

XXI НАУЧНАЯ ШКОЛА «Нелинейные волны - 2024»

Нижний Новгород, 5 - 11 ноября 2024 года

**Самоорганизующиеся
транспортные сети в геофизике:
структурная асимметрия**

Д.И. Иудин*,**

*Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород

**Приволжский исследовательский медицинский университет, г. Нижний Новгород

Работа поддержана грантом Российского научного фонда, проект № 23-11-00245

ПЛАН ЛЕКЦИИ

Введение

1. Гидрология. Речные системы

2. Атмосферные разряды. Молния

Выводы

Введение

**Транспортные сети:
самоорганизация сбора и/или
распределения ресурса**

Бронхиальное древо



Нейрональная сеть



Информационные системы

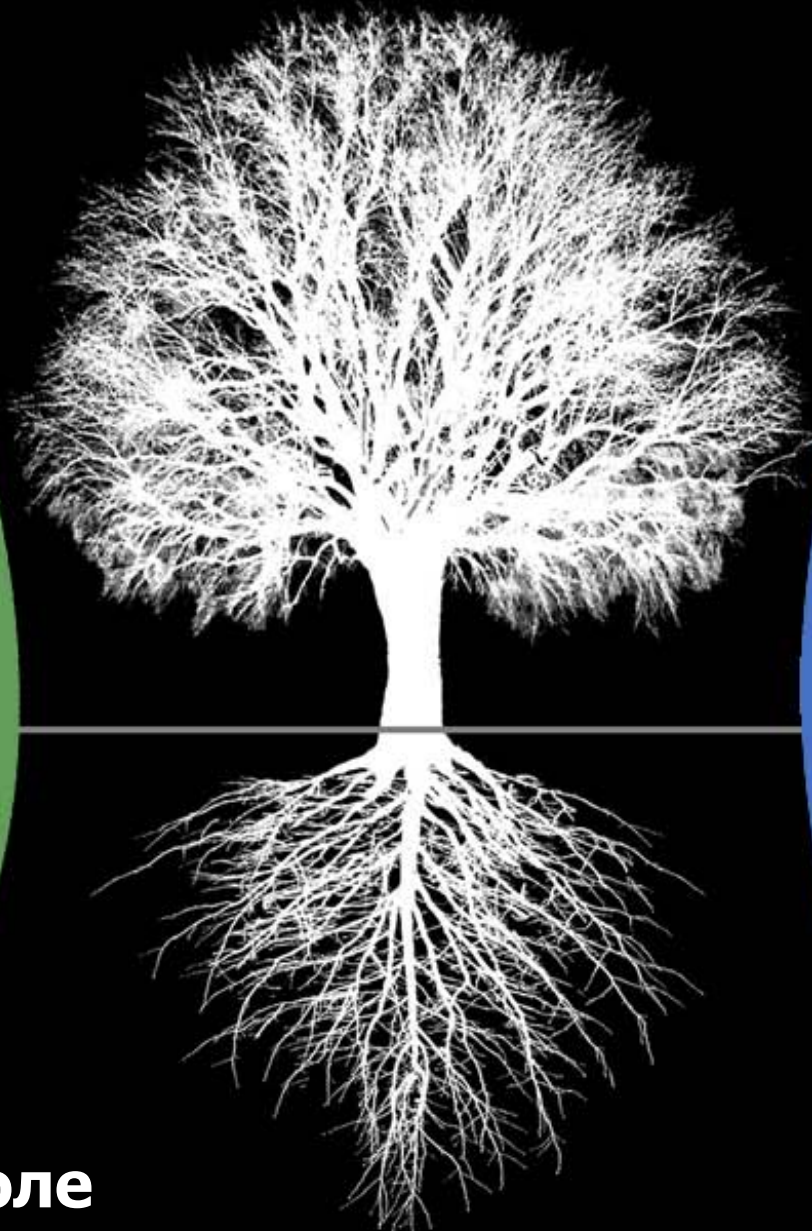


Структурная и функциональная асимметрия

Сети с древовидной архитектурой



Флоэма



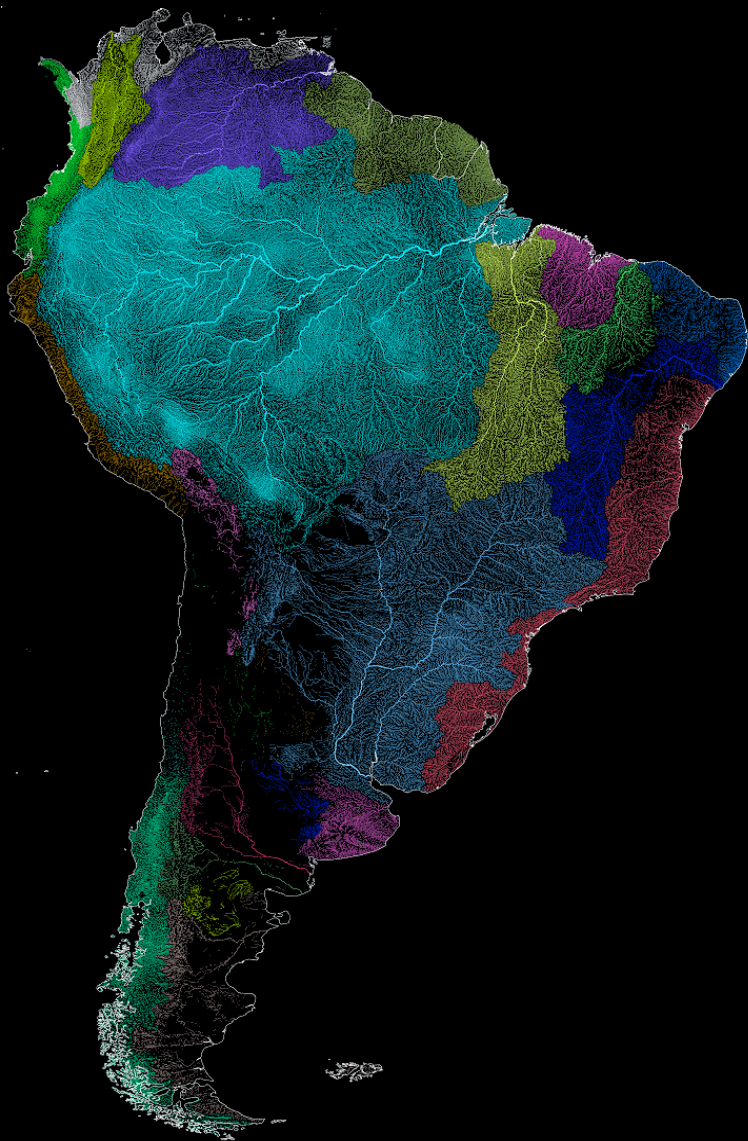
Формирование в потенциальном поле

1

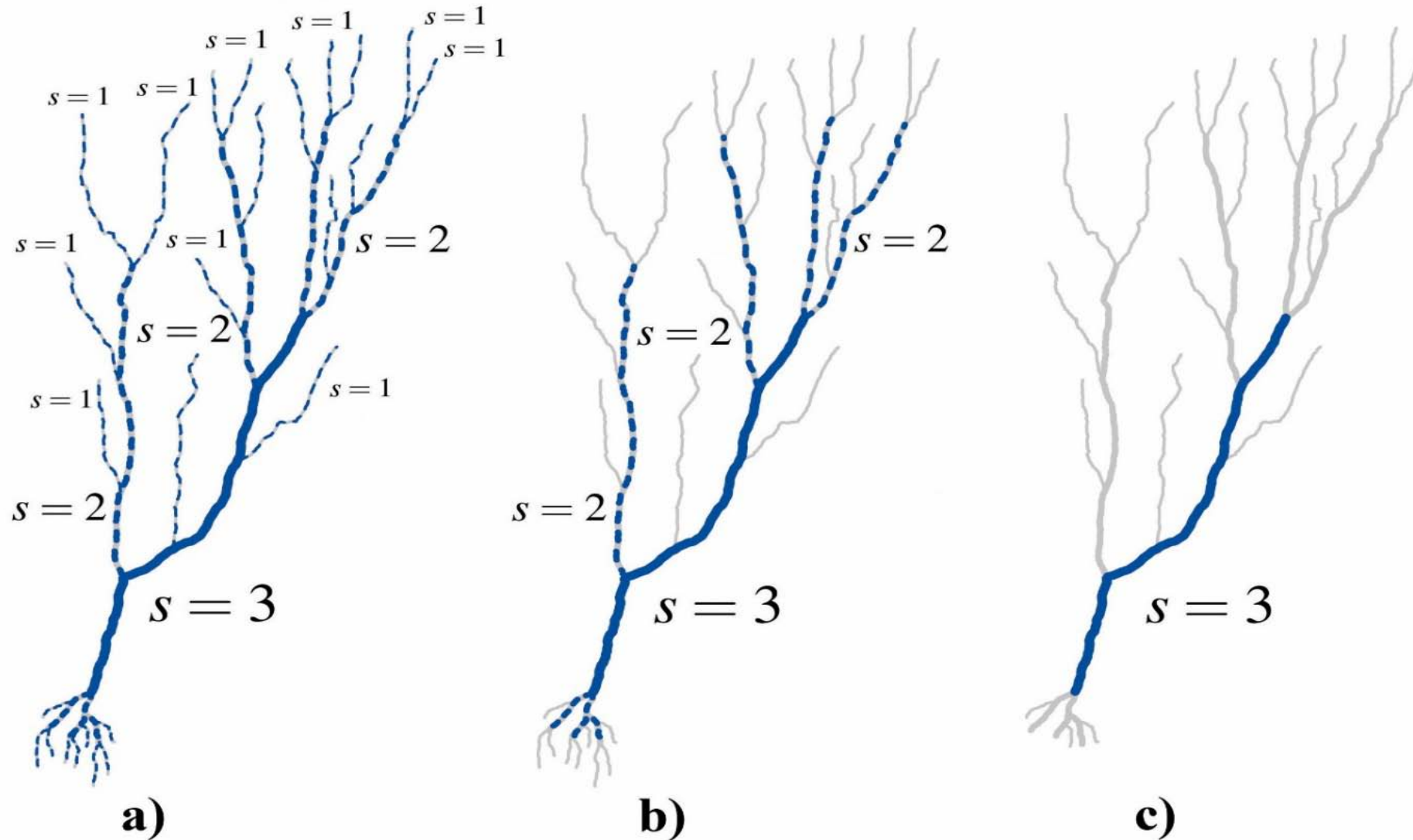
Гидрология

Речные системы

Водосборные бассейны рек



Иерархия притоков Хортона — Штролера



Для рек не имеющих притоков, порядок русла s принимается равным единице: $s = 1$. Когда два потока первого порядка объединяются, они образуют поток второго порядка и т.д.

Иерархия притоков Хортона — Штролера

$$L_s = R_l L_{s-1} = R_l^s L_0$$

коэффициент
масштабирования

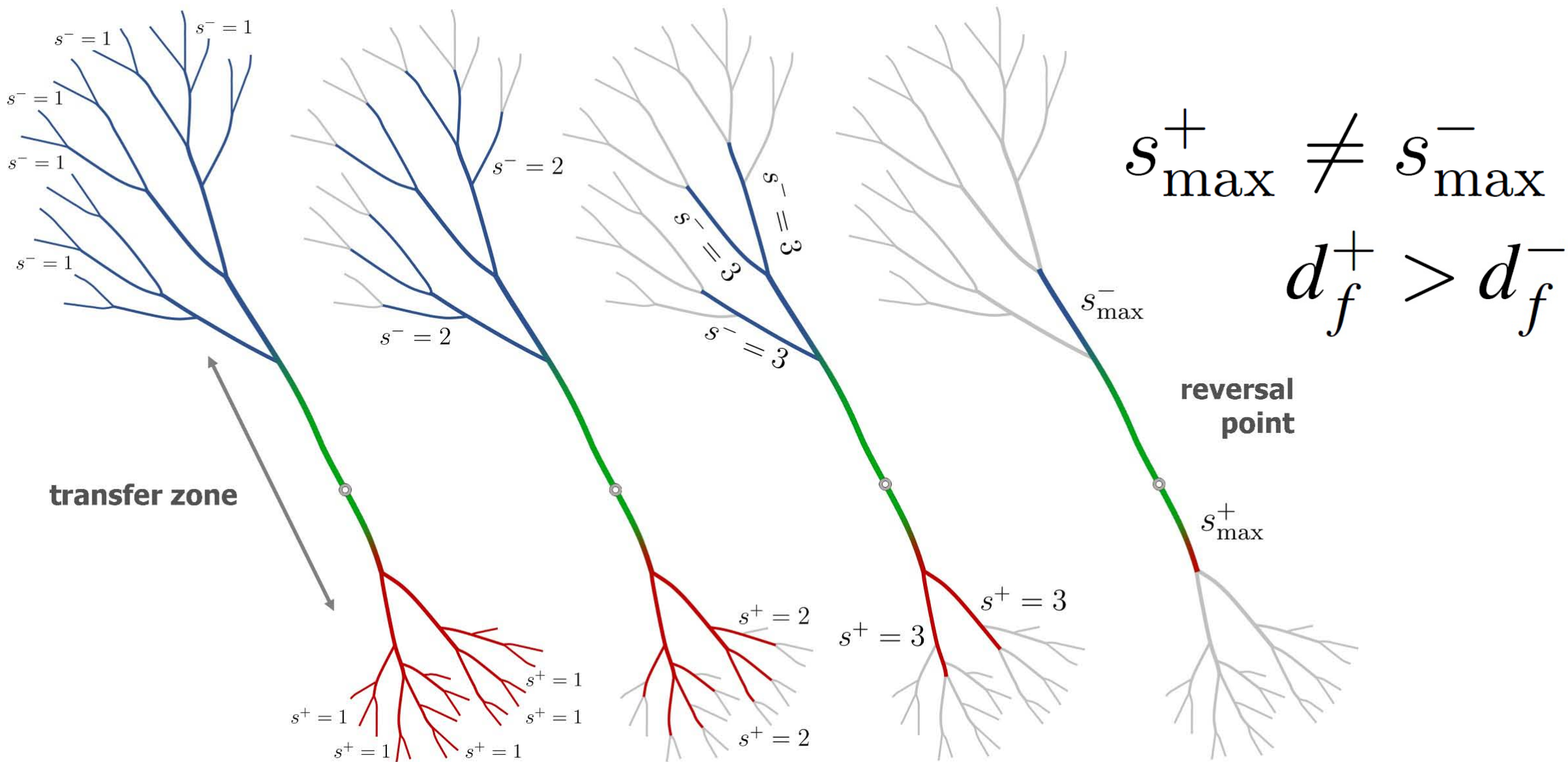
$$N_s = R_b N_{s+1} = R_b^{s_{\max} - s} N_{s_{\max}} = R_b^{s_{\max} - s}$$

коэффициент ветвления

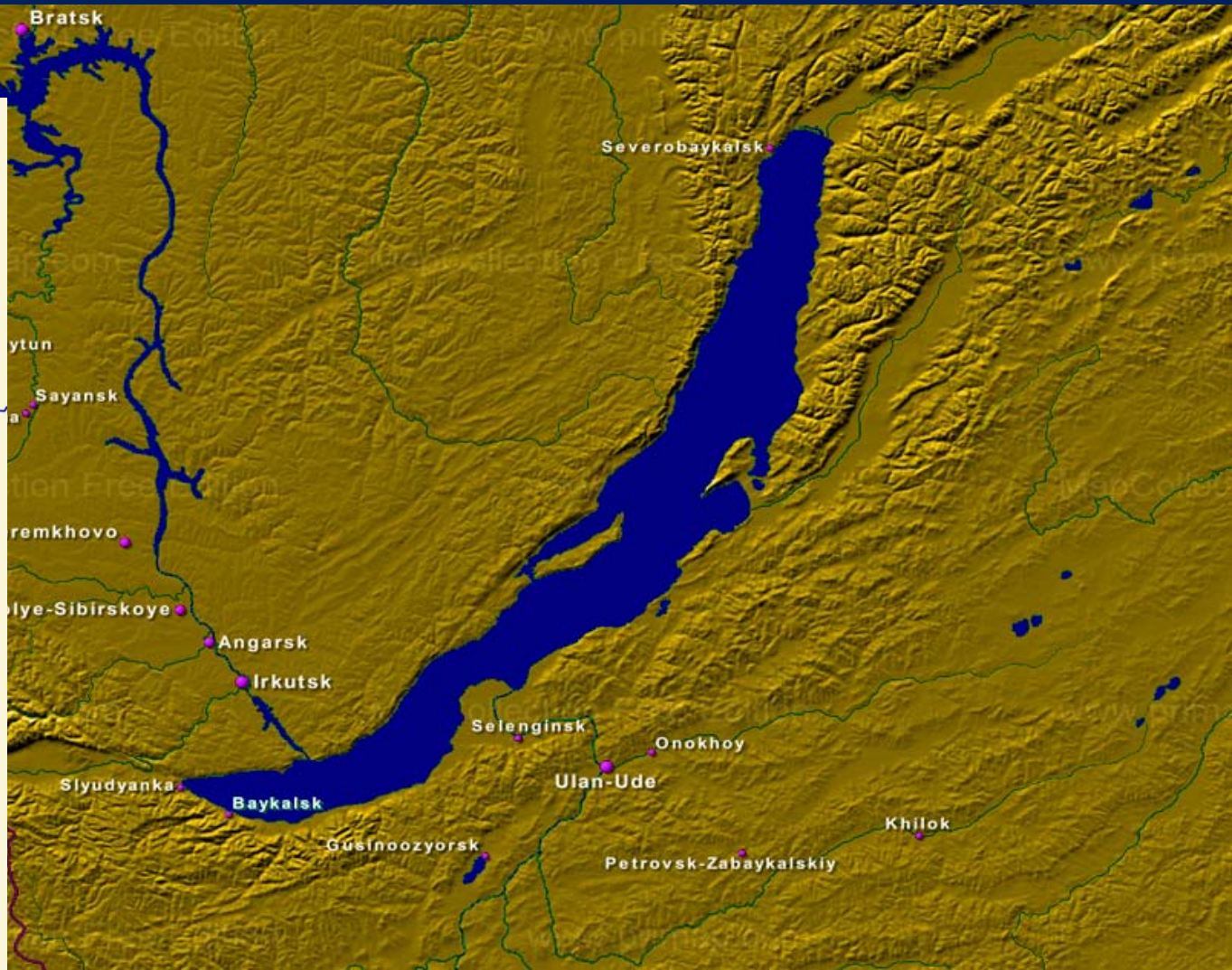
**Фрактальная размерность
сети**

$$d_f = \frac{\ln(N_s / N_{s+1})}{\ln(L_{s+1} / L_s)} = \frac{\ln(R_b)}{\ln(R_l)}$$

