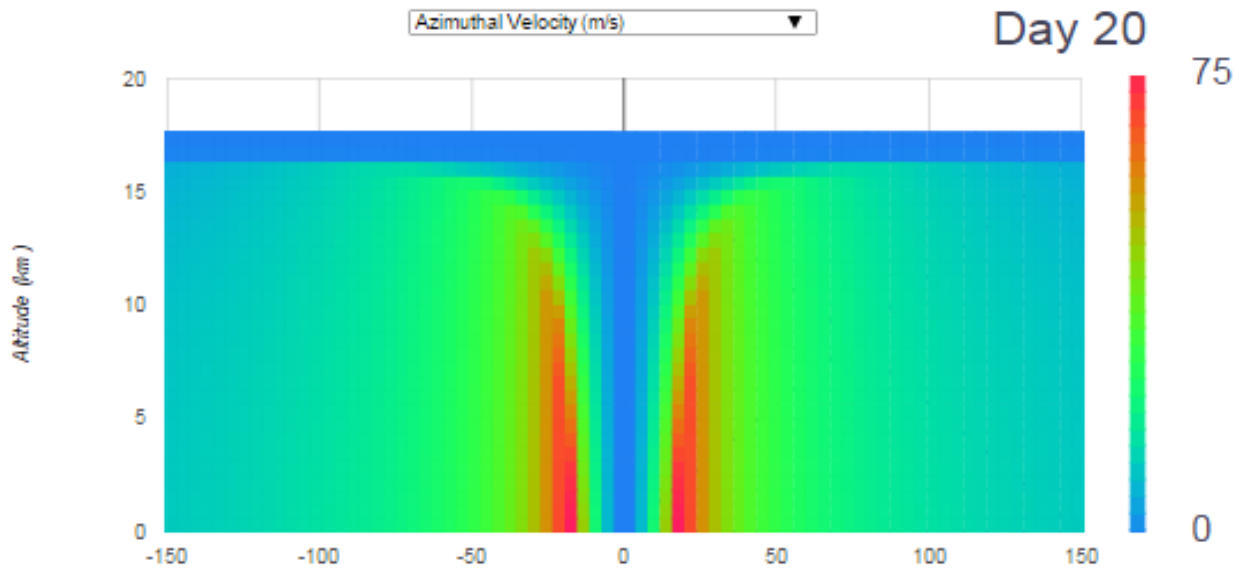
This video highlights Jupiter's trademark spot and observations made of the feature by the NASA/ESA Hubble Space Telescope that demonstrate that the spot has shrunk over time.

https://www.spacetelescope.org/videos/heic1914a/

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

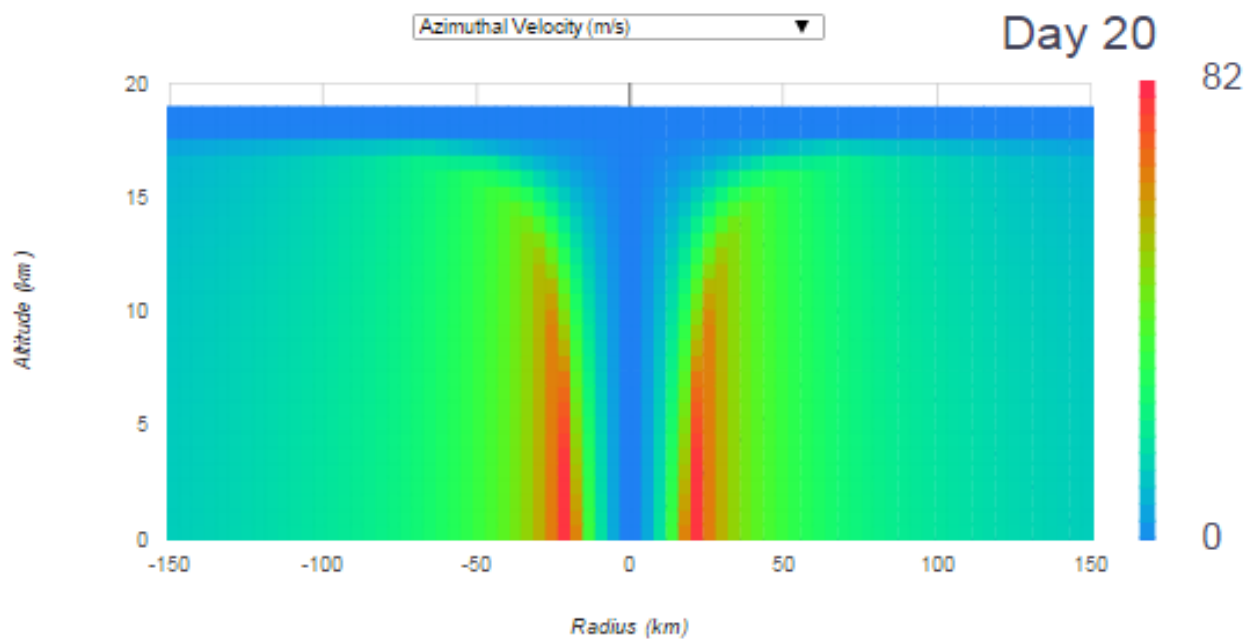
Sea Surface Temperature	27
Temperature Aloft	-70
Incoming Surface Air Relative Humidity, %	80
Wind Shear (m/s)	2
Latitude	20
Make Landfall	
Enable Ocean Mixing	

Replay

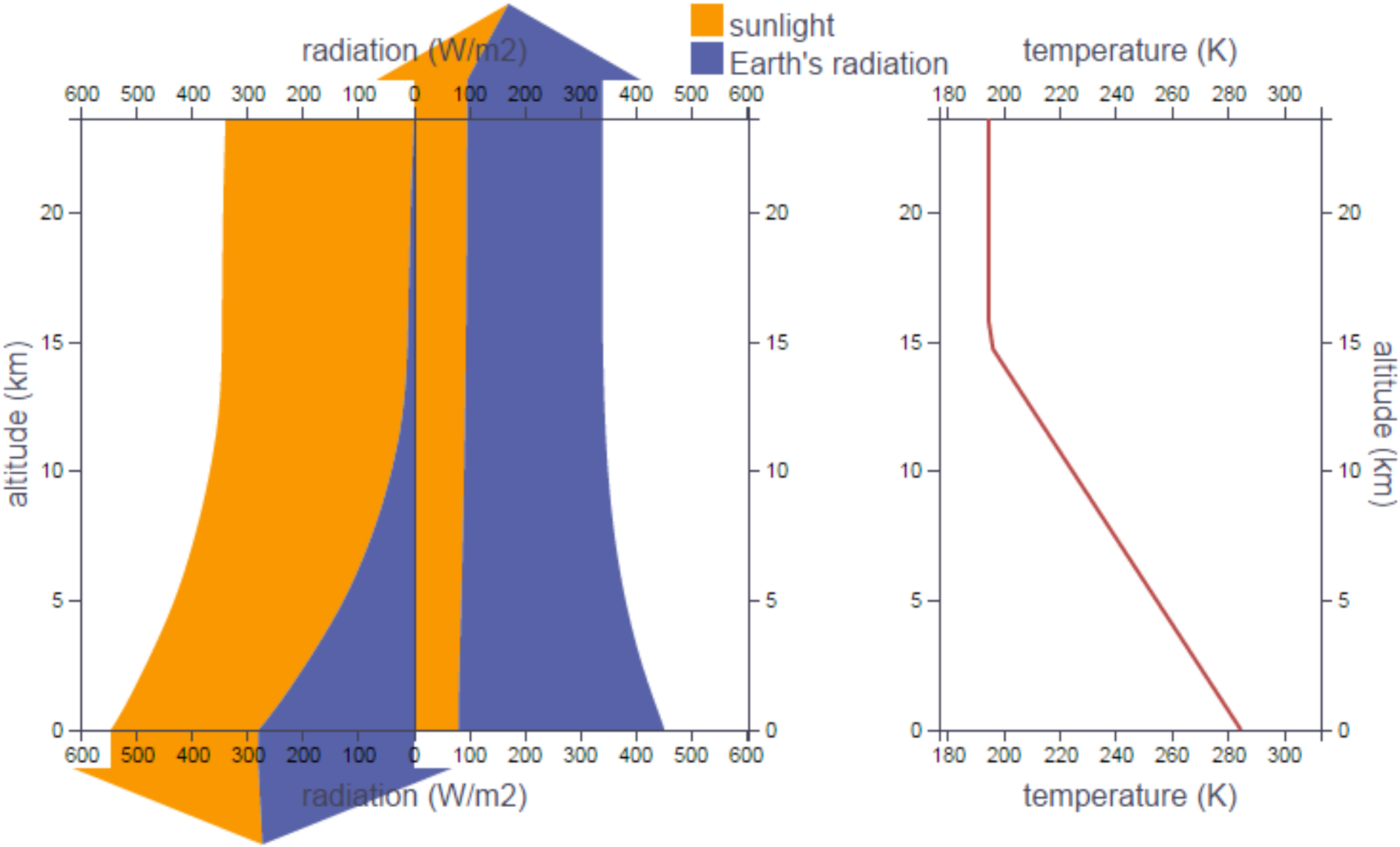


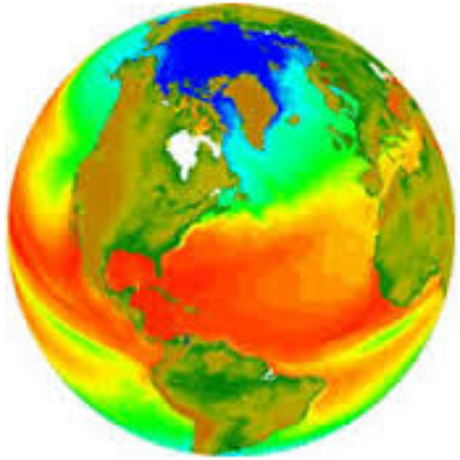
Sea Surface Temperature	29
Temperature Aloft	-70
Incoming Surface Air Relative Humidity, %	80
Wind Shear (m/s)	2
Latitude	20
Make Landfall	
Enable Ocean Mixing	

