II Всероссийская школа по экспериментальной лабораторной астрофизике и геофизике

Моделирование и мониторинг электромагнитного окружения Земли

в контексте глобальной электрической цепи

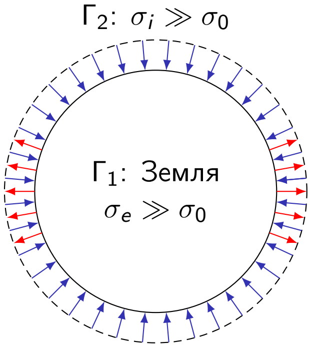
Ф. Г. Сарафанов[1]

Коллектив: Н. В. Ильин, Н. Н. Слюняев, А. А. Евтушенко, Е. А. Мареев, Ю. В. Шлюгаев, М. В. Шаталина, А. В. Волкова, А. А. Долинин

[1]Институт прикладной физики им. А. В. Гапонова-Грехова РАН

Глобальная цепь постоянного тока — DC GEC

1. Атмосфера обладает проводимостью, зависящей от высоты $\sigma(z) \sim \exp\{z/H\}$
2. Источниками стороннего тока $\mathbf{j}_\mathrm{s}$ являются электрически активные облака
3. Источники «включены» всегда, но их активность модулируется погодно-климатическими условиями
4. Поверхность Земли и нижняя ионосфера — хорошие проводники, на которых замыкаются токи зарядки (токи «плохой» погоды) и омические токи (токи «хорошей» погоды)

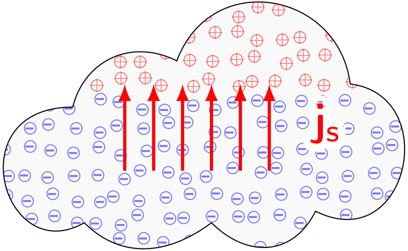


$$\mathrm{div}\,(\sigma\,\mathrm{grad}\,\varphi) = \mathrm{div}\,\mathbf{j}_\mathrm{s}$$

$$\oint_{\Gamma_1} \sigma\,\mathrm{grad}\,\varphi \cdot \mathbf{n}\,ds = \oint_{\Gamma_1} \mathbf{j}_\mathrm{s} \cdot \mathbf{n}\,ds$$

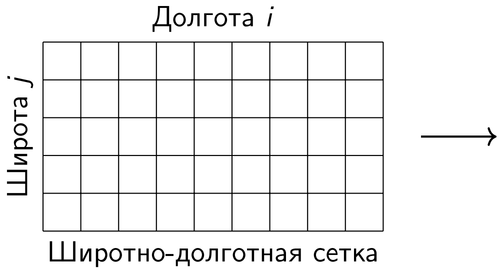
$$\varphi|_{\Gamma_1} = 0, \qquad \varphi|_{\Gamma_2} = V_\mathrm{ion}$$

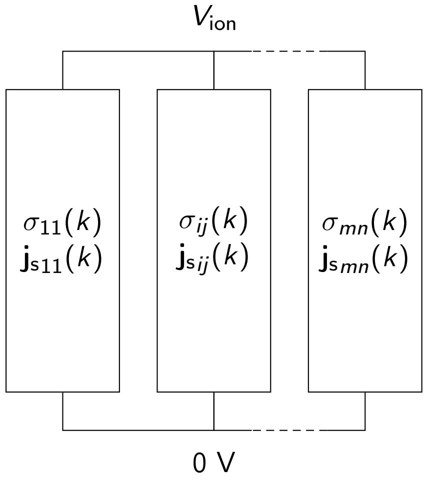
Реализация расчёта токов



1. Желателен расчёт электродинамики на мелких сетках с учётом микрофизики облака
2. В климатических моделях такой расчёт пока невозможен
3. На крупных сетках вынуждены использовать «прокси»-параметры для подсеточной параметризации
4. Поиск прокси: перебор, машинное обучение и т.п.
5. Из физических соображений построено несколько параметризаций. Мы используем постоянную плотность тока, но площадь источников определяем как $f(\mathrm{CAPE}, \mathrm{P}, \mathrm{PW})$

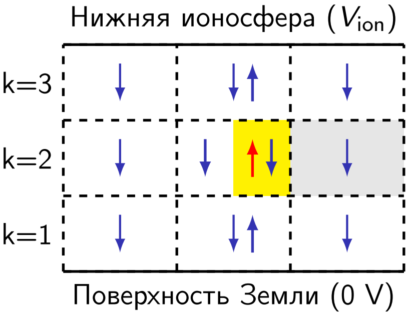
Столбчатая модель DC GEC



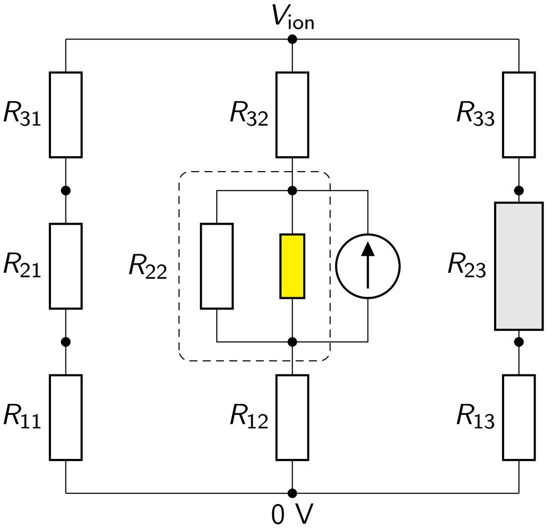


1. Пренебрегаем горизонтальными токами (справедливо на масштабах $\gtrsim$ 100 км)
2. Рассматриваем квазистационарную систему (справедливо для времён $\gtrsim$ 10 мин)

Ячейки с облаками различных типов



1. Омический ток есть во всех ячейках
2. Проводимость в грозовых облаках может быть выше, а в электрически пассивных — ниже

