

**Обнаружение на низкоорбитальном спутнике
CSES электромагнитного отклика верхней
ионосферы на СНЧ сигнал, сгенерированный
наземным протяженным источником ЗЕВС и
линиями электропередач**

Савельева Н.В.¹, Пилипенко В.А.^{1,2}, Мазур Н.Г.¹, Федоров Е.Н.¹, Шуфаньт ЧЖАО³
nasa2000@yandex.ru

- 1. Институт физики Земли им. Шмидта РАН, Москва**
- 2. Институт космических исследований РАН, Москва**
- 3. Национальный космический центр Китайской академии наук, Пекин**

Установка ЗЕВС

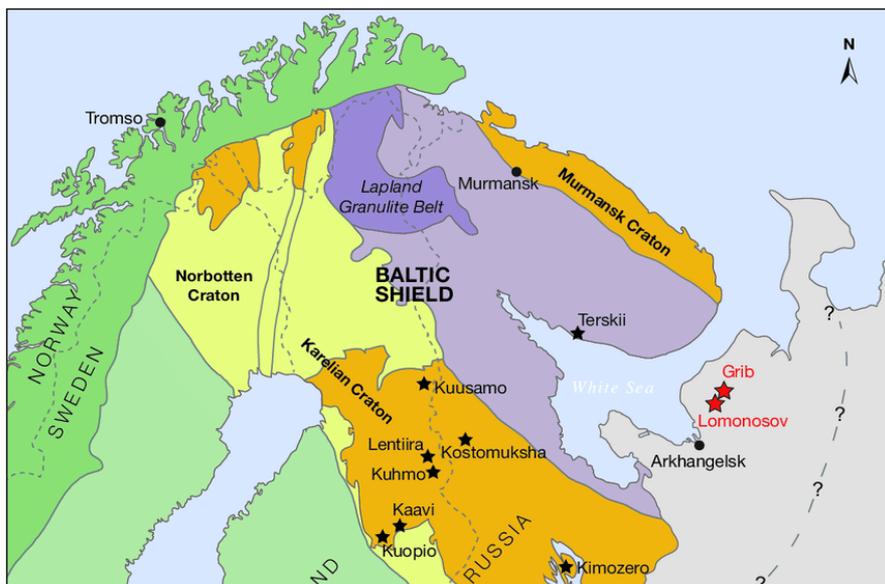
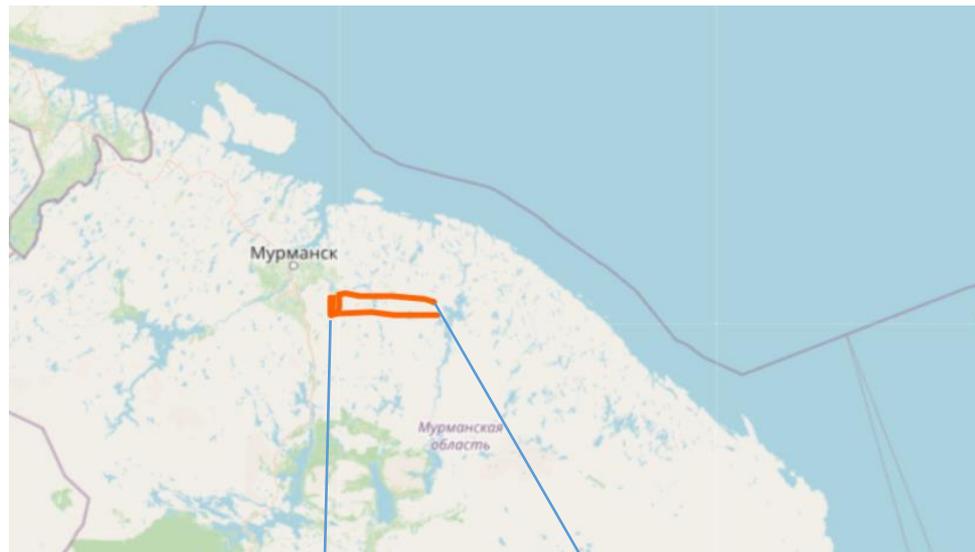
Расположена на Кольском п-ве, в центре Балтийского кристаллического щита.