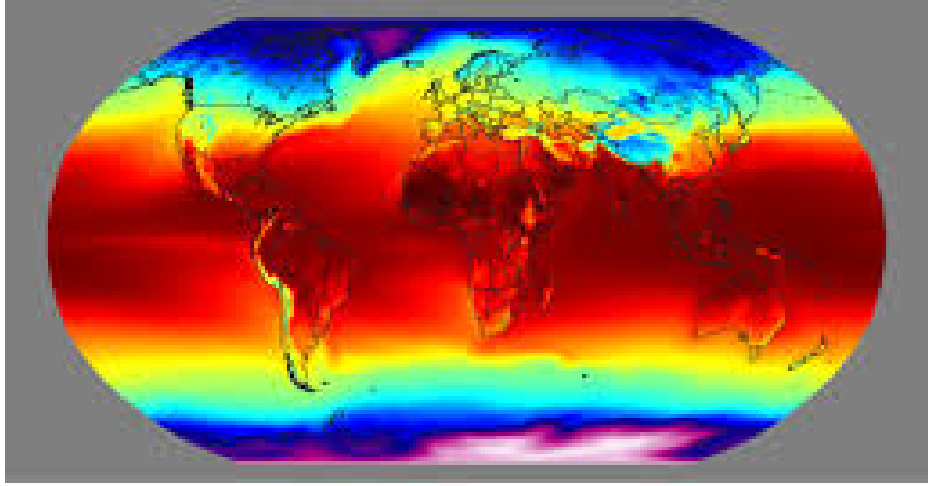
Replay

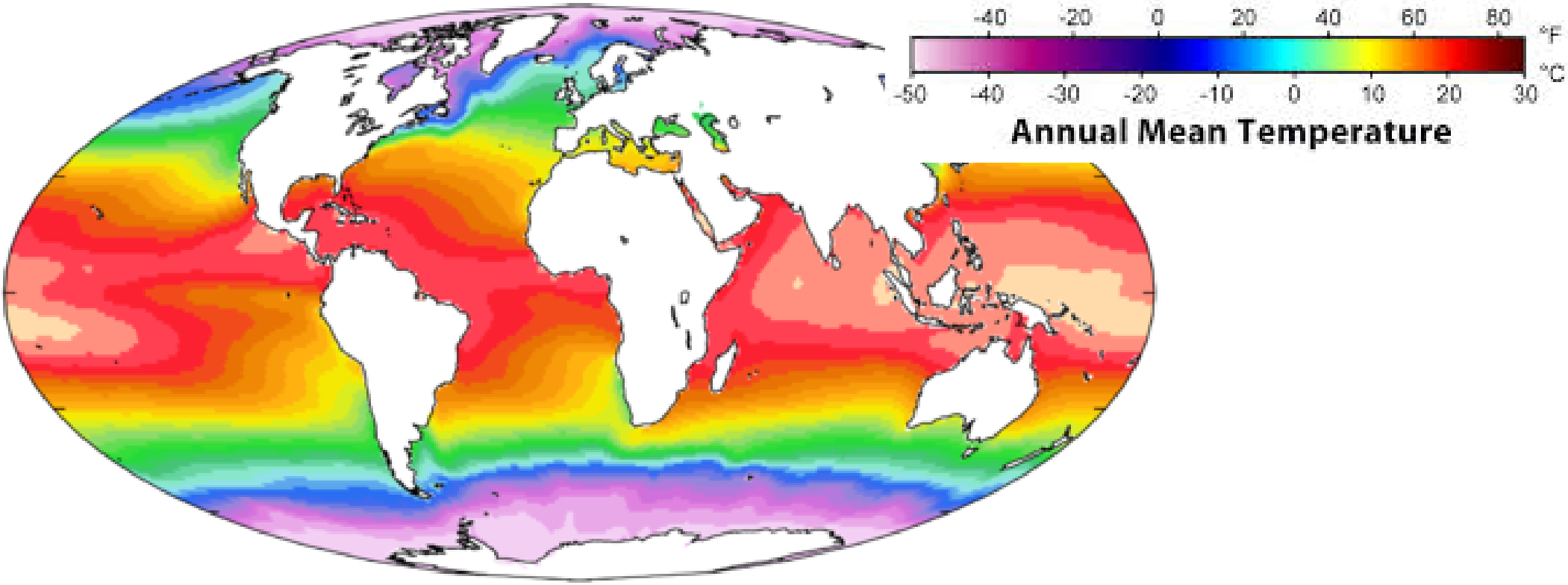


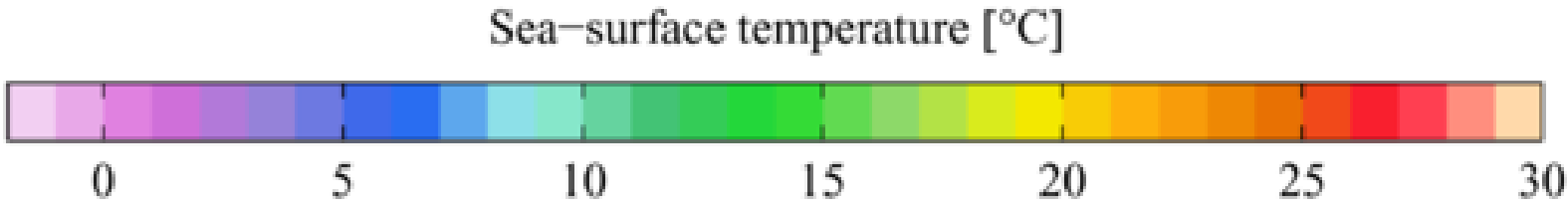
```
model_data["Tbound"] = [float(model_data["Ts"]) - min(float(alt),float(model_data["tropopause"])) * float(model_data["lapseRate"]) for alt
model_data["T"] = number_of_layers * [0]
model_data["lev"] = number_of_layers * [0]
for i in range(number_of_layers):
    if i == 0:
        T = (float(model_data["Ts"]) + 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']
```


sunlight
Earth's radiation
radiation (W/m2)
600 500 400 300 200 100 0 100 200 300 400 500 600
altitude (km)
0 5 10 15 20
temperature (K)
180 200 220 240 260 280 300






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


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

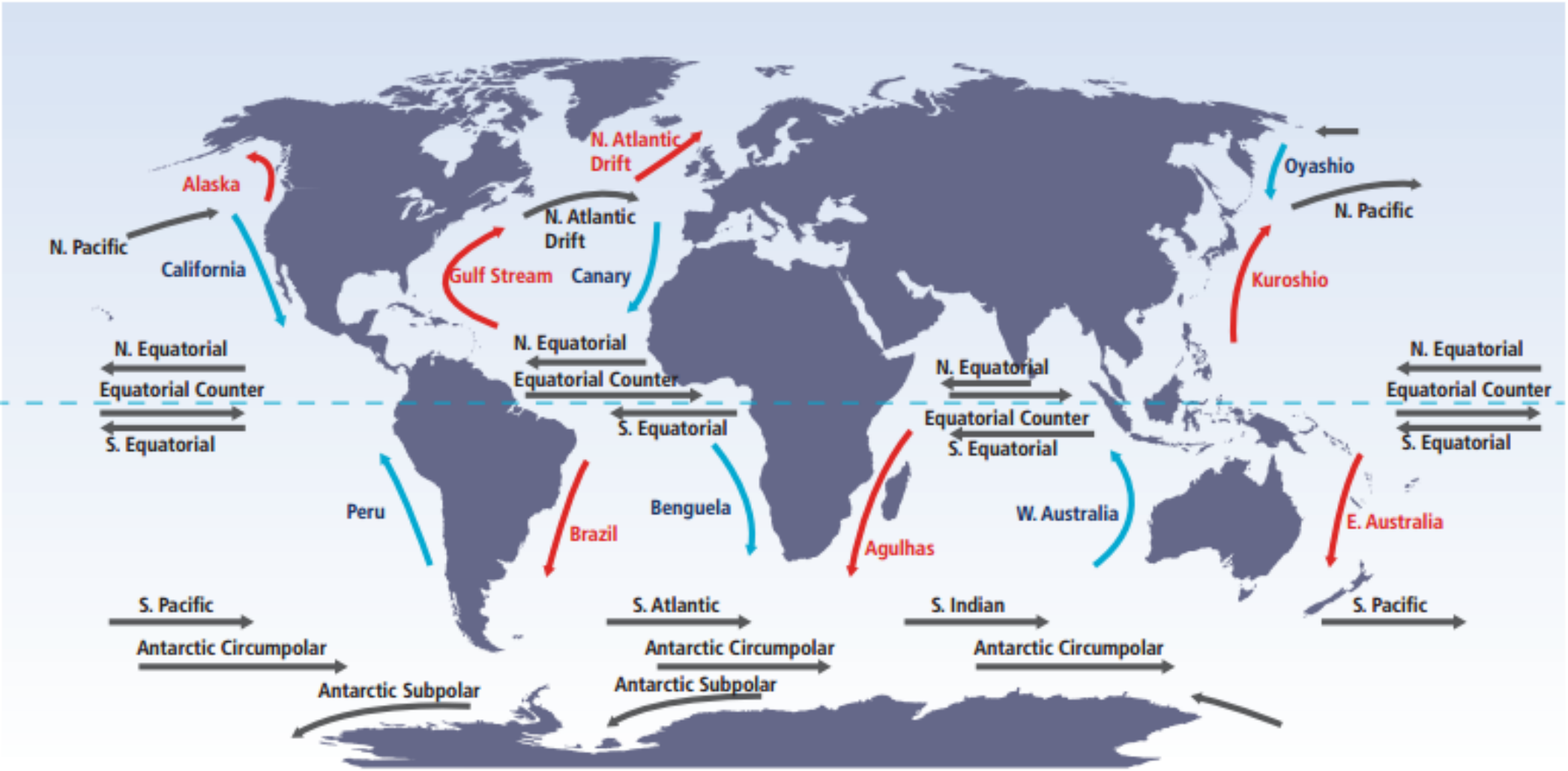
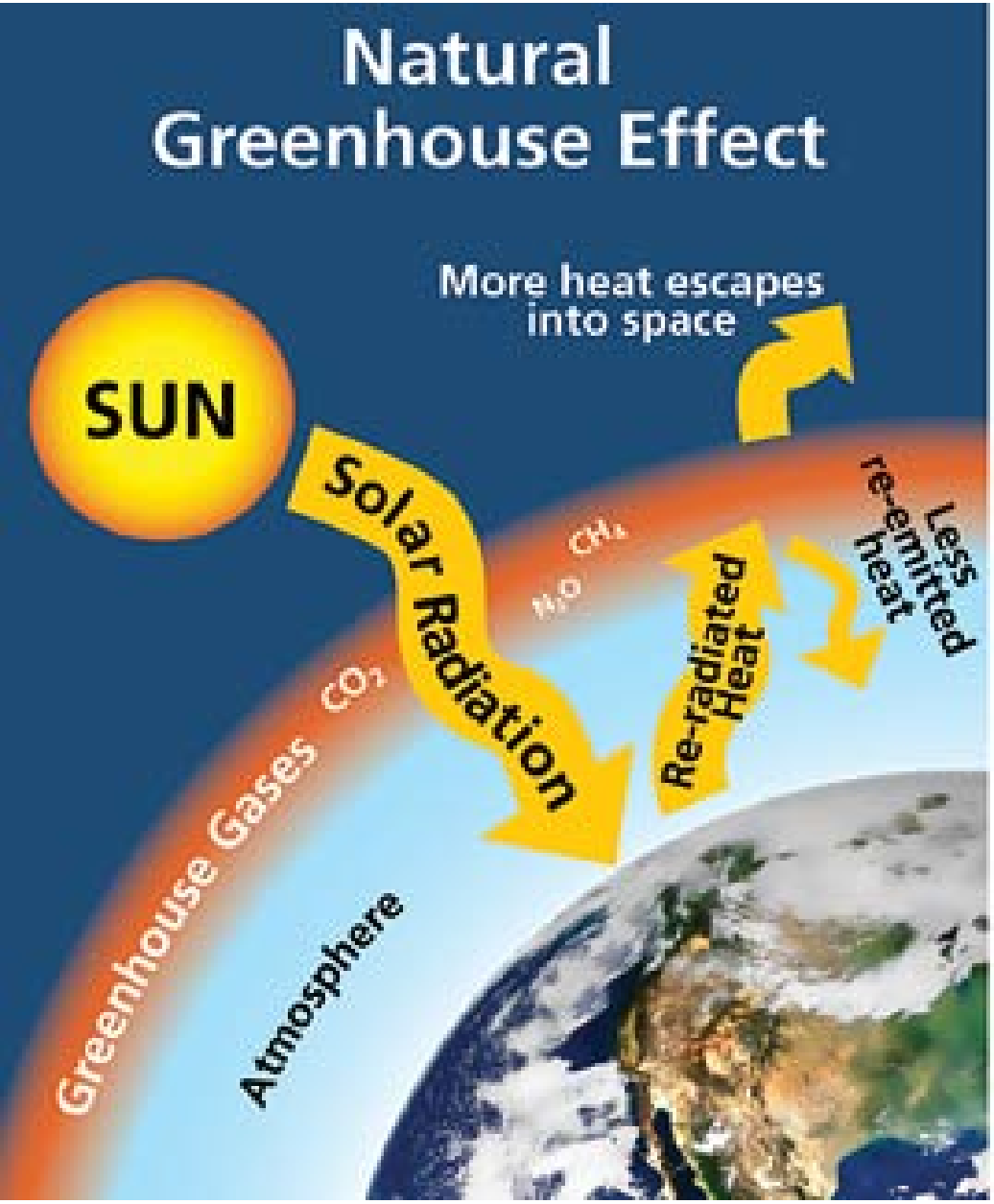
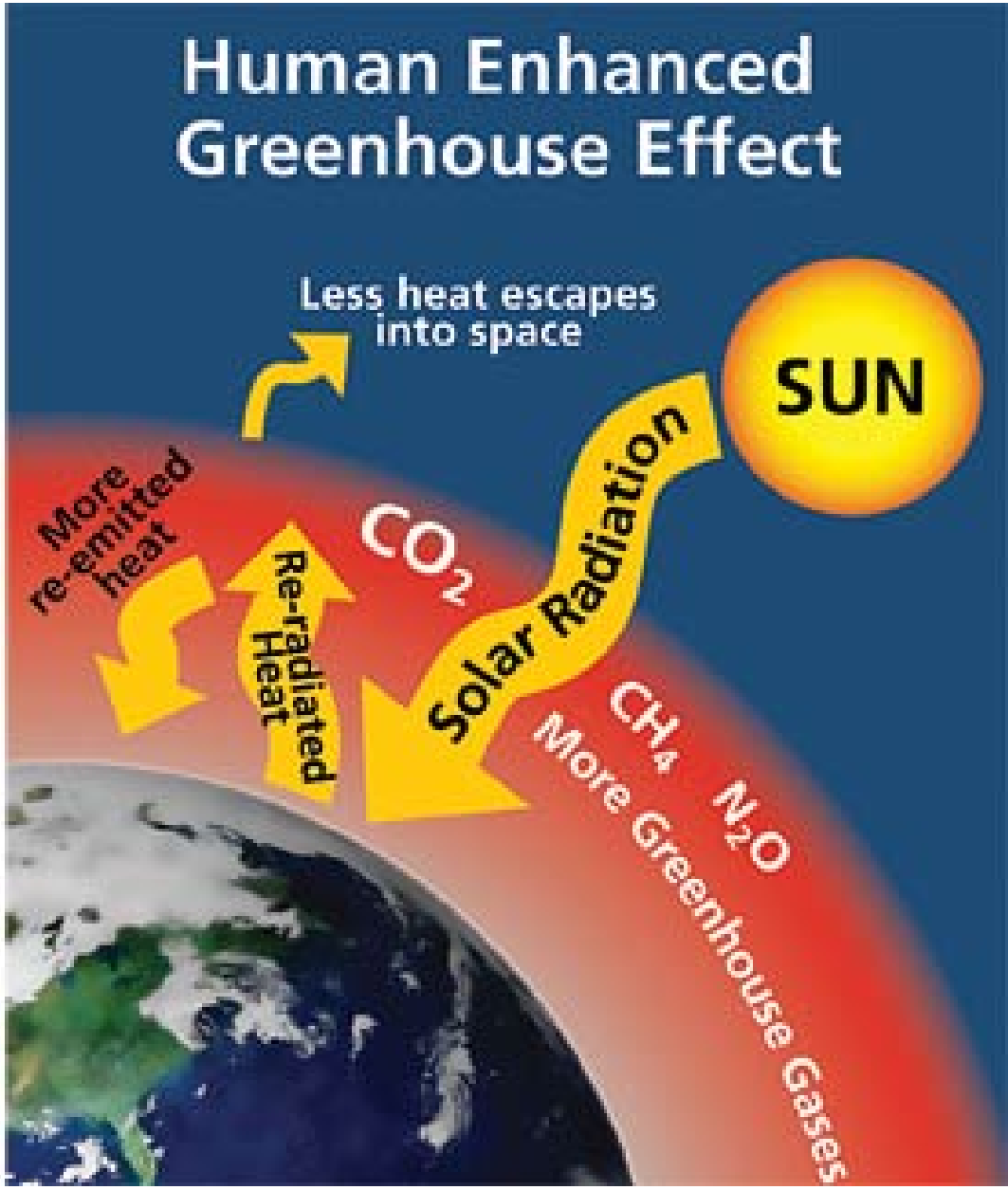
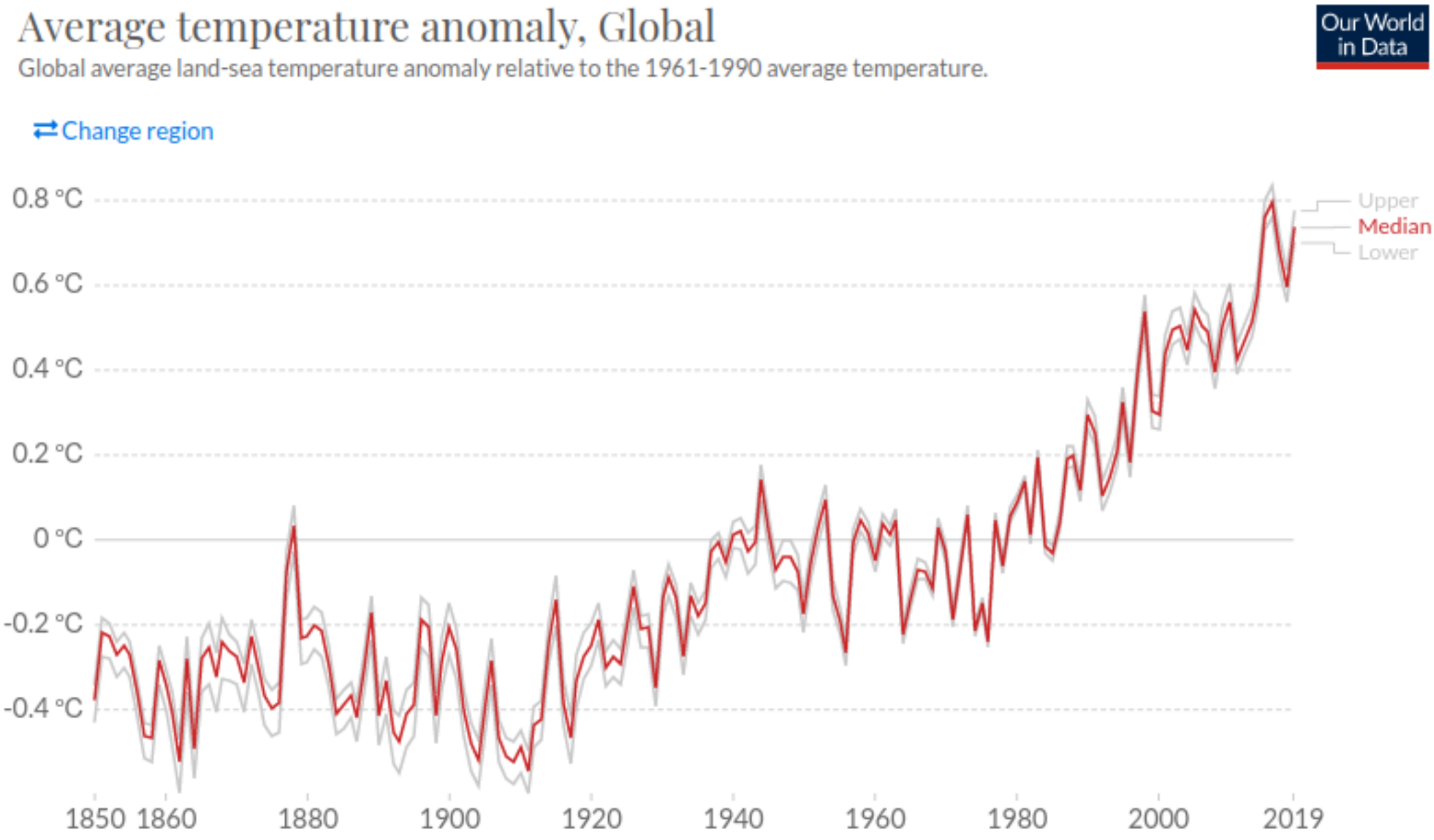