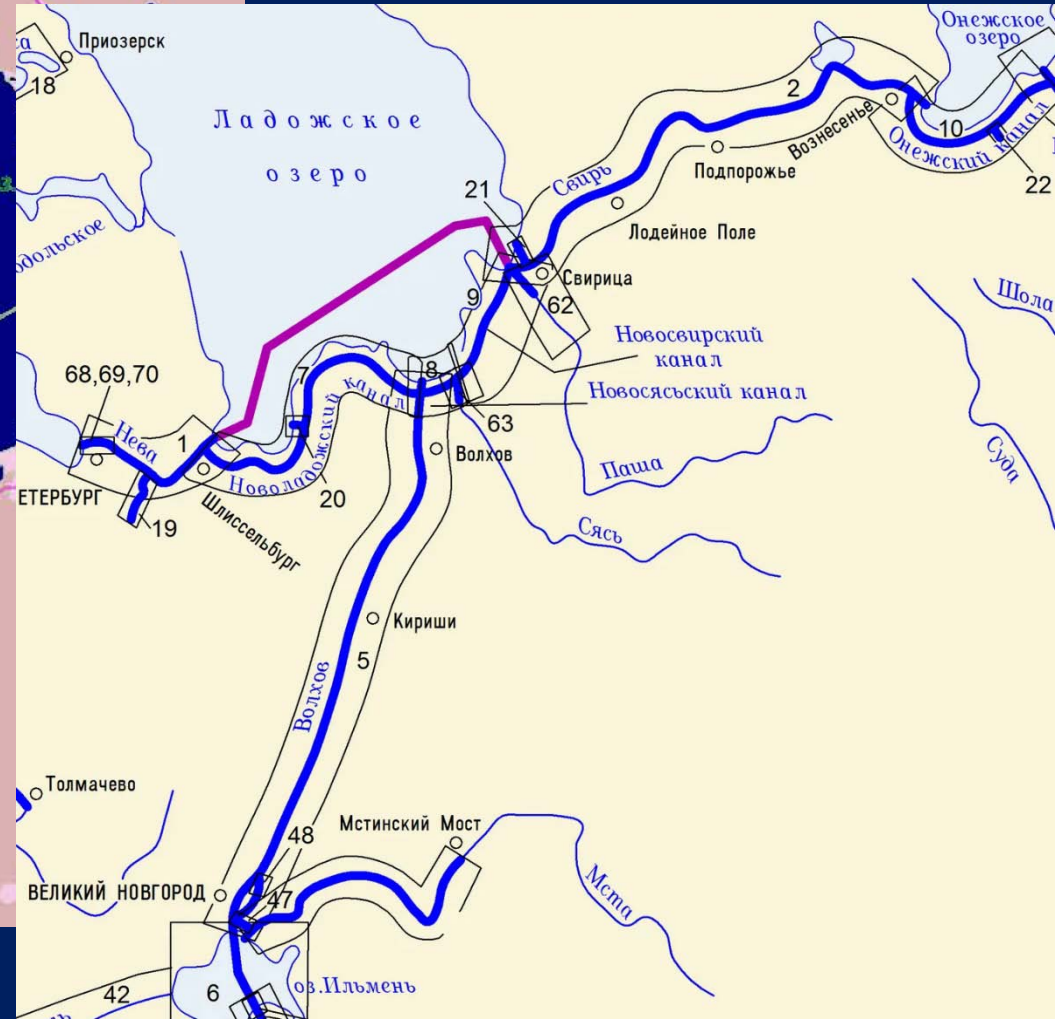
Биполярная иерархия плазменных каналов



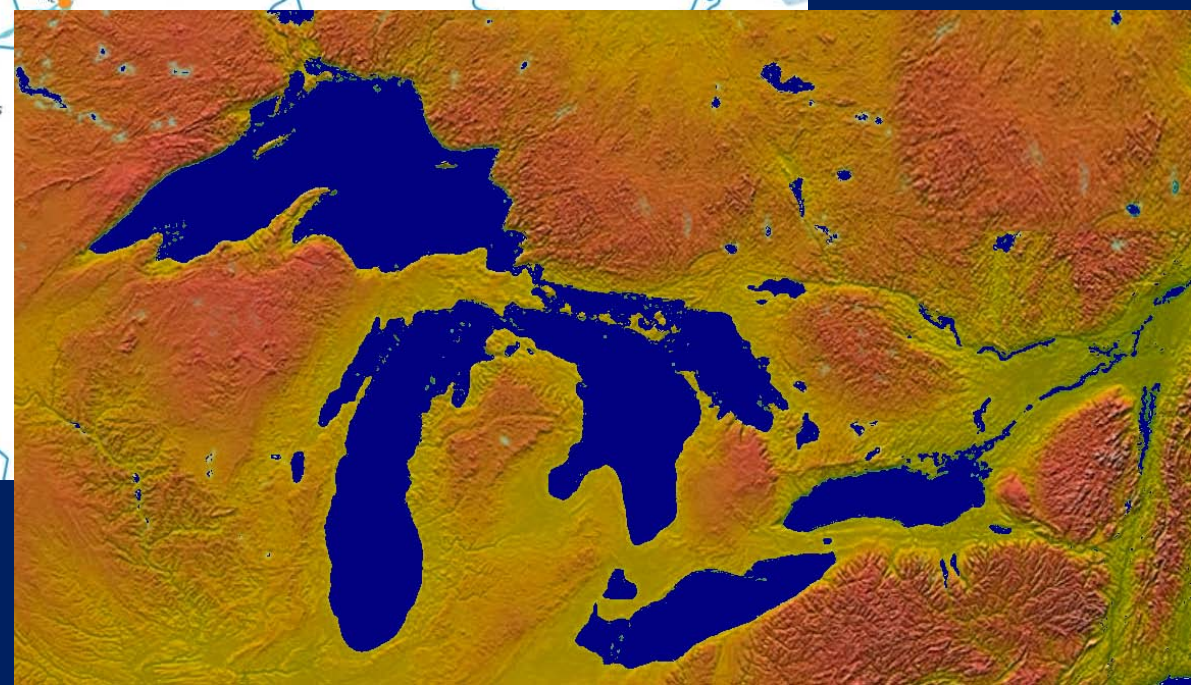
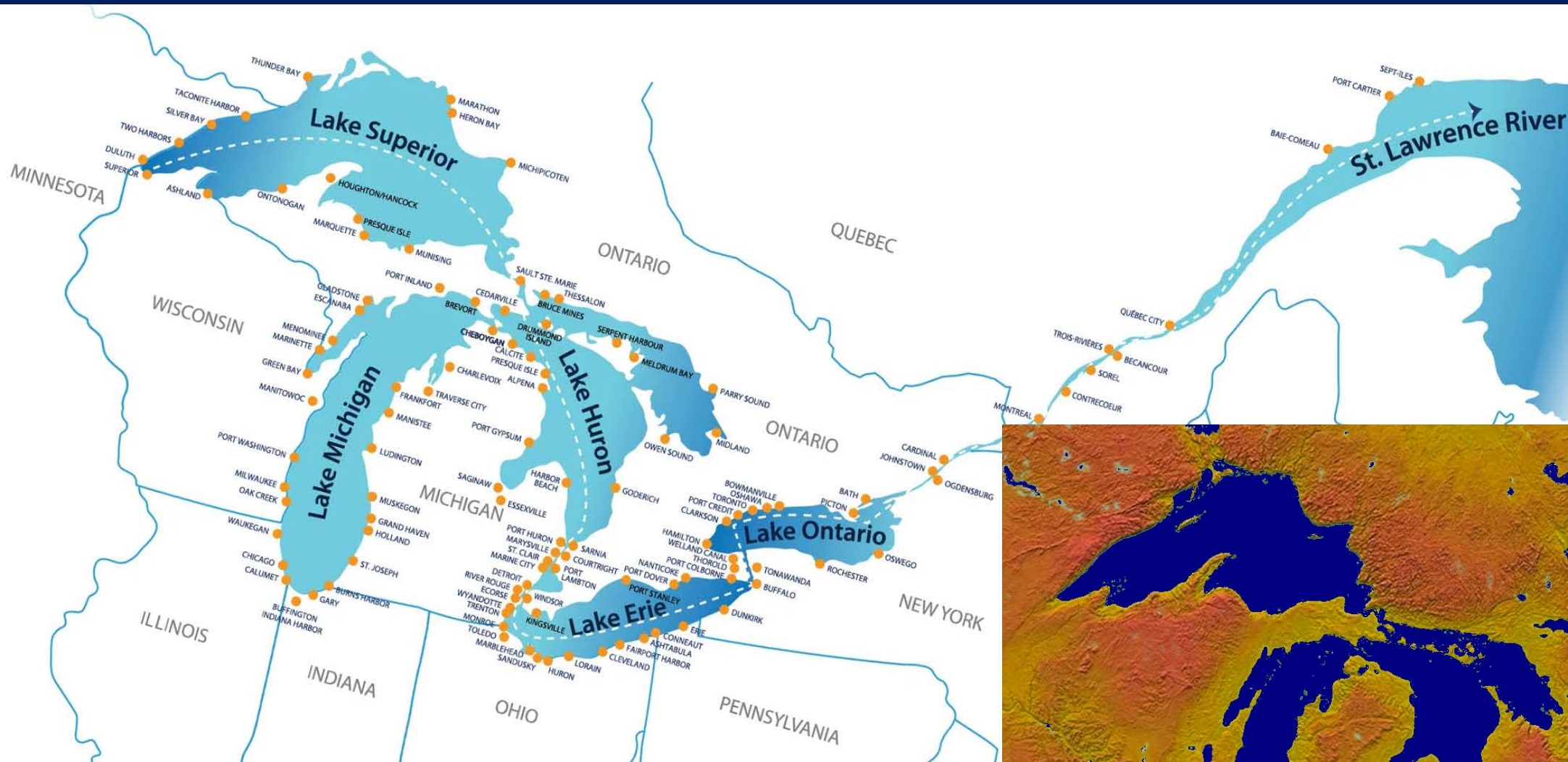
Асимметрия речных систем



Асимметрия речных систем



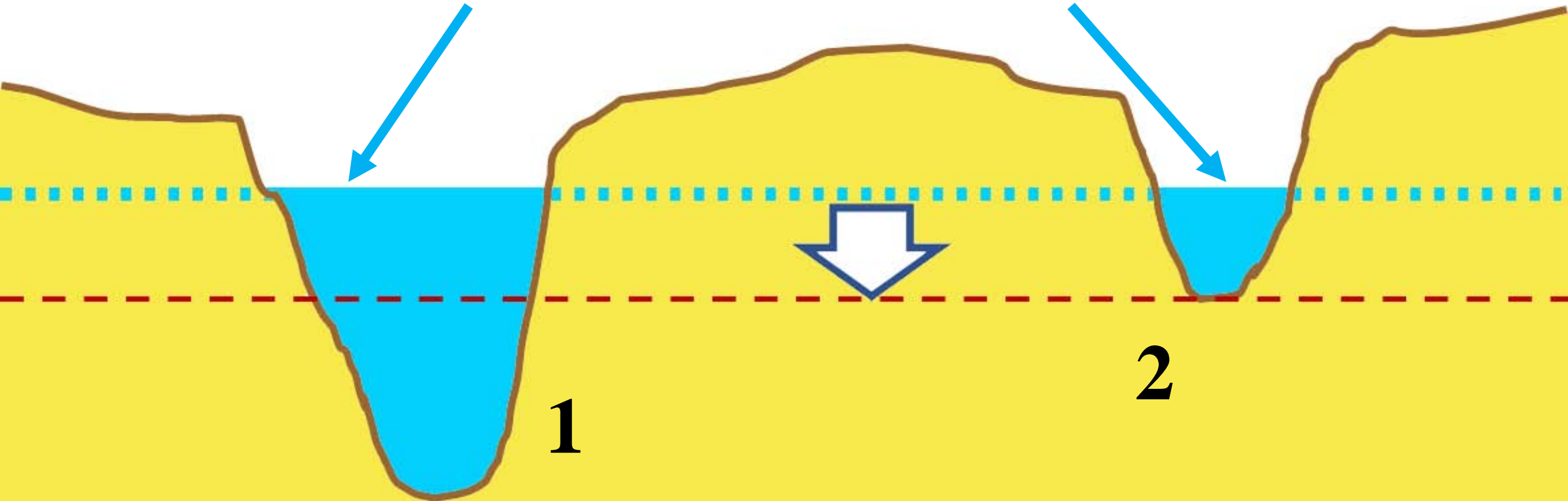
Асимметрия речных систем



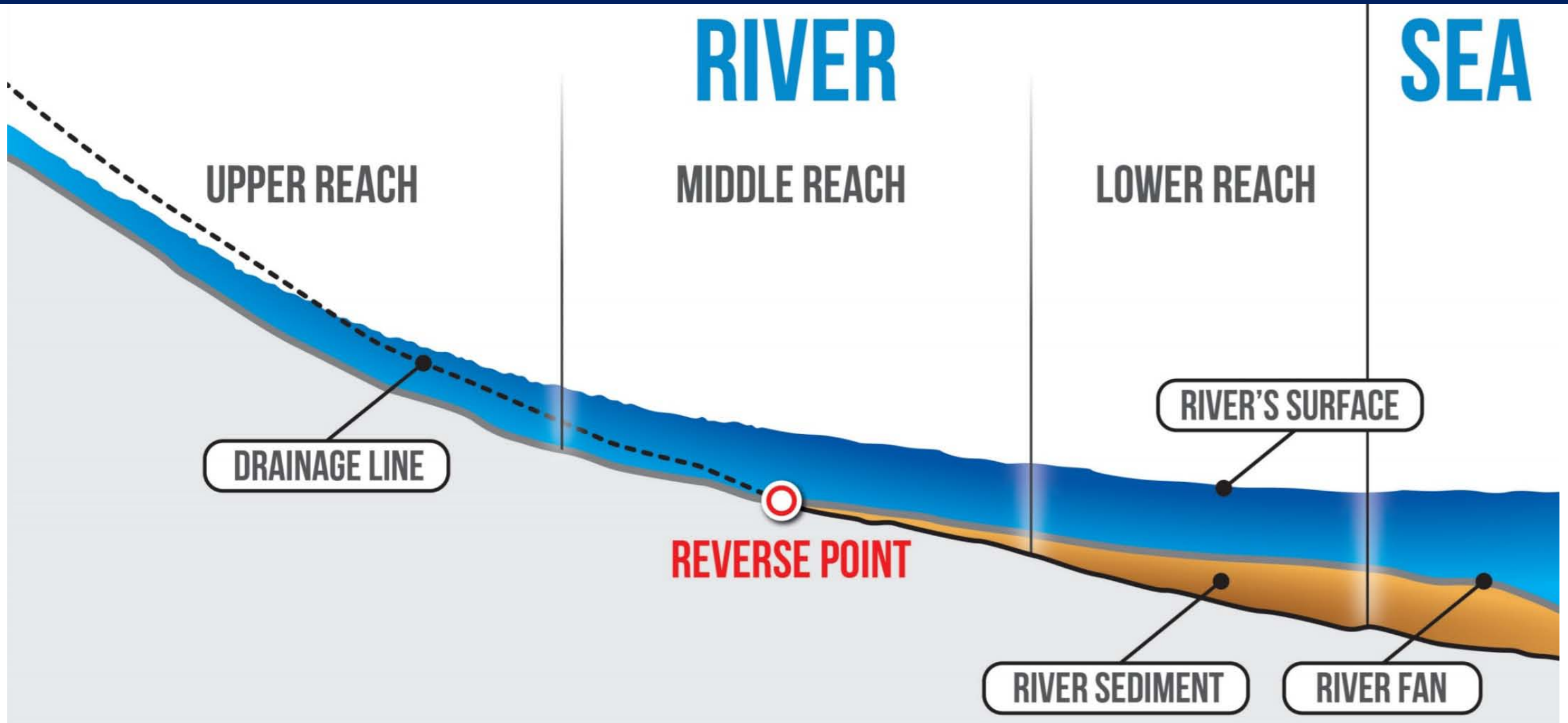
Конкуренция исходящих притоков

Выше точки реверса!

Уровень воды в озере

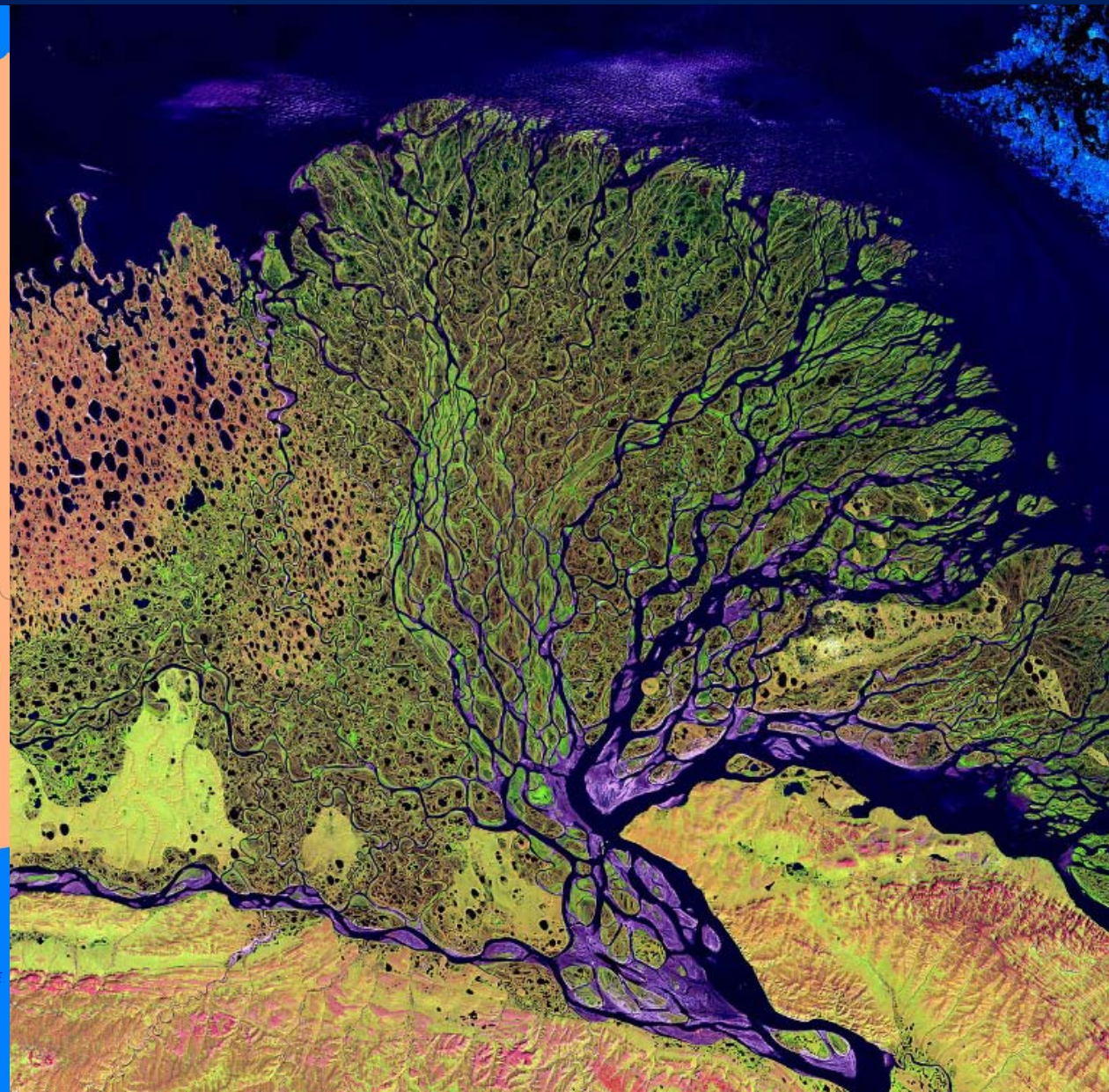
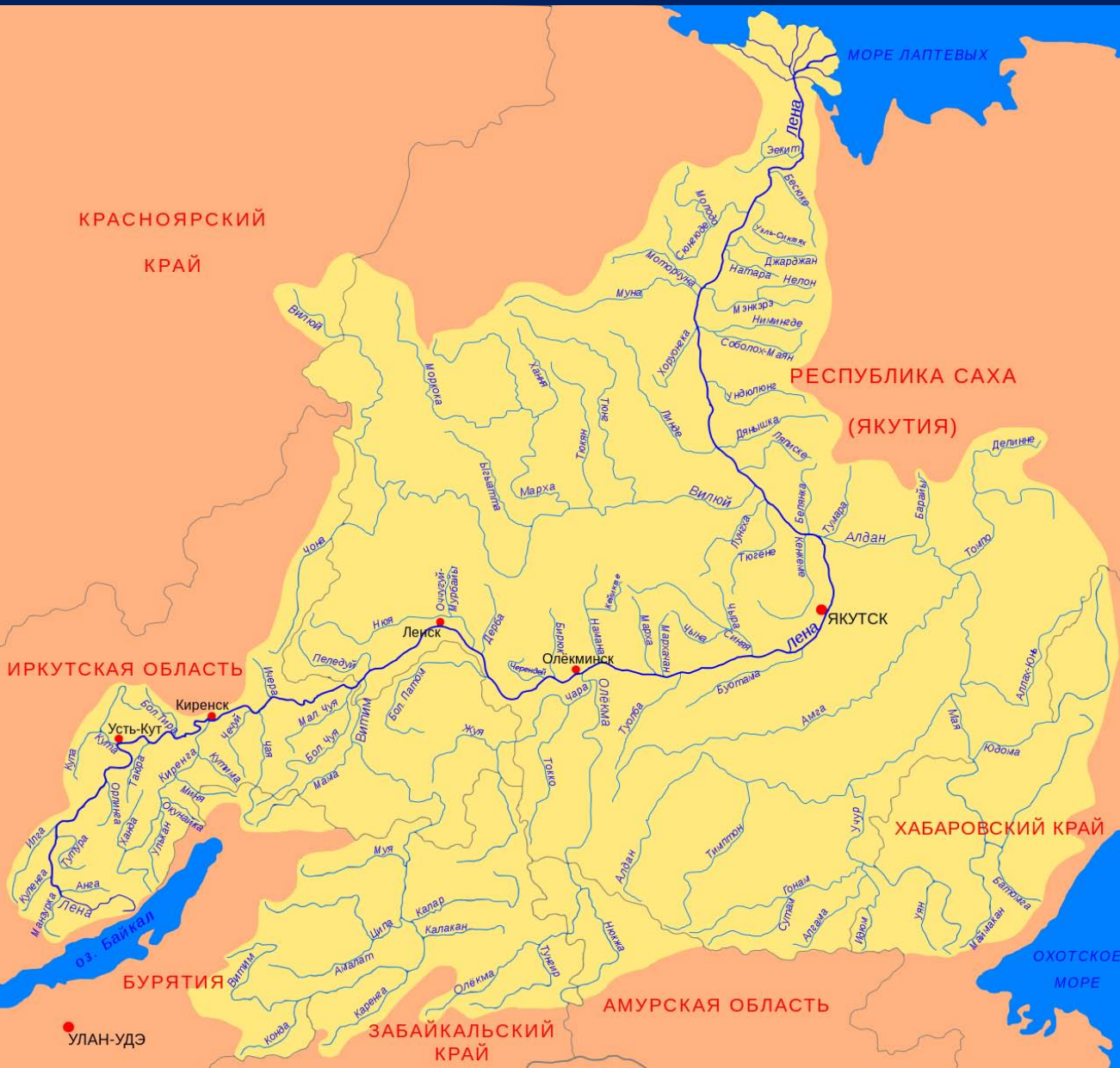


Эрозия против седиментации



Продольный разрез основного русла реки

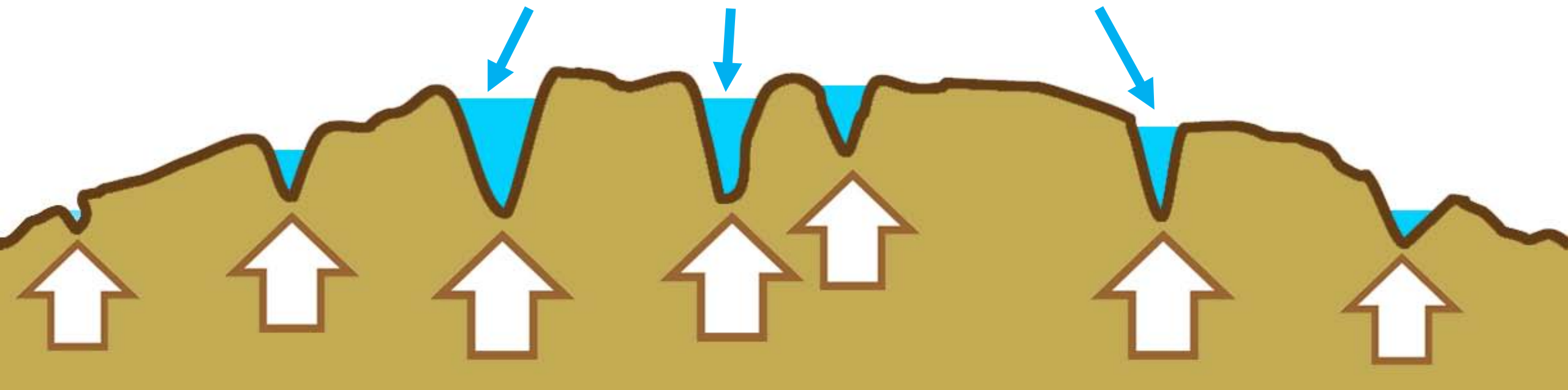
Синергия притоков в дельте Лены



Синергия притоков в дельте

Ниже точки реверса!