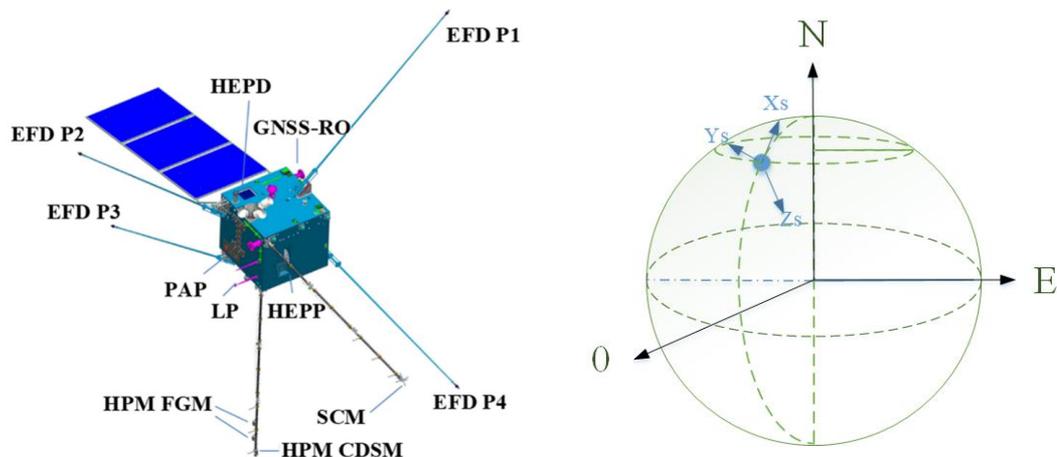
Состоит из двух ЛЭП длиной 60 км, на расстоянии примерно 10 км.

В ЛЭП создается ток до 200-300 А.

Общая мощность установки до 2.5 МВт, мощность излучения до 5 Вт.

Параметры сигнала: 82 Гц, длина волны $\lambda = 3\ 656\ \text{км}$.



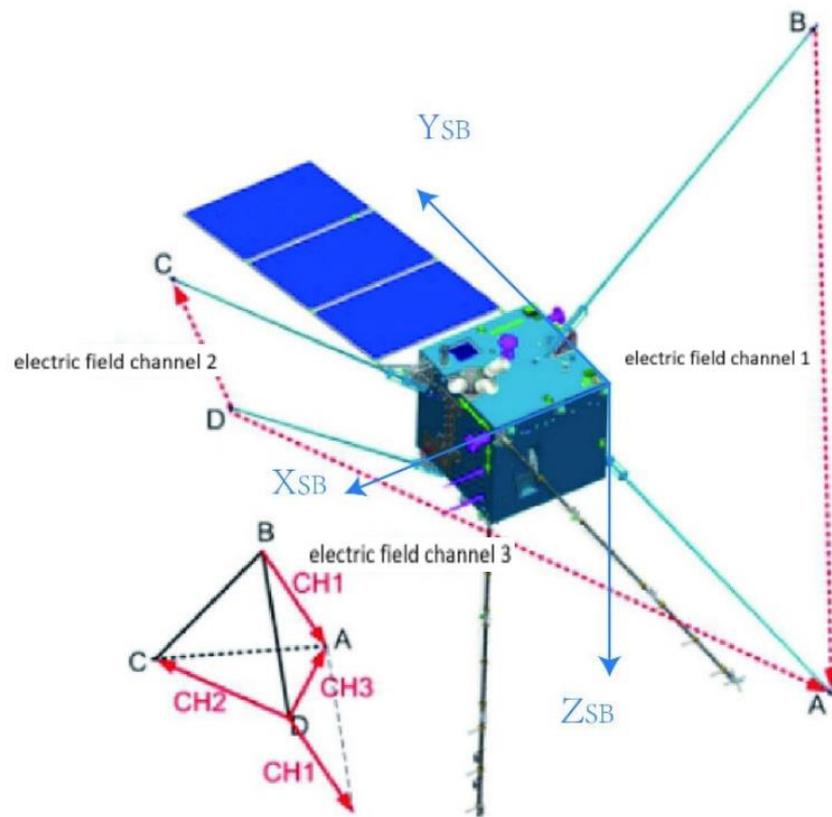


Первый китайский сейсмо-электрический спутник CSES (ZH-1)

Запущен в феврале 2018 года на солнечно-синхронную полярную орбиту с наклоном 97 градусов и высотой 500 км. Период обращения 95 минут.

Electric Field Detector (EFD) измеряет электрические потенциалы 4 сферических сенсоров, на основании которых рассчитываются три компоненты вектора электрического поля в диапазоне от DC до 3.5МГц.