Figure TS.6.1d | Global distribution of various ocean energy resources: (d) Ocean currents. [Figure 6.3]


Natural
Greenhouse Effect
More heat escapes
into space
SUN
Solar Radiation
CH_4
N_2O
Re-radiated
Heat
Less
re-emitted
heat
CO_2
Greenhouse Gases
Atmosphere

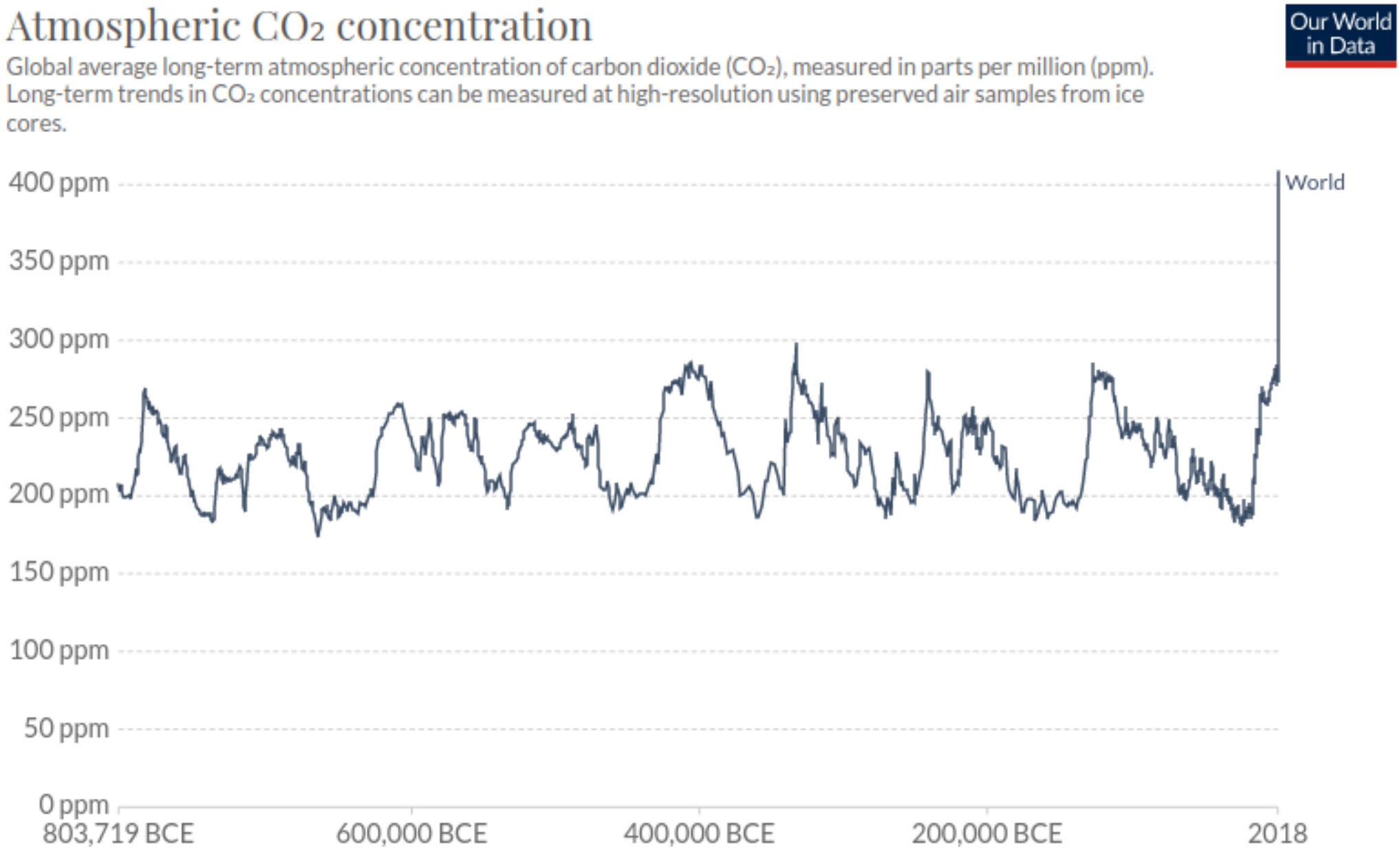

Human Enhanced
Greenhouse Effect
Less heat escapes
into space
SUN
More
re-emitted
heat
CO_2
Re-radiated
Heat
Solar Radiation
CH_4
N_2O
More Greenhouse Gases

То чи є глобальне потепління?



