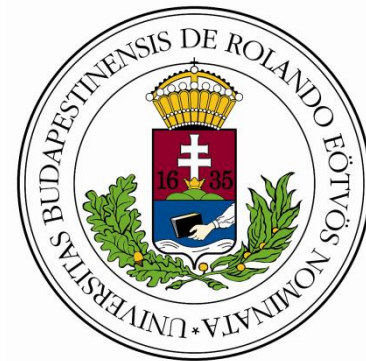




Kaotikus vonások aeroszol részecskék légköri élettartamának eloszlásában és ülepedésében

Haszpra Tímea

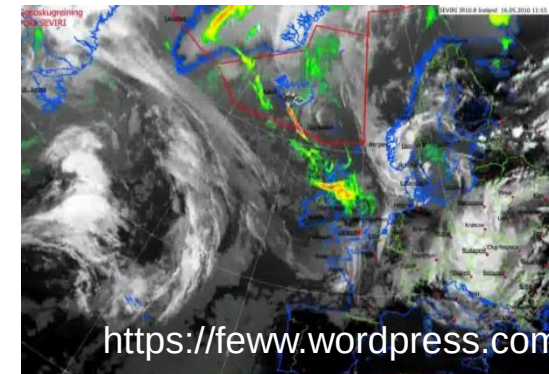
Eötvös Loránd Tudományegyetem, Elméleti Fizikai Tanszék
[MTA–ELTE Elméleti Fizikai Kutatócsoport]

A kutatás az MTA Bolyai
János Kutatási Ösztöndíj és
az NKFIH PD-121305 és FK-
124256 számú pályázatok
támogatásával készült.

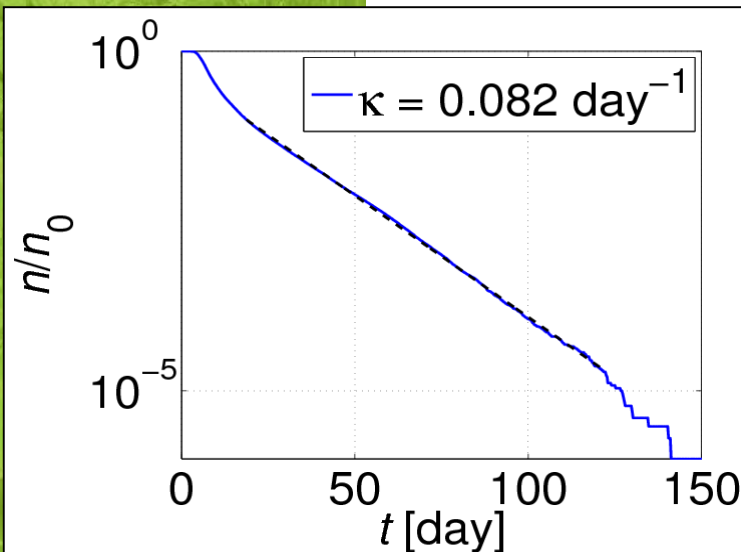
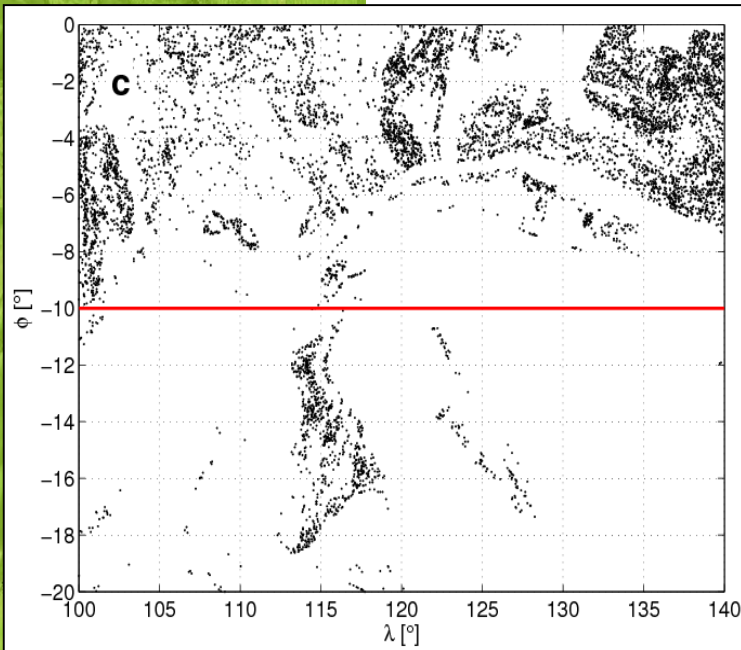
2019. november 18. Dévényi Dezső emlékülés

Bevezetés

- vulkáni hamufelhők sodródása
 - ipari balesetekből származó szennyezők terjedése
 - geoengineering
-
- 3D-s áramlásokban (légkör) a sodródó részecskék mozgása **kaotikus viselkedést** mutat:
 - kezdetben közeli részecskék egymástól gyorsan távolodnak
 - mozgásuk szabálytalan
 - bonyolult, de egyben rendezett (fraktálszerű) sodródási kép
 - nehézségi erő → részecskék a kaotikus mozgást csak **véges ideig** végzik
 - **tranziensen kaotikus** jelenség



Ülepedés (tranzien্স káosz)



- véges ideig tartó kaotikus viselkedés
- létezik egy nem vonzó, fraktál szerkezetű halmaz a légkörben, ami a kaotikus viselkedésért felelős (**kaotikus nyereghalmaz**)
- véletlen kezdeti feltételekkel induló részecskék előbb-utóbb elhagyják a légkört → **véges élettartamúak**
- a részecskék számának csökkenése a légkörben bizonyos t_0 idő után **exponenciális** és ennek gyorsaságát a **szökési ráta** (κ) jellemzi

$$n(t) \sim \exp(-\kappa t), \quad \text{ha } t > t_0$$

- kicsi, nehéz ($r = 1\text{--}10 \text{ }\mu\text{m}$, $\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$) részecskék ($\sim$ vulkáni hamu) ülepedését vizsgáltuk

Adatok és módszerek

- a részecskék trajektóriáját a **RePLaT** (Real Particle Lagrangian Trajectory) **légköri terjedési modell** számítja [Haszpra 2014]

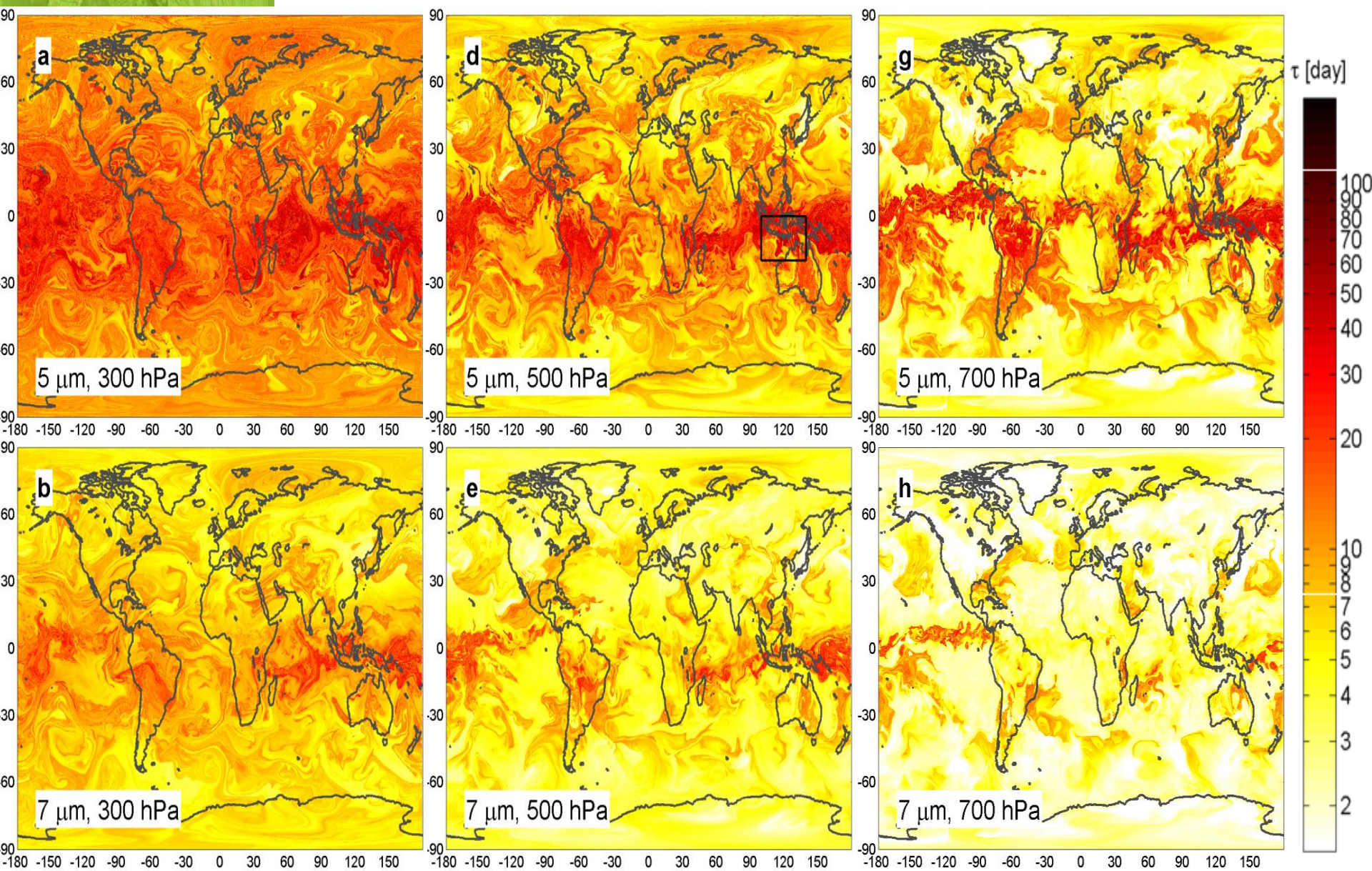
- **mozgásegyenlet:**

$$\mathbf{v}_p(\mathbf{r}, t) = \mathbf{v}(\mathbf{r}, t) + w_{\text{term}}(\mathbf{r}, t) \mathbf{n}$$