Search-coil magnetometer (SCM) измеряет три компоненты вектора вариаций магнитного поля в диапазоне от 10Гц to 20кГц.



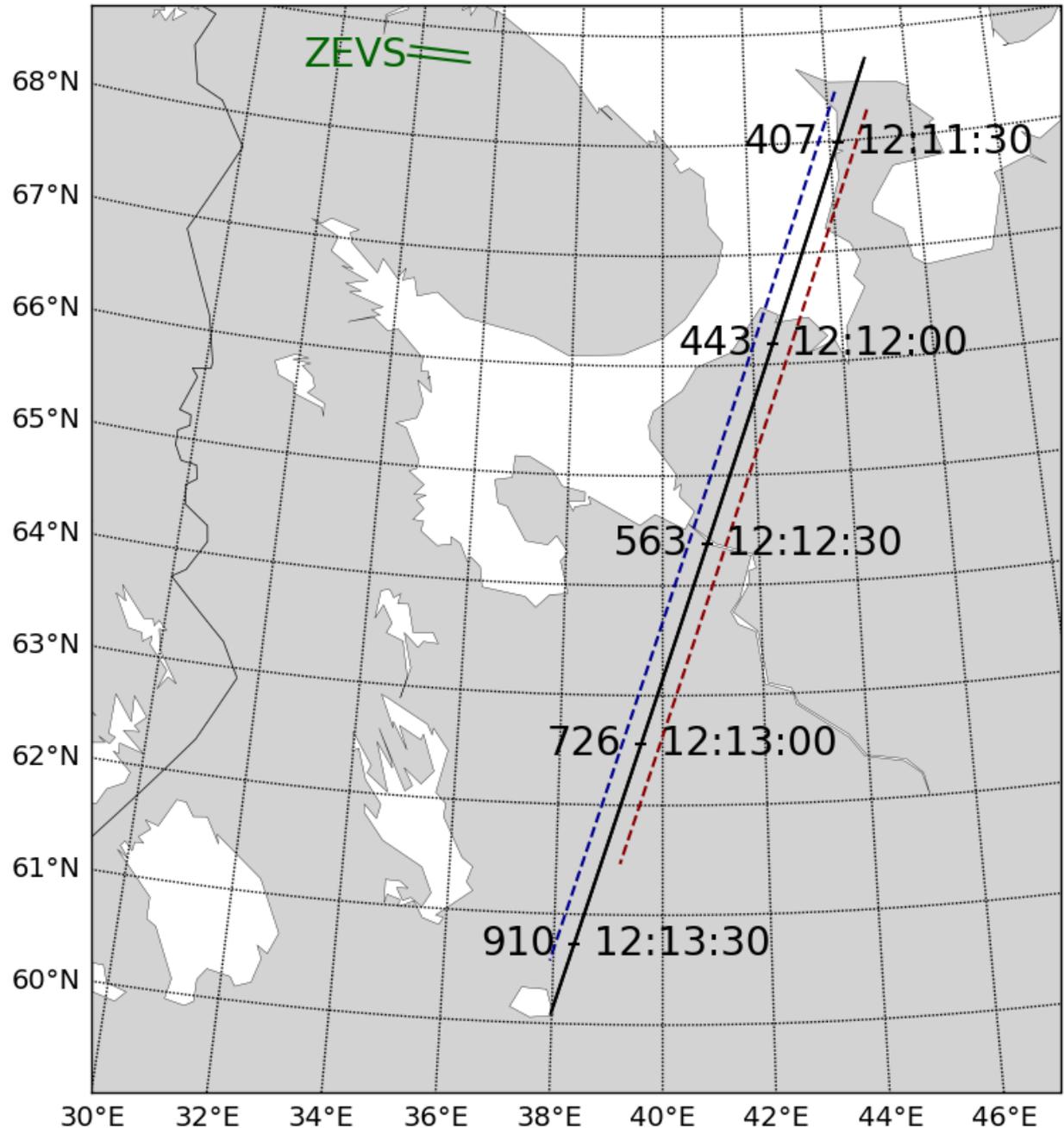
CSES 2019/11/11 orbit 98381

Обнаружение сигнала ЗЕВС 11 ноября 2019 г.