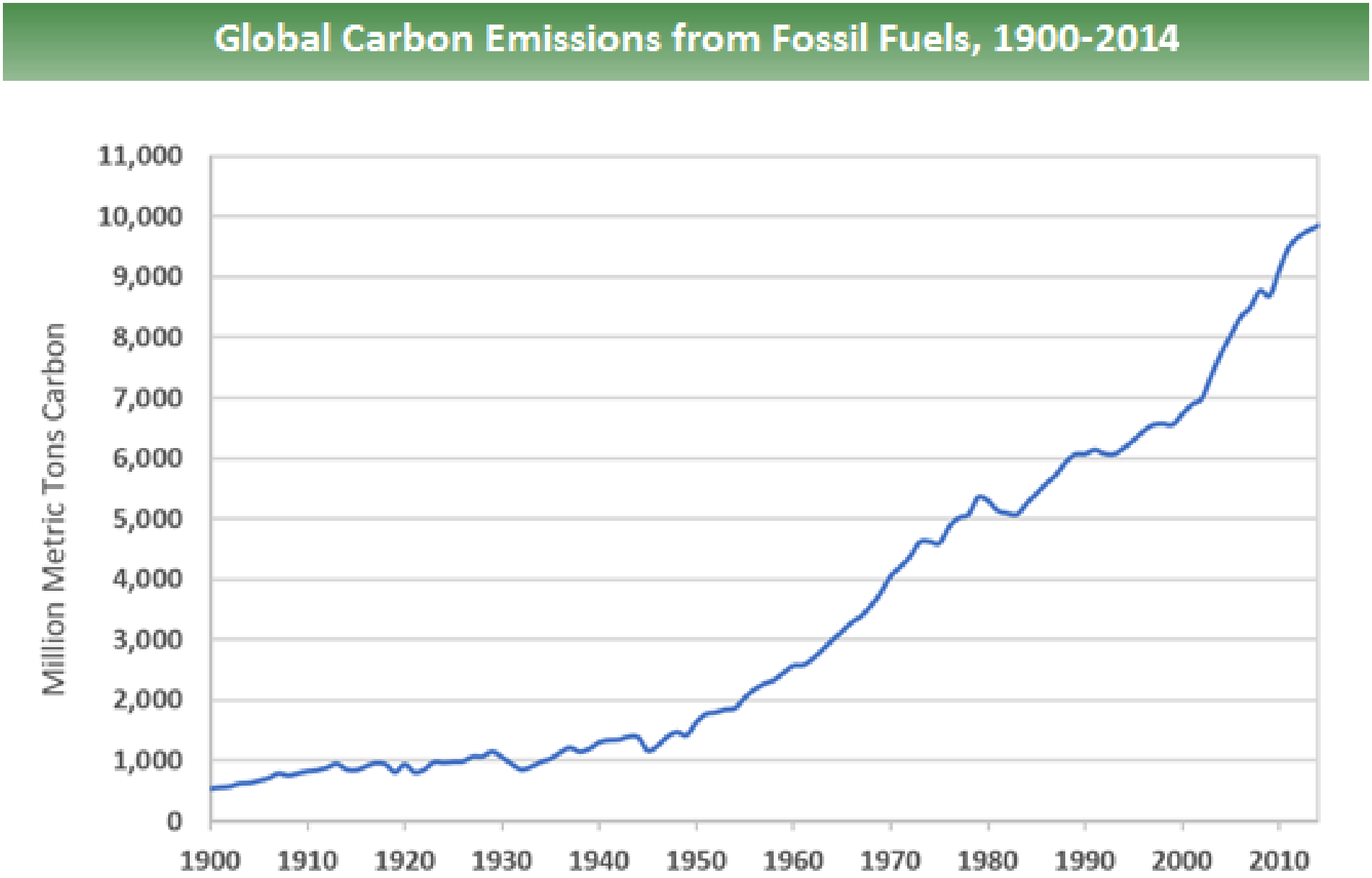
ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions

Зміни концентрації вуглекислого газу в атмосфері



ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions

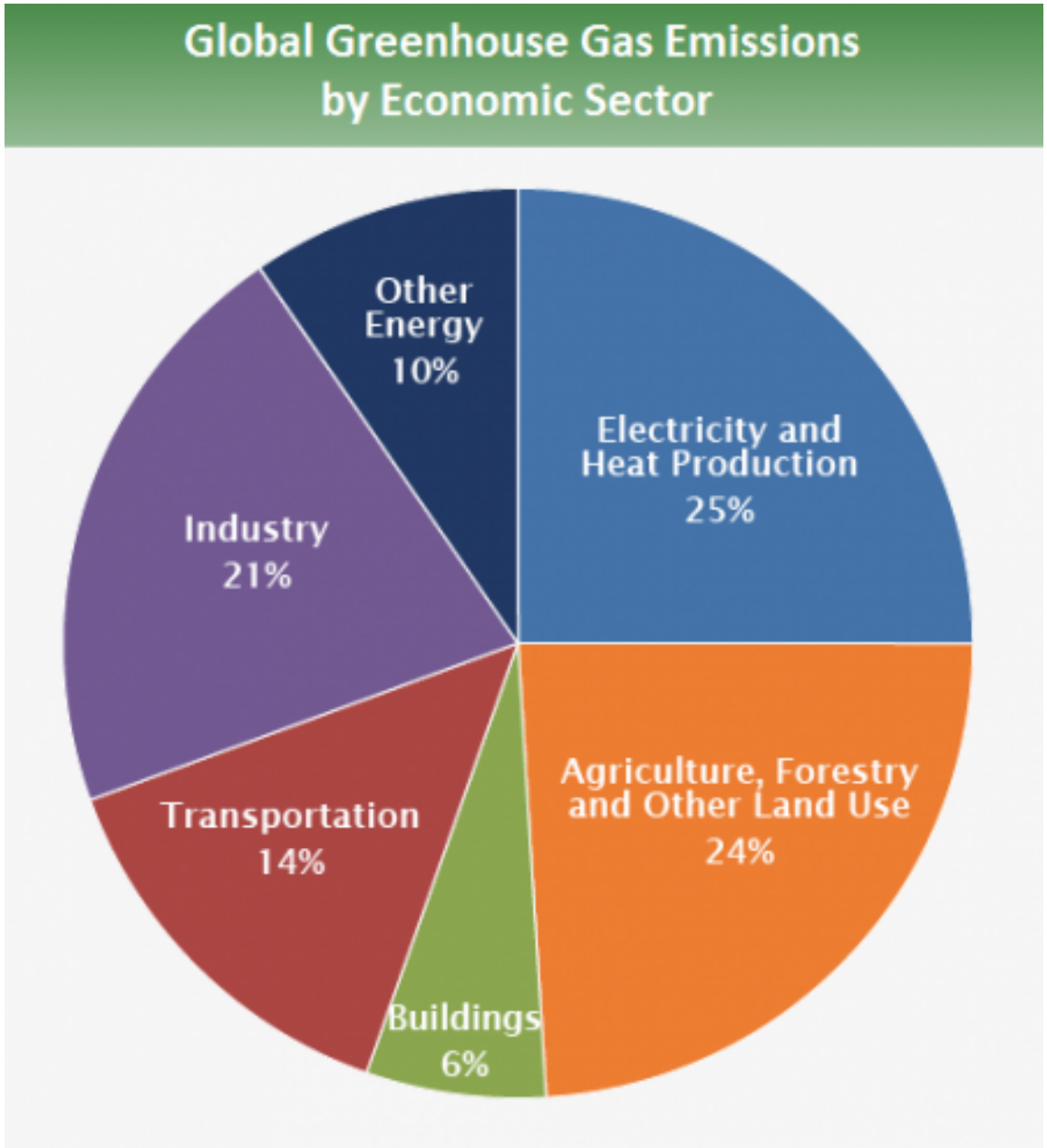
Викиди вуглецю в атмосферу від господарської діяльності людини



Source: Boden, T.A., Marland, G., and Andres, R.J. (2017). Global, Regional, and National Fossil-Fuel CO2Emissions. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A. doi 10.3334/CDIAC/00001_V2017.

https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data

Викиди вуглецю в атмосферу за секторами економіки



Source: IPCC (2014); Exit based on global emissions from 2010. Details about the sources included in these estimates can be found in the Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data

https://www.carbonfootprint.com/calculator.asp

carbon footprint™

CALCULATE OFFSETTING BUSINESSES INFORMATION ABOUT US

Your Carbon Footprint:

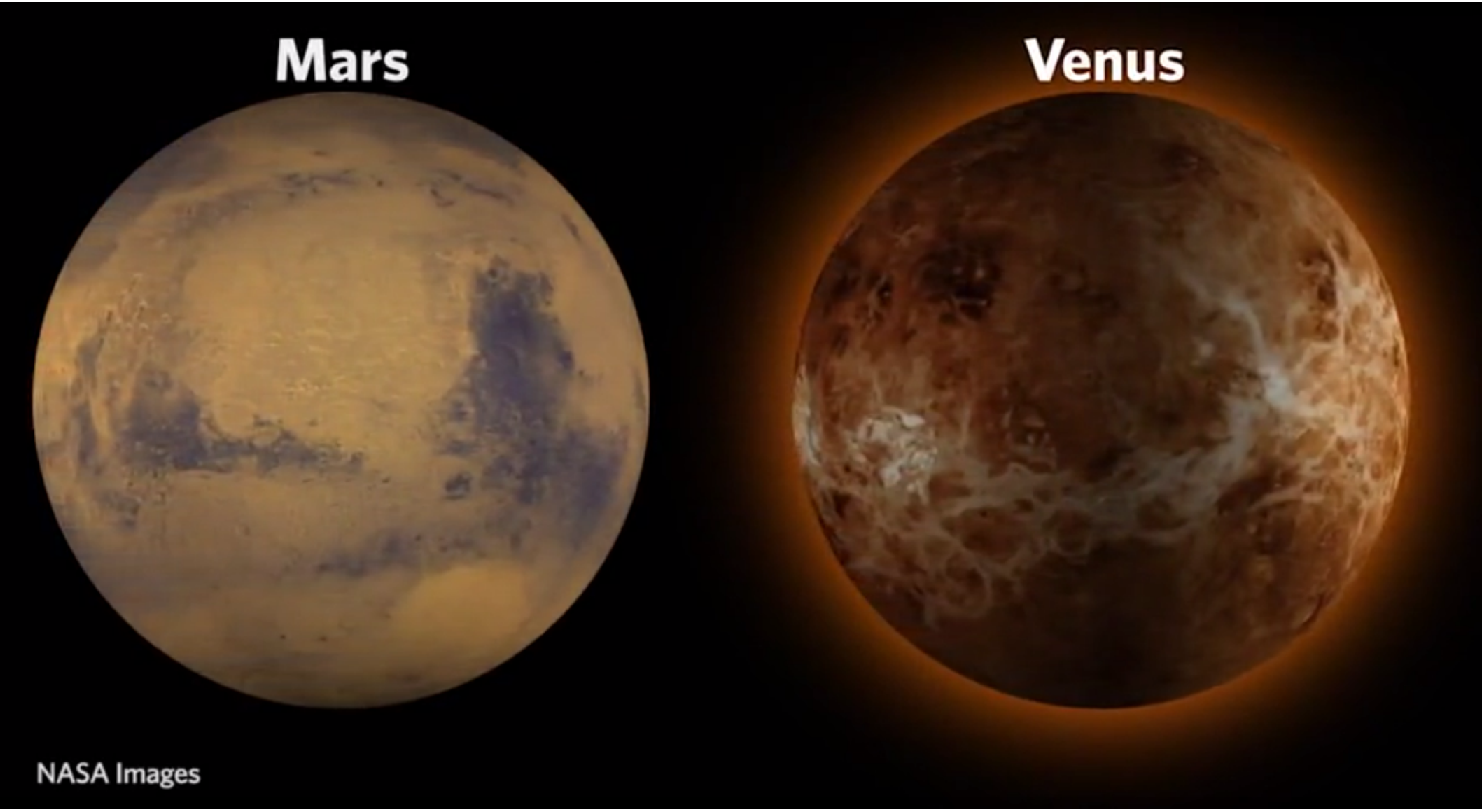
House	0.34 metric tons of CO_2e
Flights	0.00 metric tons of CO_2e
Car	0.00 metric tons of CO_2e
Motorbike	0.00 metric tons of CO_2e
Bus & Rail	0.04 metric tons of CO_2e
Secondary	2.24 metric tons of CO_2e