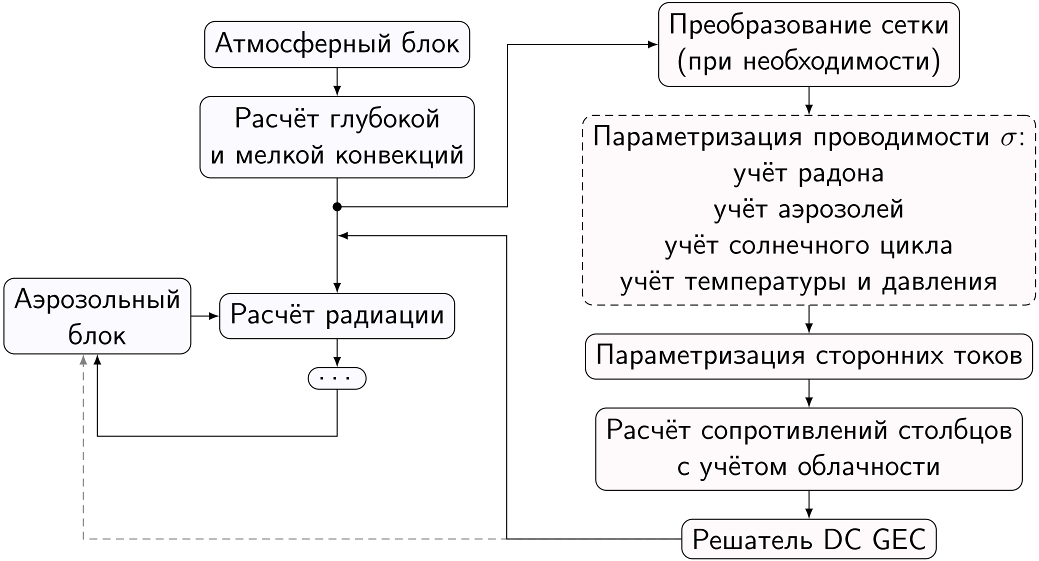


Ионосферный потенциал в столбчатой модели

$$V_{\text{ion}} = \sum_{i,j=1}^{n,m} \left[\overbrace{\frac{S_{ij} \int\limits_0^{z_{\max}} \dfrac{\mathbf{j}_{\mathsf{s}\,ij}(z) \cdot \mathbf{n} \, \mathrm{d}z}{\sigma_{ij}(z)}}{\int\limits_0^{z_{\max}} \dfrac{\mathrm{d}z}{\sigma_{ij}(z)}}}^{\mathrm{I}_{ij}} \Bigg/ \sum_{i,j=1}^{n,m} \overbrace{\frac{S_{ij}}{\int\limits_0^{z_{\max}} \dfrac{\mathrm{d}z}{\sigma_{ij}(z)}}}^{R_{ij}^{-1}} \right]$$

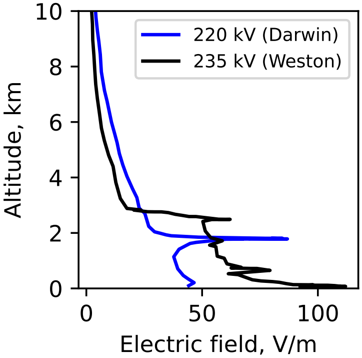
$$\mathrm{U}_{ij} = \int\limits_0^{z_{\max}} \frac{\mathbf{j}_{\mathsf{s}\,ij}(z) \cdot \mathbf{n} \, \mathrm{d}z}{\sigma_{ij}(z)} \quad \Rightarrow \quad \mathrm{I}_{ij} = \frac{U_{ij}}{R_{ij}}, \quad V_{ij} = \mathrm{I}_{ij} \Big/ \sum_{i,j=1}^{n,m} \frac{1}{R_{ij}}, \quad V_{\text{ion}} = \sum_{i,j=1}^{n,m} V_{ij}$$

Интеграция в климатические модели



Измерения ионосферного потенциала

Вертикальный профиль АЭП



$$E_z(z) \approx E_0 \cdot \exp\left(-\frac{z}{H}\right)$$

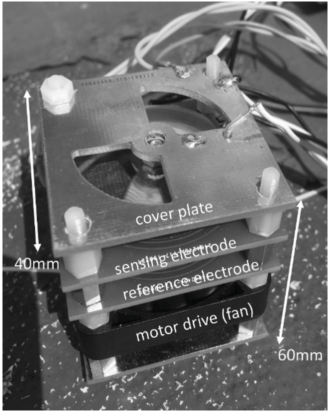
- Самолётные измерения профиля АЭП:
  И. М. Имянитов (1957),
  R. Markson (1976, 1999, 2007) (см. рисунок)
- Баллонные измерения профиля АЭП:
  T. Ogawa (1966),
  H. J. Fisher, R. P. Mühleisen (1974)

Общая методика получения значения ионосферного потенциала — измерение профиля АЭП хорошей погоды и последующее интегрирование

$$V_i = \int_0^{z_{\max}} E_z^{\text{meas}}\,\mathrm{d}z + \int_{z_{\max}}^{z_{\text{ion}}} E_z^{\text{approx}}\,\mathrm{d}z$$

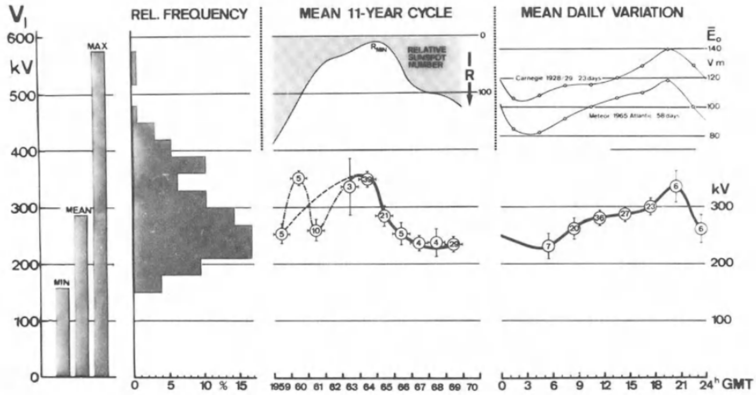
Измерения ионосферного потенциала (ИП)

Миниатюрный EFM



Прототип легковесного датчика для метеозондирования
R. G. Harrison (2020)

Статистика значений ионосферного потенциала

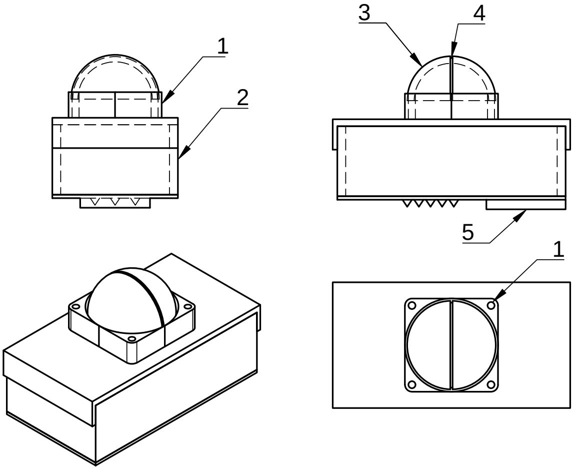


Данные по серии из 356 запусков метеозондов с датчиком электрического поля в Вайссенау, Германия
R. P. Mühleisen (ICAE, 1974)