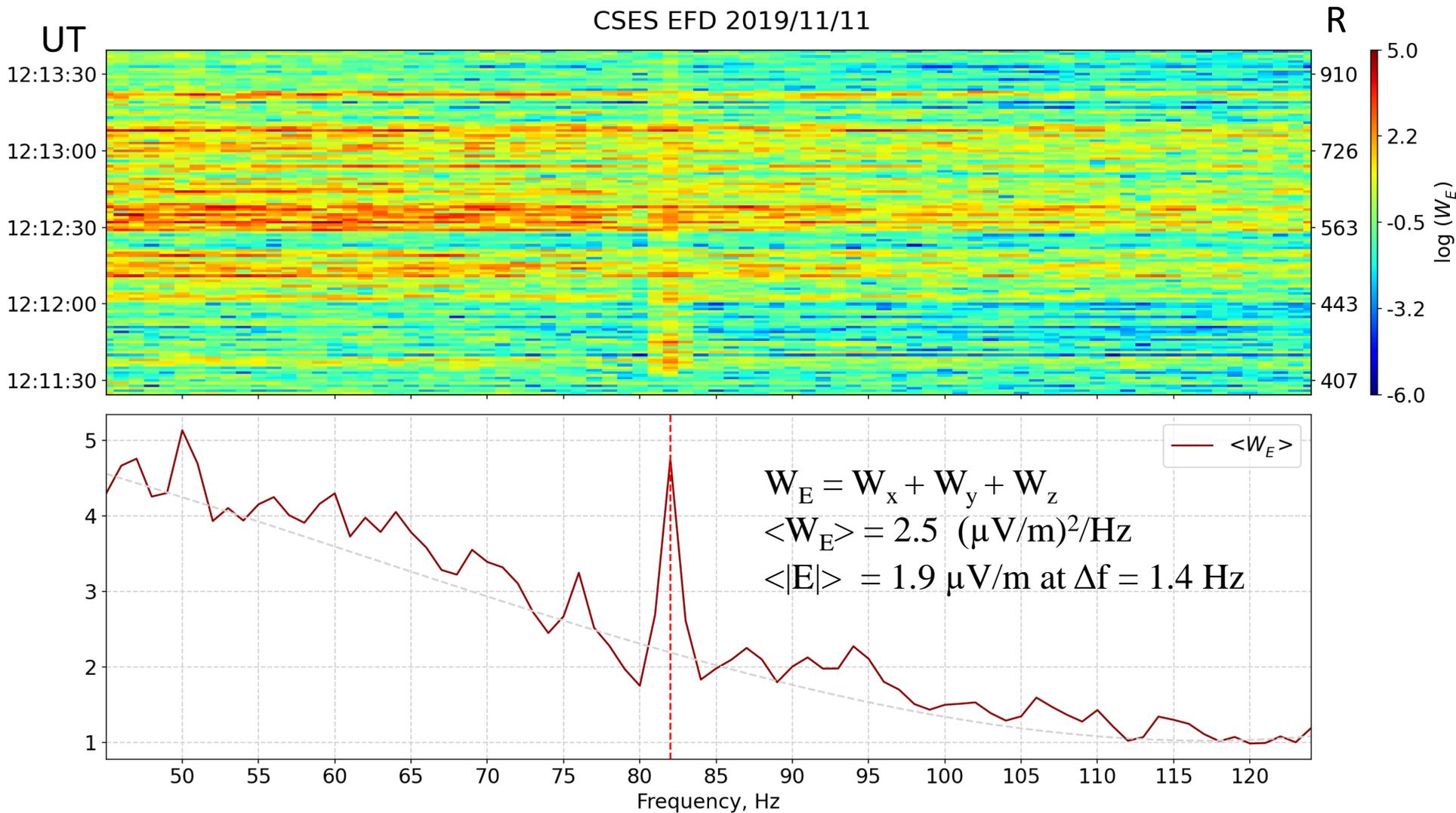
Черная линия обозначает проекцию траектории CSES.

Синим и бордовым пунктиром показаны диапазоны измерений EFD/SCM.