Уровень воды в рукавах



Седиментация

2

Атмосферные разряды

Молния

Молния: геофизика и астрофизика



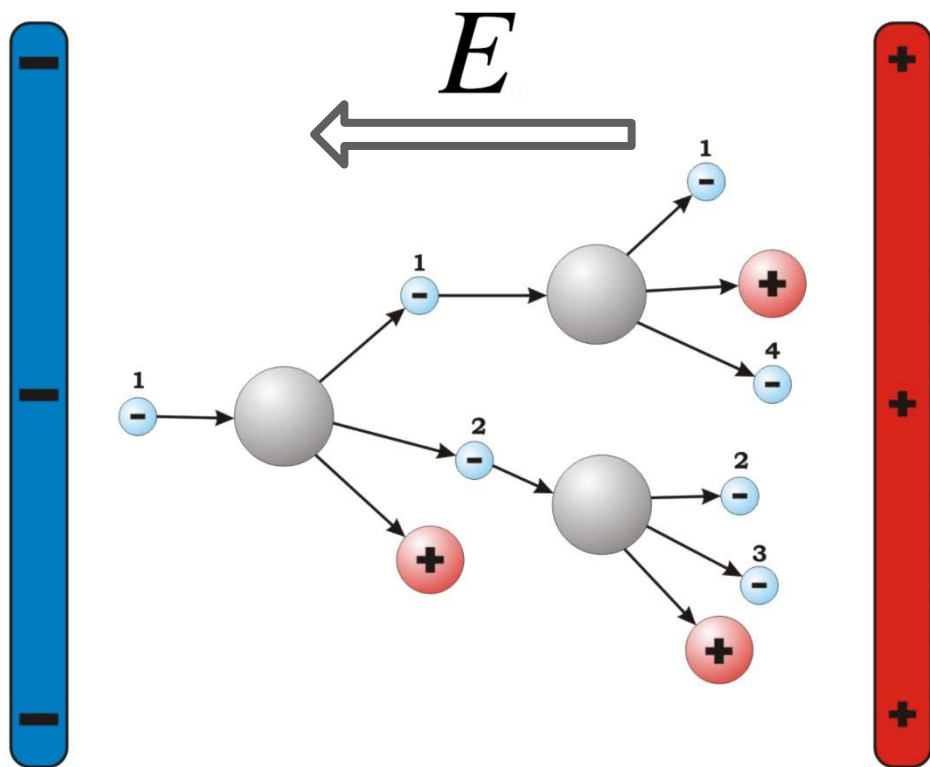
**Молнии Кататумбо
Маракайбо**



**Мощный удар молнии
на Юпитере**

Асимметрия полярности

Электронная лавина



10^8 электронов

лави́на \longrightarrow стример

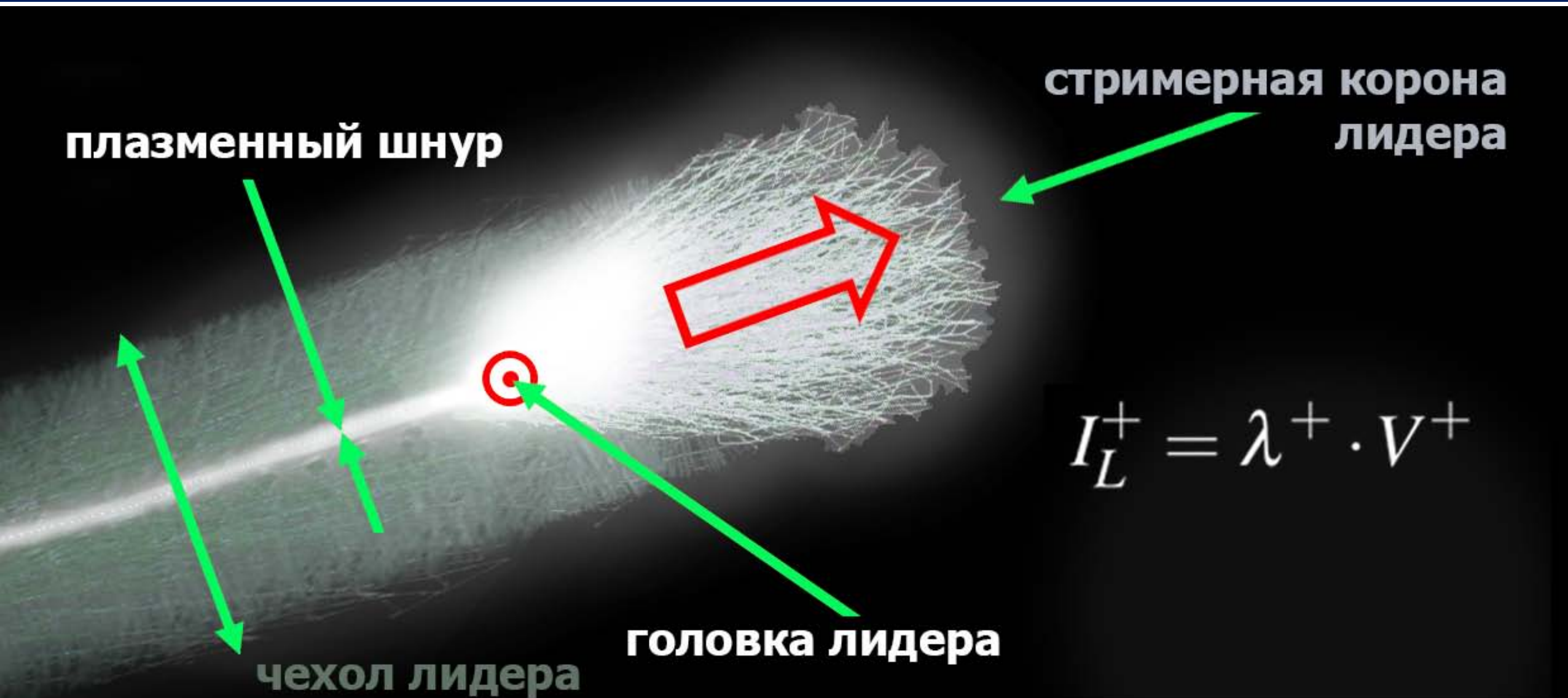
Поле поддержания стримеров



Лавина стримеров

стример \longrightarrow лидер

Формирование лидера

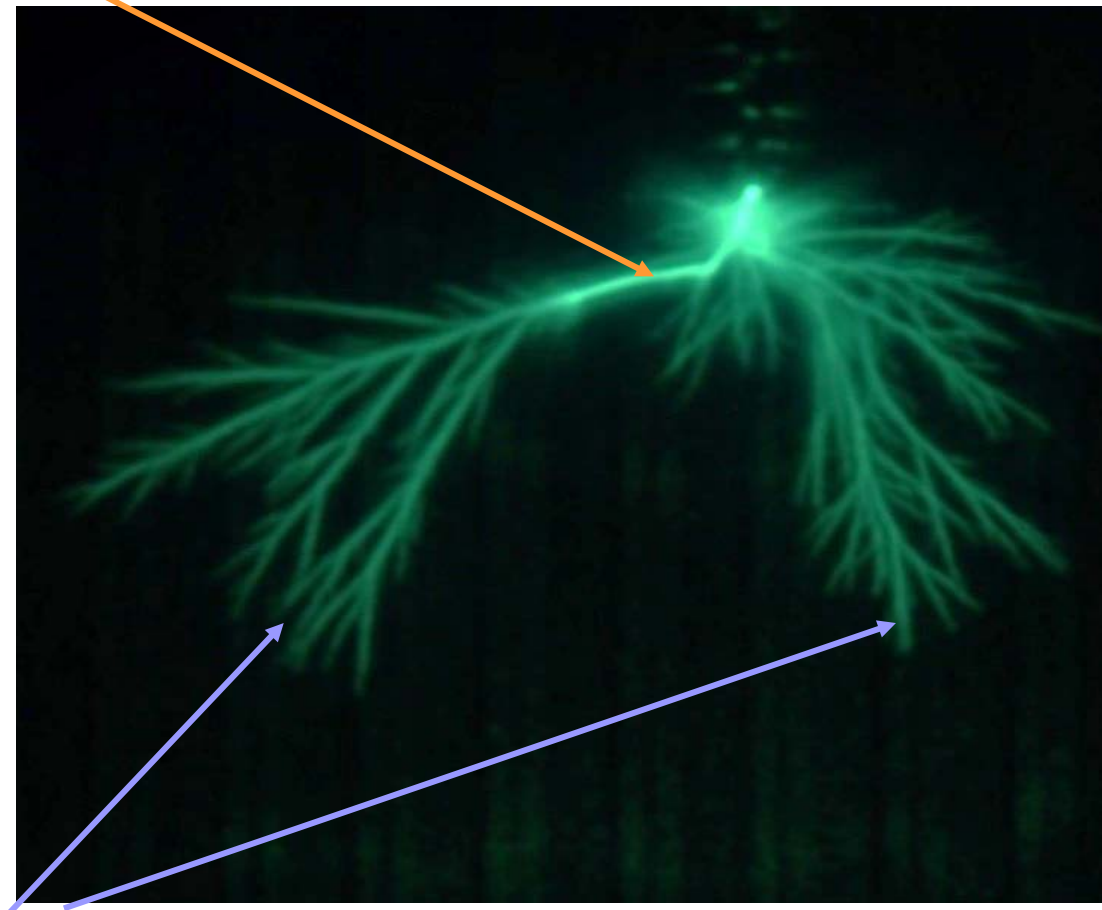
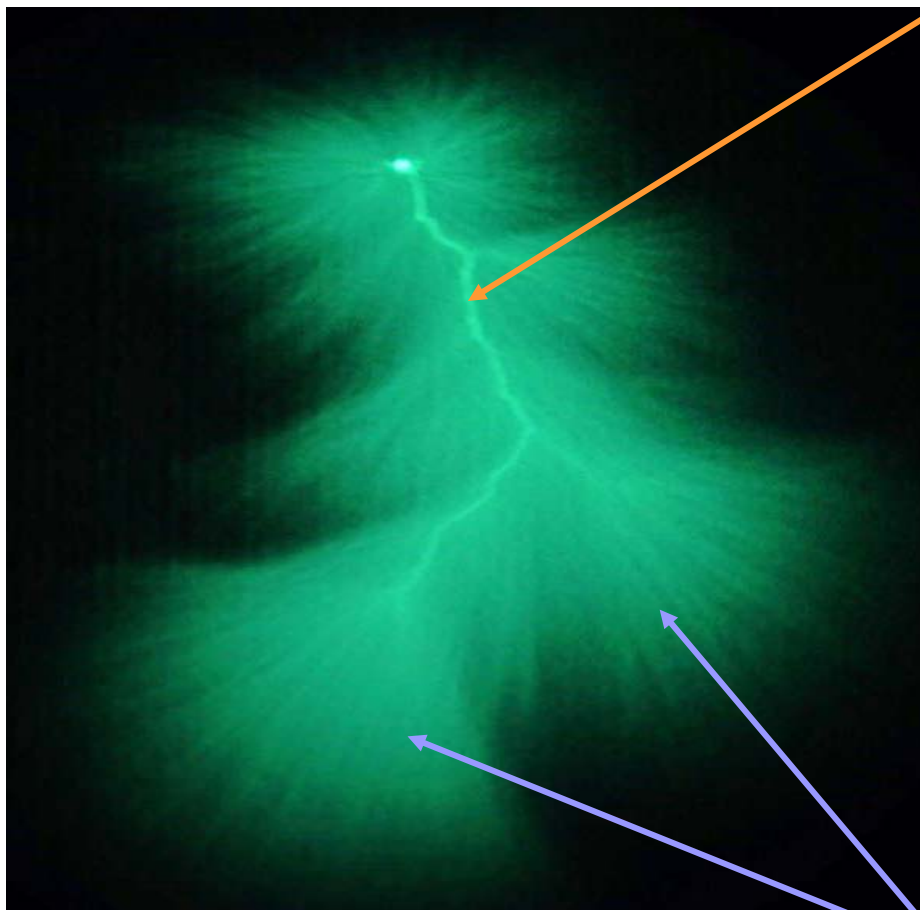


Стримеры и лидеры

Положительный лидер

Лидеры

Отрицательный лидер



Стримеры

Молния: асимметрия полярности

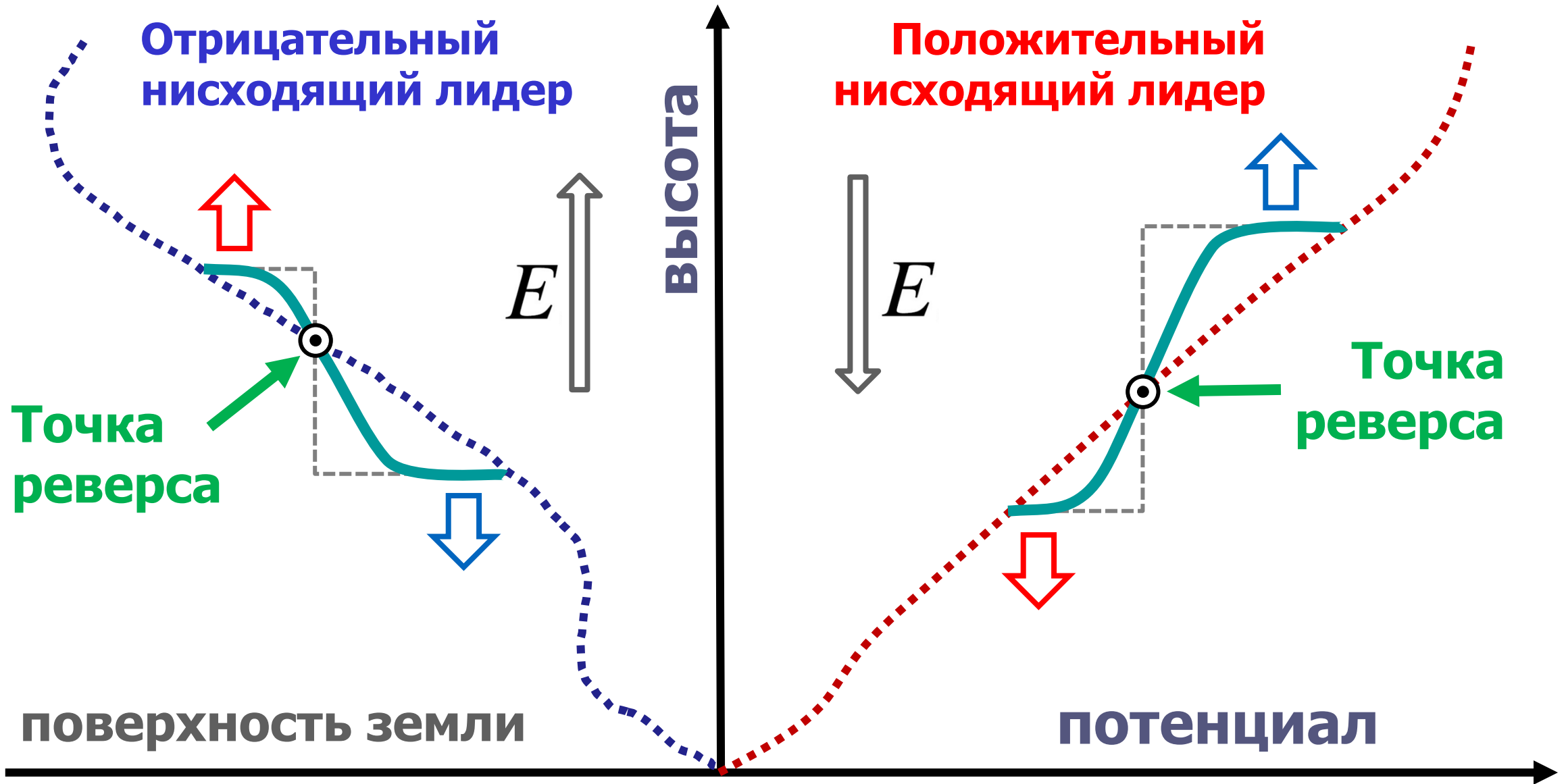
Положительные лидеры

- Распространяются относительно непрерывно
- Практически невидимы в высокочастотном диапазоне
- Как правило, ограничиваются одним ударом
- Гигантские токи обратного удара 300 кА
- Часто сопровождаются реактивацией ранее утраченных латеральных ветвей

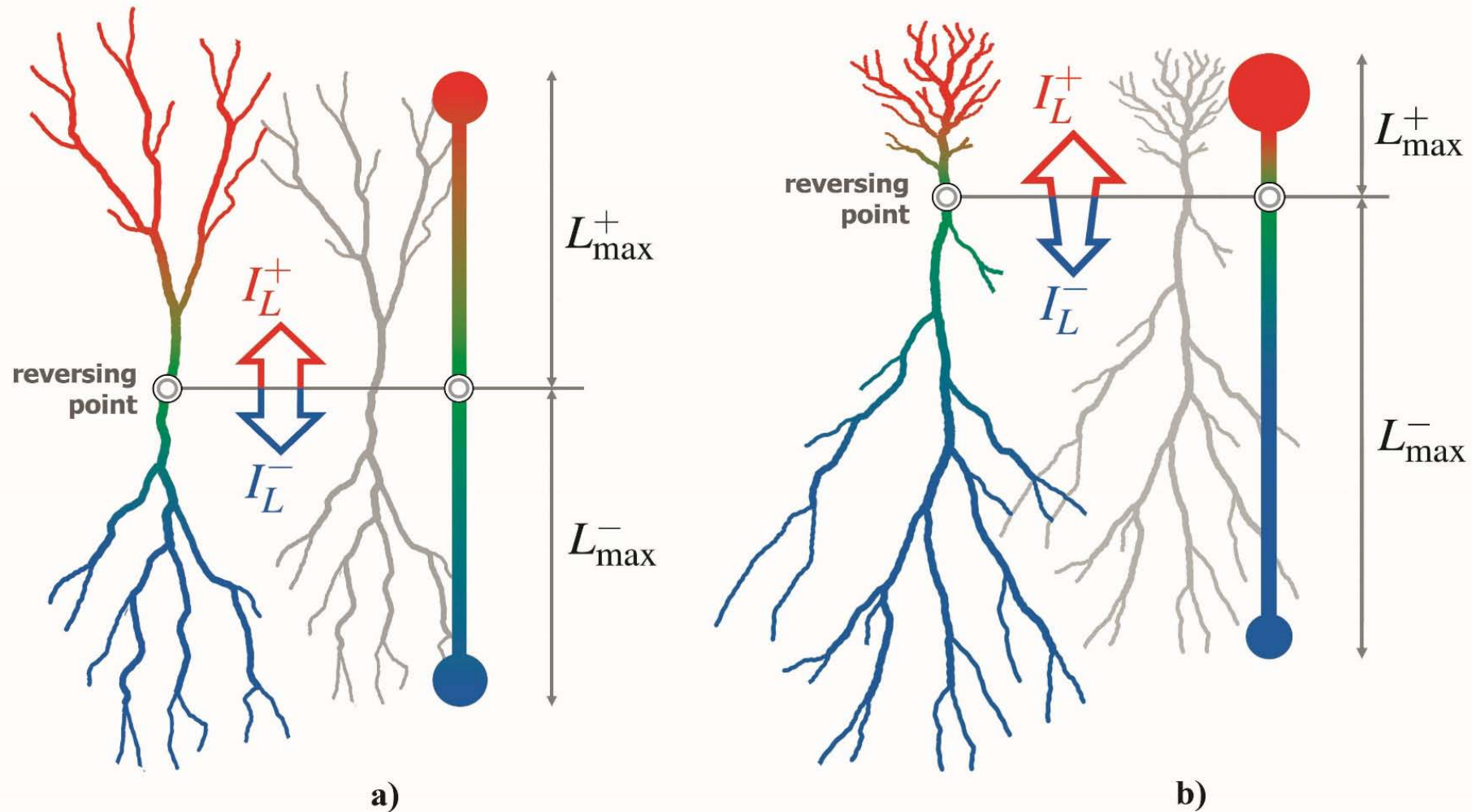
Отрицательные лидеры

- Распространяются дискретными шагами
- Испускают обильные радиоимпульсы в полосе частот 30 - 300 МГц
- Состоят из серии (иногда до нескольких десятков) ударов проходящих через один канал
- Токи обратного удара порядка 30 кА
- Очень редко теряют и реактивируют боковые ветви

Точка реверса молнии

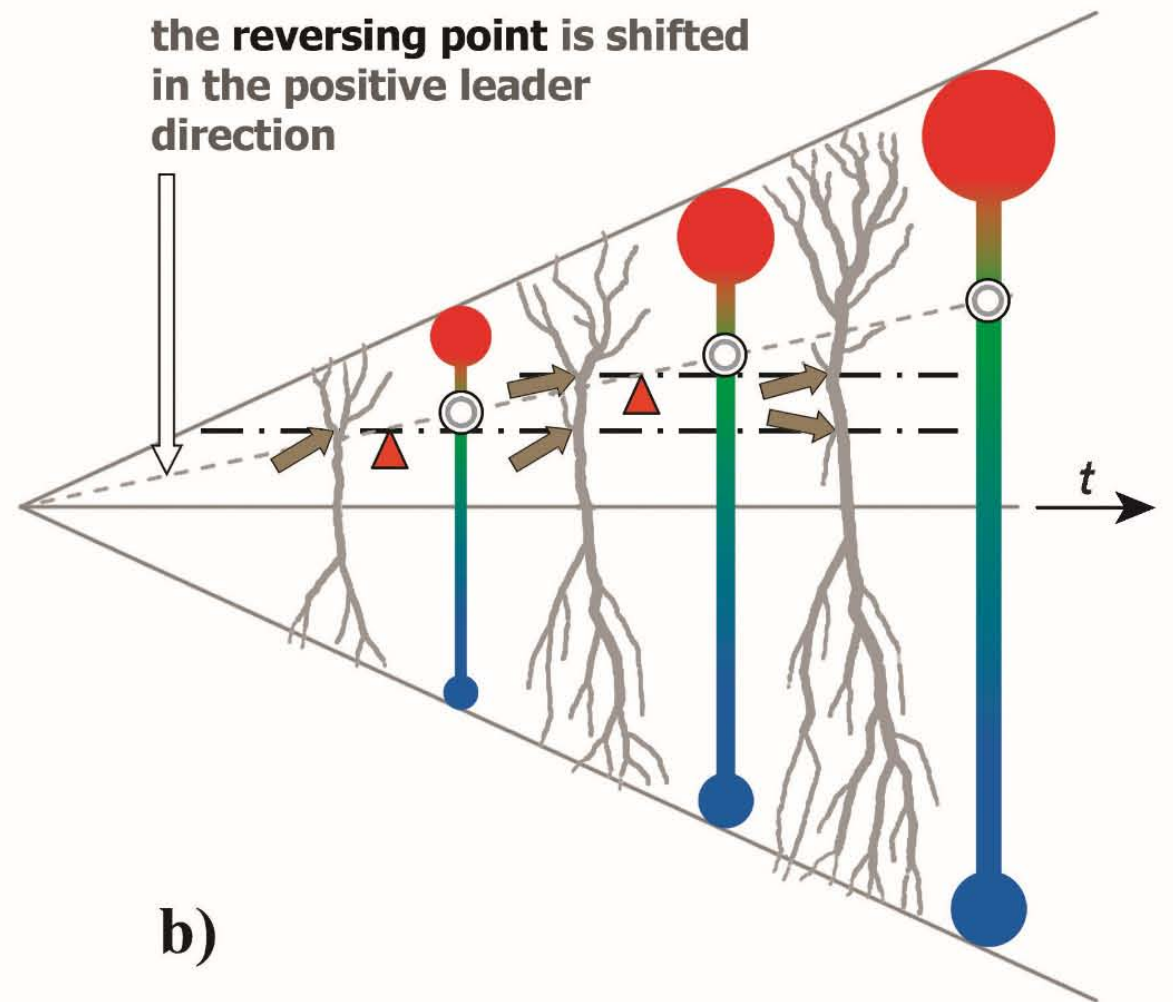
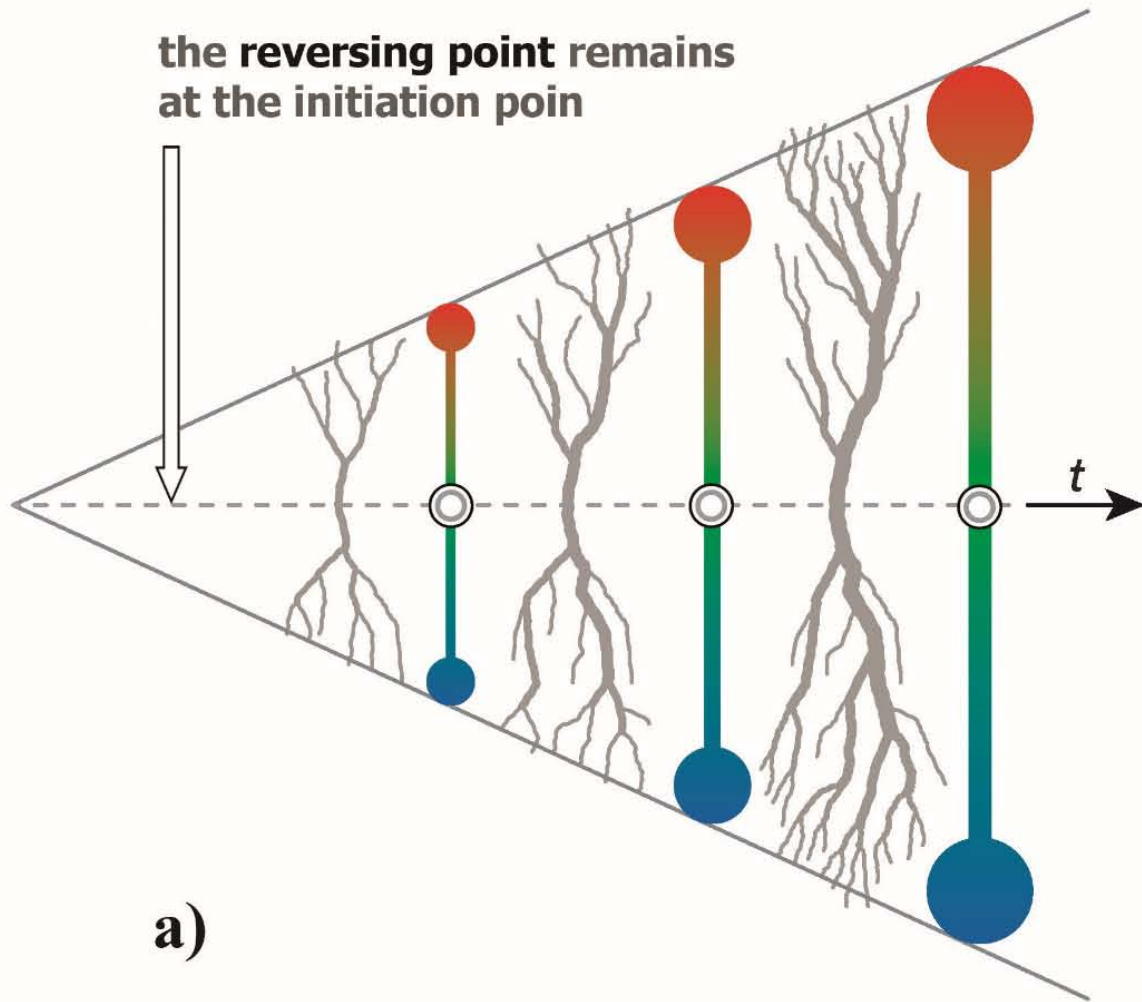