Создание датчика для измерения ИП

- Чувствительность не менее 1 В/м
- Работа от одного элемента питания не менее 3 часов
- Вес не более 250 г
- Напряжение питания 3 В
- Низкая стоимость

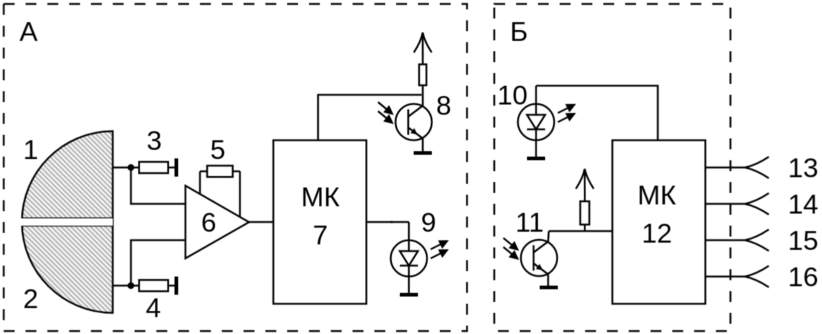
Чертёж датчика в сборе



1 — электромотор, $f_{вр}=100$ об/сек
2 — батарейный отсек, объединённый с приёмопередающим модулем
3 — один из двух электродов вращающегося диполя
4 — диэлектрический зазор между электродами
5 — крепление к метеозонду и коннектор UART приёмопередающего модуля

Под электромотором 1 размещены ИК-светодиод для синхронного детектирования и модуль IRDA для приёма оцифрованного измеряемого сигнала, управляемые приёмопередающим модулем на основе МК TI MSP430G2553

Принципиальная схема датчика



Вращающийся диполь А: 1,2 — электроды диполя, 3,4,5,6 — сверхчувствительный инструментальный усилитель с обвязкой, 7 — МК MSP430 с интегрированным 24-bit Σ/Δ АЦП, 8 — детектор полного оборота, 9 — передающий ИК-светодиод*

База датчика Б: 10 — постоянно работающий ИК-светодиод, 11 — приёмный фототранзистор*, 12 — МК MSP430, 13–16 — TTL подключение к зонду Vaisala

*В последней ревизии 10, 11 заменены на модули IRDA

Работа над датчиком продолжается

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2799385

Устройство для измерения высотного профиля квазистатического электрического поля атмосферы

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова Российской академии наук" (ИПФ РАН) (RU)*

Авторы: *Ильин Николай Владимирович (RU), Сарафанов Фёдор Георгиевич (RU)*

Заявка № **2022134237**

Приоритет изобретения **26 декабря 2022 г.**

Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **05 июля 2023 г.**

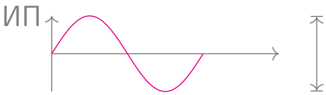
Срок действия исключительного права на изобретение истекает **26 декабря 2042 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

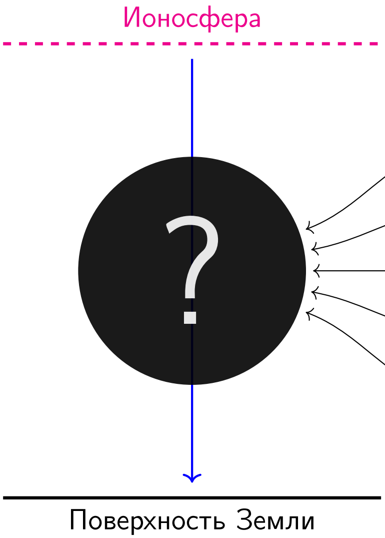
Ю.С. Зубов

Слева направо: Ф. Г. Сарафанов (в руках датчик), А. В. Волкова, Н. В. Ильин, А. А. Долинин, Д. И. Кульшин

Приземное электрическое поле $E_z\big|_{z\approx 0}$



вариация до 30%
относительно среднего



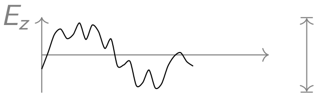
Флуктуации концентрации аэрозолей

Ближние грозы

Прохождение заряженных облаков

Снег, дождь, пылевая буря

Эмиссия радона



Разброс peak-to-peak
может быть очень велик

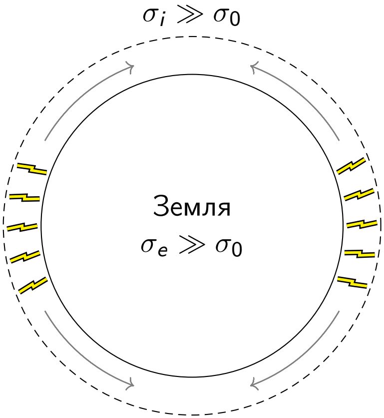
Задача №1: суточная вариация E_z

На сайте (eee.ipfran.ru/sarov24) доступны методическая литература по теории ГЭЦ и измерениям электрического поля хорошей погоды, а также архив данных измерений E_z на антарктической станции Восток (2006-2019).

Отберите из данных дни, соответствующие условиям хорошей погоды либо по метеокритериям (отсутствие облаков и осадков, ветер не более 5 м/с), используя общедоступные метеоархивы (например, rp5.ru), либо по значениям поля (в сутках есть измерения за все 24 часовых интервала, в каждом интервале поле лежит в пределах 0...1000 В/м, разброс peak-to-peak за сутки не превышает 150% от среднедневного значения).

Постройте среднюю за все время наблюдений суточную вариацию отобранных значений электрического поля. Проверьте, сохраняется ли вариация при выборе различных временных периодов из исходного ряда (например, 2006-2008 vs 2013-2015). Сравните полученную вариацию с кривой Карнеги [см. R.G. Harrison, «The Carnegie Curve»].