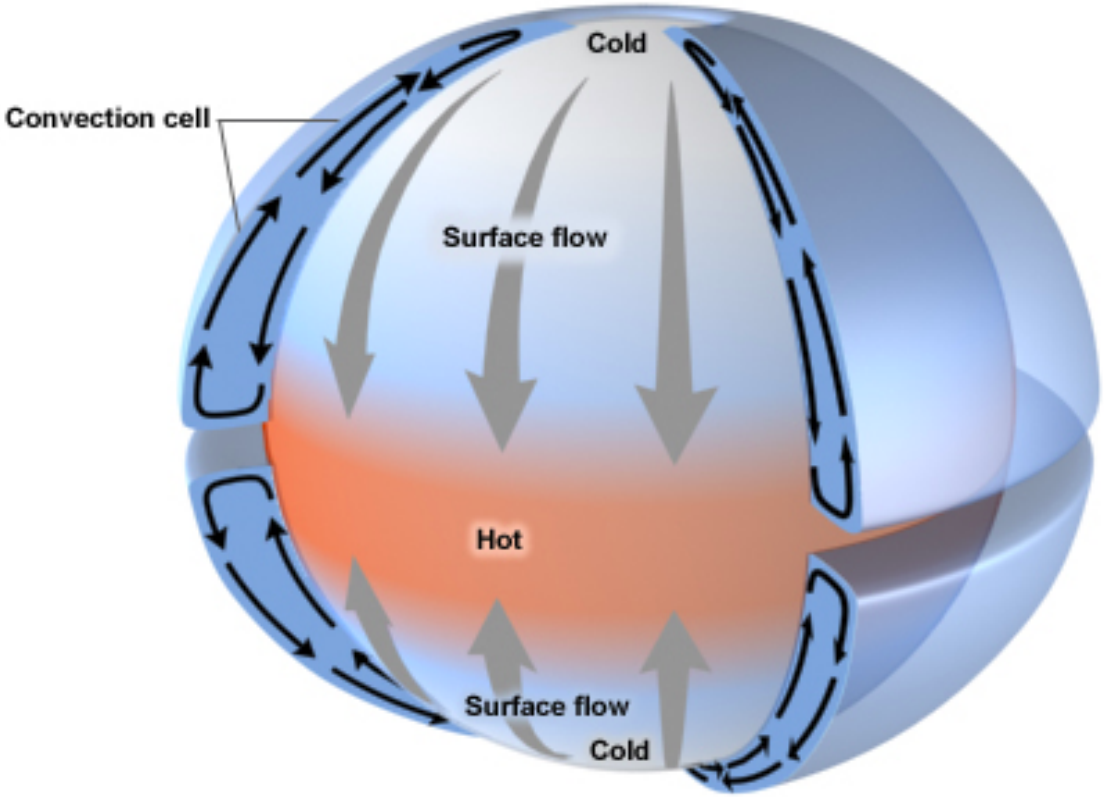
Total = 2.62 metric tons of CO_2e

To offset some or all of your carbon footprint, click the sections you would like to offset in the list above, and click the Offset Now button.

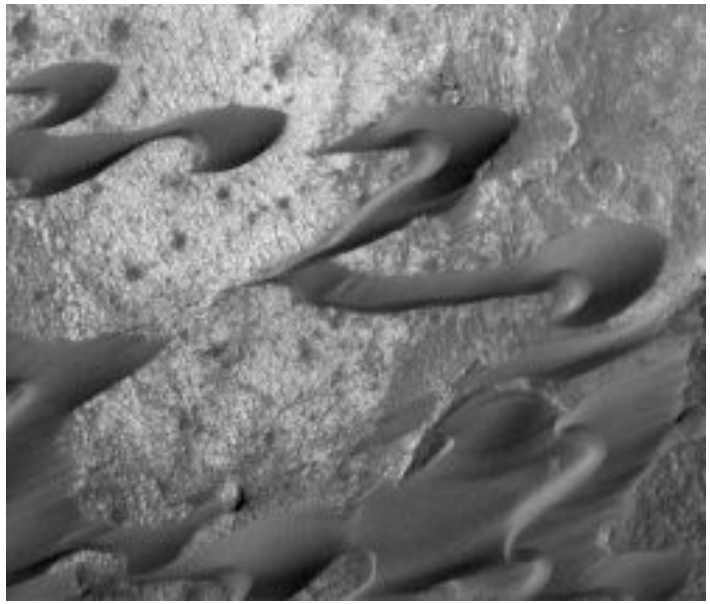
Total To Offset = 2.62 metric tons of CO_2e Offset Now

- Your footprint is 2.62 metric tons, which equates to 3.41 metric tons per year
- The average footprint for people in Ukraine is 5.02 metric tons
- The average for the European Union is about 6.4 metric tons
- The average worldwide carbon footprint is about 5 metric tons
- The worldwide target to combat climate change is 2 metric tons


Mars
Venus
NASA Images



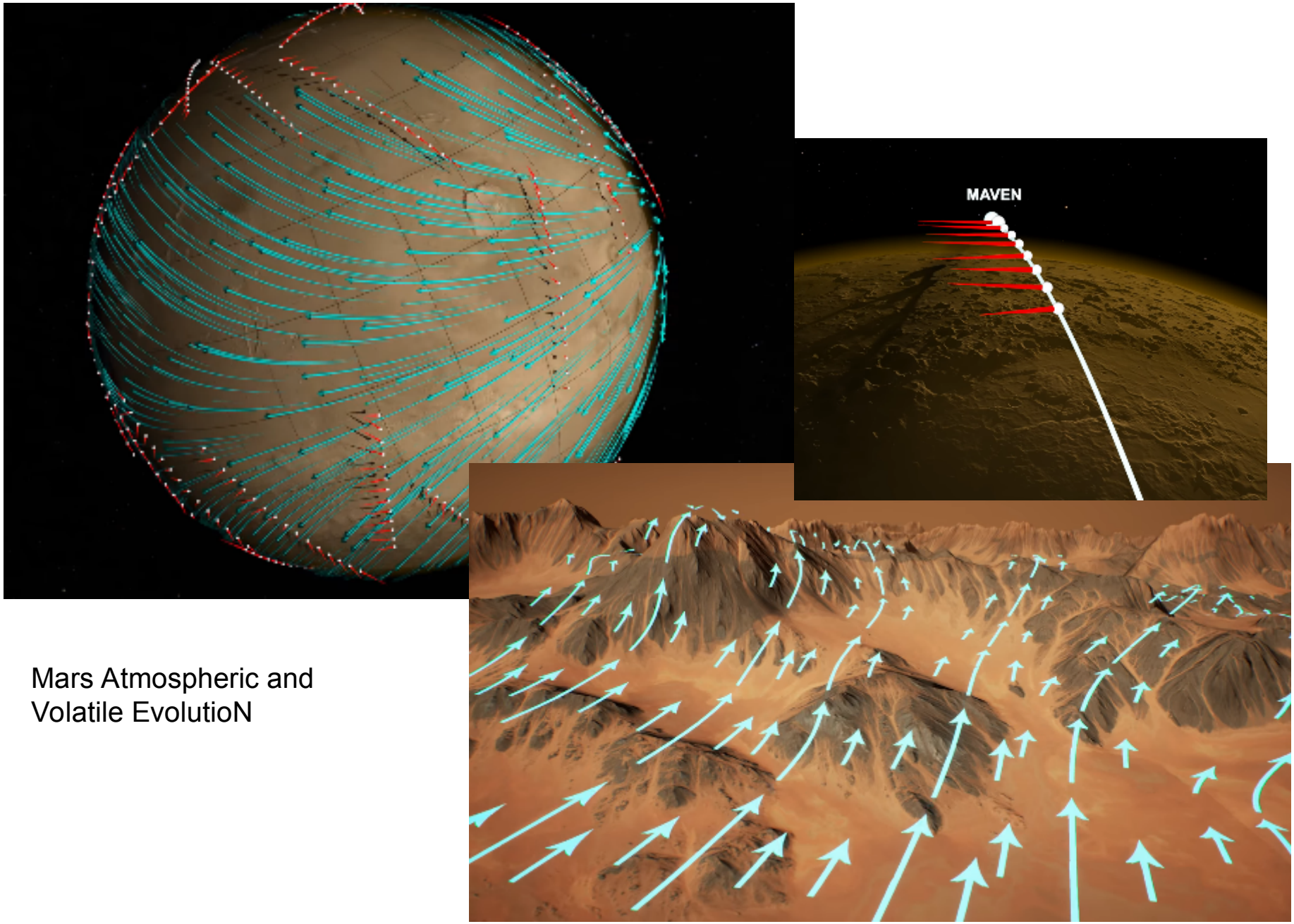
©The COMET Program



Dunes in Nili Patera (NOAA)

Атмосфера Марсу на 95% складається з двоокису вуглецю, містить 3% азоту, 1,6% аргону, сліди кисню, води, метану, інших газів та багато пилу