Симметричное и асимметричное биполярное дерево разряда



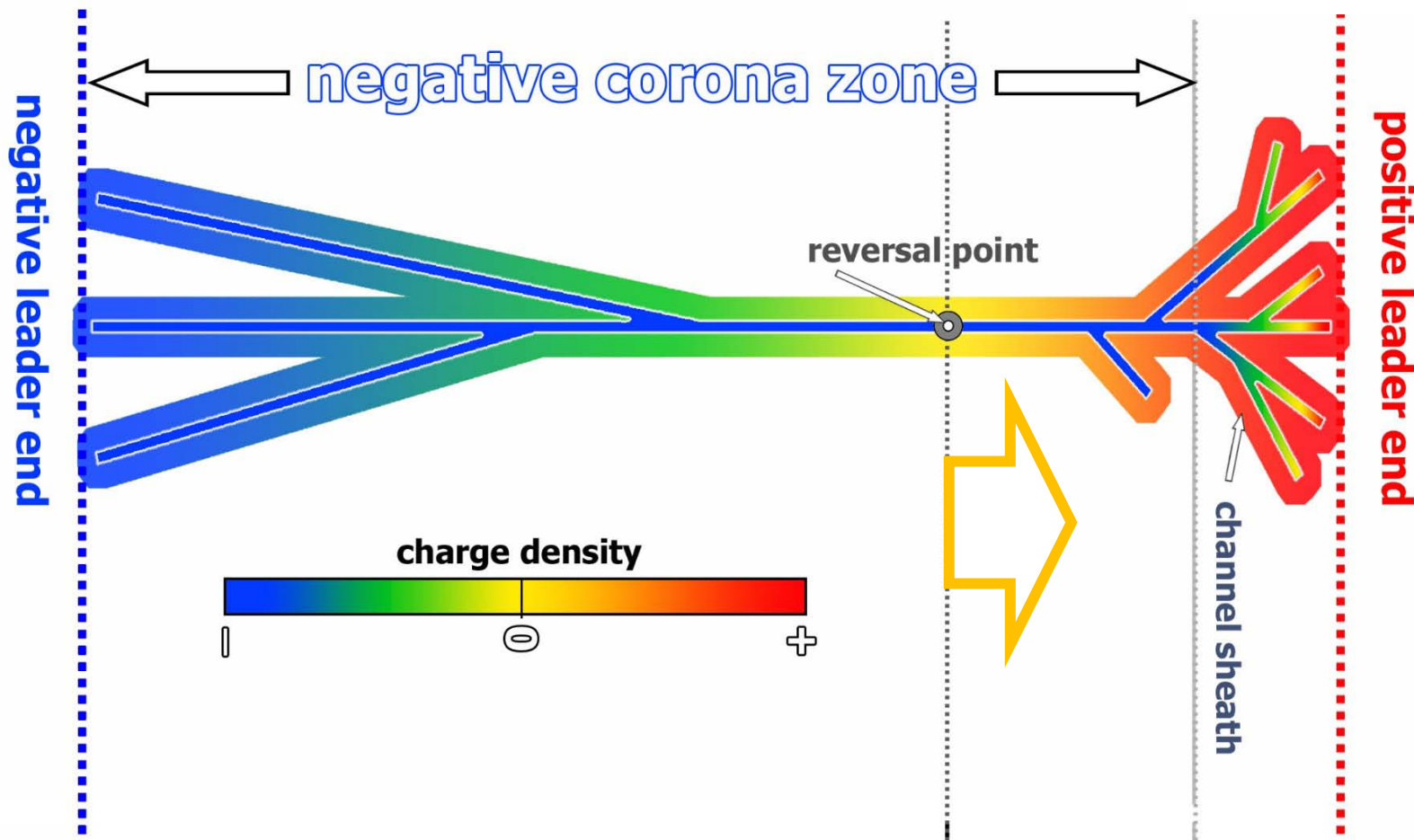
Iudin, D. I. (2021). **Lightning as an asymmetric branching network.** *Atmospheric Research*, 256(D18):105560, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105560>

Конкуренция и синергия ветвей разряда



Смещение реверса и перезарядка чехла

$$I_L^+ = \lambda^+ \cdot V^+; \quad I_L^- = \lambda^- \cdot V^- \quad \Longrightarrow \quad V_0 = \frac{\lambda^+ \cdot V^+ - \lambda^- \cdot V^-}{\lambda^+ + \lambda^-} = \frac{I_L^+ - I_L^-}{\lambda^+ + \lambda^-}$$



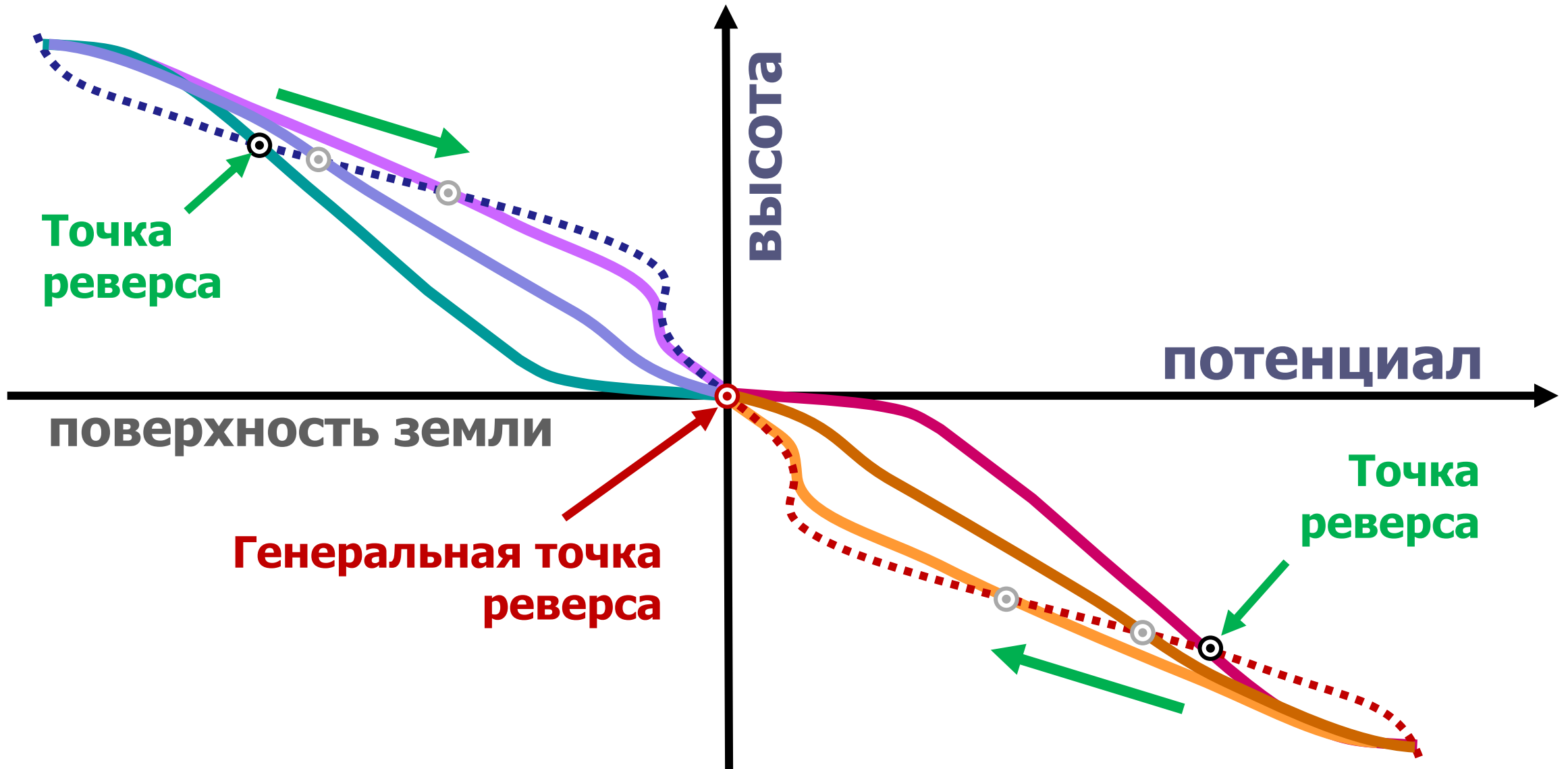
С учётом ветвей

$$I_L^+ = \sum_{i=1}^{N^+} \lambda_i^+ \cdot V_i^+$$

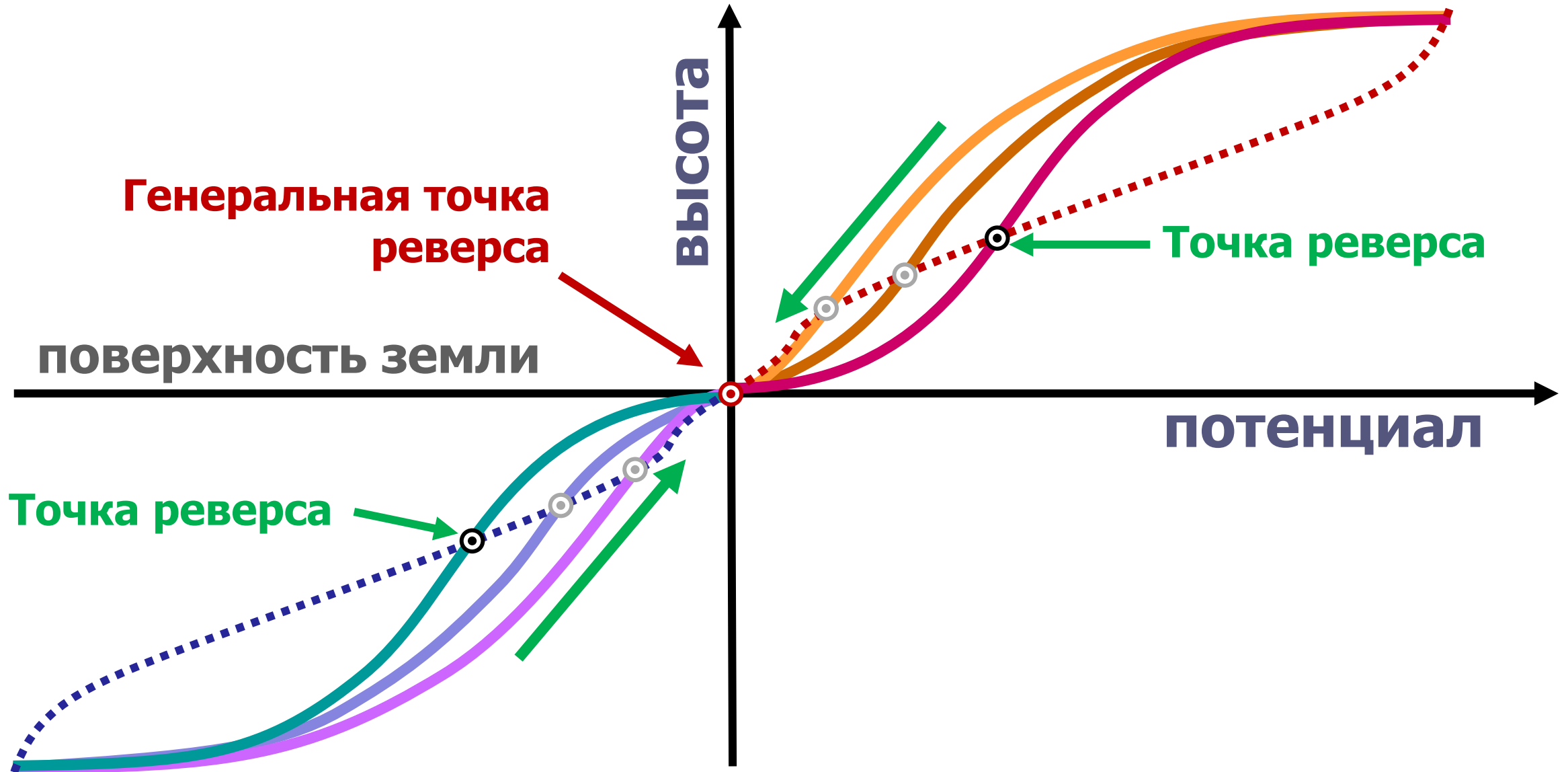
$$I_L^- = \sum_{j=1}^{N^-} \lambda_j^- \cdot V_j^-$$

$$V_0 = \frac{I_L^+ - I_L^-}{\sum_{i=1}^{N^+} \lambda_i^+ + \sum_{j=1}^{N^-} \lambda_j^-}$$

Отрицательный нисходящий лидер



Положительный нисходящий лидер



Доминирование отрицательного лидера

$$E_s^+ \simeq 0.5 E_s^-$$

$$E_s^+(z^+) \simeq 0.5 E_s^-(z^-) \cdot \exp\left(-\frac{z^+ - z^-}{H}\right)$$

$$H \simeq 8400 \text{ m}$$

$$\delta E^-(z^-) > \delta E^+(z^+) \cdot \frac{E_s^-(z^-)}{E_s^+(z^+)}$$

1. Усиление поле перед нисходящим отрицательным лидером
2. Значительная высота распространения отрицательного лидера

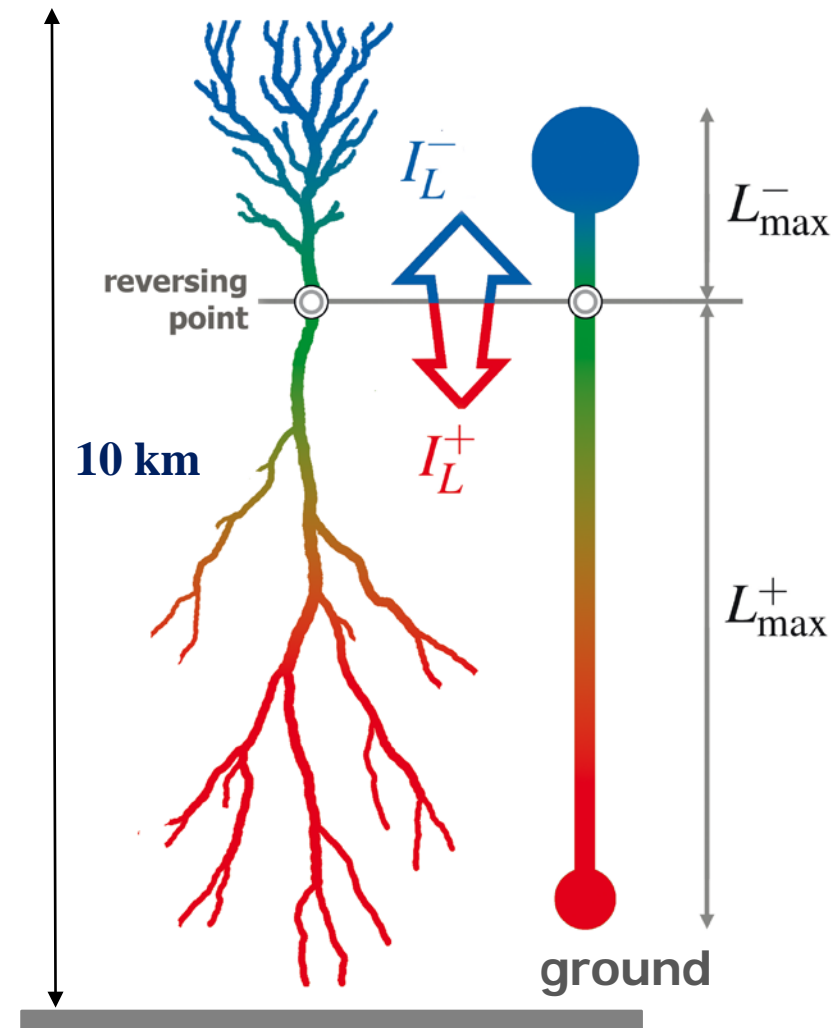
Транзиентная динамика нисходящего отрицательного лидера

Stolzenburg, M., Marshall, T. C., Karunarathne, S., Karunarathna, N., & Orville, R. E. (2015). *Transient luminosity along negative stepped leaders in lightning*. J. Geophys. Res. Atmos., 120, doi: [10.1002/2014JD022933](https://doi.org/10.1002/2014JD022933)

Ding, Z., Rakov, V. A., Zhu, Y., & Tran, M. D. (2020). *On a possible mechanism of reactivation of decayed branches of negative stepped leaders*. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 125 (23), e2020JD033305. doi: [10.1029/2020JD033305](https://doi.org/10.1029/2020JD033305)

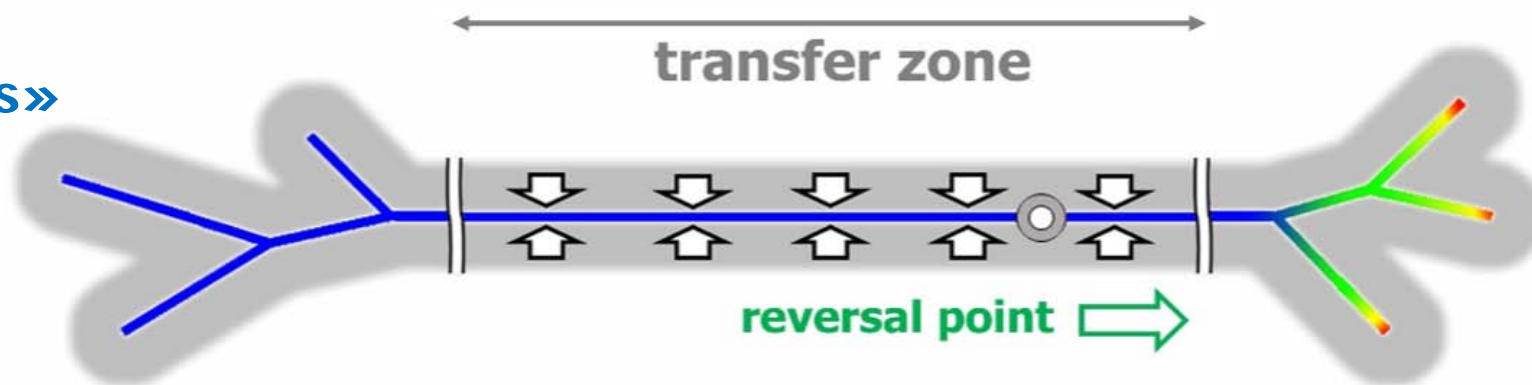
Множественные удары положительной МОЛНИИ

Zhu, Y., Bitzer, P., Rakov, V., Stock, M., Lapierre, J., DiGangi, E., et al. (2021). **Multiple strokes along the same channel to ground in positive lightning produced by a supercell.** *Geophysical Research Letters*, 48, e2021GL096714.
<https://doi.org/10.1029/2021GL096714>
4



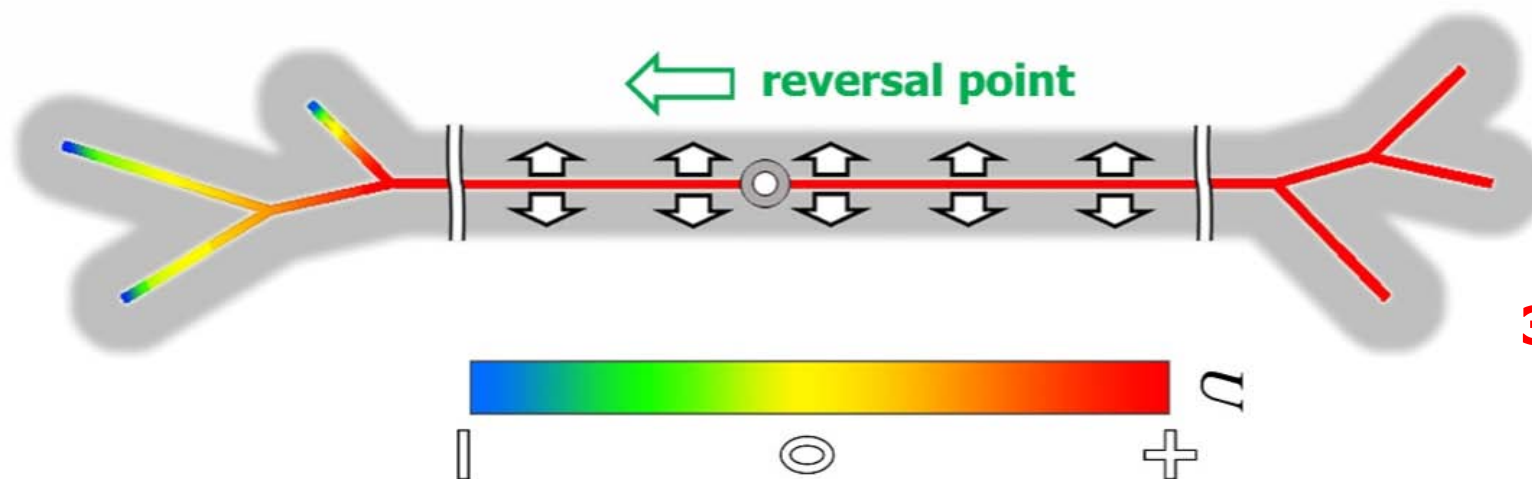
Волны переключения между модами

Эпоха «Needles»
(МОДА U^-)