Глобальная цепь переменного тока — AC GEC



1. В резонаторе Земля-Ионосфера возможны поперечные и продольные (Шумановские) резонансы
2. Возбуждение мод в резонаторе происходит за счёт глобальной молниевой активности
3. Резонансы существуют и без проводимости атмосферы
4. Реалистичные значения резонансных частот возможны только при учёте проводимости
5. Обнаружены эффекты и исследуется механизм воздействия резонансных частот (2 гармоника ШР) на биологические объекты

Математические аспекты задачи AC GEC

Комплексная диэлектрическая проницаемость:

$$\varepsilon(\mathbf{r},\omega) = 1 + \frac{4\pi\sigma(\mathbf{r})}{i\omega}$$

Уравнения на частоте ω

$$\operatorname{rot}\mathbf{E}^\omega = -\frac{i\omega}{c}\mathbf{H}^\omega$$

$$\operatorname{rot}\mathbf{H}^\omega = \frac{i\omega\varepsilon}{c}\mathbf{E}^\omega + \frac{4\pi}{c}\mathbf{J}^\omega$$

$$\mathbf{E}^\omega_\tau|_{\Gamma_1} = 0, \quad \mathbf{E}^\omega_\tau|_{\Gamma_2} = 0$$

Сторонний ток молниевых разрядов, дополняющий ток проводимости в законе Ома:

$$\mathbf{J}^\omega(\mathbf{r},\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{J}(\mathbf{r},t)e^{-i\omega t}\,\mathrm{d}t$$

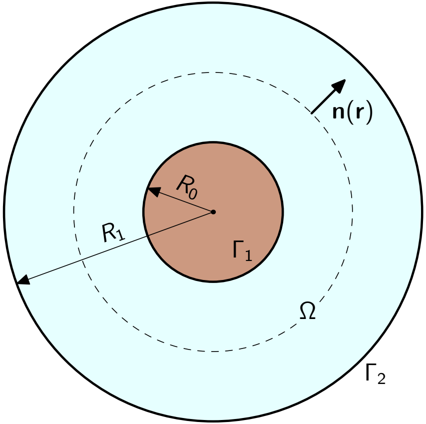
Случай проводящей среды ($\sigma(\mathbf{r}) \neq 0$):

- Задача имеет единственное решение $(\mathbf{E}^\omega(\mathbf{r},\omega), \mathbf{H}^\omega(\mathbf{r},\omega))$ при заданной проводимости $\sigma(\mathbf{r})$ и заданном источнике $\mathbf{J}^\omega(\mathbf{r},\omega)$

Случай непроводящей среды ($\sigma(\mathbf{r}) \equiv 0$, $\varepsilon(\mathbf{r},\omega) \equiv 1$):

- Есть набор резонансных частот $\{\omega_n\}$ и собственных мод $\{(\mathbf{E}^\omega_{nk}(\mathbf{r},\omega), \mathbf{H}^\omega_{nk}(\mathbf{r},\omega))\}$
- На нерезонансных частотах задача имеет единственное решение $(\mathbf{E}^\omega(\mathbf{r},\omega), \mathbf{H}^\omega(\mathbf{r},\omega))$ при заданном источнике $\mathbf{J}^\omega(\mathbf{r},\omega)$
- На резонансной частоте ω_n решение определено с точностью до комбинации собственных мод, отвечающих этой частоте

Уравнения в сферических координатах



$\mathbf{r} = (r, \vartheta, \varphi)$

Уравнения для компонент полей

$$\mathrm{div}_\perp\left(\mathbf{n}\times\mathbf{E}^\omega_\perp\right) = \frac{i\omega}{c} H^\omega_r$$

$$\frac{1}{r}\frac{\partial\left(r\mathbf{E}^\omega_\perp\right)}{\partial r} - \mathrm{grad}_\perp\, E^\omega_r = \frac{i\omega}{c}\mathbf{n}\times\mathbf{H}^\omega_\perp$$

$$\mathrm{div}_\perp\left(\mathbf{n}\times\mathbf{H}^\omega_\perp\right) = -\frac{i\omega\varepsilon}{c} E^\omega_r - \frac{4\pi}{c} J^\omega_r$$

$$\frac{1}{r}\frac{\partial\left(r\mathbf{H}^\omega_\perp\right)}{\partial r} - \mathrm{grad}_\perp\, H^\omega_r = -\frac{i\omega\varepsilon}{c}\mathbf{n}\times\mathbf{E}^\omega_\perp - \frac{4\pi}{c}\mathbf{n}\times\mathbf{J}^\omega_\perp$$

$$\mathbf{E}^\omega_\perp\big|_{r=R_0} = 0, \quad \mathbf{E}^\omega_\perp\big|_{r=R_1} = 0$$

- В случае $\sigma(\mathbf{r}) = \sigma(r)$ задачу можно представить в виде суперпозиции двух независимых подзадач
- Каждая из подзадач может быть описана в терминах одной потенциальной функции (U или V)
- В основе — разложение поперечных компонент полей на безвихревую и бездивергентную части

Уравнения для потенциальных функций

Поперечную часть стороннего тока можно представить в виде $\mathbf{J}_\perp^\omega = \operatorname{grad}_\perp \psi + \mathbf{n} \times \operatorname{grad}_\perp \chi$

Задача для функции $U(\mathbf{r}, \omega)$

$$\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{\varepsilon}\frac{\partial U}{\partial r}\right) + \frac{1}{\varepsilon}\Delta_\perp U + \frac{\omega^2}{c^2} U = -\frac{4\pi}{i\omega\varepsilon} J_r^\omega + \frac{4\pi}{i\omega}\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{\psi}{\varepsilon}\right)$$

$$\left.\frac{\partial U}{\partial r}\right|_{r=R_0} = \frac{4\pi}{i\omega}\psi|_{r=R_0}, \qquad \left.\frac{\partial U}{\partial r}\right|_{r=R_1} = \frac{4\pi}{i\omega}\psi|_{r=R_1} + \text{const}$$

Задача для функции $V(\mathbf{r}, \omega)$

$$\frac{\partial^2 V}{\partial r^2} + \Delta_\perp V + \frac{\omega^2 \varepsilon}{c^2} V = \frac{4\pi}{c}\chi$$

$$V|_{r=R_0} = 0, \qquad V|_{r=R_1} = \text{const}$$

Компоненты полей

$$\mathbf{E}_\perp^\omega = \frac{1}{\varepsilon}\operatorname{grad}_\perp \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{i\omega}{c}\mathbf{n} \times \operatorname{grad}_\perp V - \frac{4\pi}{i\omega\varepsilon}\operatorname{grad}_\perp \psi$$

$$E_r^\omega = -\frac{1}{\varepsilon}\Delta_\perp U - \frac{4\pi}{i\omega\varepsilon} J_r^\omega$$

$$\mathbf{H}_\perp^\omega = -\frac{i\omega}{c}\mathbf{n} \times \operatorname{grad}_\perp U + \operatorname{grad}_\perp \frac{\partial V}{\partial r}$$

$$H_r^\omega = -\Delta_\perp V$$

Задачи для функций $U(\mathbf{r}, \omega)$ и $V(\mathbf{r}, \omega)$ **можно решать методом разделения переменных**, раскладывая всё в ряды по сферическим функциям и решая уравнения для коэффициентов