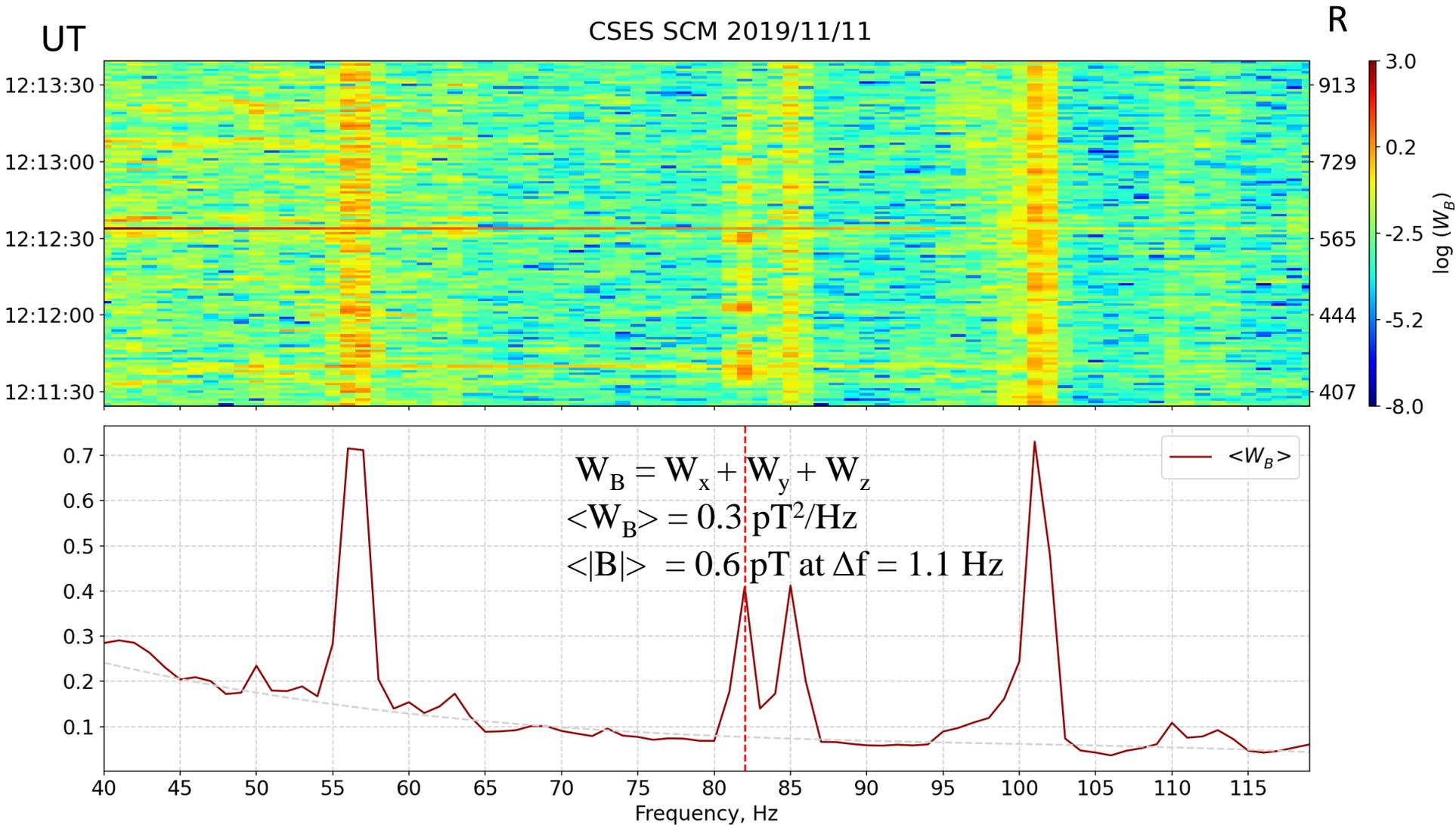
Сигнал 82Гц был зафиксирован с 12:11:30 до 12:13:30 UT (+3LT), на расстоянии от 400 до 900 км от источника.