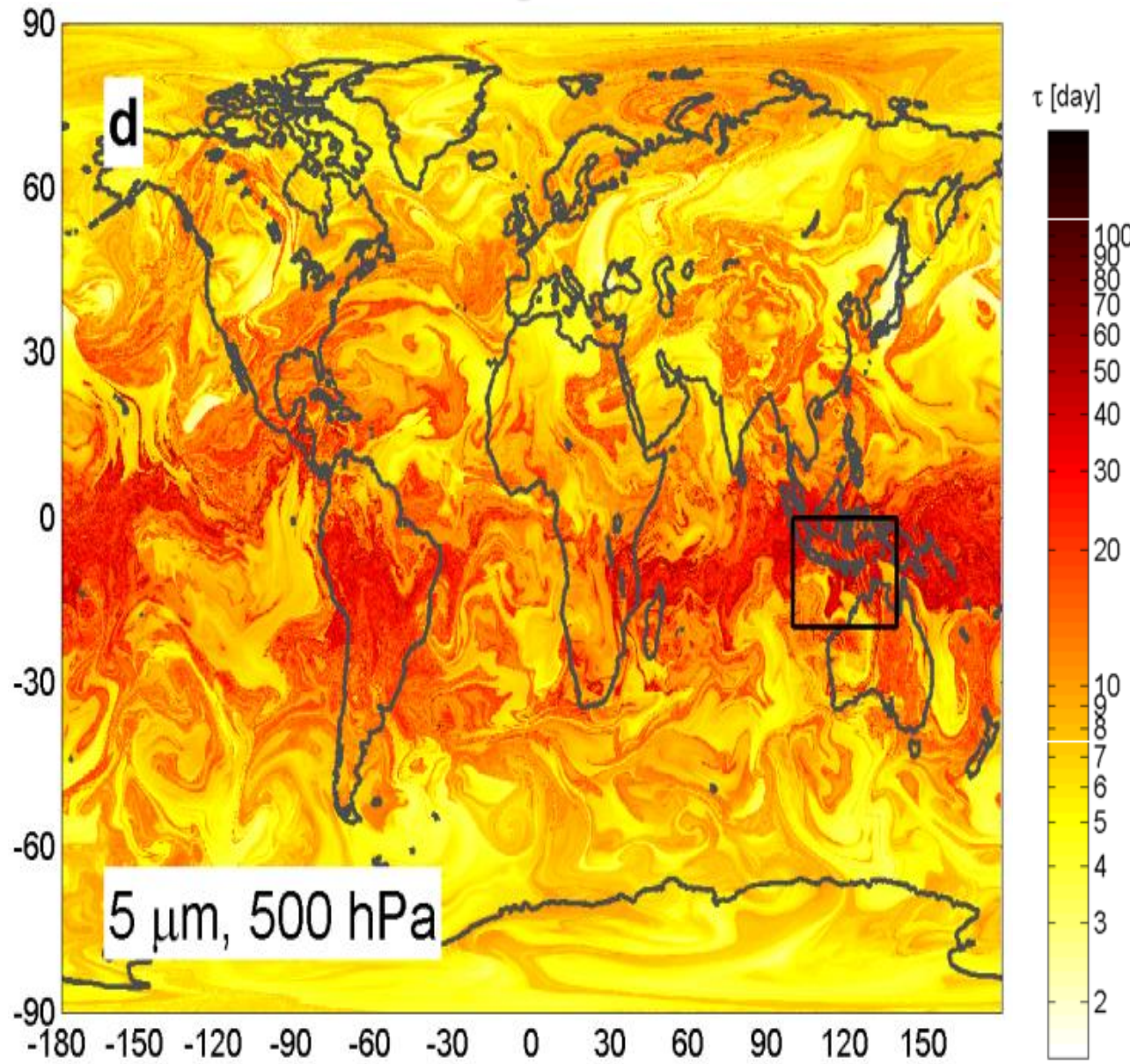
$\mathbf{v}_p$	részecske sebessége
$\mathbf{v}$	levegő sebessége
w_{term}	határsebesség
$\mathbf{n}$	egységvektor

- **meteorológiai adatok** (szélsebesség, függőleges sebesség, hőmérséklet): ERA-Interim adatbázisból (ECMWF)
 - felbontás: $1.5^\circ \times 1.5^\circ$, 6 óra, 1000–100 hPa
- **kezdeti feltételek:** $n_0 = 10^3 \times 10^3$ részecske egyenletesen elosztva a Föld felett adott nyomási szinteken 2016. jan. 1. 00 UTC-kor
- a részecskéket annyi ideig követjük (τ **élettartam**), ameddig ki nem **szöktek** (üledtek) a légkörből