Задача с чисто радиальным сторонним током

В задаче о колебаниях в шумановском частотном диапазоне **с чисто радиальным сторонним током** ($\mathbf{J}_\perp^\omega = 0$) достаточно одной потенциальной функции $U(\mathbf{r}, \omega)$

Задача для функции $U(\mathbf{r}, \omega)$

$$\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{\varepsilon}\frac{\partial U}{\partial r}\right) + \frac{1}{\varepsilon}\Delta_\perp U + \frac{\omega^2}{c^2} U = -\frac{4\pi}{i\omega\varepsilon} J_r^\omega$$

$$\left.\frac{\partial U}{\partial r}\right|_{r=R_0} = 0, \qquad \left.\frac{\partial U}{\partial r}\right|_{r=R_1} = 0$$

Компоненты полей

$$\mathbf{E}_\perp^\omega = \frac{1}{\varepsilon}\,\mathrm{grad}_\perp \frac{\partial U}{\partial r}, \qquad E_r^\omega = -\frac{1}{\varepsilon}\Delta_\perp U - \frac{4\pi}{i\omega\varepsilon} J_r^\omega$$

$$\mathbf{H}_\perp^\omega = -\frac{i\omega}{c}\mathbf{n} \times \mathrm{grad}_\perp U, \qquad H_r^\omega = 0$$

Решение методом разделения переменных: $U(r, \vartheta, \varphi, \omega) = \sum\limits_{l,m} R_{lm}(r, \omega) Y_l^m(\vartheta, \varphi)$

Задача для функции $R_{lm}(r, \omega)$

$$\frac{d}{dr}\left(\frac{1}{\varepsilon}\frac{dR_{lm}}{dr}\right) + \left(\frac{\omega^2}{c^2} - \frac{l\,(l+1)}{\varepsilon r^2}\right) R_{lm} = J_{lm}$$

$$\left.\frac{dR_{lm}}{dr}\right|_{r=R_0} = 0, \qquad \left.\frac{dR_{lm}}{dr}\right|_{r=R_1} = 0$$

$$\varepsilon(r, \omega) = 1 + \frac{4\pi\sigma(r)}{i\omega}$$

$$J_{lm}(r, \omega) = -\int_0^{2\pi}\int_0^{\pi} \frac{4\pi J_r^\omega(r, \vartheta, \varphi, \omega)\overline{Y_l^m}(\vartheta, \varphi)}{i\omega\varepsilon(r, \omega)} \sin\vartheta \, d\vartheta \, d\varphi$$

Дальнейшее упрощение описания источников

- Молниевые разряды **описываются линейными радиальными токами** (с помощью дельта-функции по ϑ и φ)
- Линейные радиальные токи **заменяются на точечные токовые диполи** соответствующей величины
- Характерный **вертикальный масштаб** L **предполагается одинаковым** для всех молниевых разрядов
- Соотношение $L \ll R_1 - R_0$ позволяет приближённо **перенести источники в граничные условия**

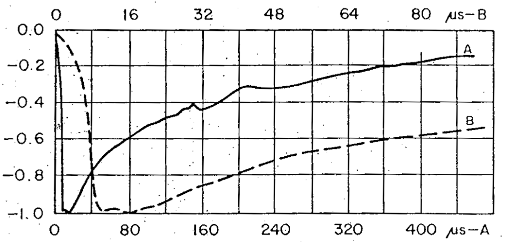
j-ый молниевый разряд происходит в точке **с координатами** (ϑ_j, φ_j) и описывается **осциллограммой тока возвратного удара** $I_j(t)$ **с фурье-образом** $I_j^\omega(\omega)$

Задача для функции $R_{lm}(r,\omega)$

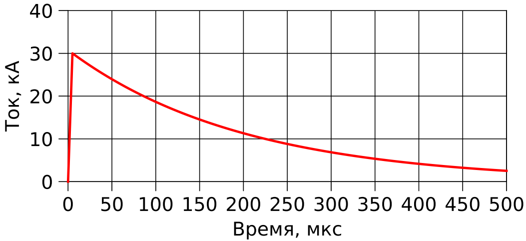
$$\frac{d}{dr}\left(\frac{1}{\varepsilon}\frac{dR_{lm}}{dr}\right) + \left(\frac{\omega^2}{c^2} - \frac{l\,(l+1)}{\varepsilon r^2}\right) R_{lm} = 0$$

$$\left.\frac{dR_{lm}}{dr}\right|_{r=R_0} = -\frac{4\pi L}{i\omega R_0^2}\sum_j I_j^\omega(\omega)\overline{Y_l^m}(\vartheta_j,\varphi_j), \qquad \left.\frac{dR_{lm}}{dr}\right|_{r=R_1} = 0$$

Параметризация тока молниевого разряда



(Berger et al., 1975)



j-ый молниевый разряд
происходит **в момент времени** t_j

$$I_j(t) = \begin{cases} 0, & t \leqslant t_j \\ I_0^{(j)} \dfrac{t - t_j}{\tau_1}, & t_j < t \leqslant t_j + \tau_1 \\ I_0^{(j)} \exp\left(-\dfrac{t - t_j - \tau_1}{\tau_2}\right), & t > t_j + \tau_1 \end{cases}$$

$$I_j^{\omega}(\omega) = I_0^{(j)} e^{-i\omega t_j} \times$$
$$\times \left[-\frac{1}{\omega^2\tau_1} + e^{-i\omega\tau_1}\left(\frac{1 + i\omega\tau_1}{\omega^2\tau_1} + \frac{\tau_2}{1 + i\omega\tau_2}\right)\right]$$

Далее используются значения
$\tau_1 = 5$ мкс и $\tau_2 = 200$ мкс

Схема модели ГЭЦ переменного тока

Проводимость $\sigma(r)$

$$\varepsilon(r,\omega) = 1 + \frac{4\pi\sigma(r)}{i\omega}$$

Параметры разрядов $\vartheta_j,\ \varphi_j,\ t_j,\ I_0^{(j)}$

$$I_j^\omega(\omega) = I_0^{(j)} e^{-i\omega t_j}\left[-\frac{1}{\omega^2\tau_1} + e^{-i\omega\tau_1}\left(\frac{1+i\omega\tau_1}{\omega^2\tau_1} + \frac{\tau_2}{1+i\omega\tau_2}\right)\right]$$