Электрический компонент поля, измеренный EFD



Магнитный компонент поля, измеренный SCM

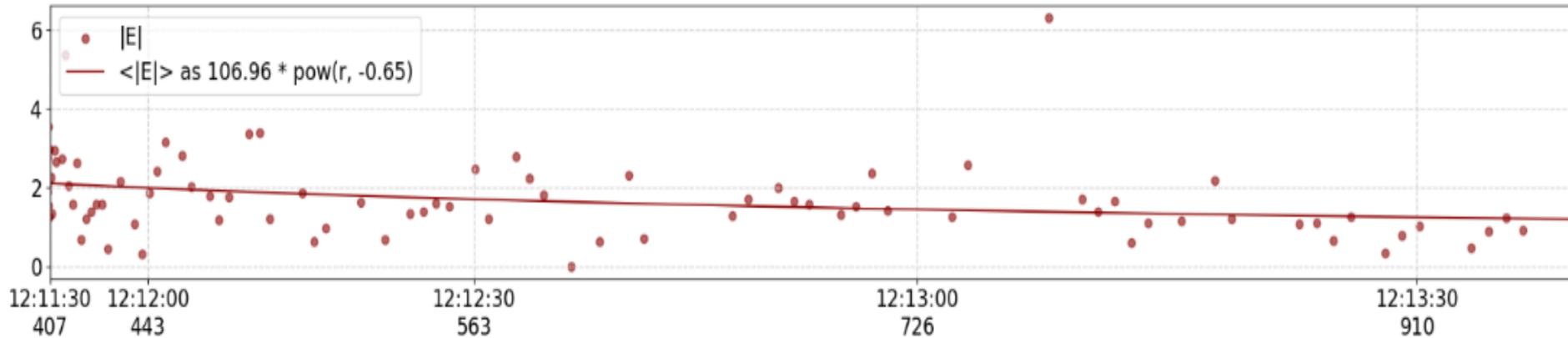


Измерения магнитометра сильно зашумлены помехами от другого оборудования. 6

Ослабление амплитуды сигнала

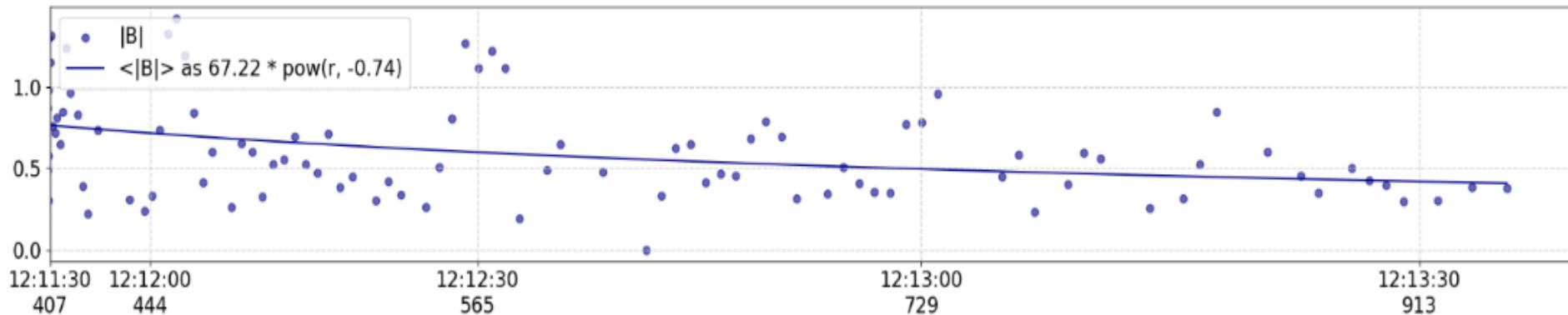
Ослабление амплитуды электрической компоненты в зависимости от расстояния R от источника описывается формулой: $E(R) \sim R^S \rightarrow S = -0.65$