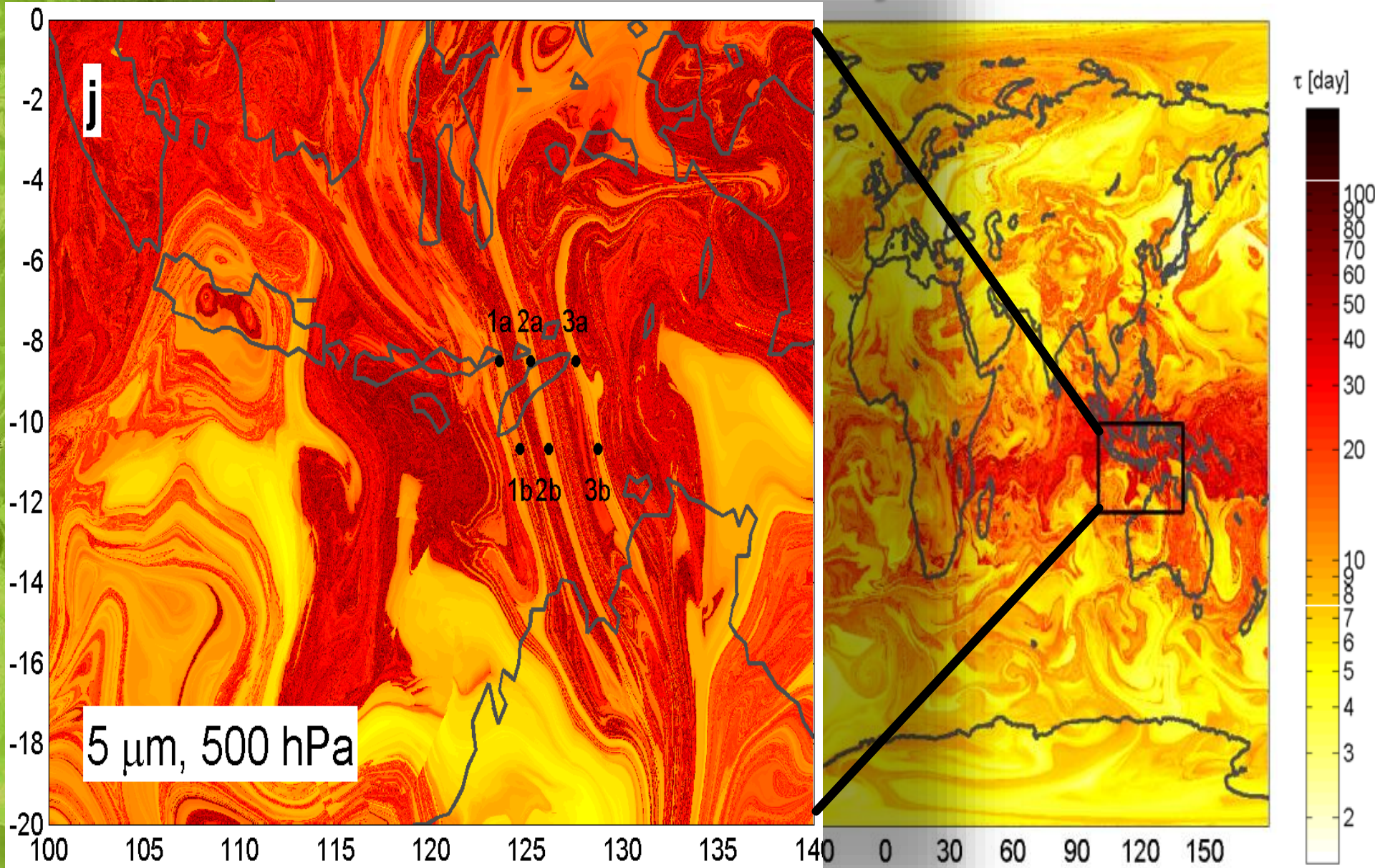
Élettartamok földrajzi eloszlása



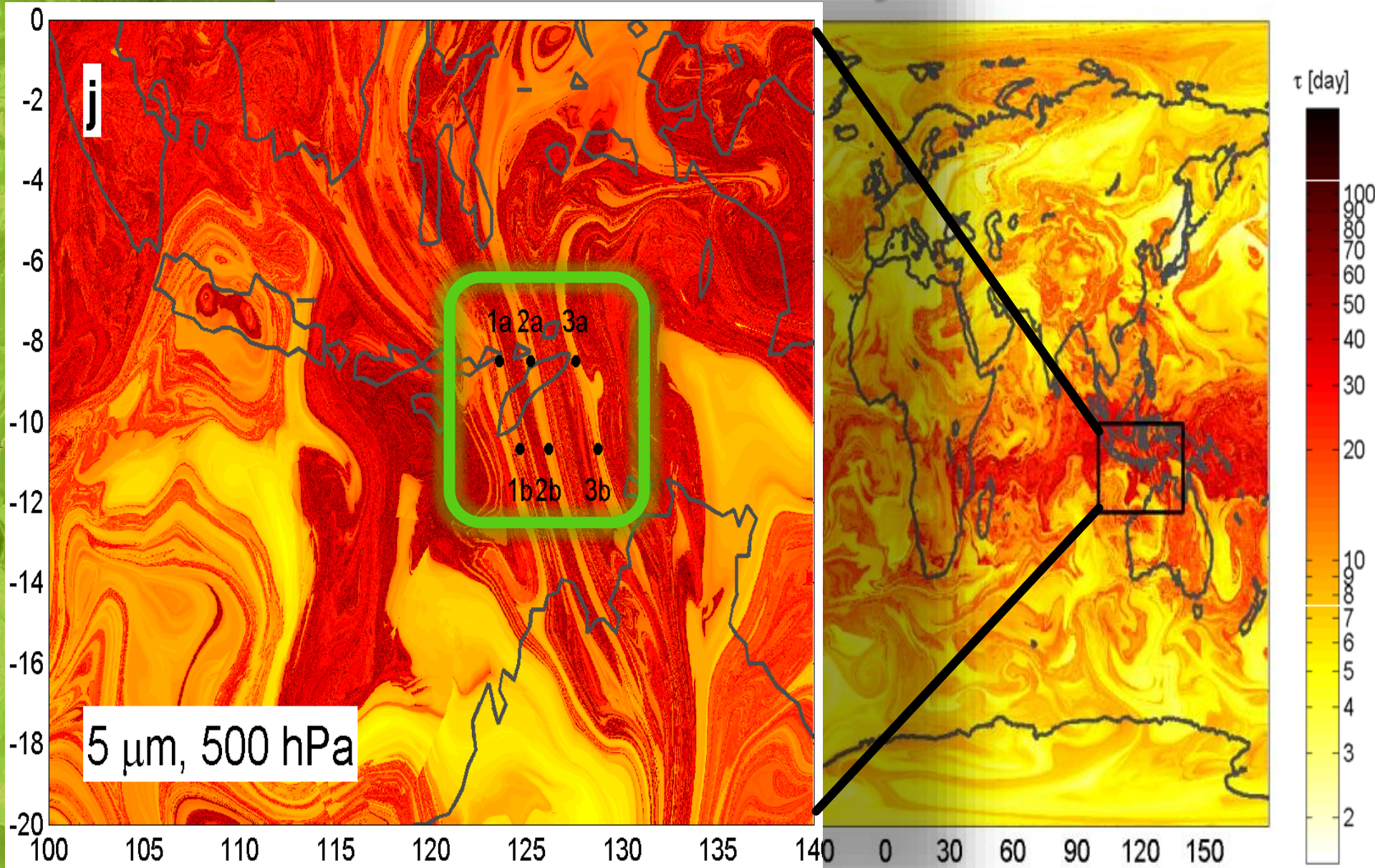
Élettartamok földrajzi eloszlása



Élettartamok földrajzi eloszlása

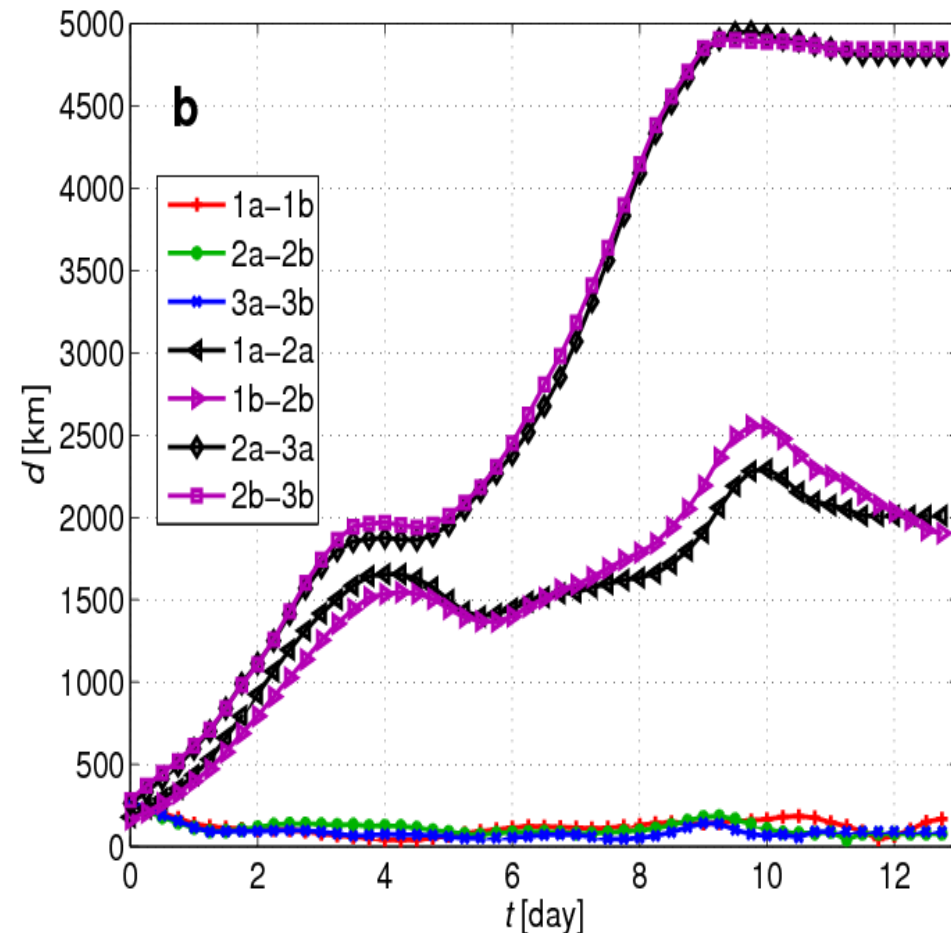
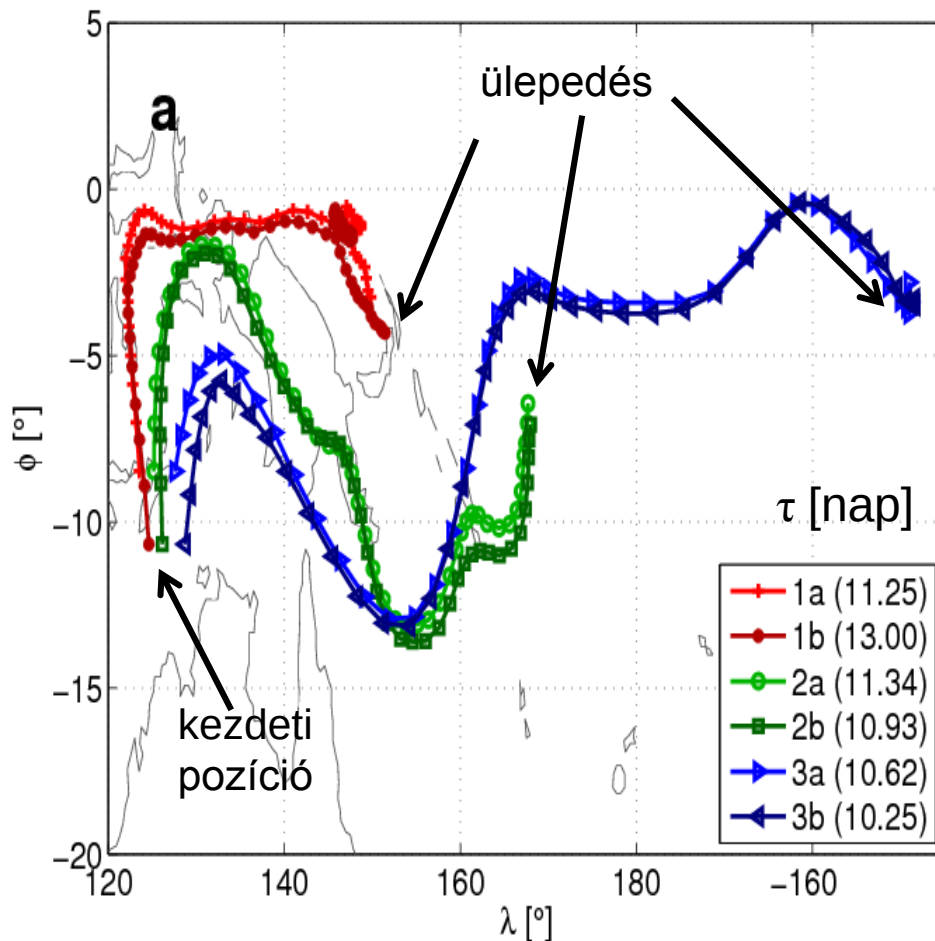