Задача Коши для $T_l(r,\omega)$:

$$\frac{d}{dr}\left(\frac{1}{\varepsilon}\frac{dT_l}{dr}\right) + \left(\frac{\omega^2}{c^2} - \frac{l\,(l+1)}{\varepsilon r^2}\right)T_l = 0$$

$$T_l\big|_{r=R_1} = 1, \qquad \left.\frac{dT_l}{dr}\right|_{r=R_1} = 0$$

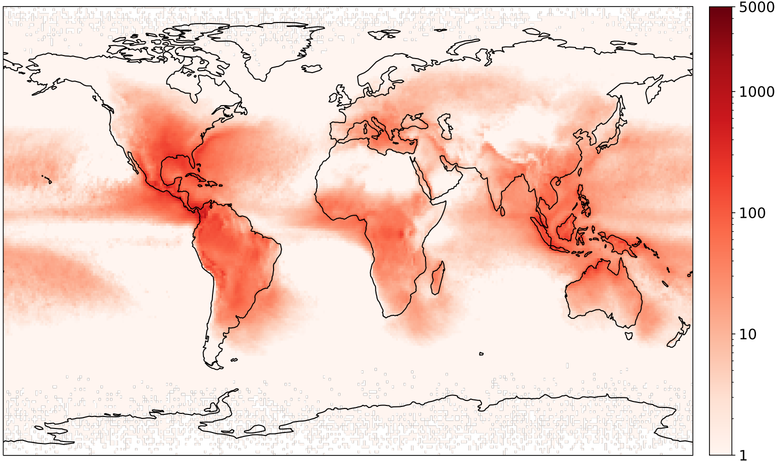
$$R_{lm}(r,\omega) = -\frac{4\pi L T_l(r,\omega)}{i\omega R_0^2\, dT_l/dr(R_0,\omega)} \times$$
$$\times \sum_j I_j^\omega(\omega)\overline{Y_l^m}(\vartheta_j,\varphi_j)$$

$$E_r^\omega(r,\vartheta,\varphi,\omega) = \sum_{l,m}\frac{l\,(l+1)}{\varepsilon(r,\omega)r^2}R_{lm}(r,\omega)Y_l^m(\vartheta,\varphi),$$ аналогично для других компонент полей

World Wide Lightning Location Network

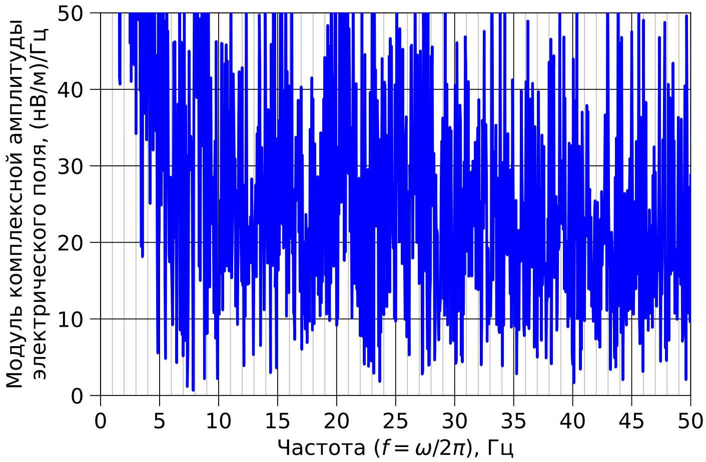
Основные параметры молниевых вспышек, определяемые WWLLN:

- Координаты разряда (широта и долгота)
- Время разряда
- Энергия разряда (позволяет оценить пиковый ток)



Количество вспышек за день в ячейках сетки 1°×1° по данным WWLLN (среднее за 2015–2021 годы)

Расчёт резонансов по данным WWLLN

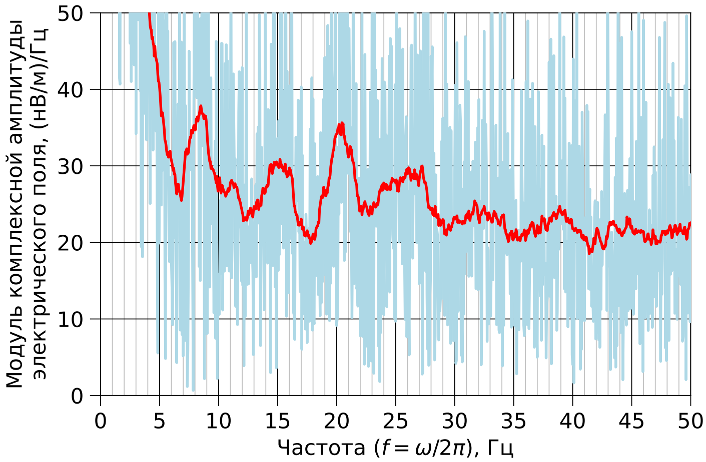


- **Проводимость:**

$$\sigma(r) = \sigma_0 \exp\left(\frac{r - R_0}{D}\right)$$

- **Источники:** молниевые разряды по данным WWLLN за 18:00–18:30 UTC 1 июля 2020 года
- **Точка наблюдения:** 45° с. ш., 180° в. д.

Расчёт резонансов по данным WWLLN



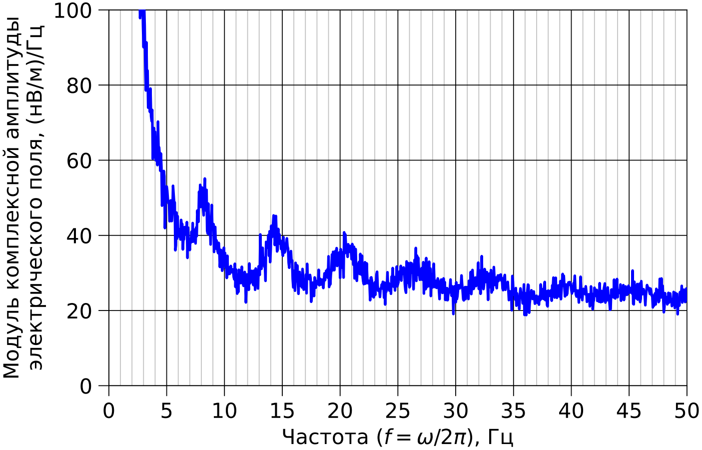
- **Проводимость:**

$$\sigma(r) = \sigma_0 \exp\left(\frac{r - R_0}{D}\right)$$

- **Источники:** молниевые разряды по данным WWLLN за 18:00–18:30 UTC 1 июля 2020 года
- **Точка наблюдения:** 45° с. ш., 180° в. д.