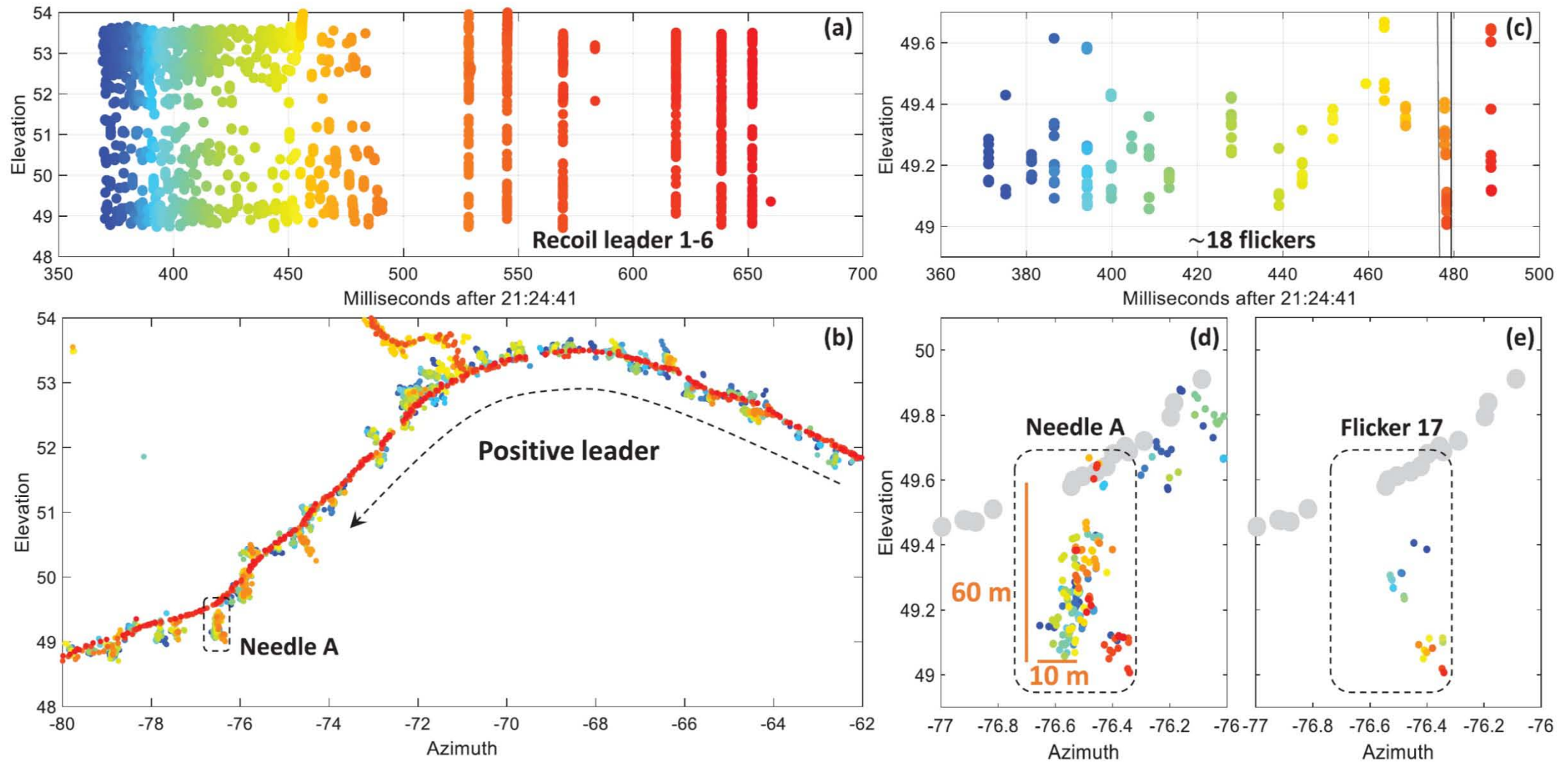
Доминирует
положительный
лидер

Доминирует
отрицательный
лидер



Эпоха «Recoils»
(МОДА U^+)

Молния: асимметрия полярности

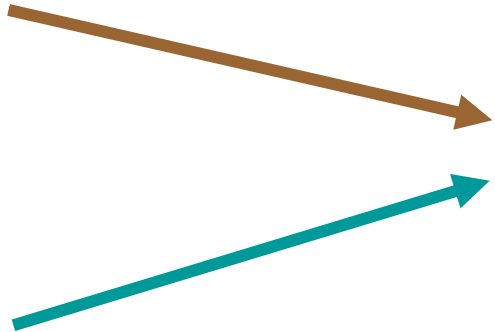


Pu, Y., & Cummer, S. A. (2019). **Needles and lightning leader dynamics imaged with 100–200 MHz broadband VHF interferometry.** *Geophysical Research Letters*, 46. <https://doi.org/10.1029/2019GL085635>

Нелинейное параболическое уравнение

Закон Ома

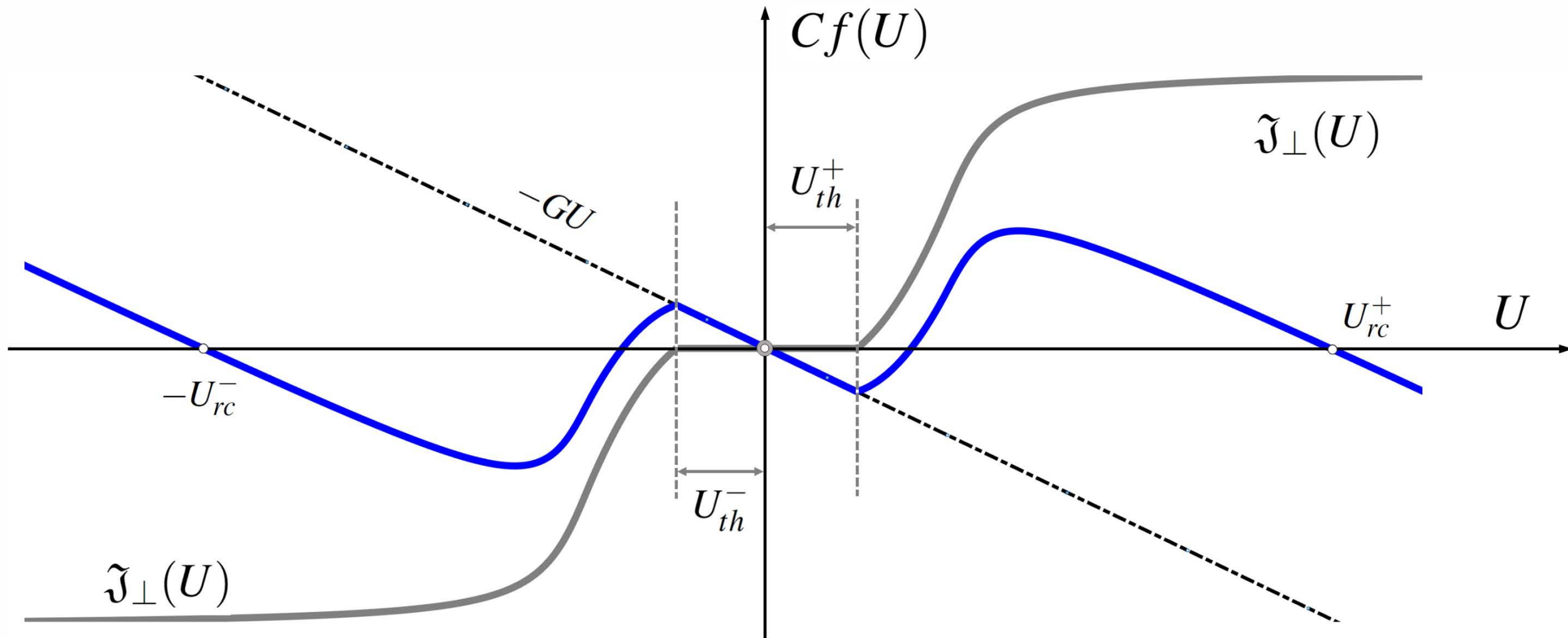
$$I = -\frac{1}{R} \cdot \frac{\partial U(z)}{\partial z} = \frac{1}{R} \cdot E,$$


$$\frac{\partial U}{\partial t} = f(U) + D \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} \quad D = \frac{1}{RC}$$

$$C \frac{\partial U}{\partial t} = C f(U) - \frac{\partial I}{\partial z}, \quad f(U) = \frac{1}{C} (-G(U - \Delta U) + \mathfrak{J}_{\perp}(U))$$

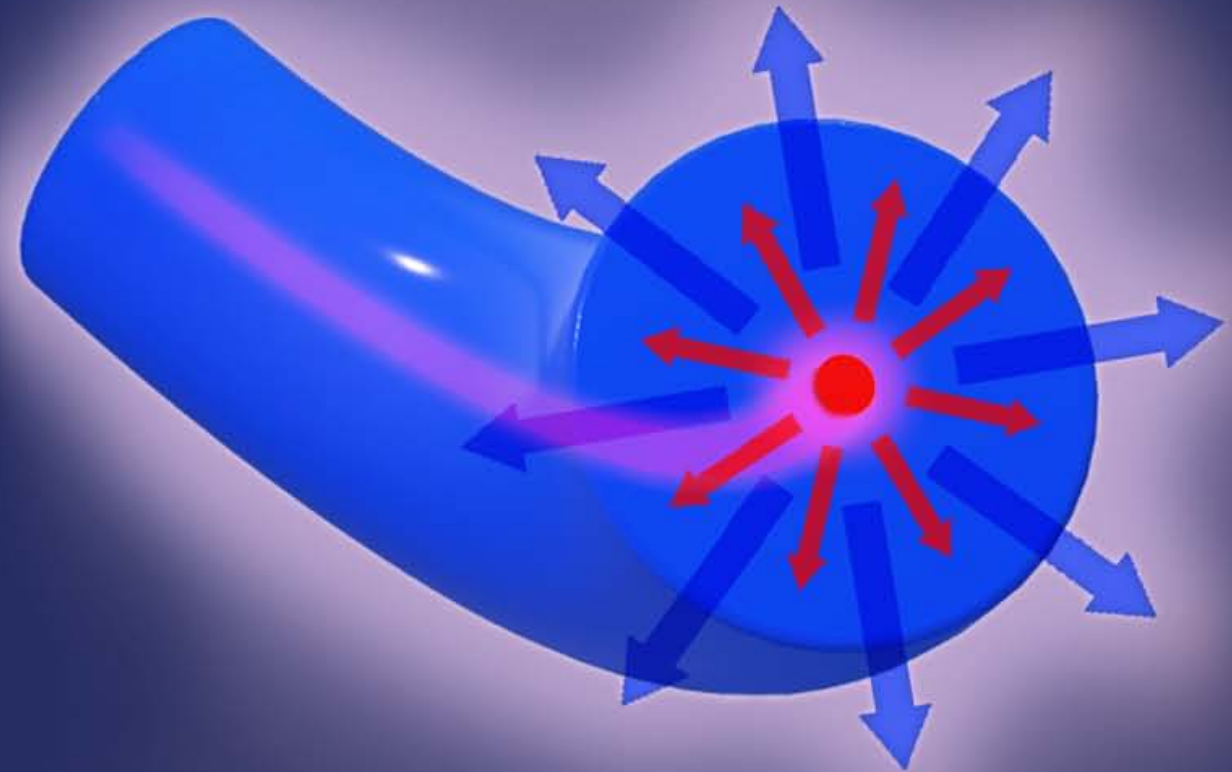
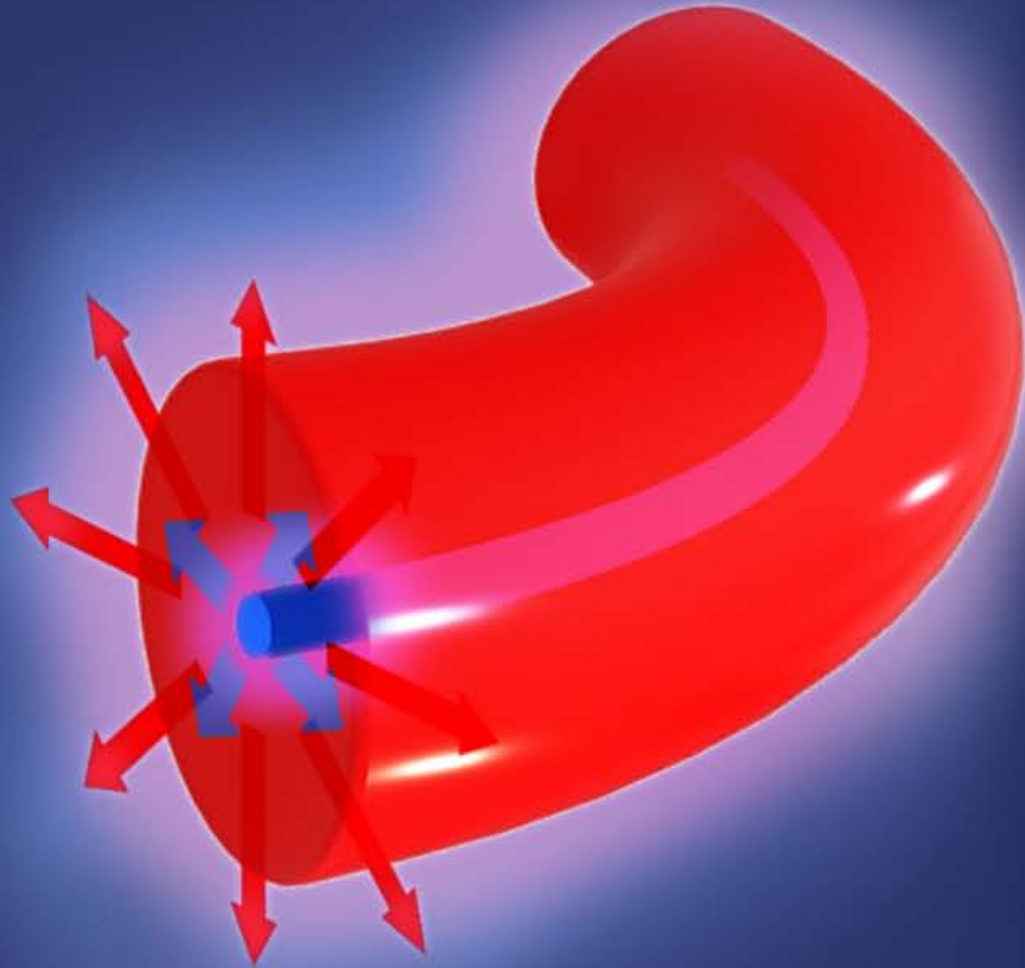
Закон сохранения заряда

Нелинейность изменения погонного заряда

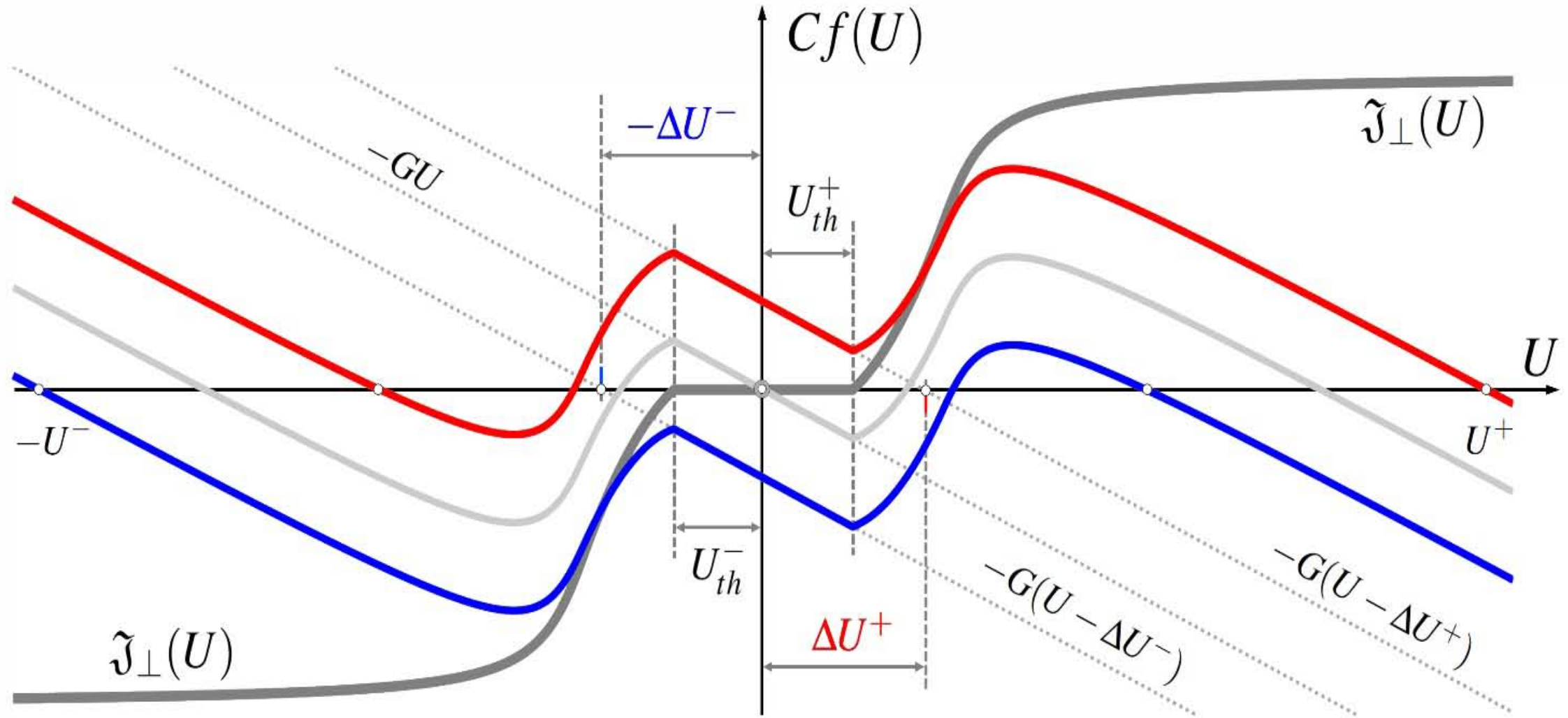


Скорость изменения заряда шнура как функции радиального поля

Взаимодействие плазменного шнура и чехла канала

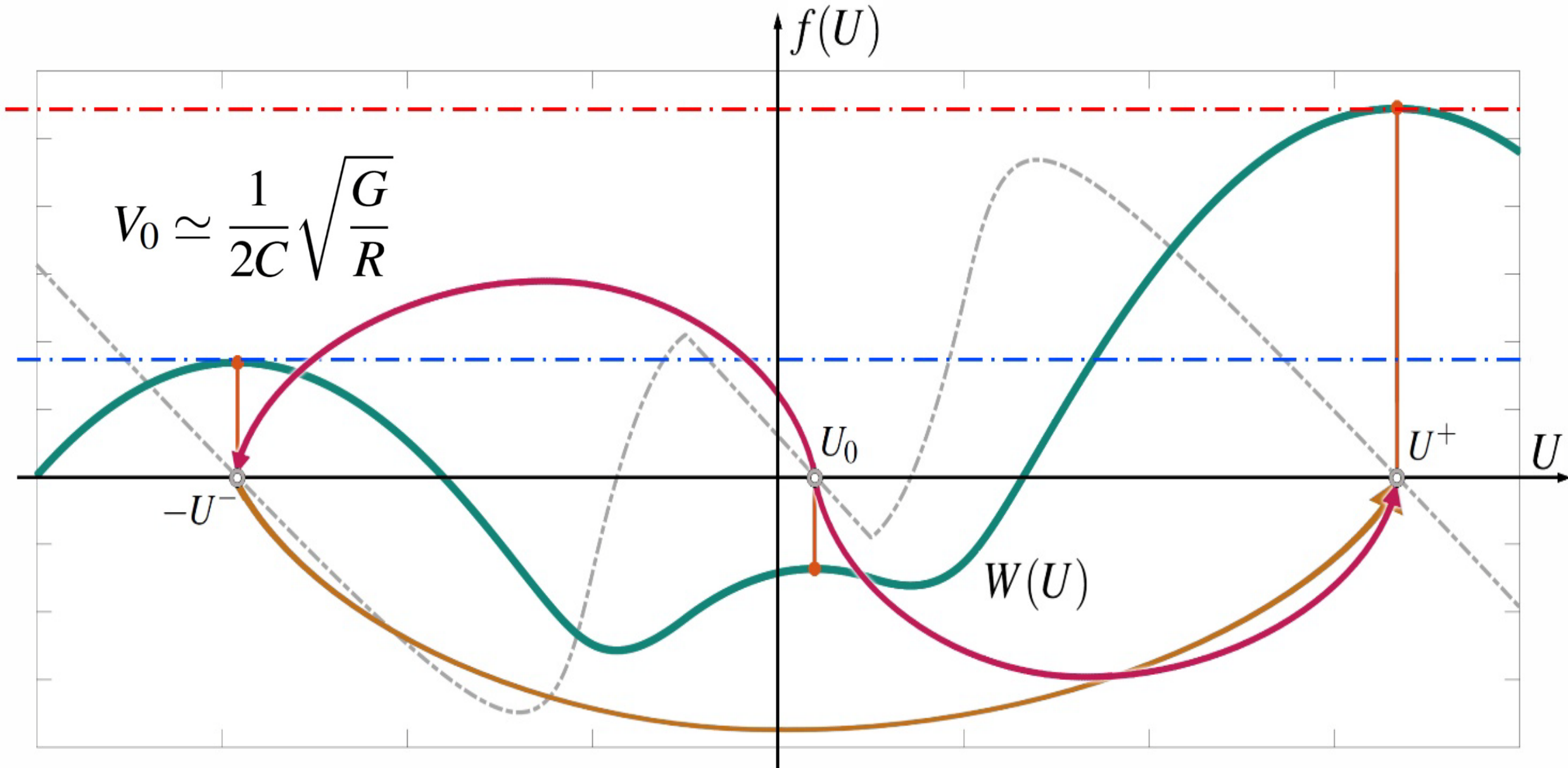


Нелинейность изменения погонного заряда

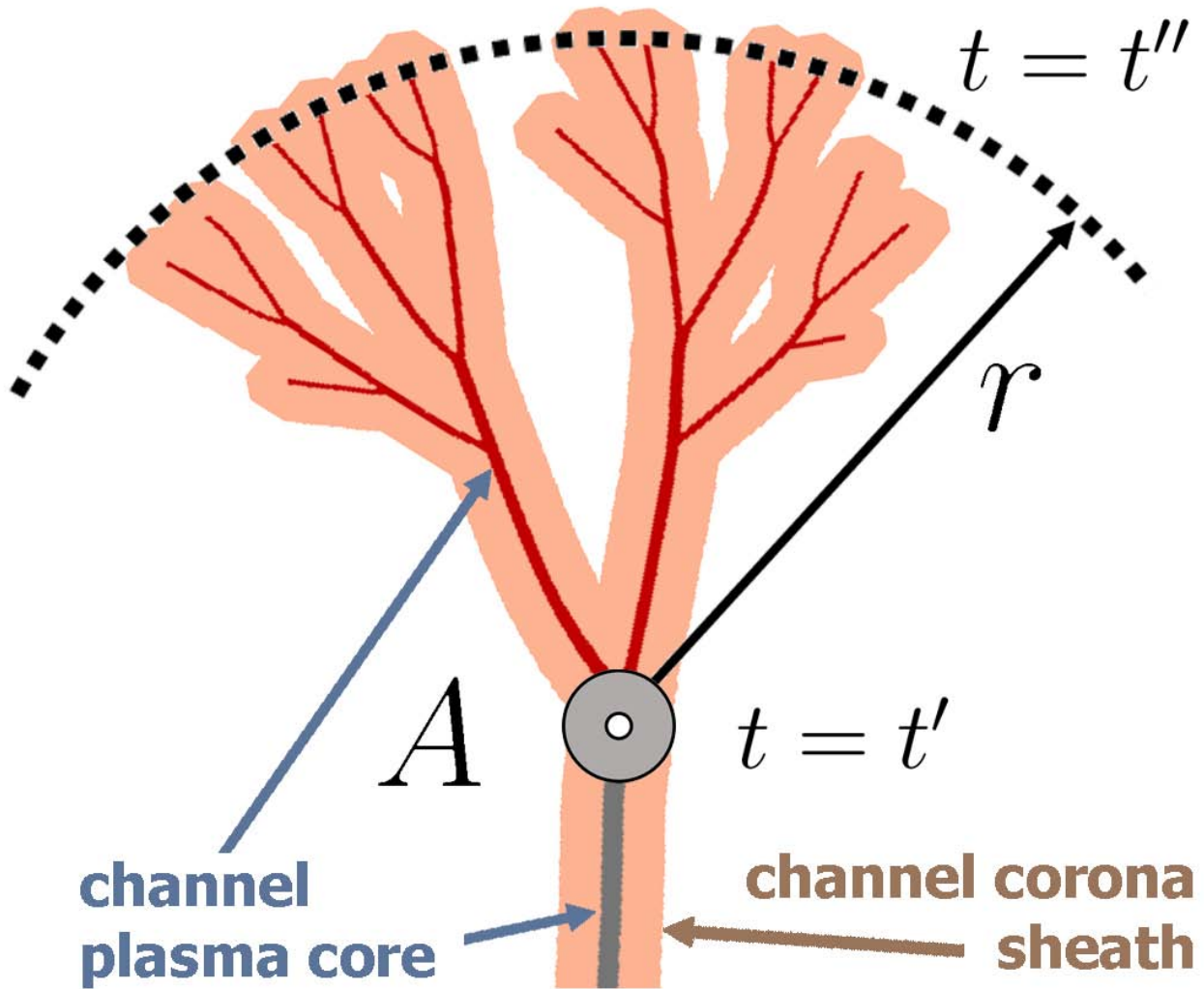


Скорость изменения заряда шнура как функции радиального поля

Волны переключения



Деполяризация шнура



$$\delta Q(r) \sim N(r) \sim r^{d_f-1}$$

Изменение заряда чехла

Изменение потенциала

$$\phi(r) \sim \int \frac{\delta Q(r') dr'}{r'} \sim$$
$$\sim \int_0^r r'^{d_f-2} dr' \sim r^{d_f-1}$$