CSES 2019/11/11 $|E|$ in [$\mu V/m$] for 82.0 Hz

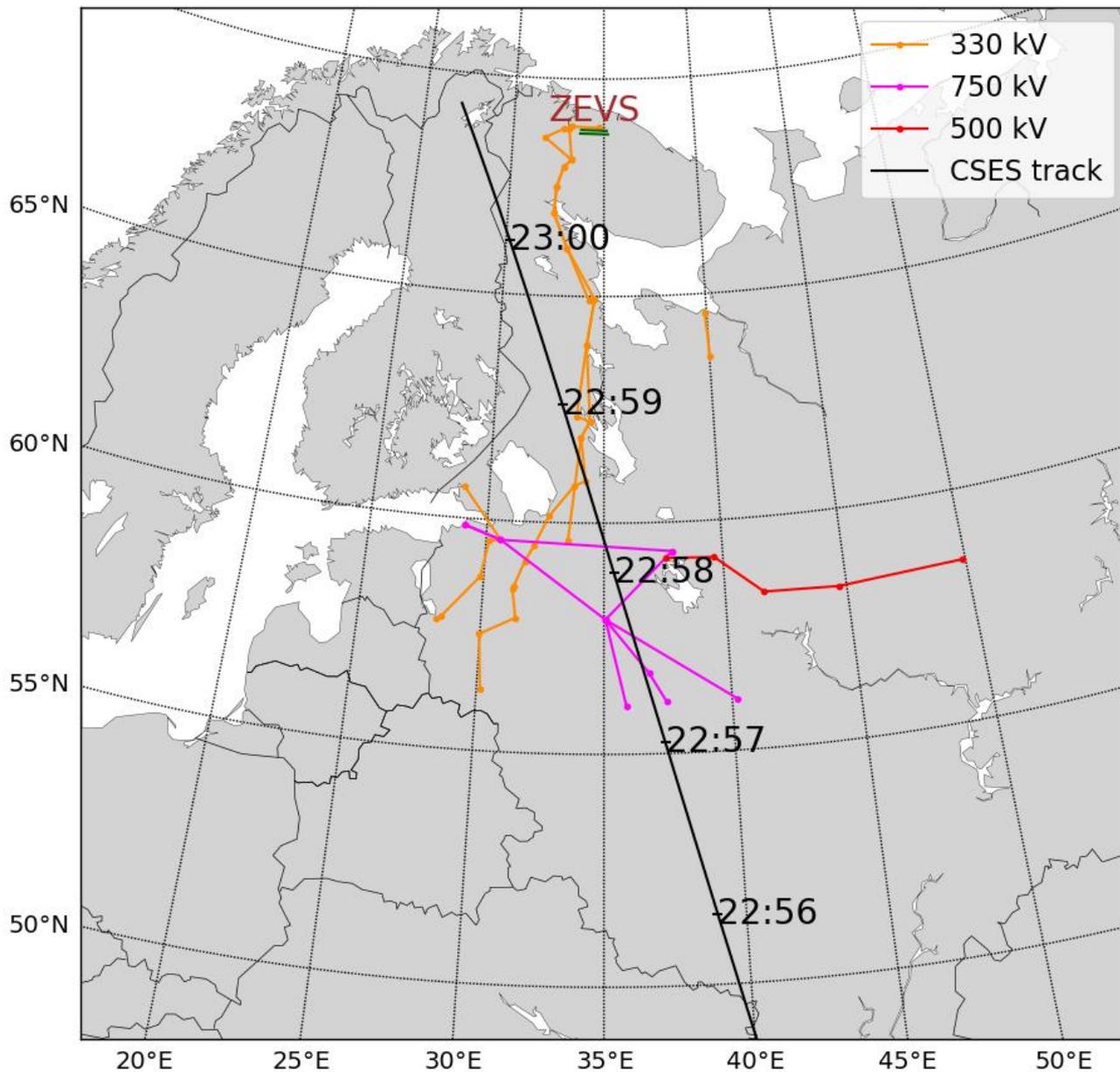


Аналогичная зависимость для магнитной компоненты: $B(R) \sim R^S \rightarrow S = -0.74$

CSES 2019/11/11 $|B|$ in [pT] for 82.0 Hz



Одновременный прием УНЧ излучения ЗЕВС и ЛЭП 21 марта 2022г.