Видны резонансы на частотах, близких к наблюдаемым в измерениях

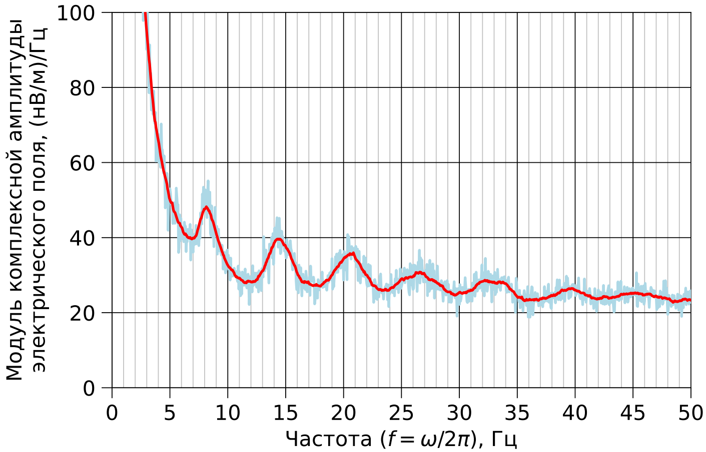
Среднесуточная картина резонансов



- **Проводимость:**
$$\sigma(r) = \sigma_0 \exp\left(\frac{r - R_0}{D}\right)$$
- **Источники:** молниевые разряды по данным WWLLN за последовательные 30-минутные интервалы в течение 1 июля 2020 года (48 отдельных расчётов)
- **Точка наблюдения:** 45° с. ш., 180° в. д.

При усреднении по большому количеству независимых расчётов картина резонансов становится более упорядоченной и ясной

Среднесуточная картина резонансов



- **Проводимость:**
$$\sigma(r) = \sigma_0 \exp\left(\frac{r - R_0}{D}\right)$$
- **Источники:** молниевые разряды по данным WWLLN за последовательные 30-минутные интервалы в течение 1 июля 2020 года (48 отдельных расчётов)
- **Точка наблюдения:** 45° с. ш., 180° в. д.

При усреднении по большому количеству независимых расчётов картина резонансов становится более упорядоченной и ясной

Задача №2: суточная вариация молний

На сайте (eee.ipfran.ru/sarov24) доступен архив наблюдений всемирной грозопеленгационной сети (WWLLN) за 1 июля 2022 года.

Постройте количество молний в мире за час в зависимости от времени суток (суточная вариация молниевой активности). Сравните с суточной вариацией электрического поля хорошей погоды, полученной в Задаче №1. Объясните сходство и различие вариаций, пользуясь предоставленным методическим пособием (часть 2).

Задача повышенной сложности. Используя математический аппарат ГЭЦ переменного тока (полный вывод всех уравнений предоставлен в пособии), найдите коэффициенты разложения спектра возбуждаемых единичным разрядом колебаний в ряд по сферическим гармоникам. Рассчитайте суммарный спектр от всех разрядов (их координаты доступны в файле, токи считайте равными 30 кА) по часовым интервалам. Из расчётов найдите суточный ход амплитуды и частоты первой гармоники ($\sim$7.8 Гц).

Сеть регистрации молний

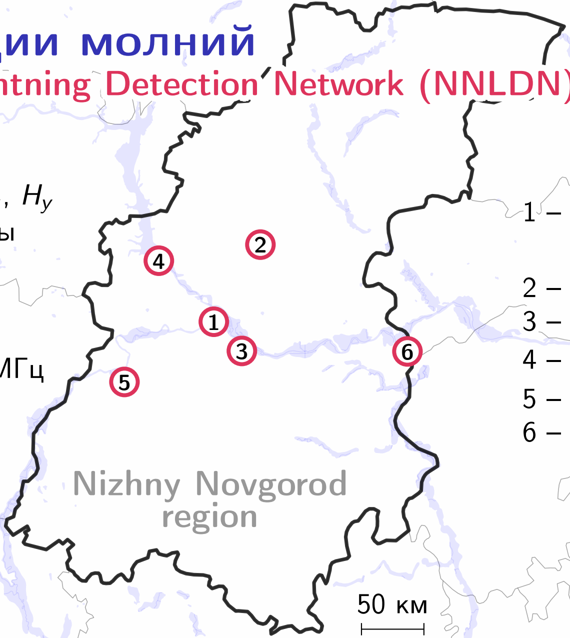
Nizhny Novgorod Lightning Detection Network (NNLDN)

На станциях магнитные H_x, H_y и E_z электрическая антенны

Диапазон приёма ULF/VLF (3-30 кГц)

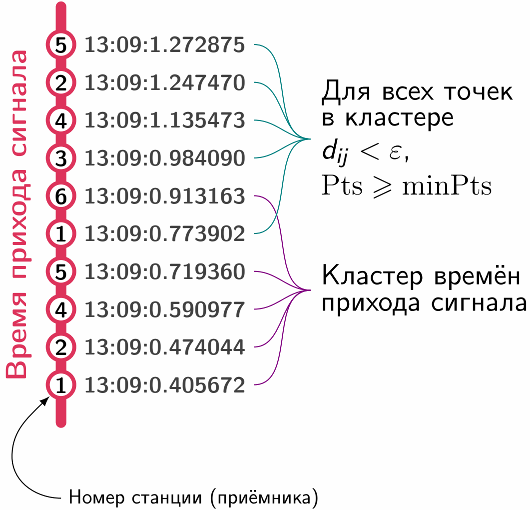
Частота дискретизации 8 МГц

Расчёт положения молний не реже раза в 5 минут



1 – Нижний Новгород (с ЦОД)
2 – Семёнов
3 – Безводное
4 – Городец
5 – Павлово
6 – Васильсурск

Временная кластеризация пришедших сигналов

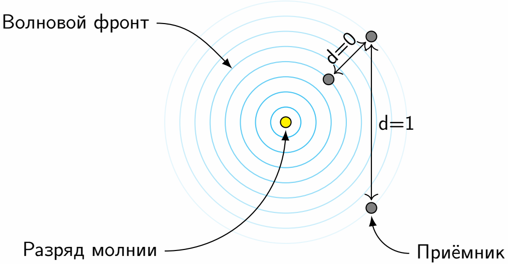


Безразмерное расстояние

$$d_{ij} = \left| \frac{|\vec{r}_i - \vec{r}_j| - |t_i - t_j| c}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|} \right|, \ i \neq j,$$

где $\vec{r}_j$ — положение j-го приёмника,
c — скорость света, t_j — время прихода.