Élettartamok földrajzi eloszlása



Élettartamok földrajzi eloszlása

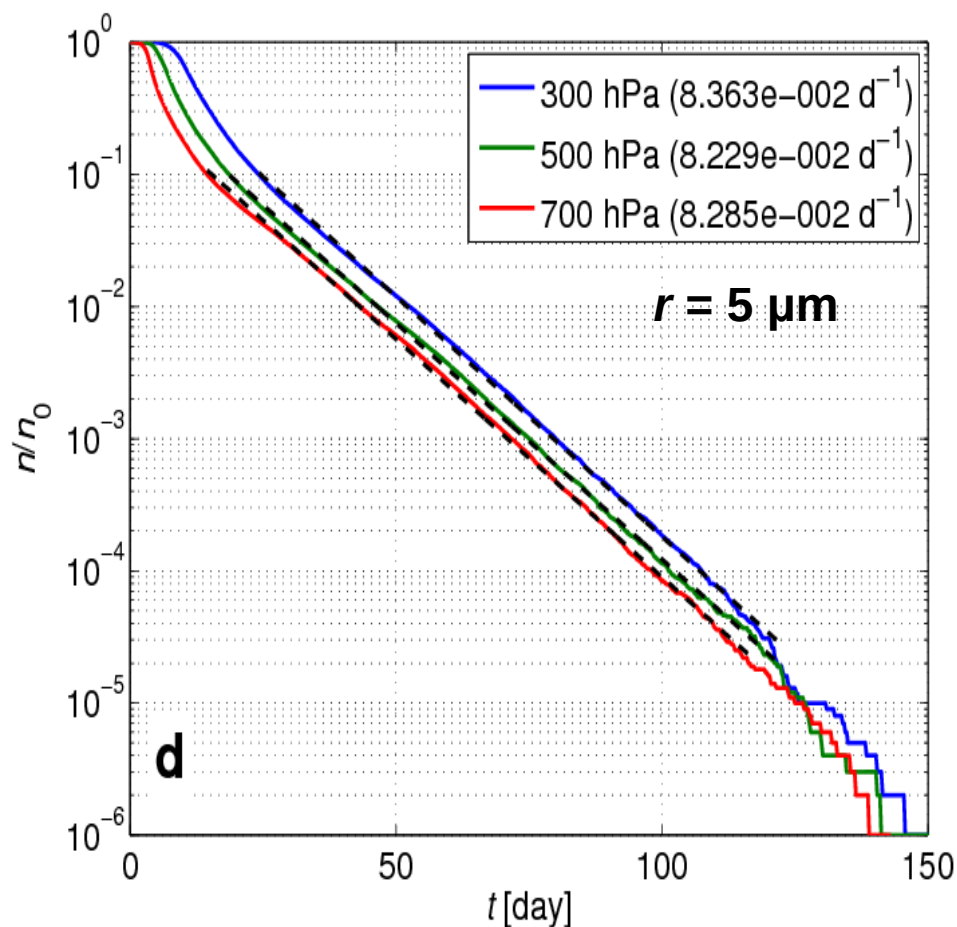
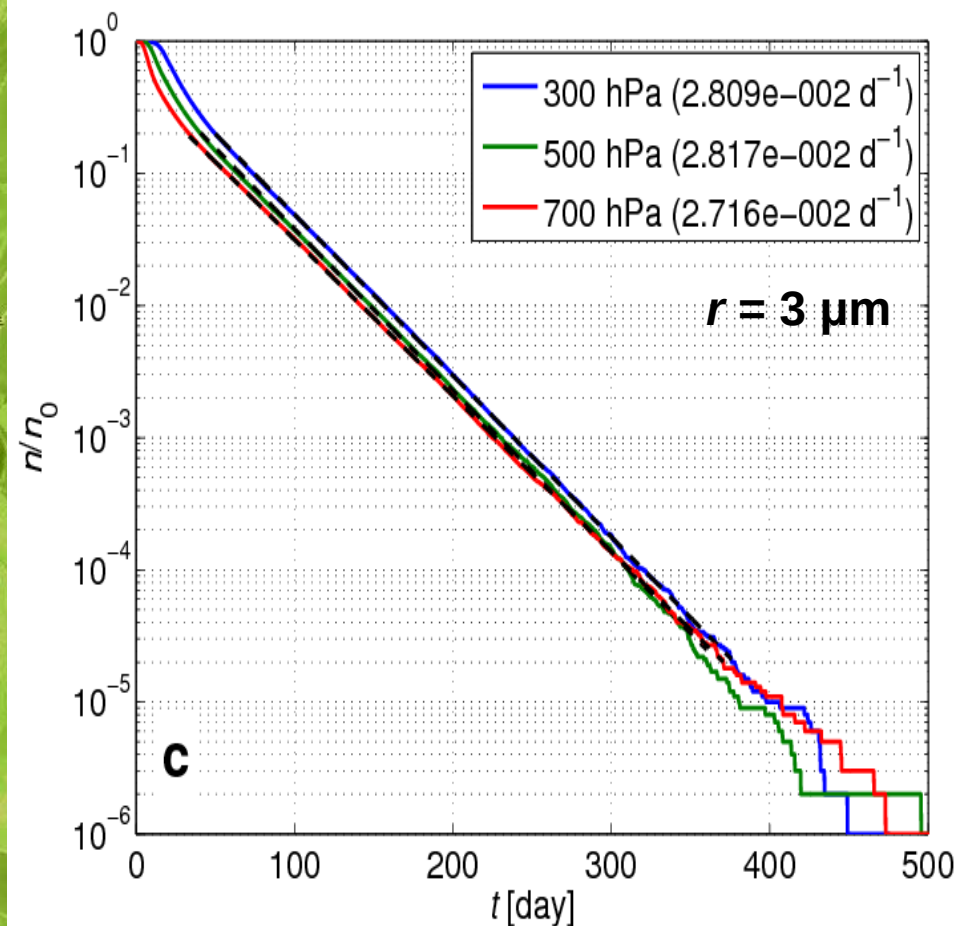
- az azonos szálaban induló részecskék együtt maradnak
- különböző szálabból induló részecskék közötti távolság gyorsan nő
- két szín közötti határvonalak = **Lagrangian Coherent Structure** (LCS)



Szökési ráta (κ)

$$n(t) \sim \exp(-\kappa t), \quad \text{ha } t > t_0$$

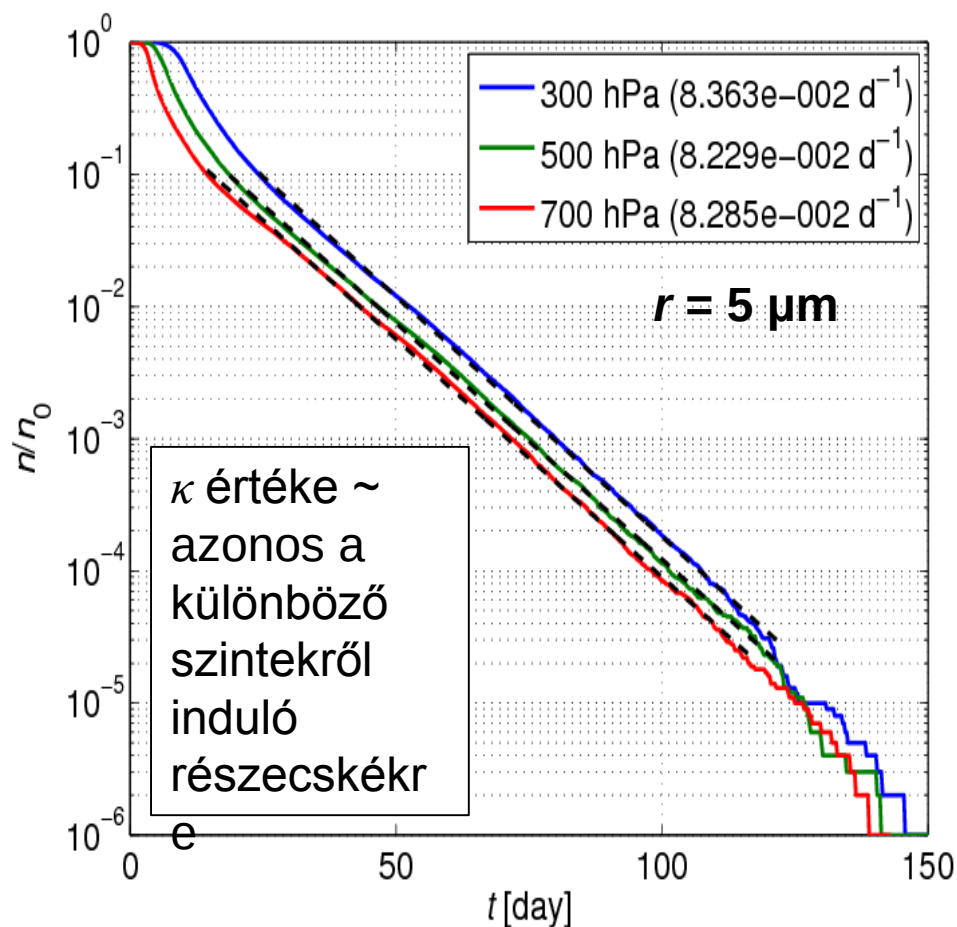
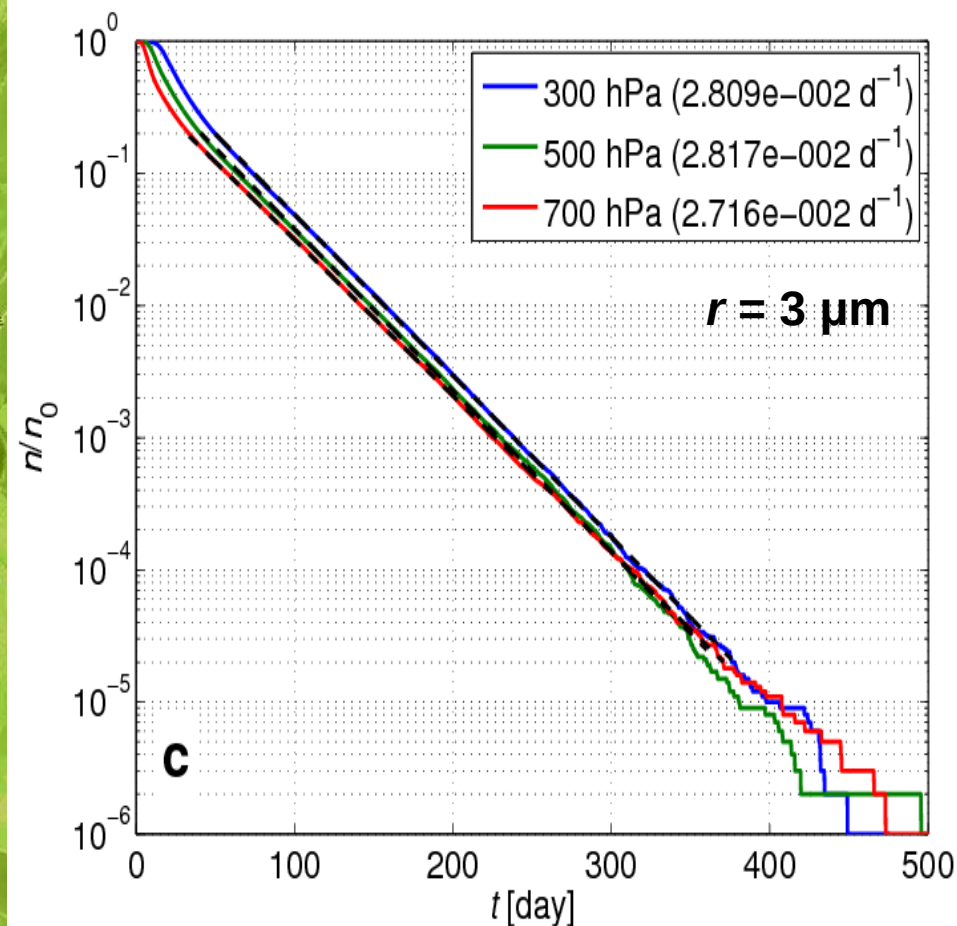
- a nehézségi erő hatásának köszönhetően minden aeroszol részecske kiülepedik a légkörből
- bizonyos idő után a légkörben maradó részecskék $n(t)$ száma **exponenciálisan csökken**