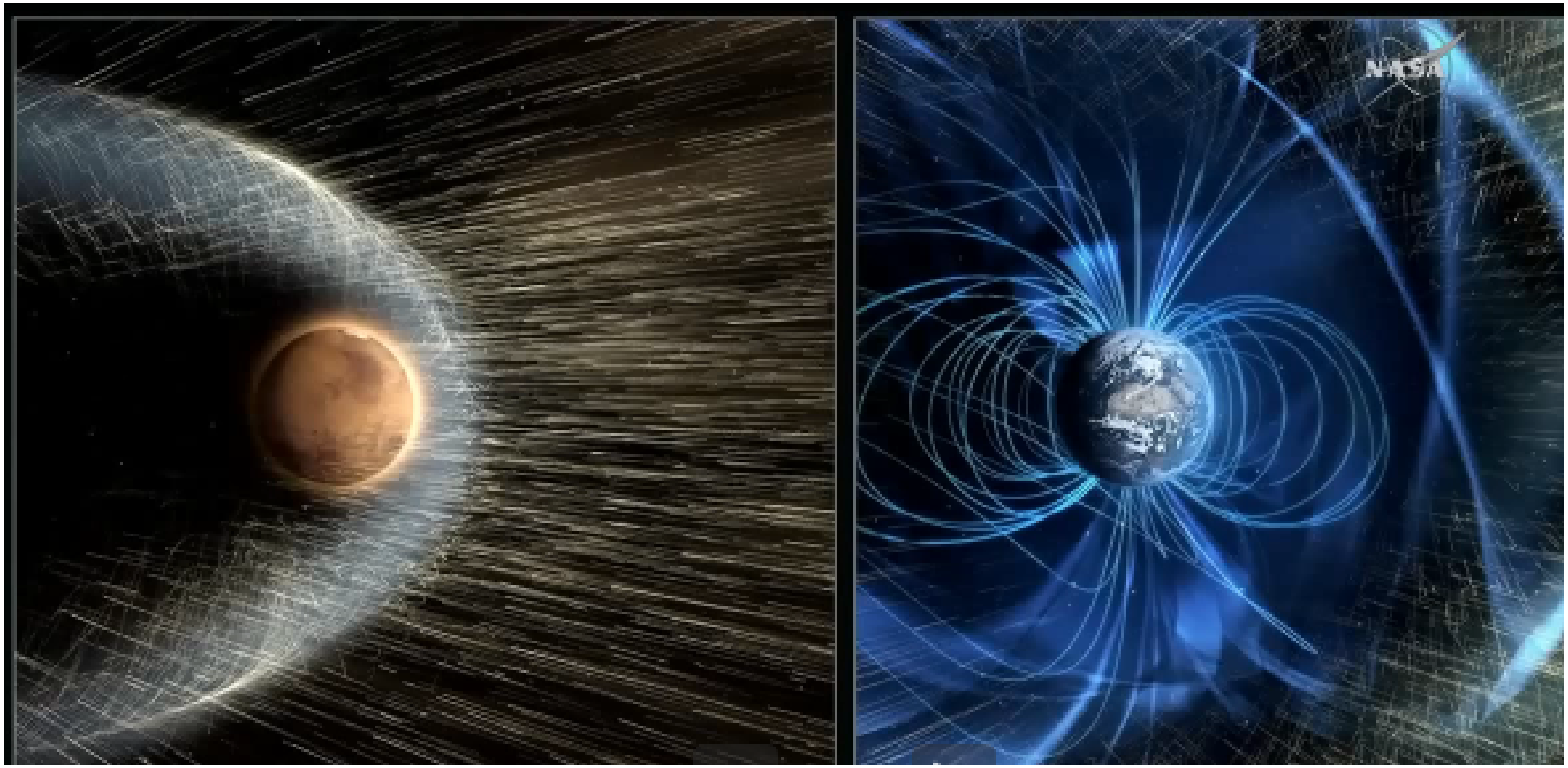
https://marsed.asu.edu/mep/wind



Mars Atmospheric and
Volatile EvolutioN

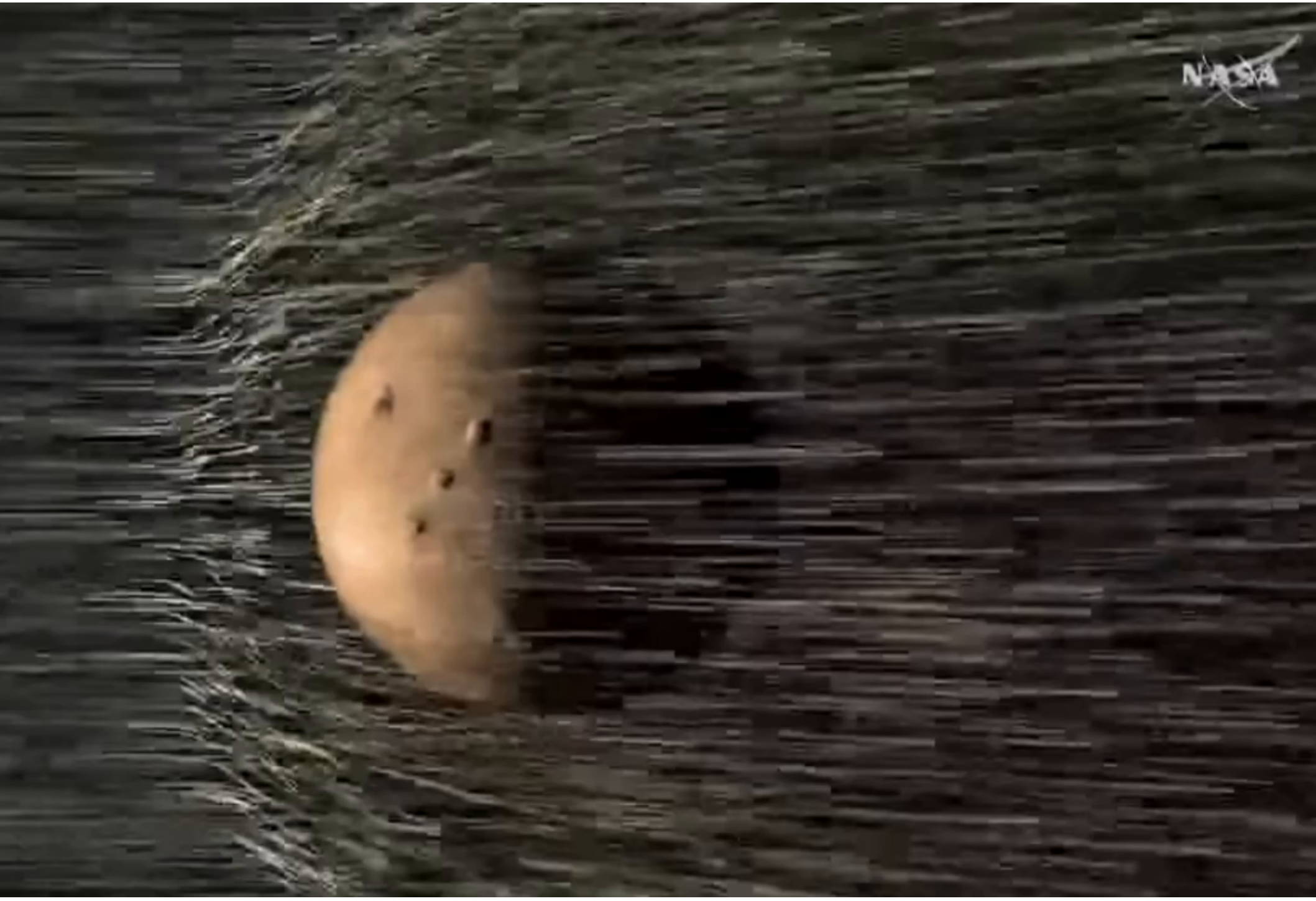
https://www.nasa.gov/mission_pages/maven/main/index.html

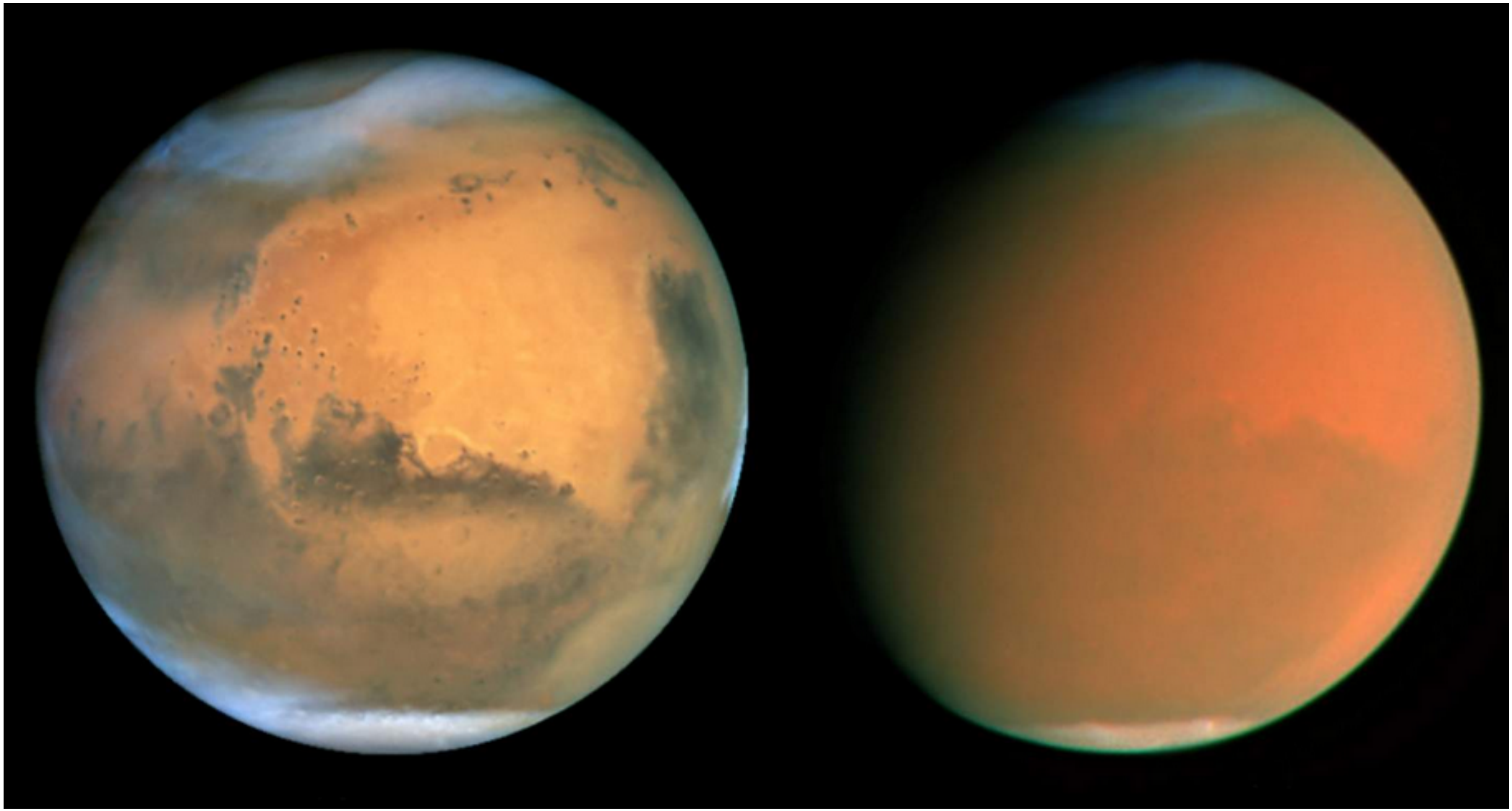
“Звіяна вітром”



Mars Atmospheric and Volatile EvolutioN

https://www.nasa.gov/mission_pages/maven/main/index.html


NASA

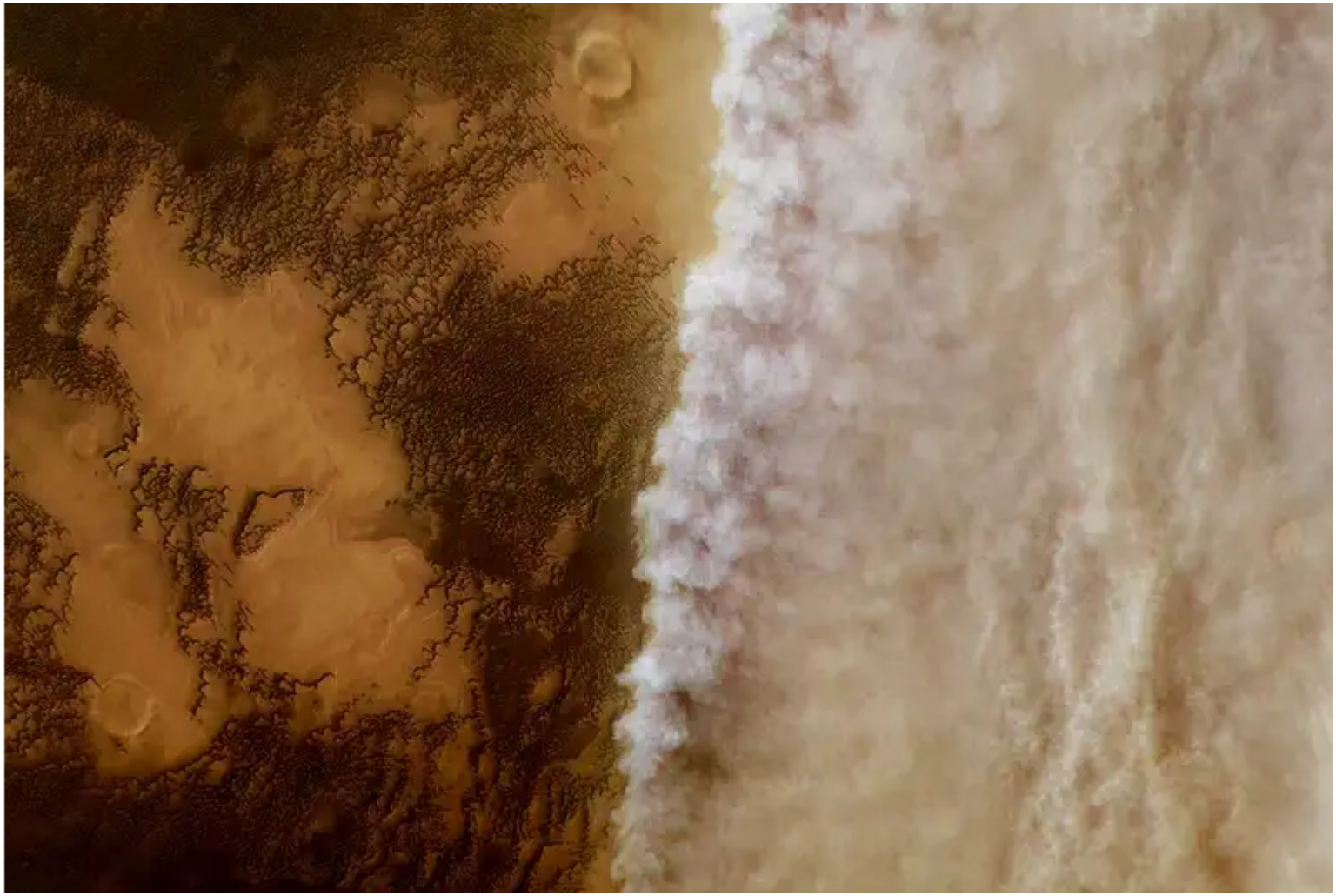


https://airandspace.si.edu/multimedia-gallery/6077hjpg?id=6077

Images showing the advancing, global dust storm, taken by Curiosity's Mast Camera between Sol 2075 and Sol 2170 on Mars, which would've fallen between June 8, 2018, and September 13, 2018, on Earth. Images via NASA/JPL-Caltech/York University.