Алгоритм DBSCAN*: $\mathrm{minPts} = 4$, $\varepsilon = 1.05$



*Density-based spatial clustering of applications with noise

Местоопределение разрядов молний

Время прихода сигнала:

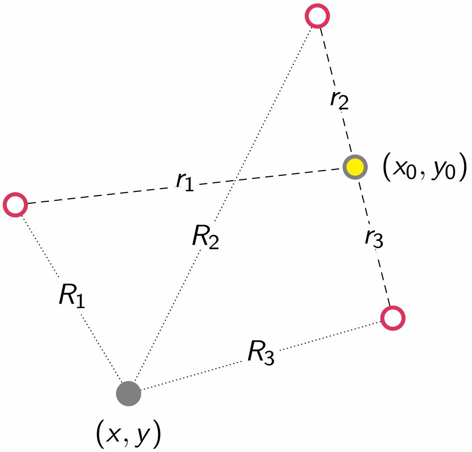
$$t_i = t_0 + \frac{r_i}{c} \Rightarrow \frac{r_i - r_j}{c} = t_i - t_j = \Delta t_{ij}$$

Известно только Δt_{ij}. Строится функция невязки

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=i+1}^{N} (R_i - R_j - c\Delta t_{ij})^2,$$

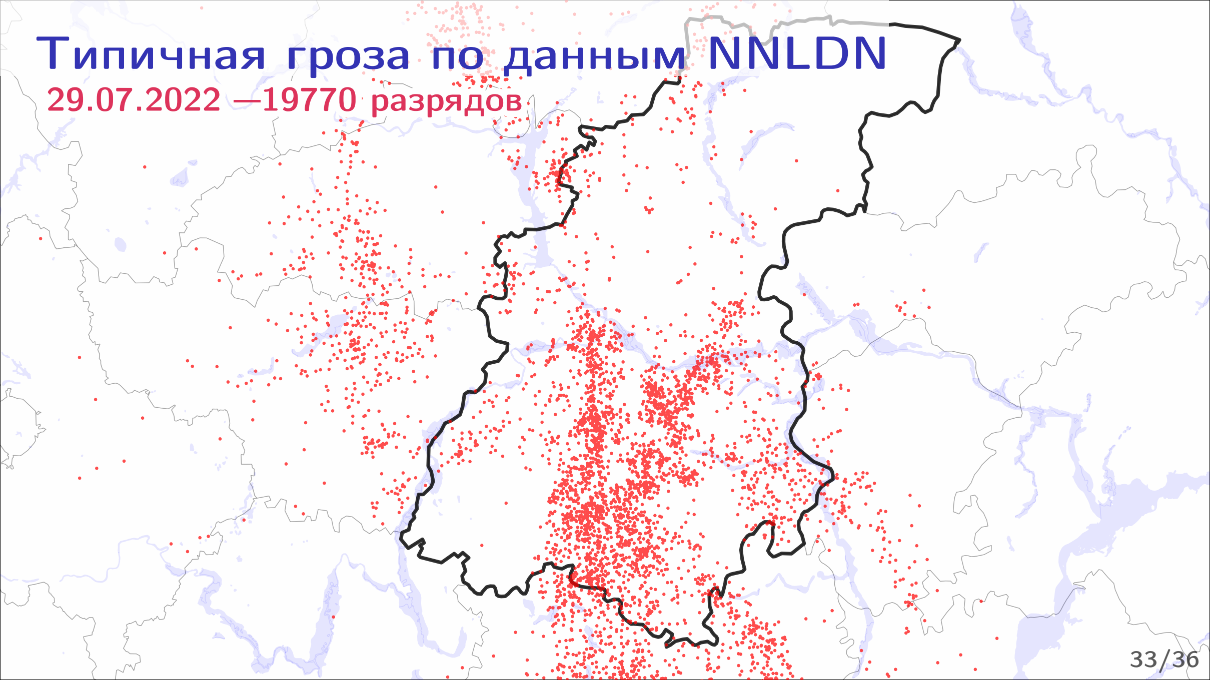
$$f(x_0, y_0) \equiv 0.$$

Метод минимизации (в нашем случае — Нелдера-Мида) позволяет найти точку разряда (x_0, y_0).

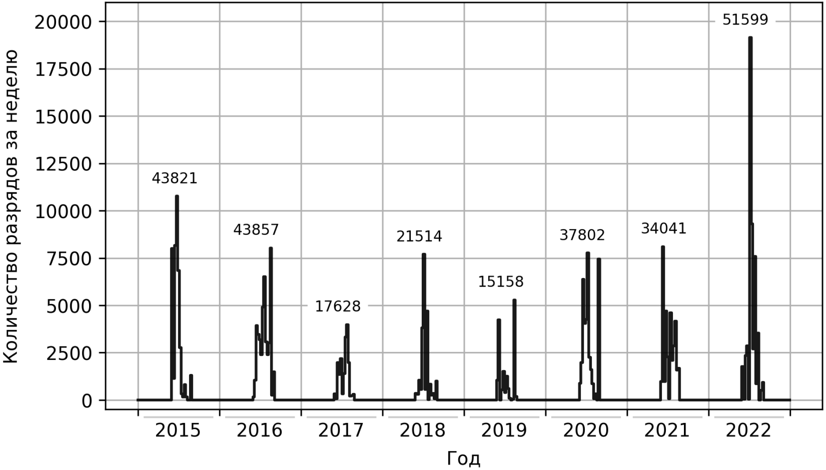


Типичная гроза по данным NNLDN

29.07.2022 —19770 разрядов



Молниевая активность в регионе



Сплошной кривой приведены количества разрядов за неделю, подписи над максимумами обозначают количество разрядов за соответствующий год. Здесь молнии по данным WWLLN

Заключение

1. На базе ИПФ РАН созданы и развиваются методы численного моделирования глобальной электрической цепи как постоянного, так и переменного тока
2. Созданные методы позволили обнаружить достоверное воздействие ряда погодно-климатических мод на ГЭЦ постоянного тока
3. Развернут широкий спектр натурных измерений электрических параметров в тропосфере: электрические поля хорошей и плохой погоды, магнитные поля шумановского диапазона, региональная грозопеленгация и ряд других
4. Ведётся работа над созданием датчика для собственной экспериментальной кампании по регулярному измерению профиля E_z. Целью является измерение долгосрочной динамики ИП
5. Остается открытым для исследования большое количество прикладных вопросов теории ГЭЦ; в частности, связанных с корректной параметризацией стороннего тока, учетом не облачных источников ГЭЦ и т.д.

eee.ipfran.ru/sarov24

Спасибо за внимание!