Szökési ráta (κ)

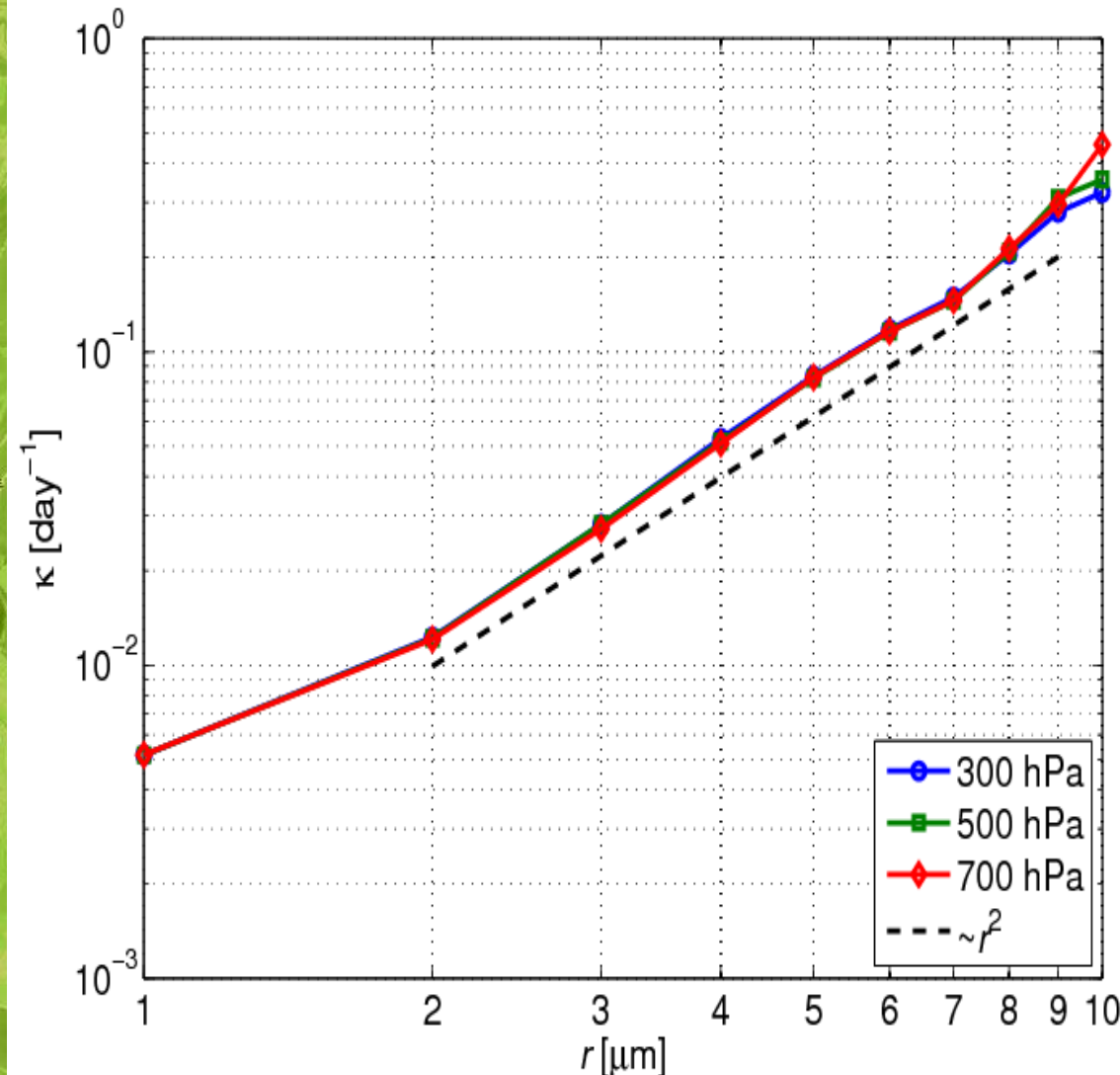
$$n(t) \sim \exp(-\kappa t), \quad \text{ha } t > t_0$$

- a nehézségi erő hatásának köszönhetően minden aeroszol részecske kiülepedik a légkörből
- bizonyos idő után a légkörben maradó részecskék $n(t)$ száma **exponenciálisan csökken**