ВЫВОДЫ

ВЫВОДЫ

Симметрия – порядок, скованность, статика



Собор Святого Стефана в Вене

Дмитрий Рогачёв | dmrog.livejournal.com

Асимметрия – произвол, случайность, движение



«Большая волна в Канагаве» Кацусики Хокусай

Асимметрия во времени

**Бенвенуто
Челлини**
«Персей с
головой
Медузы»
Флоренция



**Лучано
Гарбати**
«Медуза с
головой Персея»
Нью-Йорк

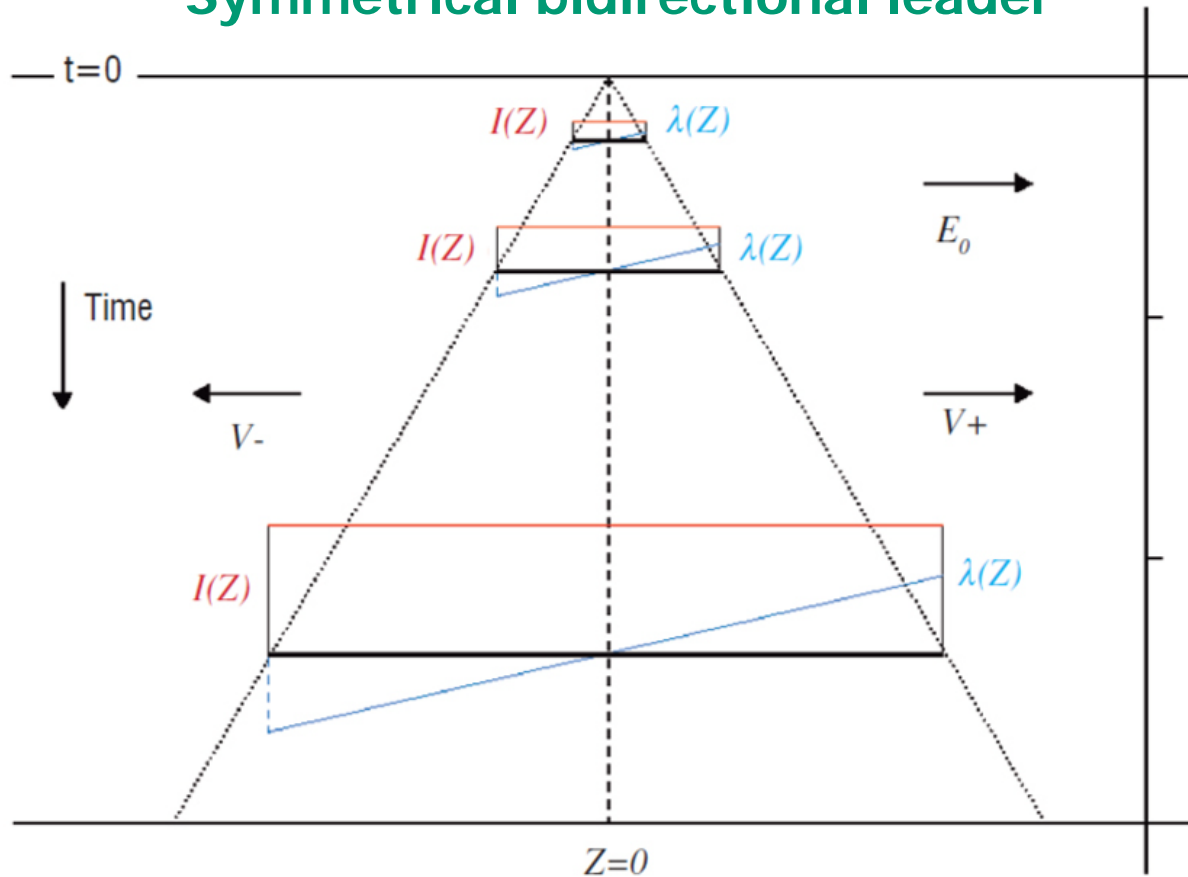


Спасибо!

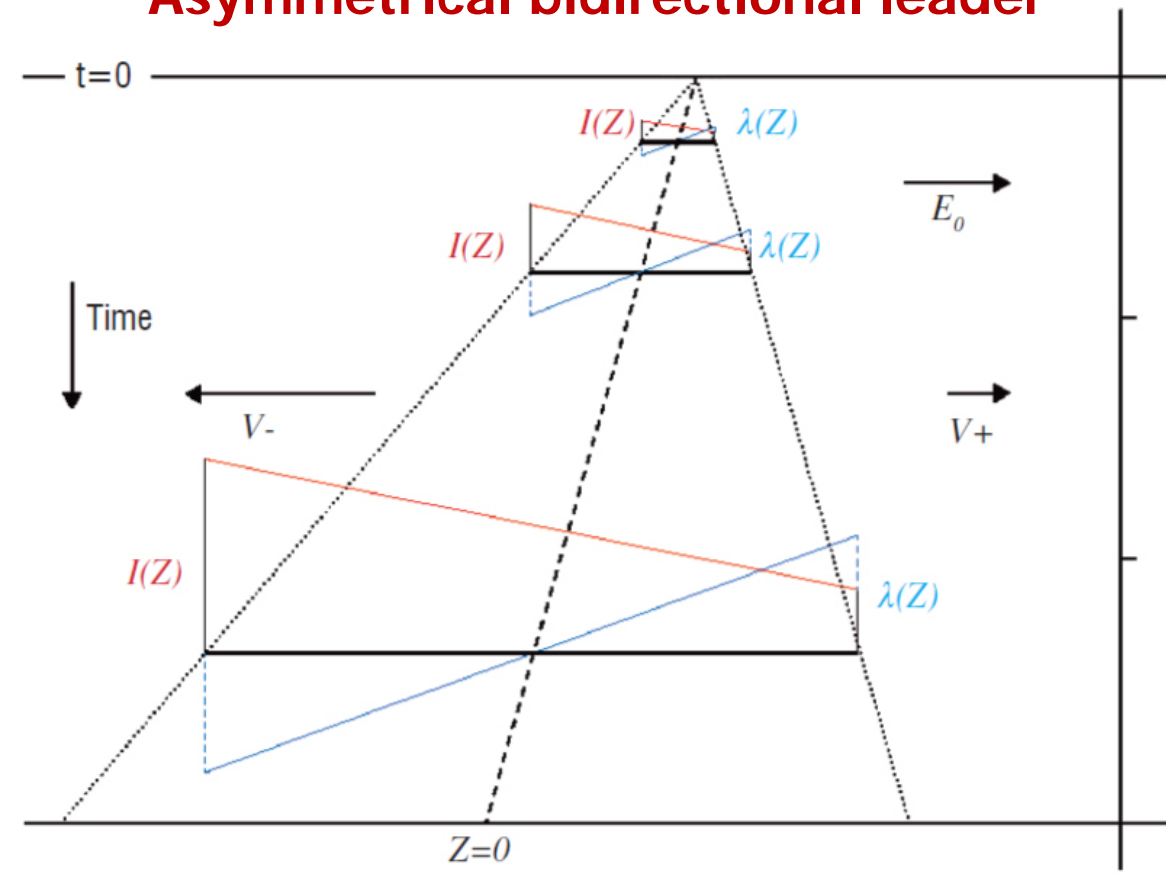


Асимметрия полярности в 1D

Symmetrical bidirectional leader



Asymmetrical bidirectional leader



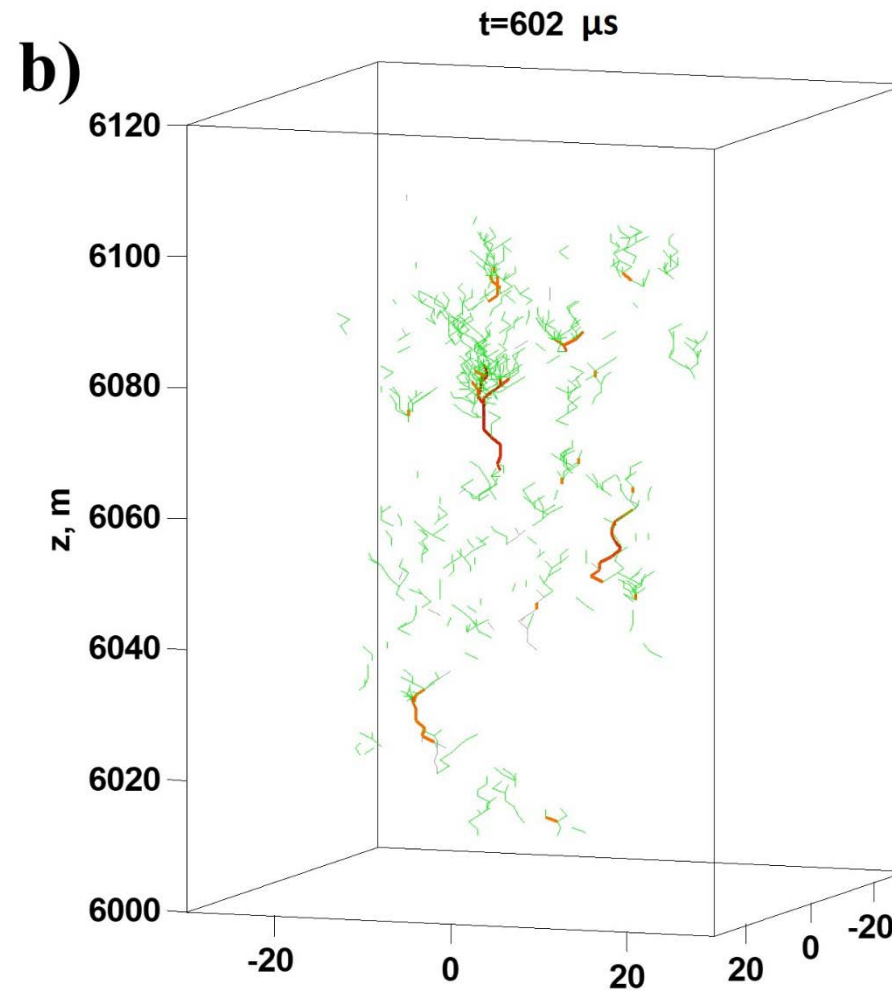
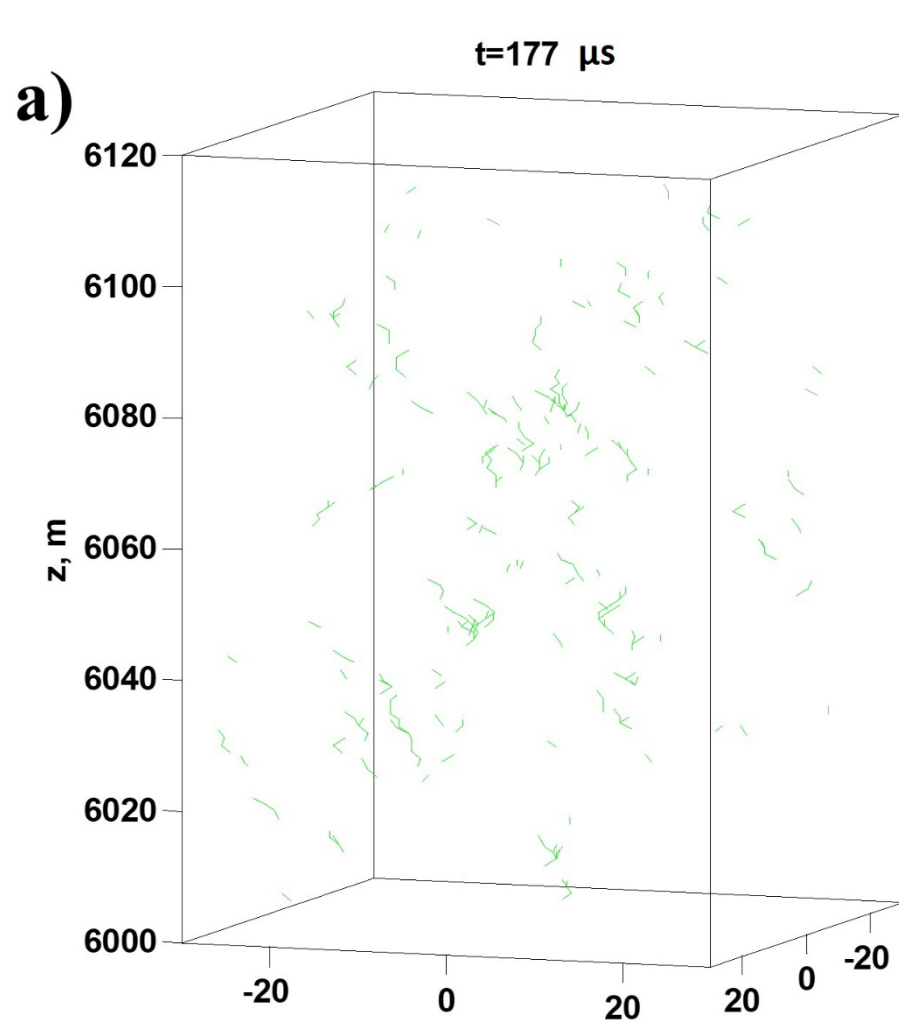
E. Williams, S. Heckman, 2012 **Polarity Asymmetry in Lightning Leaders: the Evolution of Ideas on Lightning Behavior from Strikes to Aircraft** *AerospaceLab*, 2012, p. 1-8. <hal-01184333>

6

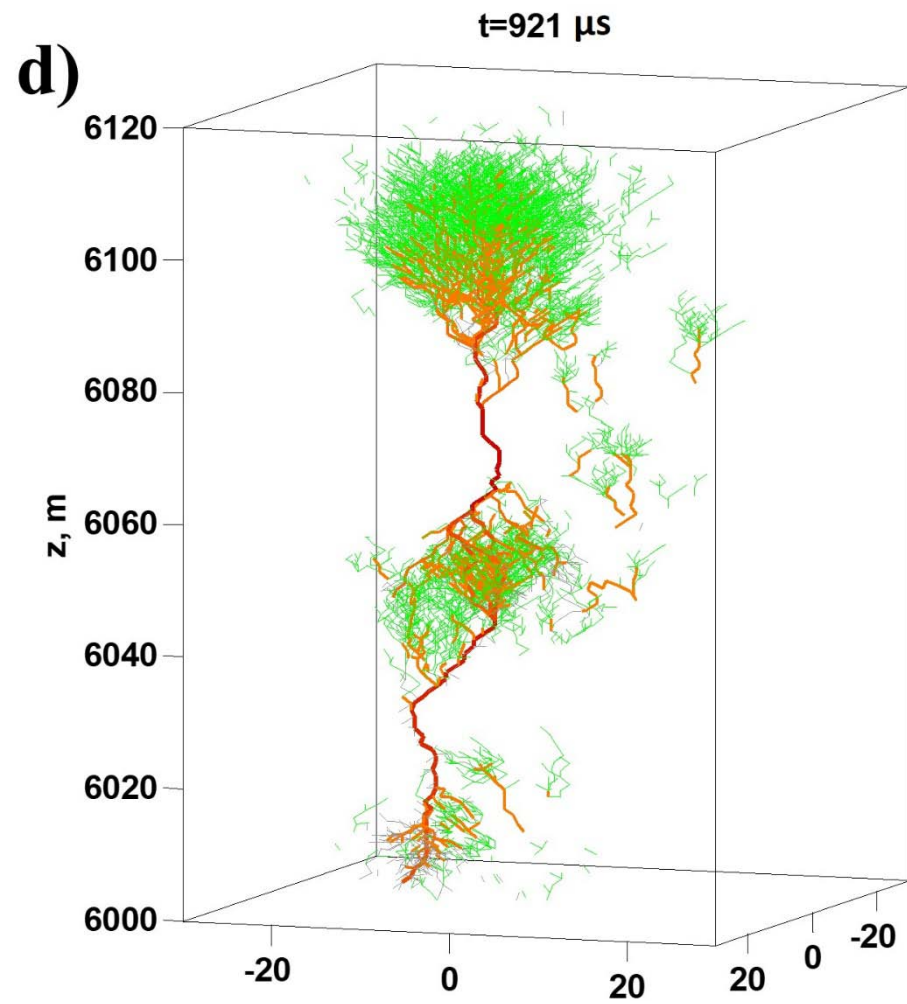
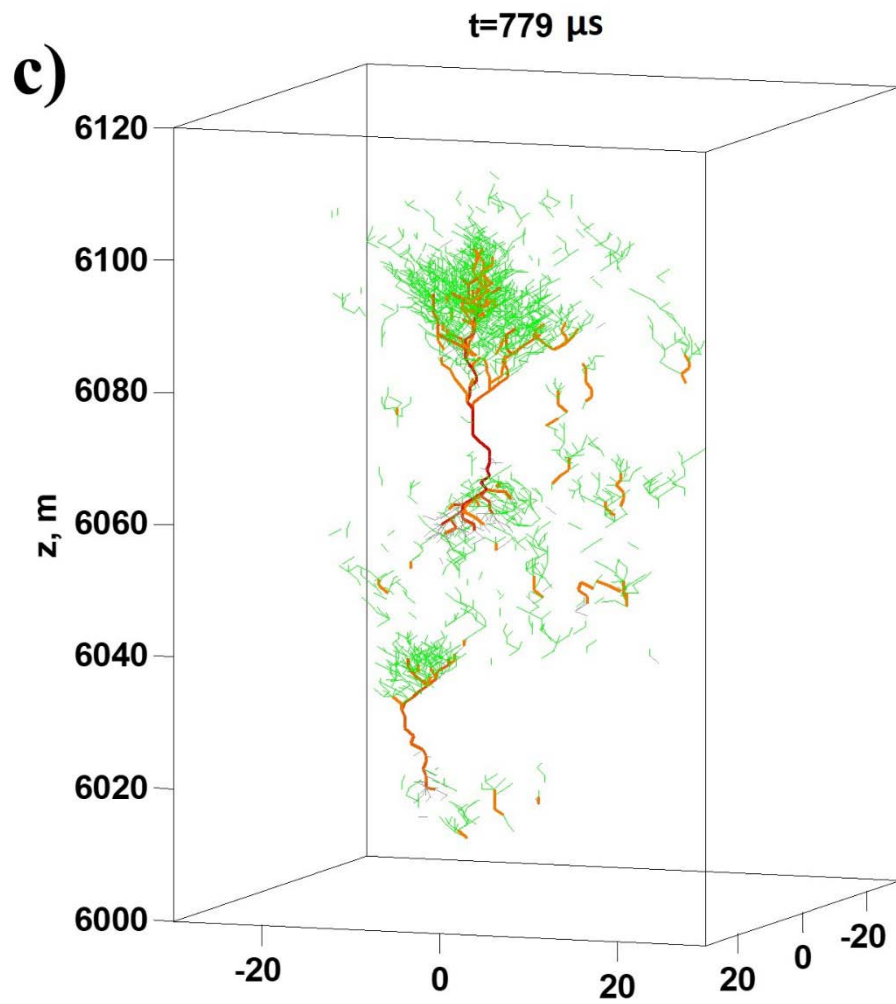
Загадки фізики

МОЛНИИ

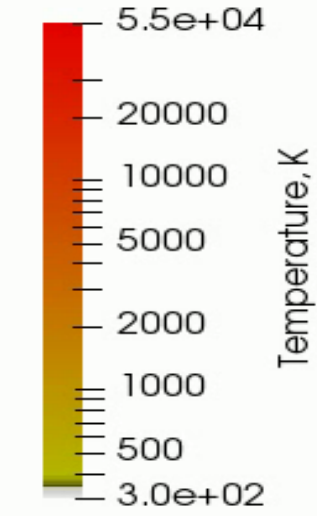
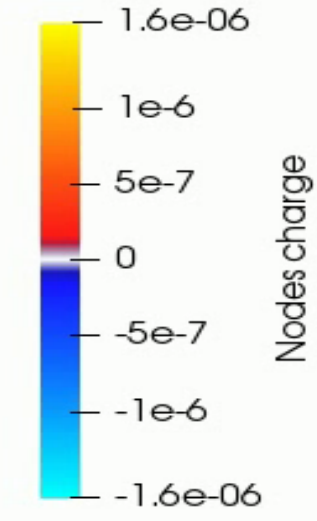
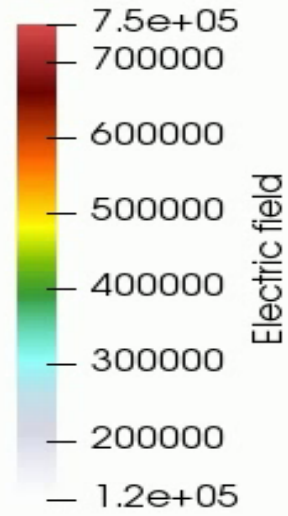
Взрывной рост проводящего канала



Взрывной рост проводящего канала

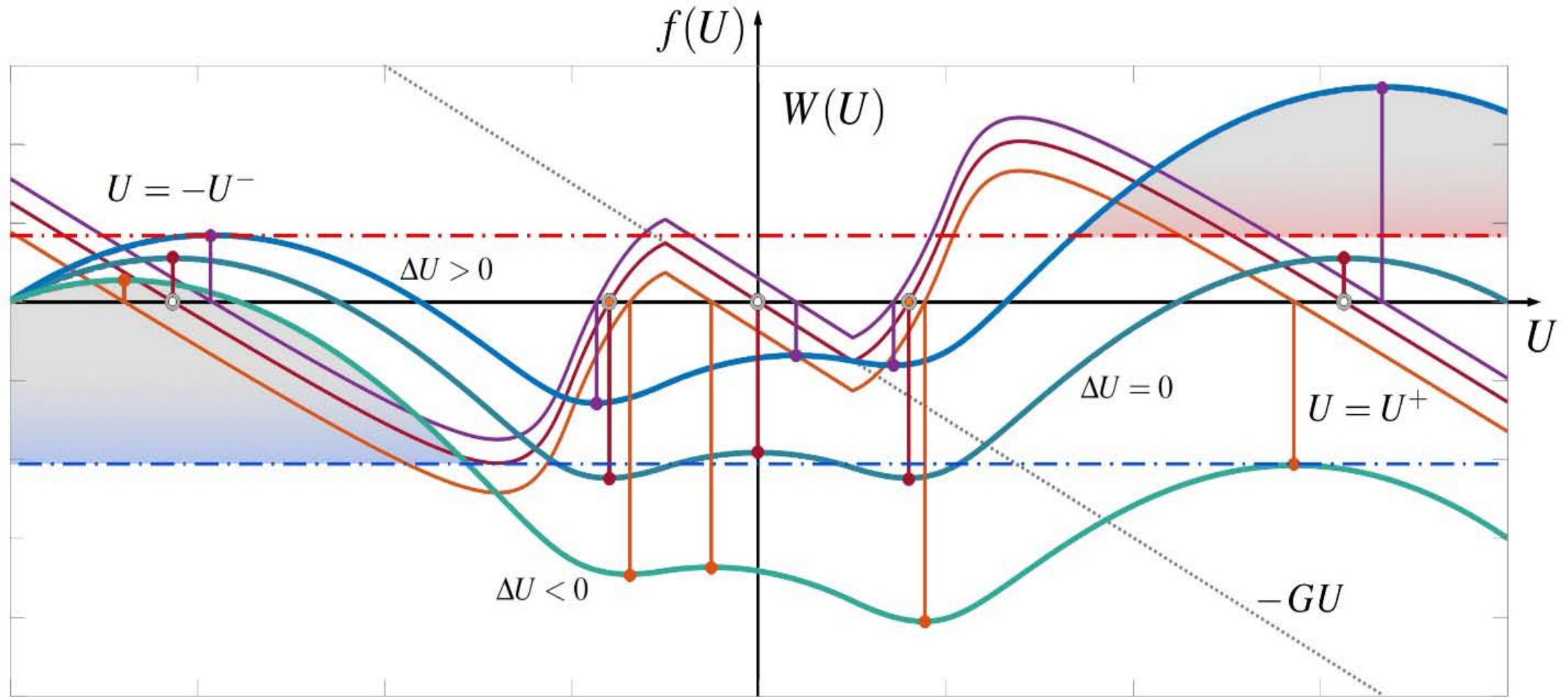


Lightning seed formation



t = 0 us

Волны переключения



$$U \rightarrow U^+, \quad \eta \rightarrow -\infty; \quad U \rightarrow -U^-, \quad \eta \rightarrow +\infty$$