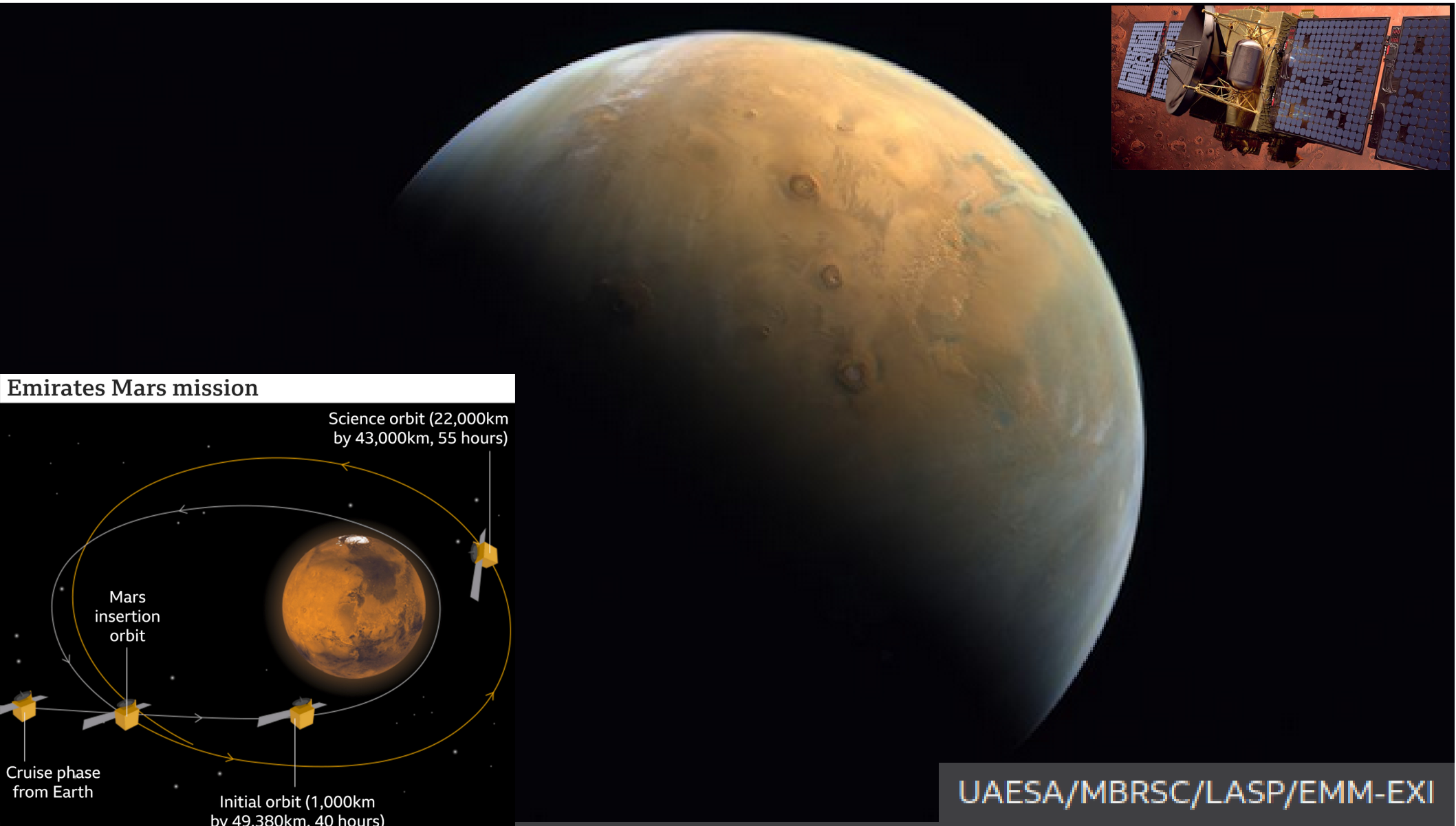
https://earthsky.org/space/understanding-mars-dust-storms

A dust storm on Mars photographed by the European Space Agency's Mars Express



https://www.newscientist.com/article/2199236-largest-dust-storm-on-mars-ever-recorded-may-reveal-why-its-so-dry/

У вівторок зонд ОАЕ “Надія” передав перше фото з орбіти Марса



UAESA/MBRSC/LASP/EMM-EXI

The image shows three shield volcanoes in a line, as well as Olympus Mons, the largest volcano in the Solar System

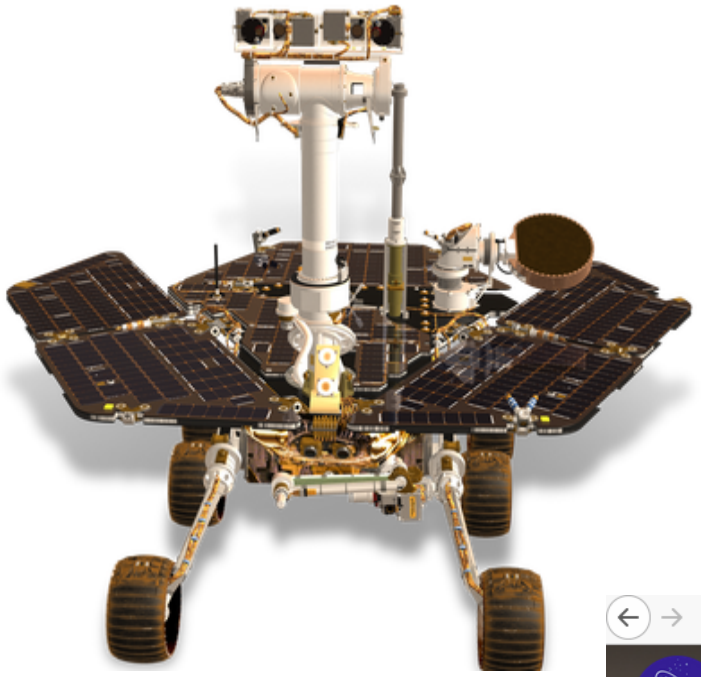
www.bbc.com/news/science-environment-56060890

Китайська місія Tianwen-1 досягла орбіти Марса

edition.cnn.com/2021/02/10/asia/china-tianwen-1-mars-orbit-hnk-scli-scn/index.html
www.npr.org/2021/02/10/966299609/chinese-probe-enters-mars-orbit-with-plan-for-may-landing