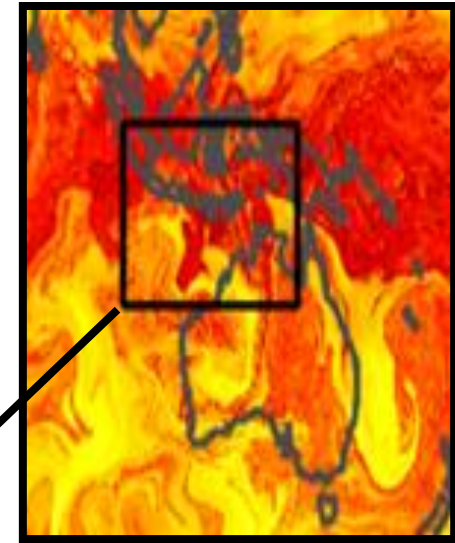
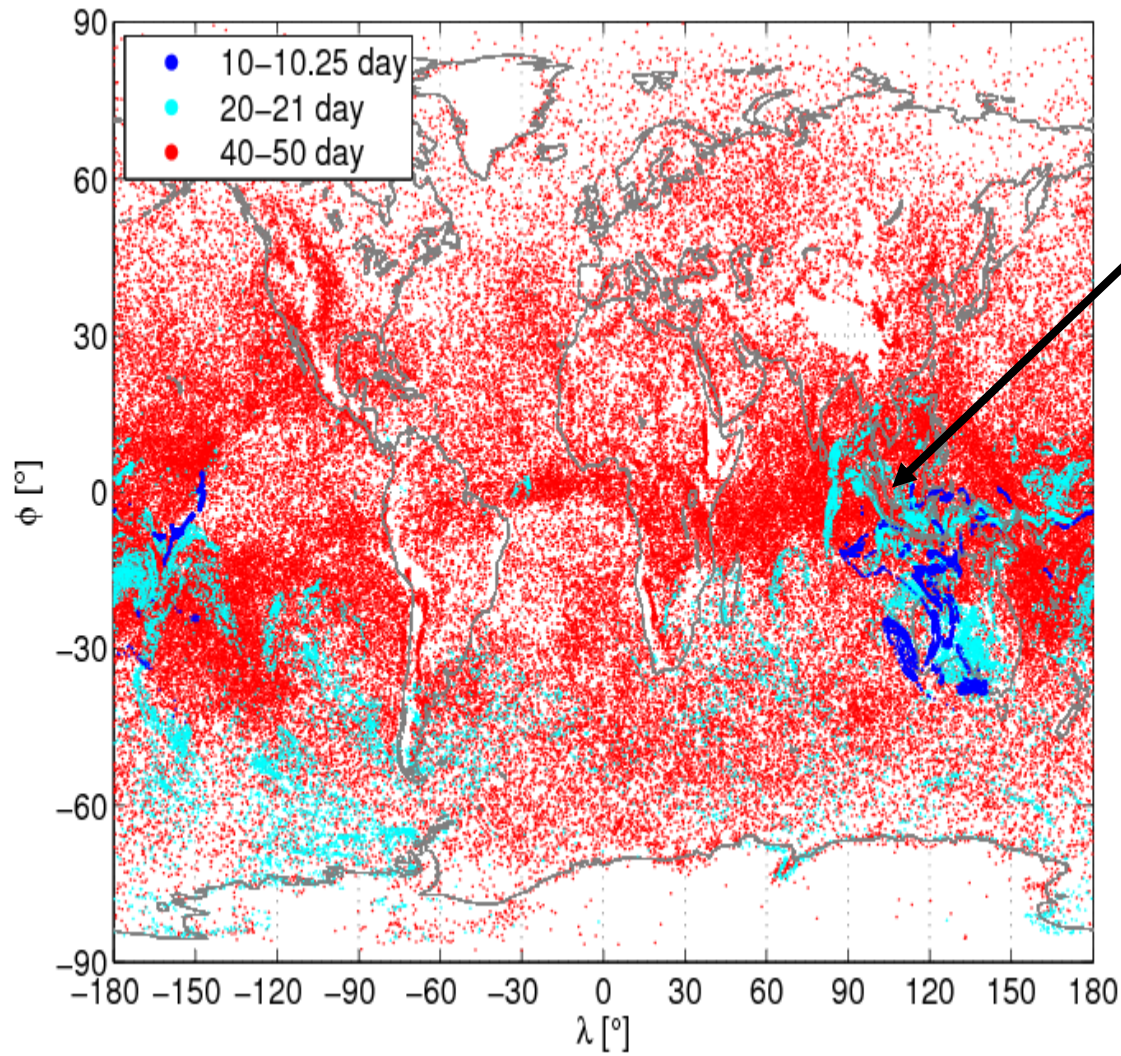
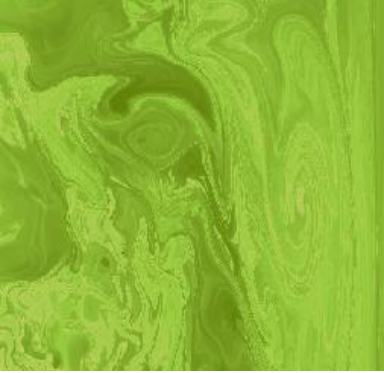
Szökési ráta (κ)

$$n(t) \sim \exp(-\kappa t), \quad \text{ha } t > t_0$$



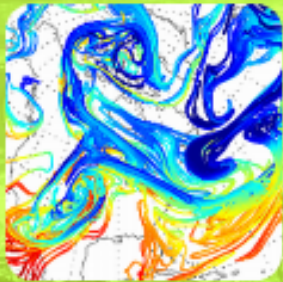
- κ **nem függ** jelentősen a **kiindulási magasságtól**
- κ azon kivételes részecskék ülepedési dinamikáját jellemzi, amik elegendően sokáig „túléltek” a légkörben → elegendő idejük volt a **kezdeti feltételeiket elfelejteni**, és a légkörben **jól elkeveredni** (globális légköri kaotikus nyereghalmaz)
- $\kappa(r) \sim r^2 \leftarrow w_{\text{term}} \sim r^{-2}$ és átlagosan a részecskék a határsebességükkel esnek

Ülepedési mintázat



- rövid időintervallum: ülepedés mintázat **szálas szerkezetű**
- 20-21 nap alatt a (kezdetben kompakt) részecskefelhő **a félteke jelentős részét befedi**
- hosszabb időre a mintázat **homogénabb**, mindkét féltekét eléri a részecskék, de **ritkásabb és sűrűbb tartományok** továbbra is megfigyelhetők

<http://theorphys.elte.hu/fiztan/volcano/index.html>



RePLaT-CHAOS



For the illustration of the chaotic behavior of the advection of volcanic ash clouds and other atmospheric pollutants

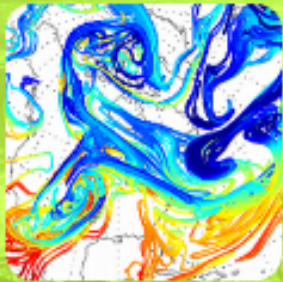


RePLaT-Chaos is an application for simulating the global-scale atmospheric spreading of pollutant clouds. The pollutant clouds consist of aerosol particles or gas particles. RePLaT-Chaos is also a suitable tool for studying the so-called chaotic features of the advection. The application is a simpler version of the previously developed RePLaT (Real Particle Lagrangian Trajectory) model.

In three-dimensional flows, as it is the case in the atmosphere, the advection of pollutants is **chaotic**. The advection dynamics of pollutants shows typical characteristics of the chaos, such as **sensitivity to the initial conditions** (the trajectories of initially nearby particles diverge within short time), irregular motion, and **complex but regular (fractal) structures**. It can be easily observed in the RePLaT-Chaos simulations that pollutant clouds do not disperse in the atmosphere like dye blobs on clothes, rather an initially compact pollutant cloud becomes soon strongly stretched, its length grows rapidly, while becoming **filamentary**, tortuous and folded. The application can also calculate two quantities which describe the chaoticity of the advection. The **stretching rate (topological entropy)** characterizes the rate of the exponential stretching of pollutant clouds, while the **escape rate** quantifies the deposition rate of particles falling out from the atmosphere to the surface.

In the **full version** each simulation parameter can be changed. The **student version** includes more animation and explanation for the observable phenomena.

<http://theorphys.elte.hu/fiztan/volcano/index.html>



RePLaT-CHAOS



For the illustration of the chaotic behavior of the advection of volcanic ash clouds and other atmospheric pollutants



RePLaT-Chaos is an application for simulating the global-scale atmospheric spreading of pollutant clouds. The pollutant clouds consist of aerosol particles or gas particles. RePLaT-Chaos is also a suitable tool for studying the so-called chaotic features of the advection. The application is a simpler version of the previously developed RePLaT (Real Particle Lagrangian Trajectory) model.

In three-dimensional flows, as it is the case in the atmosphere, the advection of pollutants is **chaotic**. The advection dynamics of pollutants shows typical characteristics of the chaos, such as **sensitivity to the initial conditions** (the trajectories of initially nearby particles diverge within short time), irregular motion, and **complex but regular (fractal) structures**. It can be easily observed in the RePLaT-Chaos simulations that pollutant clouds do not disperse in the atmosphere like dye blobs on clothes, rather they become **filamentous and folded**. The application can also calculate quantities which describe the chaoticity of the motion. The **stretching rate (topological entropy)** characterizes the rate of the exponential stretching of pollutant clouds, while the **escape rate** quantifies the deposition of particles falling out from the atmosphere to the ground.

In the **full version** each simulation parameter can be changed. The **student version** includes more animation and explanation for the observable phenomena.