Быстрые и медленные переменные

Закон сохранения заряда

Чехол канала

медленные изменения

$$\frac{\partial i}{\partial z} = -C_{sh} \frac{\partial U_{sh}}{\partial t} - \underbrace{gU_{sh}}_{\text{ток утечки}}$$

$$C_{sh} \gg C$$

Плазменный шнур канала

быстрые изменения

$$\frac{\partial I}{\partial z} = -C \frac{\partial U}{\partial t} + \underbrace{I_{\perp}(U)}_{\text{ток утечки}}$$

$$I_{\perp}(U) = \mathfrak{J}_{\perp}(U) - G(U - \Delta U) \quad G \gg g$$

ПЛАН ЛЕКЦИИ

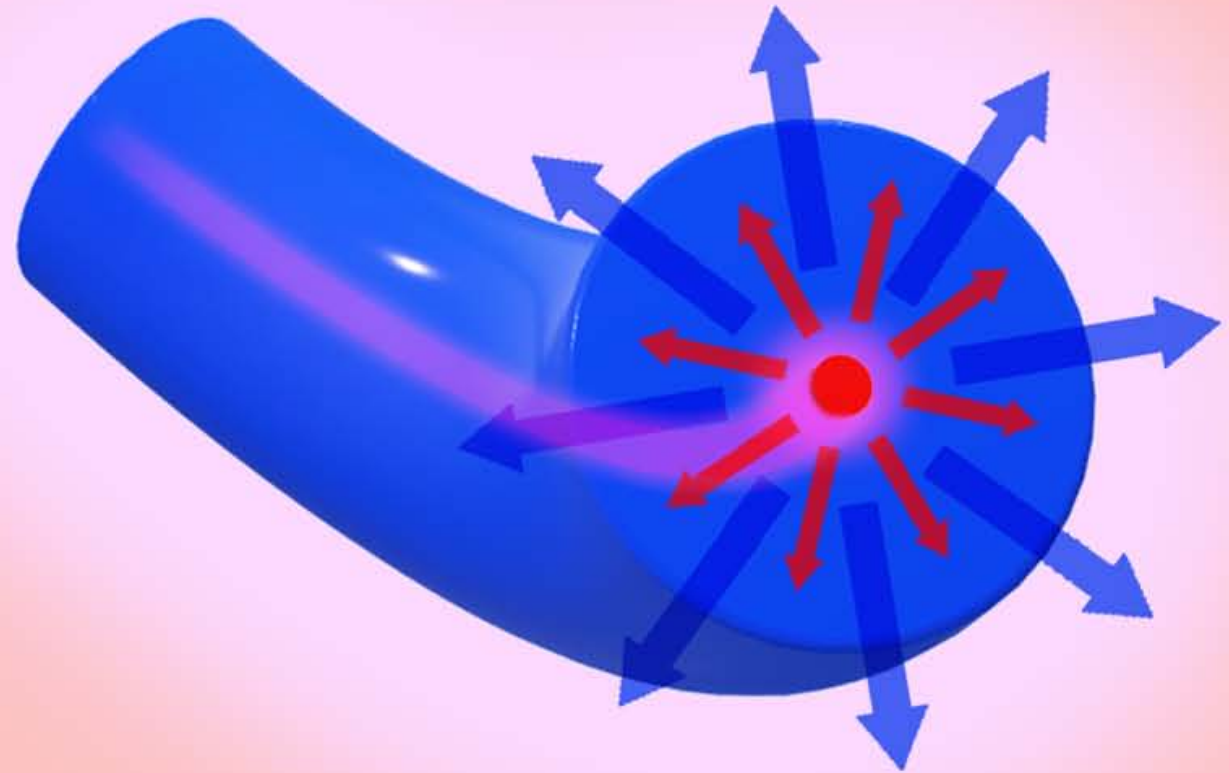
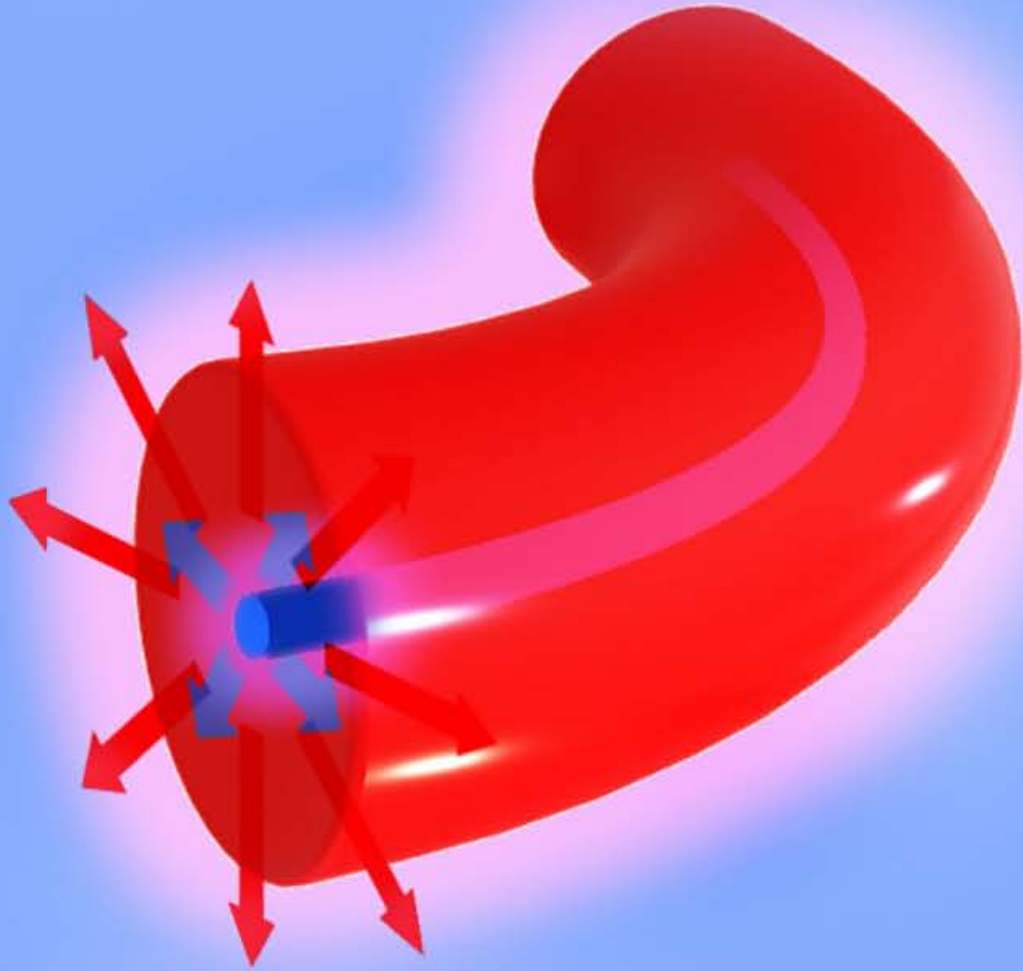
1. Транспортные сети: самоорганизация сбора и/или распределения ресурса

**2. Транспортные сети в геофизике:
самоорганизация в потенциальных полях**

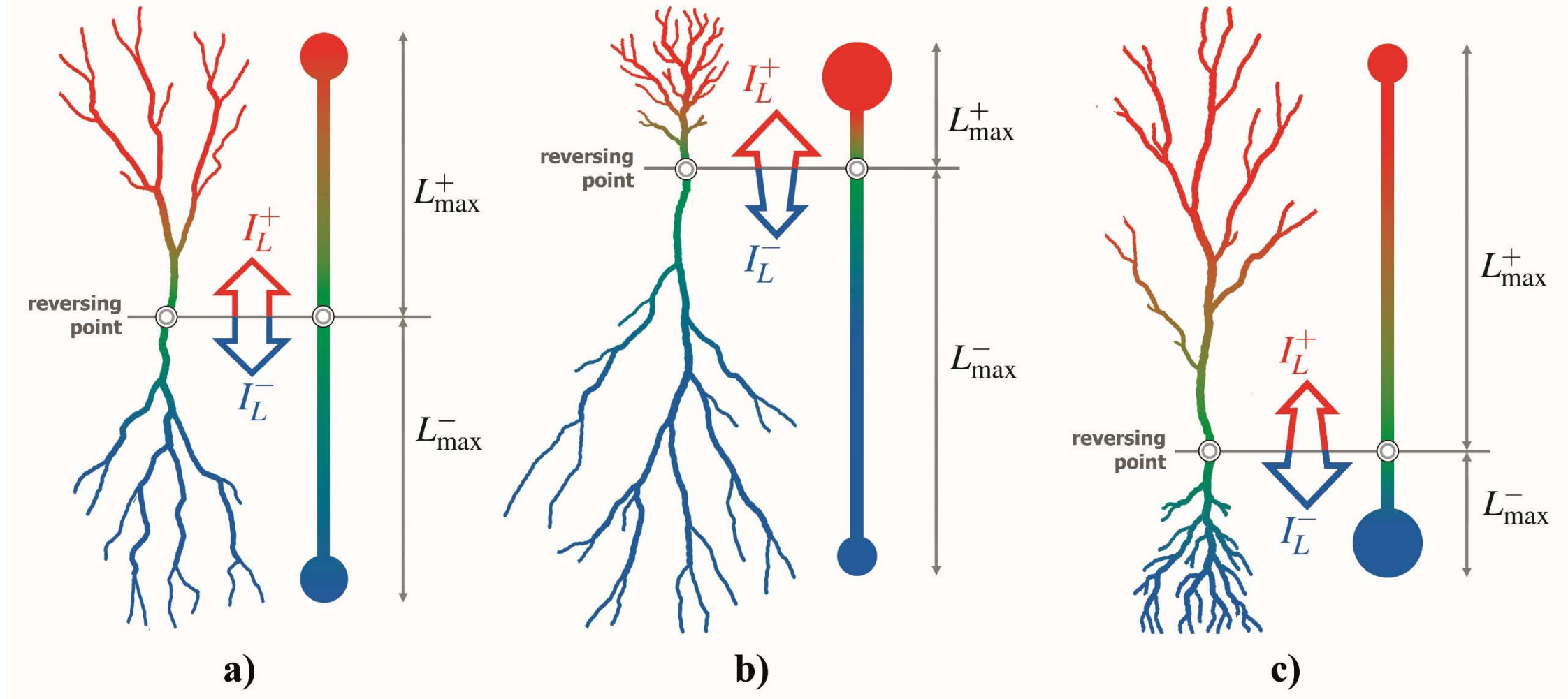
2.1. Речные системы. Гидрология

2.2. Атмосферные разряды. Молния

Взаимодействие плазменного шнура и чехла канала

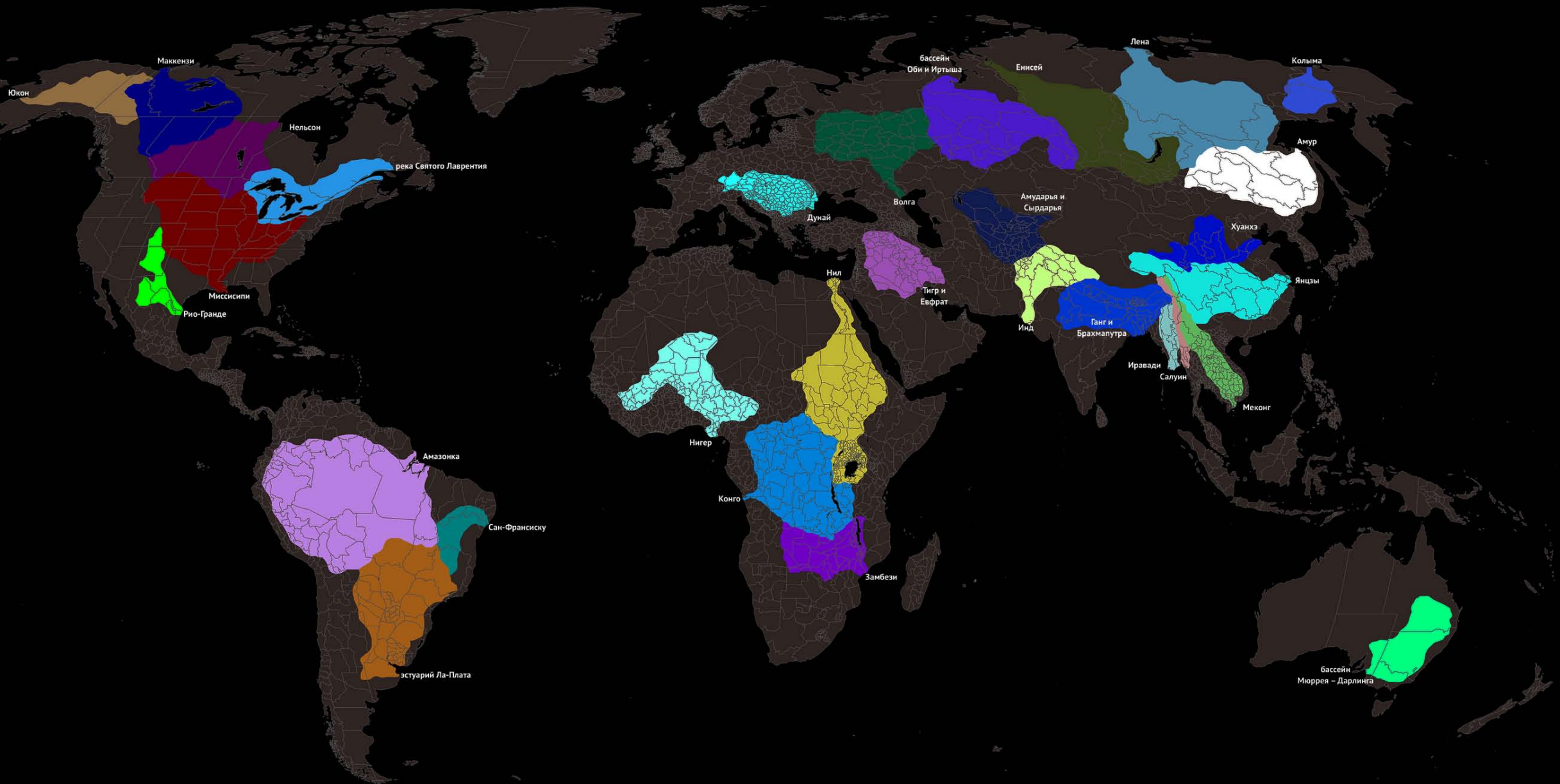


Симметричное и асимметричное биполярное дерево разряда

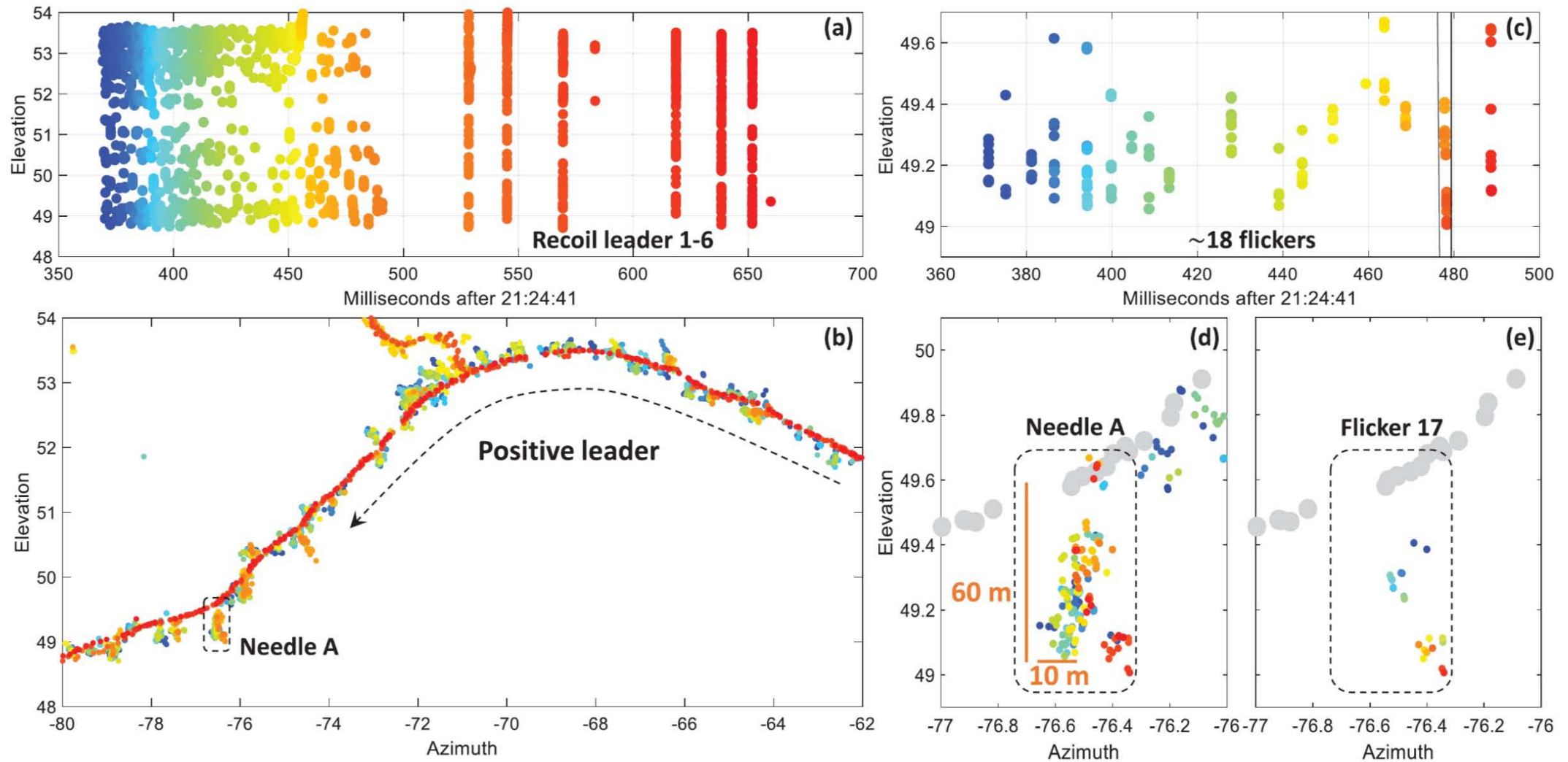


Iudin, D. I. (2021). **Lightning as an asymmetric branching network.** *Atmospheric Research*, 256(D18):105560, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105560>

Водосборные бассейны крупнейших рек мира



Молния: асимметрия полярности

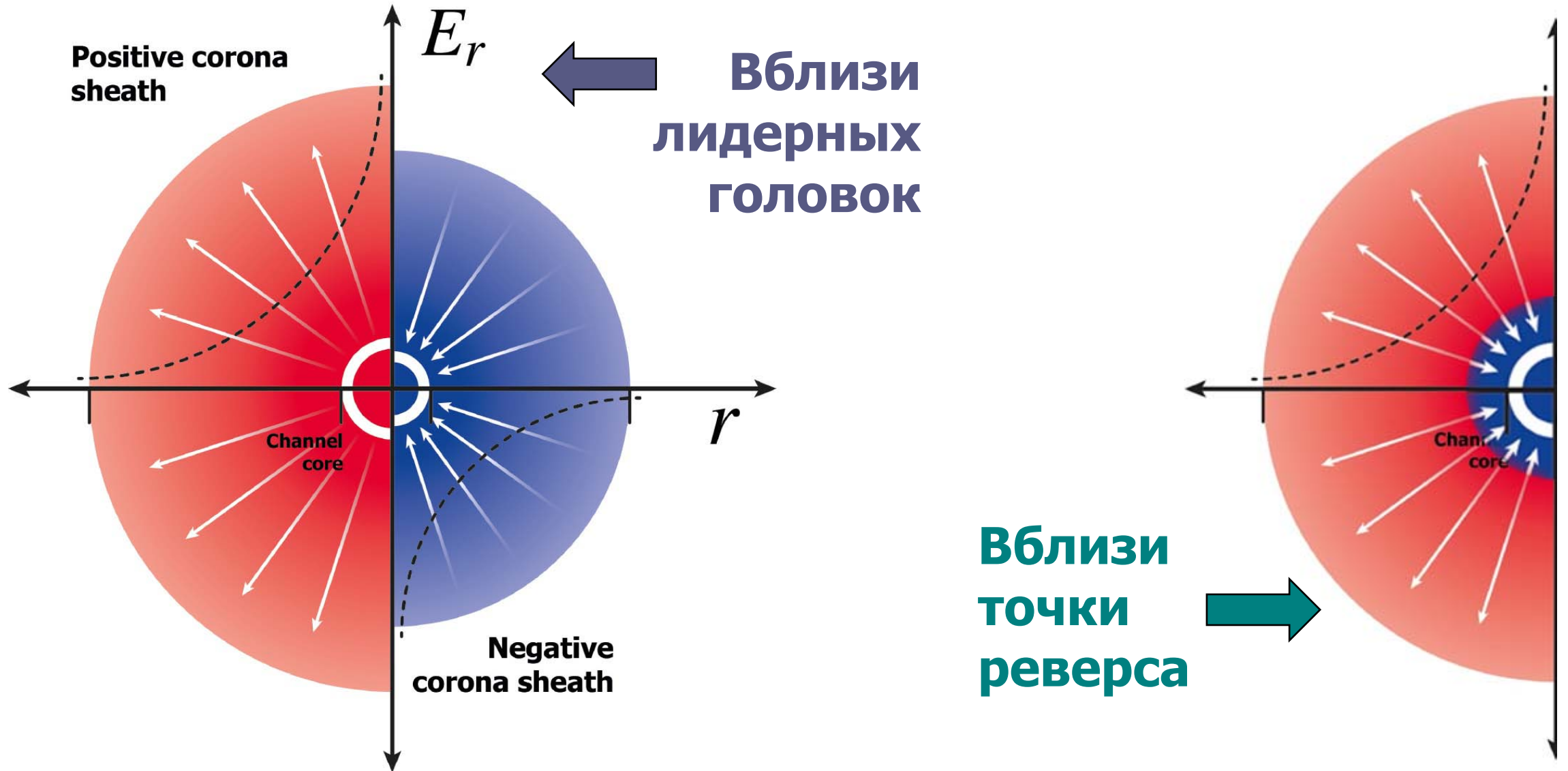


Pu, Y., & Cummer, S. A. (2019). **Needles and lightning leader dynamics imaged with 100–200 MHz broadband VHF interferometry.** *Geophysical Research Letters*, 46. <https://doi.org/10.1029/2019GL085635>