Марс – планета, заселена роботами

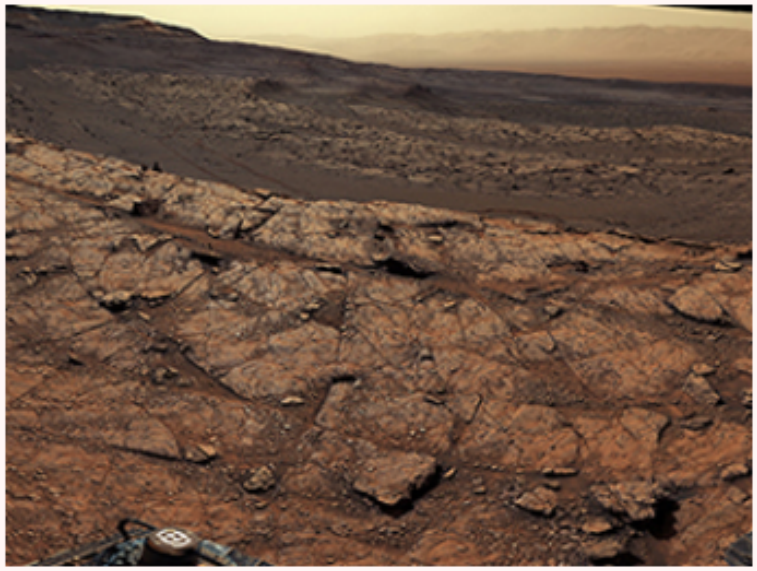
mars.nasa.gov/msl/home/



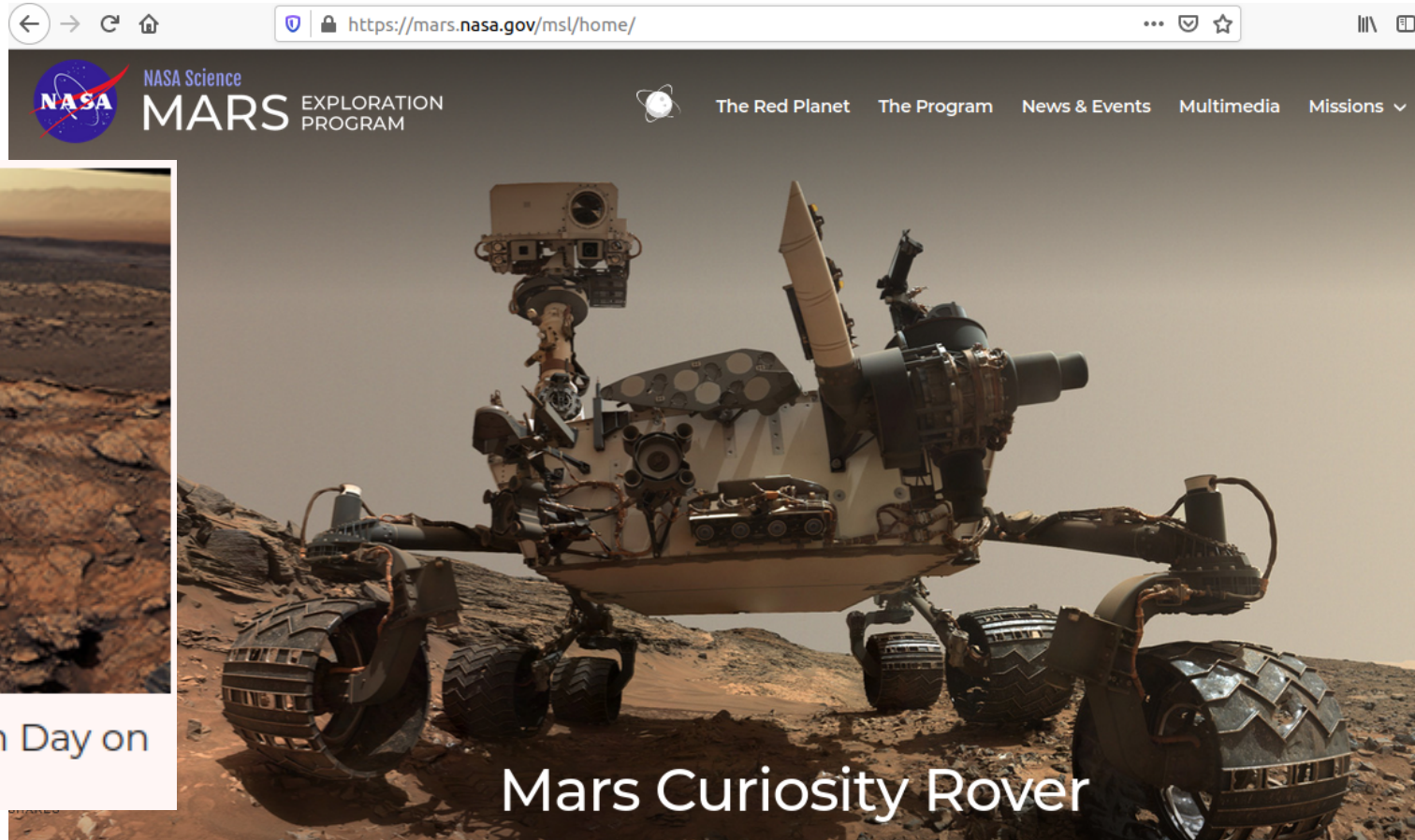
Status Update

Opportunity's Mission Is Complete
2/14/2019

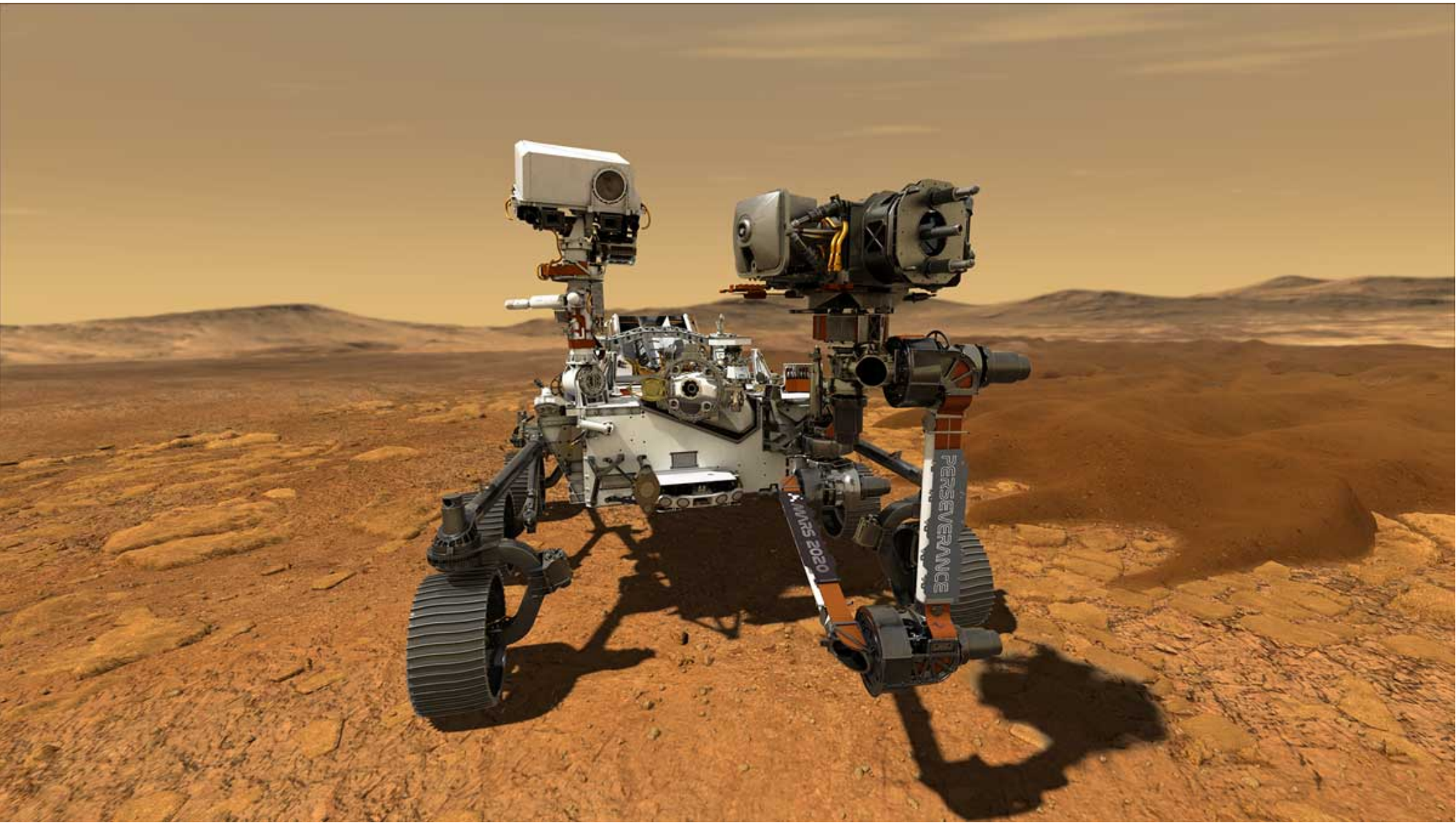
No response has been received from Opportunity since Sol 5111 (June 10, 2018), amid a planet-encircling dust storm on Mars.



Curiosity Reaches Its 3,000th Day on Mars

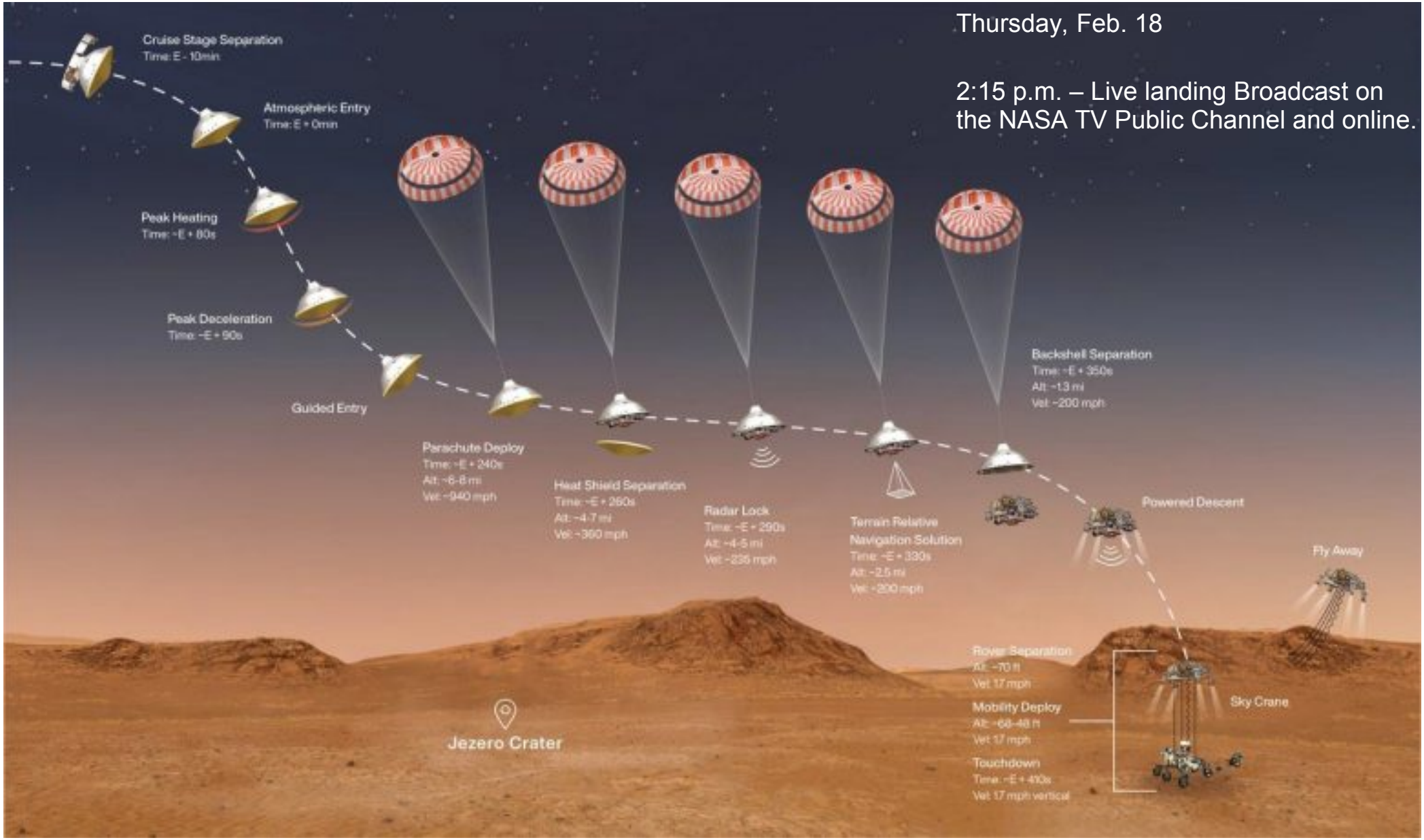


NASA Perseverance Rover



spectrum.ieee.org/automaton/aerospace/robotic-exploration/
nasa-perseverance-rover-landing-on-mars-overview

18 лютого 2021 року запланована посадка зонда на Марс



https://www.nasa.gov/press-release/nasa-invites-public-to-share-thrill-of-mars-perseverance-rover-landing

Використані джерела

C2SM Center for Climate Systems Modeling

coursera

WMO ICSU UNEP IOC GCOS GLOBAL CLIMATE OBSERVING SYSTEM

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

ETH zürich

Department of Environmental Systems Science

Institute for Atmospheric and Climate Science

MITOPENCOURSEWARE

MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY

Global Warming I: The Science and Modeling of Climate Change

The University of Chicago

UNIVERSITY OF OXFORD

www.geomar.de/

fwee.org/environment/how-

National Centre for Atmospheric Science

NATURAL ENVIRONMENT RESEARCH COUNCIL

AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY 1919

GEOMAR

FWEE Foundation for Water & Energy Education

NOAA

Earth System Research Laboratory

Physical Sciences Division

Conservation in a Changing Climate

SPECIAL REPORT OF THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE

ipcc

WMO UNEP

WIKIMEDIA COMMONS

Dniester Pump Storage Plant: project risks

HALOGEN OCCULTATION ALOE 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

INTERNATIONAL DAY OF LIGHT

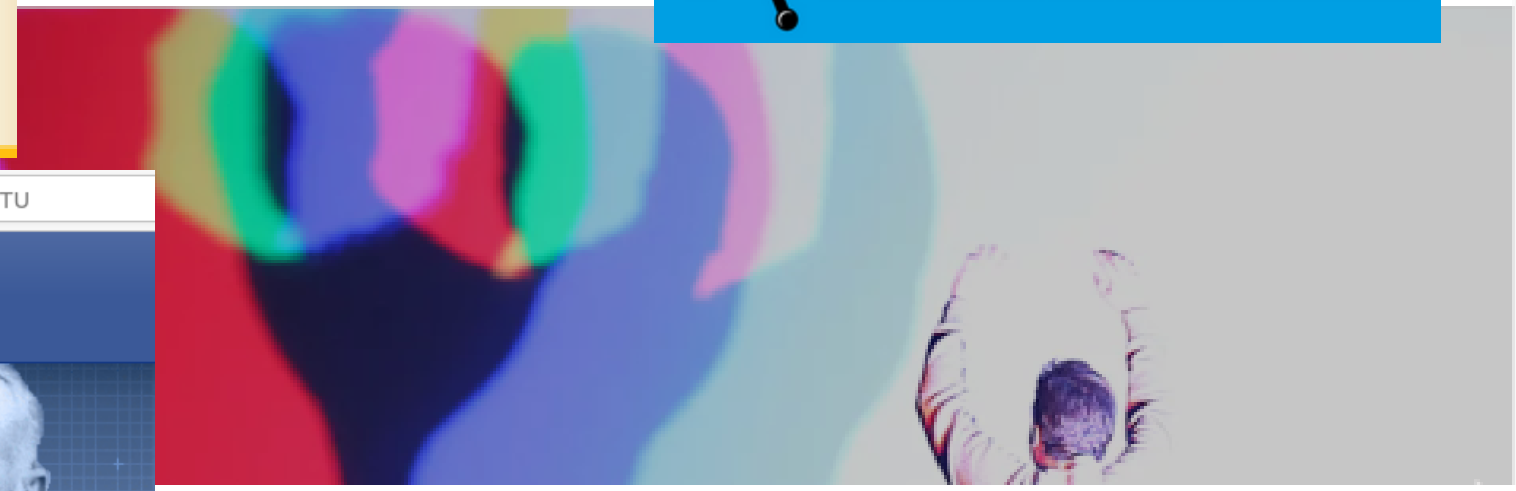
17 травня 2021 року
На youtube-каналі
Кафедри фізики ТНТУ

United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

International Day of Light

Events National Nodes

8-15 травня 2021 року
24. PIKNIK NAUKOWY
POLSKIEGO RADIA I CENTRUM NAUKI KOPERNIK



https://www.facebook.com/PhysicsDeptTNTU

facebook

Кафедра фізики ТНТУ
@PhysicsDeptTNTU

physics.tntu.edu.ua/news/

МАН
ТЕРНОПІЛЬ

ТЕРНОПІЛЬСЬКЕ ОБЛАСНЕ ВІДДІЛЕННЯ МАЛОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