RePLaT-Chaos

/teljes változat, minden paraméter beállítható/

RePLaT-Chaos - New simulation - set parameters

File Help

Start: 2010.04.14.00:00:00

End: 2010.04.24.00:00:00

Time step (dt) [s]: ☒ constant ☐ variable 300

Time interval of the input met. fields [s]: 21600

Input folder: input Choose input folder

File name pattern for the met. fields: u: u v: v w: w T: t

Reflect from the surface? ☐

Reflect from the top? ☒

Reflection coefficient for the surface: 0

Reflection coefficient for the top: 0.1

Save particle data? ☒

Output folder: output Choose output folder

File name pattern for output: p_

Calculate length? (filename) ☐ length.txt

Calculate proportion of non-escaped particles? (filename) ☐ escape.txt

Time interval (dtWrite) for the output [s]: 21600

Insert new particles ☐ if the distance [km] of two particles > 100

Max. number of particles: 100000

Default values Save Load **1. Generate simulation setup**

Number of the particles in direction

x (longitudinal) [1, inf): 10

y (latitudinal) [1, inf): 10

z (vertical) [1, inf): 10

Center of the particle cloud

x (longitudinal) [0, 360] [°]: 60

y (latitudinal) (-90, 90) [°]: 60

z (vertical) [m]: 5500

Extension of the particle cloud

x (longitudinal) [km]: 100

y (latitudinal) [km]: 100

z (vertical) [m]: 1000

Properties of the particles

Diameter (mean - std. dev.) [μm]: 1 0

Density (mean - std. dev.) [kg/m³]: 2000 0

Default values Save Load **2. Generate particles**

Display during calculation? ☒

Number of particles to display: 1000

3. Start simulation

a szimuláció paramétere

a szennyeződéshő paramétere



RePLaT-Chaos

/teljes változat, minden paraméter beállítható/

RePLaT-Chaos - New simulation - set parameters

File Help

Start: 2010.04.14.00:00:00

End: 2010.04.24.00:00:00

Time step (dt) [s]: ☒ constant ☐ variable 300

Time interval of the input met. fields [s]: 21600

Input folder: input Choose input folder

File name pattern for the met. fields: u: u v: v w: w T: t

Reflect from the surface? ☐

Reflect from the top? ☒

Reflection coefficient for the surface: 0

Reflection coefficient for the top: 0.1

Save particle data? ☒

Output folder: output Choose output folder

File name pattern for output: n

Calculate length? (filename) ☐ ← nyúlási ütem

Calculate proportion of non-escaped particles? (filename) ☐ ← szökési ráta

Time interval (dtwrite) for the output [s]: 21600

Insert new particles ☐ if the distance [km] of two particles > 100

Max. number of particles: 100000

Default values Save Load 1. Generate simulation setup

Number of the particles in direction

x (longitudinal) [1, inf): 10

y (latitudinal) [1, inf): 10

z (vertical) [1, inf): 10

Center of the particle cloud

x (longitudinal) [0, 360] [°]: 60

y (latitudinal) (-90, 90) [°]: 60

z (vertical) [m]: 5500

Extension of the particle cloud

x (longitudinal) [km]: 100

y (latitudinal) [km]: 100

z (vertical) [m]: 1000

Properties of the particles

Diameter (mean - std. dev.) [μm]: 1 0

Density (mean - std. dev.) [kg/m³]: 2000 0

Default values Save Load 2. Generate particles

Display during calculation? ☒

Number of particles to display: 1000

3. Start simulation

a szimuláció paraméterei

a szennyeződéscsúcs paraméterei



RePLaT-Chaos-edu

/diákváltozat, „játék”/

felhasználói felület:
Kiss Mária (Berzsenyi
Dániel Gimn. 12. oszt.)

RePLaT-Chaos - Volcanic ash clouds



More simulations

Design an eruption!

Chaotic quantities

Measuring chaos

Conclusions

Authors

Design eruption i

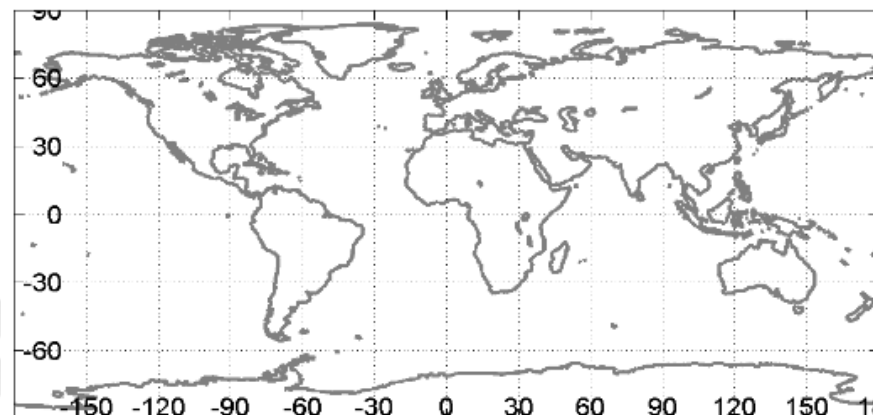
Locate eruption by clicking the map & provide other data



Imagine the initial volcanic cloud as a cuboid!

density [kg/m^3] i

diameter [μm] i



Eruption's location i

longitude: [°] i

latitude: [°] i

altitude: [m]

Cloud's size i

[km]

[km]

[m]

Number of particles/direction

Start

i Leave the mouse over the *i* letters to get more information.

Long. min-max [-180, 180] [°]:

-180.0

180.0

Lat. min-max [-90, 90] [°]:

-90.0

90.0

Height min-max [m]:

110.0

11000.

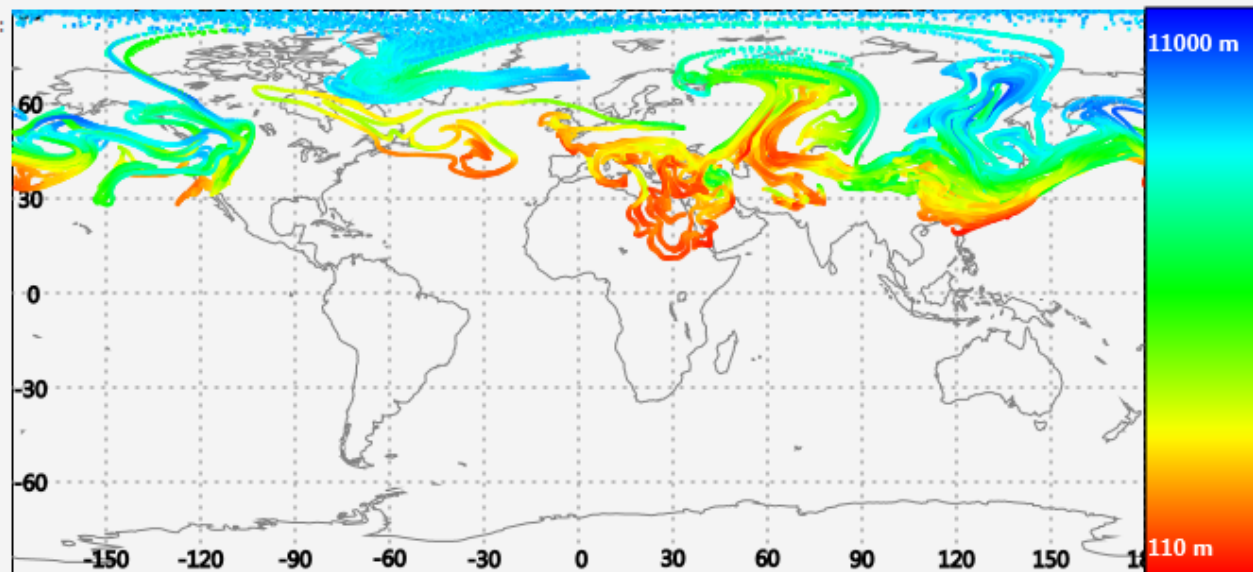
Marker size:

2.0

Frame rate:

5

Apply



Previous

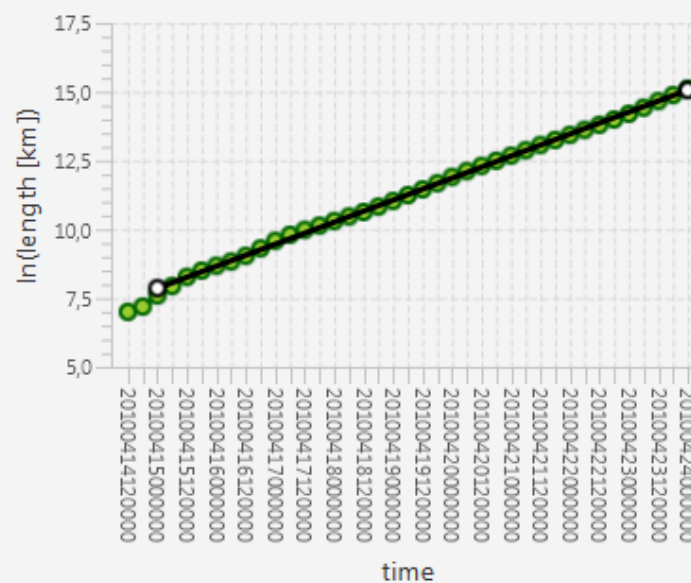
Next

Continue

Stop

Save image

20100424000000


 $h = 0.800 \text{ day}^{-1}$

Save image

Based on the interval:

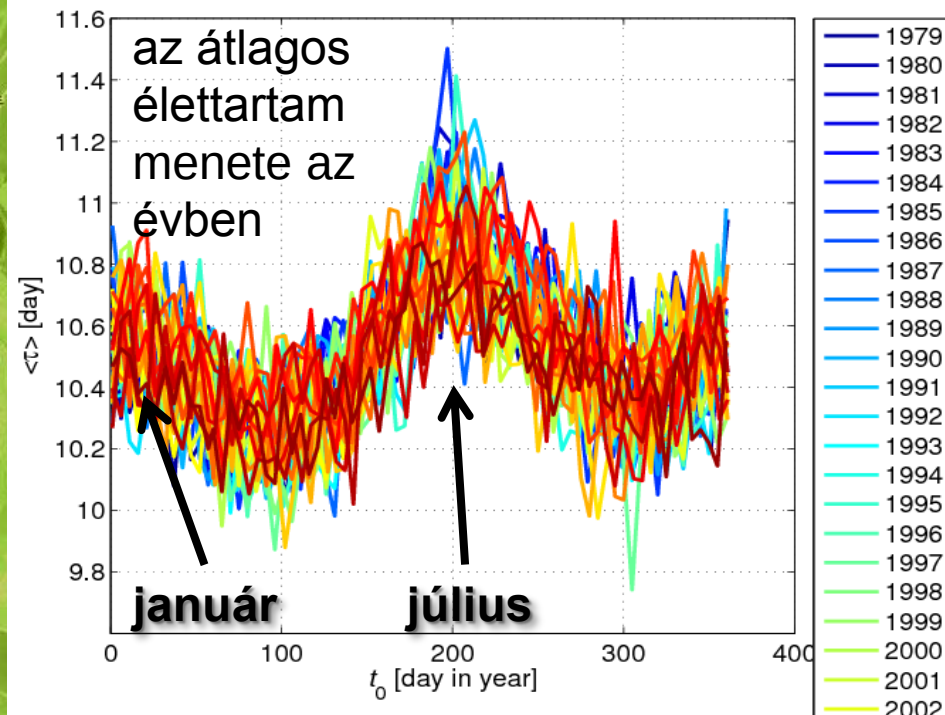
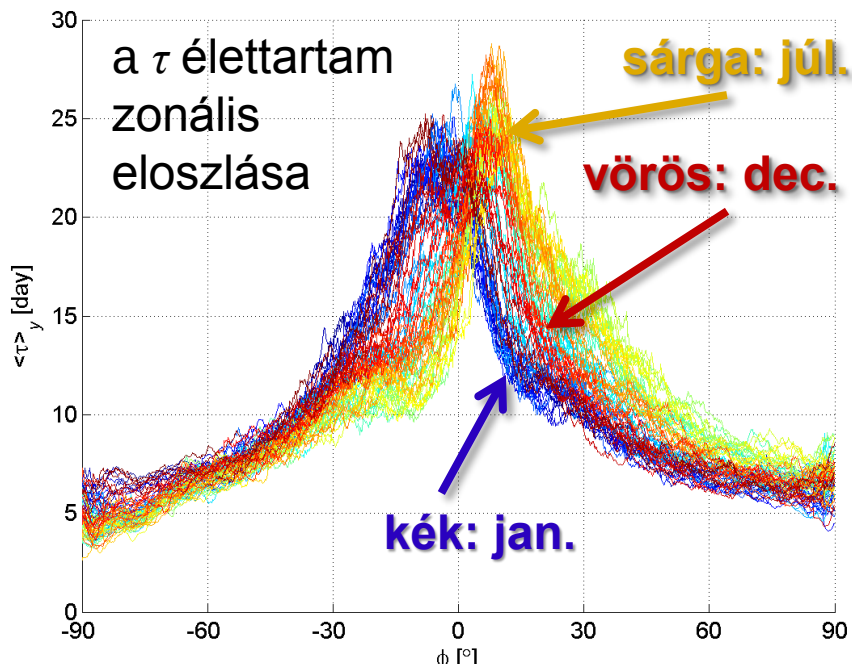
20100415000000