4

Движение точки реверса

Взаимодействие плазменного шнура и чехла канала



5

Механизм

перезарядки чехла

Модель основного канала молнии

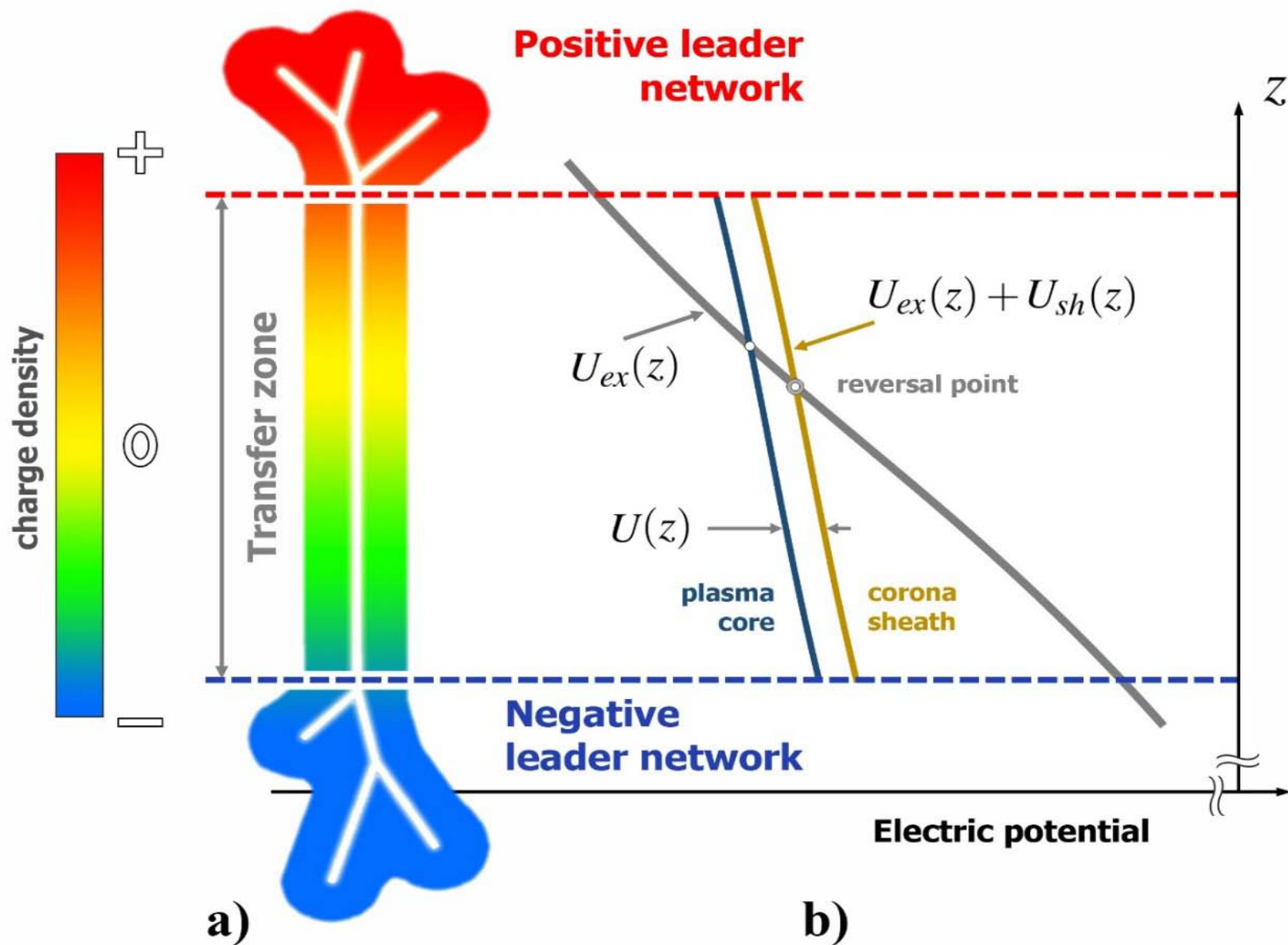


Схема модели:

- a)** полярные лидерные системы и переходная зона между ними,
- b)** распределение потенциала электрического поля вдоль ствола молнии

Телеграфные уравнения

Закон Ома

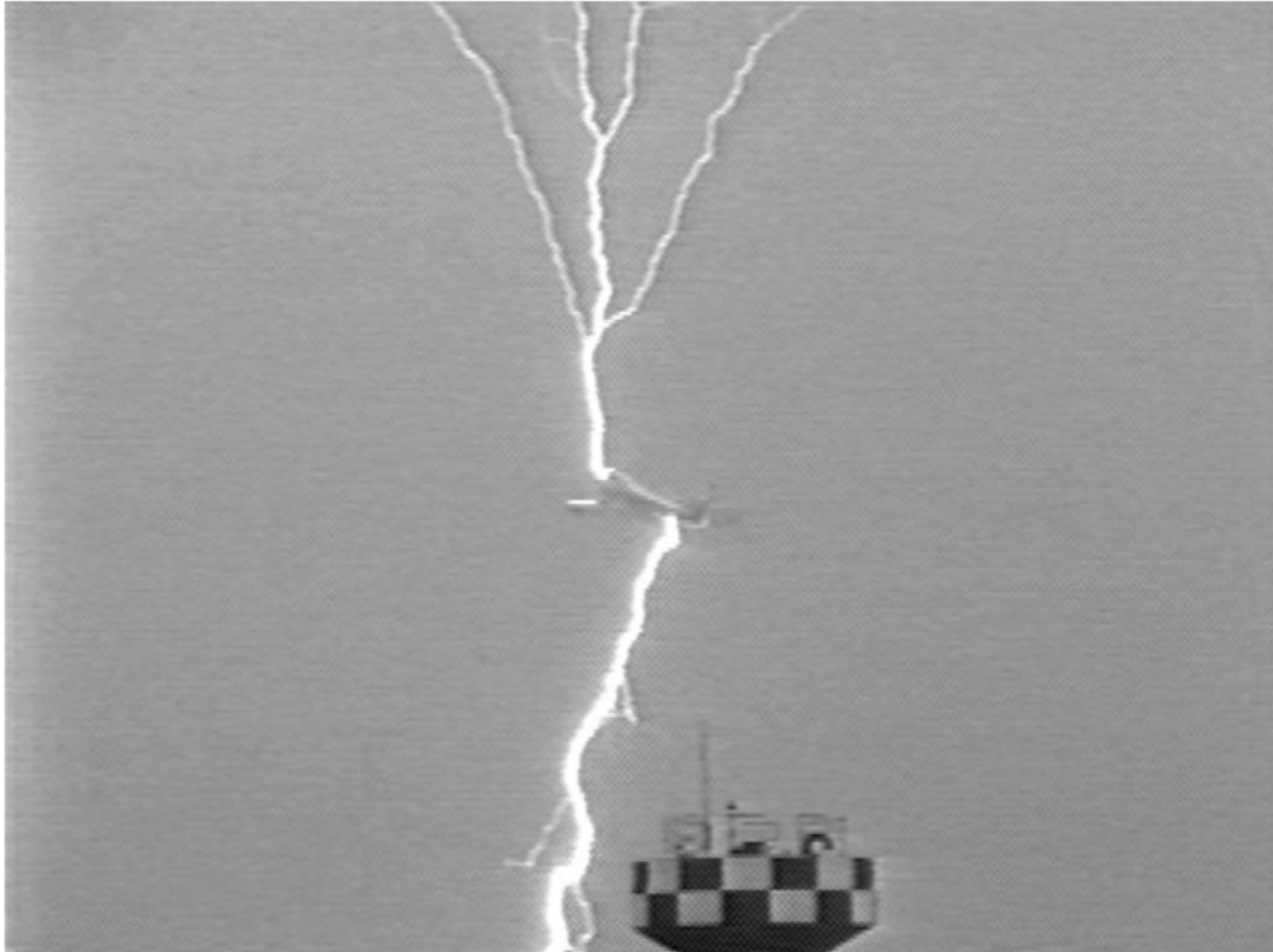
$$I = -\frac{1}{R} \cdot \frac{\partial U(z)}{\partial z} = \frac{1}{R} \cdot E,$$

Закон сохранения заряда

$$C \frac{\partial U}{\partial t} = C f(U) - \frac{\partial I}{\partial z},$$

$$f(U) = \frac{1}{C} \left(-G(U - \Delta U) + \mathfrak{J}_{\perp}(U) \right)$$

Биполярное дерево



**двунаправленное
дерево молнии
инициированной
самолётом**

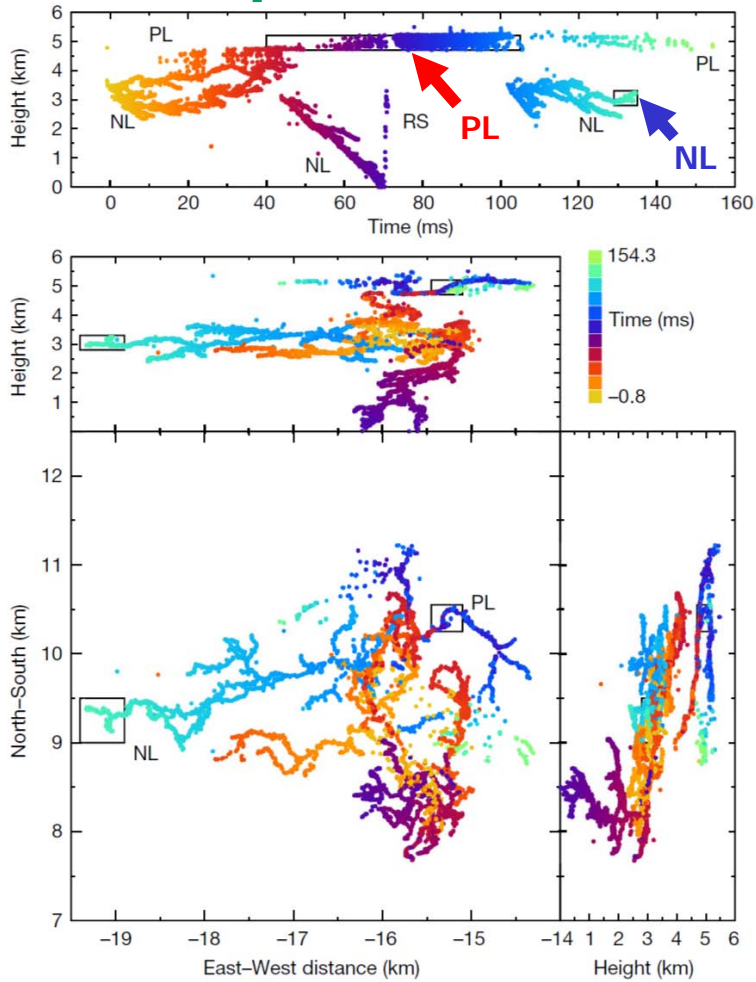
Mazur V. **1989**

**A physical model of
lightning initiation on
aircraft in thunderstorms**

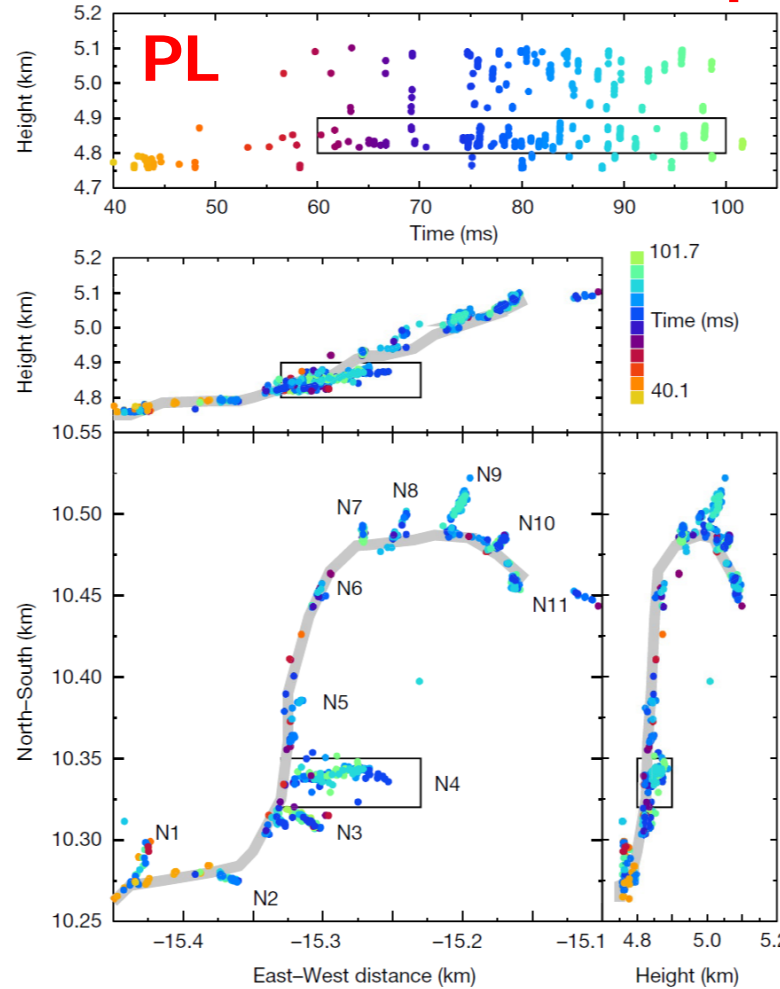
J. Geophys. Res. 94 3326–40

Высокочастотное картирование молнии

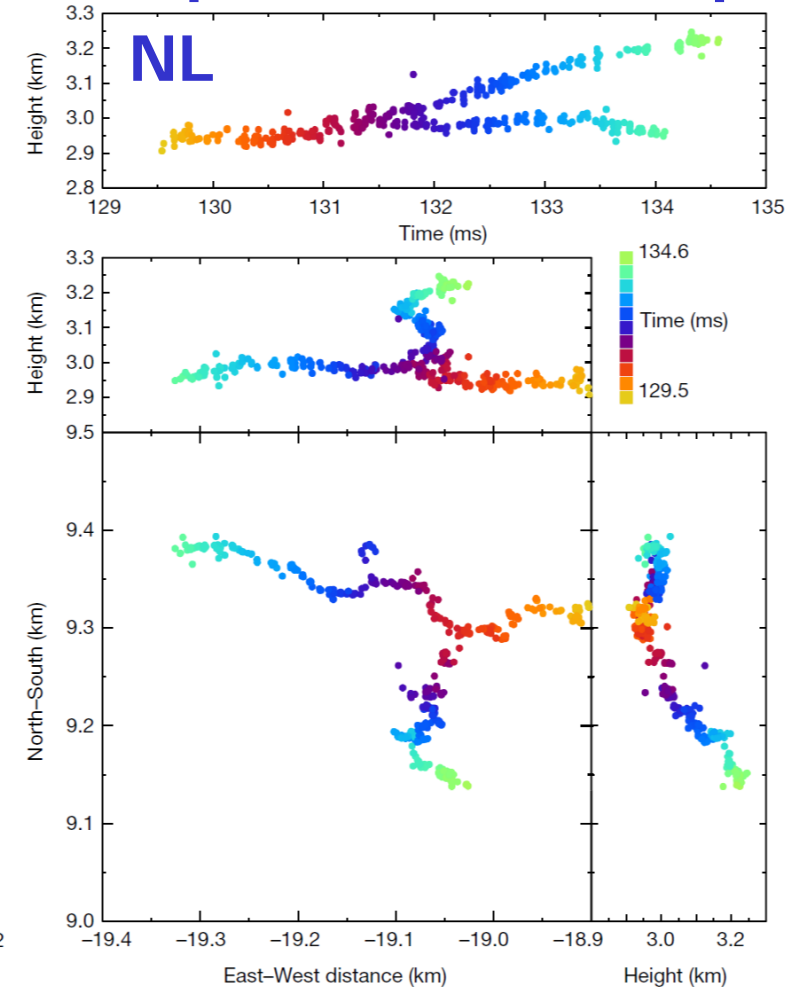
Карта вспышки



Положительный лидер

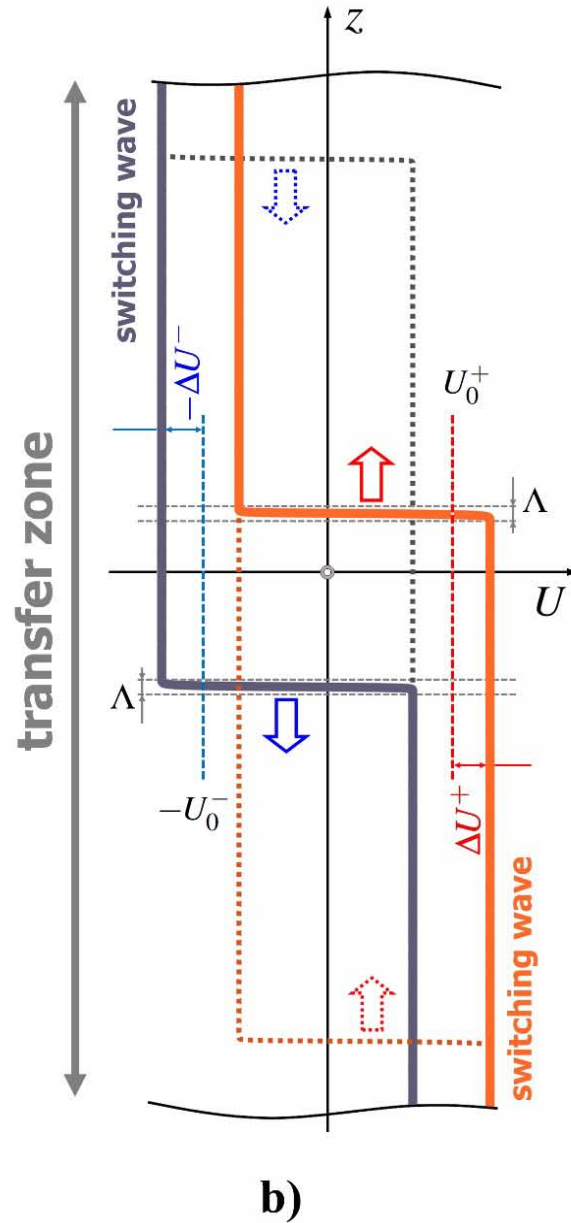
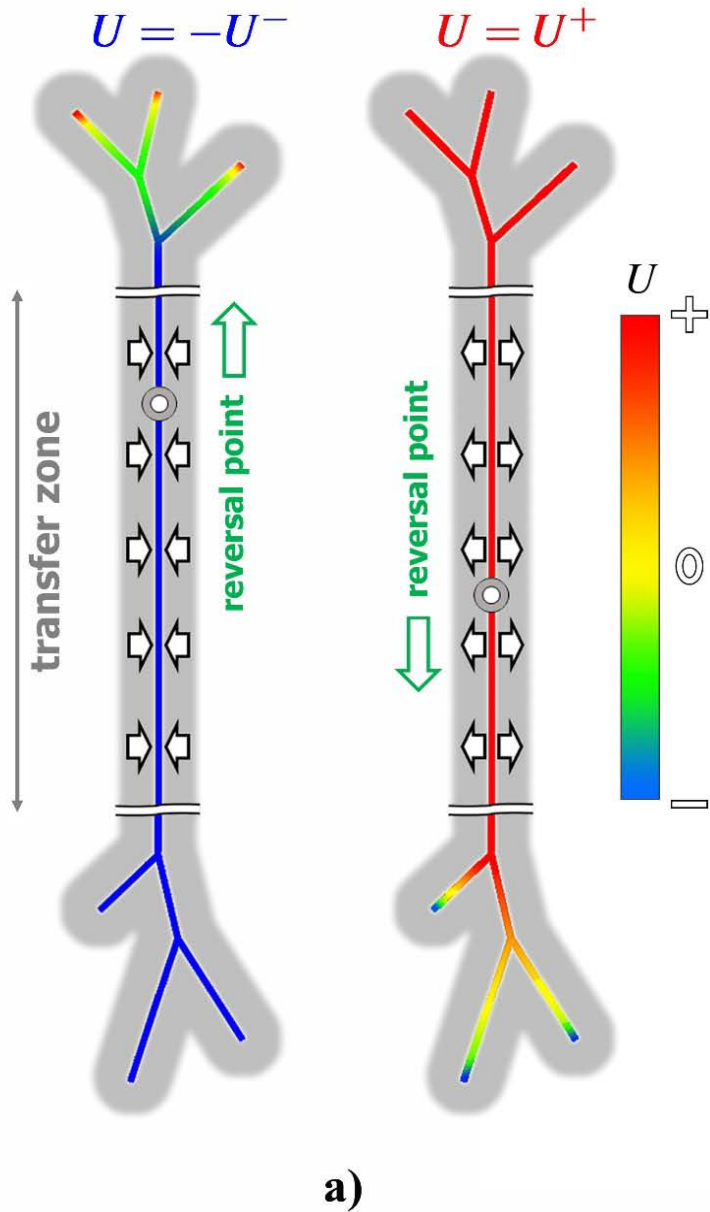


Отрицательный лидер



Hare, B., Scholten, O., Dwyer, J., Trinh, T., Buitink, S., ter Veen, S., et al. (2019). **Needle-like structures discovered on positively charged lightning branches.** *Nature*, 568(7752), 360–363. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1086-6>

Волны переключения между модами



$$V_0 \simeq \frac{1}{2C} \sqrt{\frac{G}{R}} \quad \Lambda \simeq \frac{D}{V_0} = \frac{1}{\sqrt{RG}}$$

$$D = \frac{1}{RC}$$

$$\tilde{J}_\perp \simeq 10^{-3} \text{ A/M} \quad \tau_s \simeq 0,1 \text{ c}$$

$$Q \simeq \tilde{J}_\perp \cdot \tau_s \simeq 10^{-4} \text{ Кл/M}$$

$$C \simeq 10^{-11} \text{ Ф/M}$$

$$\Delta U_s \simeq Q/C \simeq 10 \text{ MB}$$

$$G \simeq 10^{-6} \text{ C}_M/\text{M} \quad R \simeq 10 \text{ O}_M/\text{M}$$

$$V_0 \simeq \sqrt{G/R/C} \lesssim 10^8 \text{ M/c}$$

$$\Lambda \simeq D/V_0 \simeq 1/\sqrt{RG} \gtrsim 100 \text{ M}$$

Нелинейное параболическое уравнение

$$\frac{\partial U}{\partial t} = f(U) + D \cdot \frac{\partial^2 U}{\partial z^2}$$

$$U = U(\eta), \quad \eta = z - V_0 t$$

$$W(U) = \int_{-U^*}^U f(U) dU$$

$$U^* > U^-$$

$$DU'' = -\frac{\partial W}{\partial U} - V_0 U' \quad D = \frac{1}{RC}$$

Ёмкость древа разряда

$$d_f^+ > d_f^-, \quad \frac{R_b^+}{R_l^+} > \frac{R_b^-}{R_l^-} \quad C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(l/r)} \simeq 10^{-11} \text{ F/m}$$

$$R_b/R_l \lesssim 2$$

$$s_{\max}^{\pm} \simeq 14$$

$$C_{\text{total}}^{\pm} = C_0 L_{\text{total}}^{\pm} \simeq C_0 L_{s_{\max}^{\pm}}^{\pm} \left(\frac{R_b^{\pm}}{R_l^{\pm}} \right)^{s_{\max}^{\pm}} \gtrsim 10^{-4} \text{ F/m}$$