20100424000000

Calculate topological entropy

Összefoglalás

- a részecskék ülepedésének dinamikájában **kaotikus jellemzők** figyelhetők meg
- a részecskék élettartamának eloszlása **szálas szerkezetű**
- a szálok határai **lagrange-i koherens struktúráknak (LCS)** tekinthetők ← az azonos szálból induló részecskék együtt sodródnak
- a légkörben maradó részecskék száma **exponenciálisan csökken**, ennek ütemét a **szökési ráta** számszerűsíti: $\kappa(r) \sim r^2$
- a sodródási probléma időfüggő → a **kaotikus nyereghalmaz**, κ és az **átlagos élettartam szintén időfüggő** (10-20% egy éven belül)





Volume 29, Issues 7–9, July–September 2019

Intricate features in the lifetime and deposition of atmospheric aerosol particles

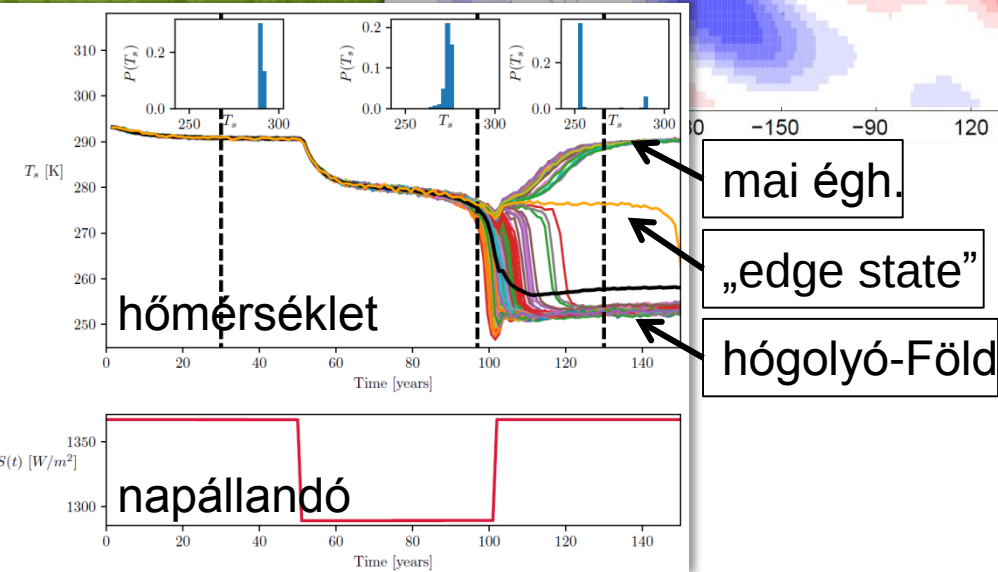
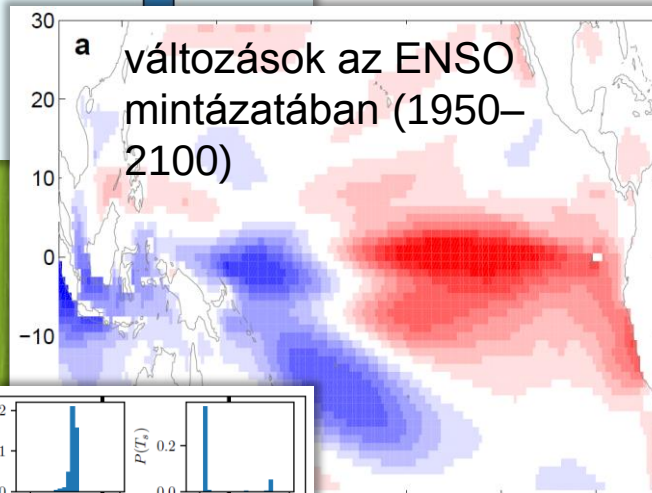
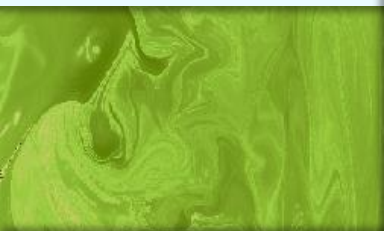
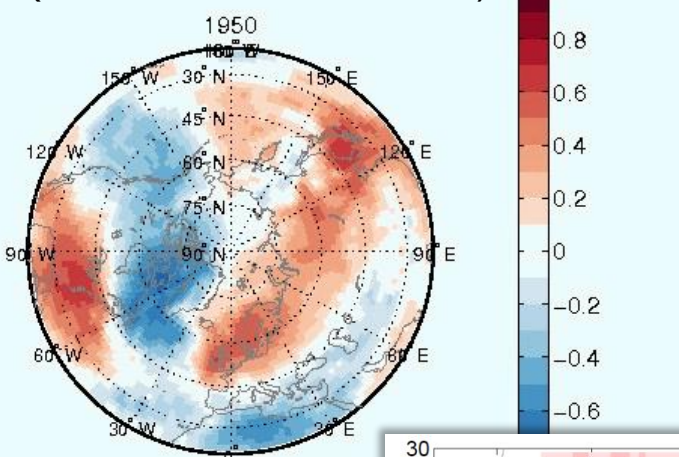
Chaos 29, 071103 (2019); doi.org/10.1063/1.5110385

T. Haszpra

Összefoglalás

- **geoengineering** kapcsán felmerülő egyes kérdésekre válasz
 - a méretükről függően milyen hosszan maradnak a részecskék a levegőben
 - időben hogyan csökken a mennyiségük
- 10-20 nap alatt a helyi kibocsátásokból származó szennyeződések nagy terület felett jelenhetnek meg, 1-2 hónap alatt beteríthetik ***mindkét féltekét***
- Haszpra, T. (2019): Intricate features in the lifetime and deposition of atmospheric aerosol particles. *Chaos* 29(7), 071103

$r(\text{AO-index, hőmérséklet})$



Egyéb kutatások: sokasági éghajlati szimulációk

- légköri **oszcillációk** és **távkapcsolataik**

- **Arktikus Oszcilláció**

Haszpra, T., Topál, D., Herein, M. (2019): On the time evolution of the Arctic Oscillation and related wintertime phenomena under different forcing scenarios in an ensemble approach. *Submitted to J. Clim.*

- **El Niño–Southern Oscillation**

Haszpra, T., Herein, M., Bódai, T. (2019): On the time evolution of ENSO and its teleconnections in an ensemble view – a new perspective. *Submitted to Earth System Dynamics.*

- a napállandó változásának hatására a **hógolyó-Földre való átmenet és visszatérés valószínűségének vizsgálata**

Kaszás, B., Haszpra, T., Herein, M. (2019): The snowball Earth transition in a climate model with drifting parameters: Splitting of the snapshot attractor.

Chaos **29**(11), 113102

- **Összefoglaló:** Tél, T., Bódai, T., Drótos, G., Haszpra, T., Herein, M., Kaszás, B., Vincze, M. (2019): The theory of parallel climate realizations: A new framework of ensemble methods in a changing climate – an overview. *J. Stat. Phys.* (accepted)

A photograph of a powerful volcanic eruption. A massive, billowing plume of white ash and steam rises vertically from a volcano on the right side of the frame, expanding into a large, cauliflower-like cloud that fills much of the upper sky. In the foreground, a paved road curves through a dry, grassy landscape. In the distance, another volcano with a smaller, conical ash plume is visible against the horizon. The sky is a clear, pale blue.

**KÖSZÖNÖM
A FIGYELMET!**