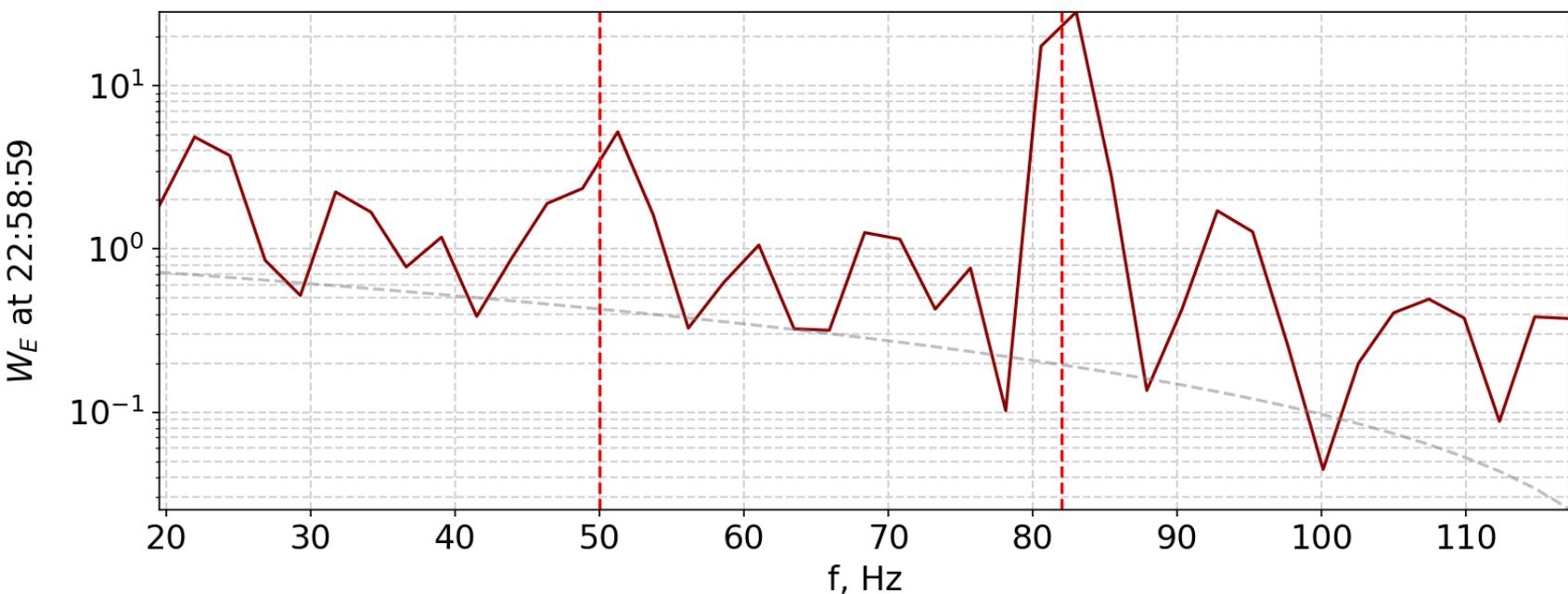
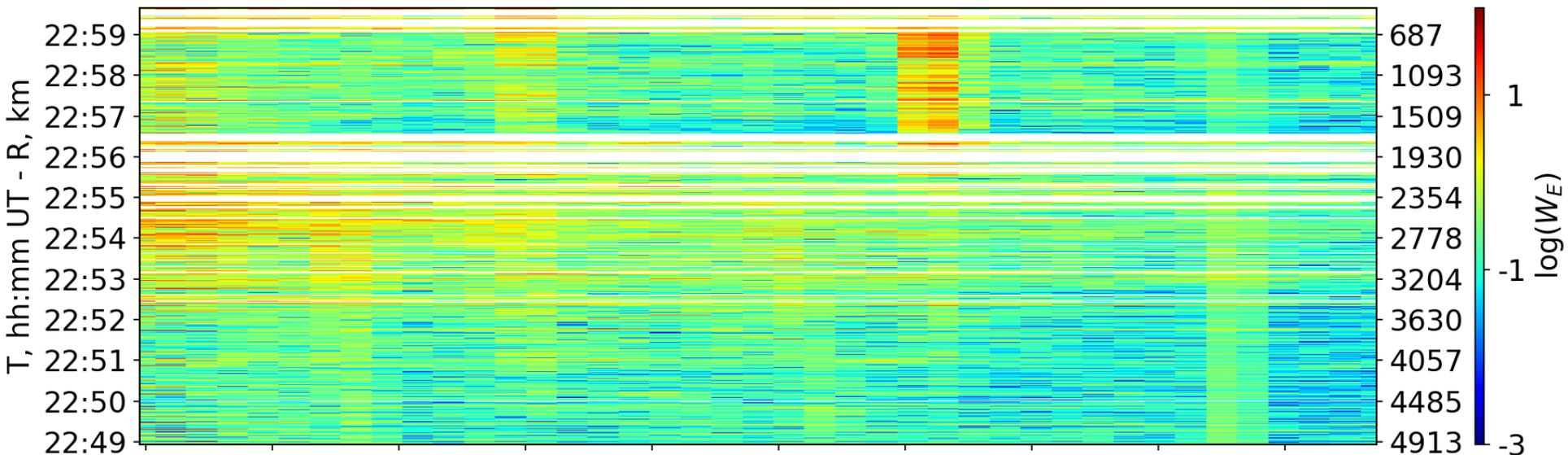
ЛЭП Северный Транзит
330кВ

ЛЭП Ленинградской
АЭС 750кВ

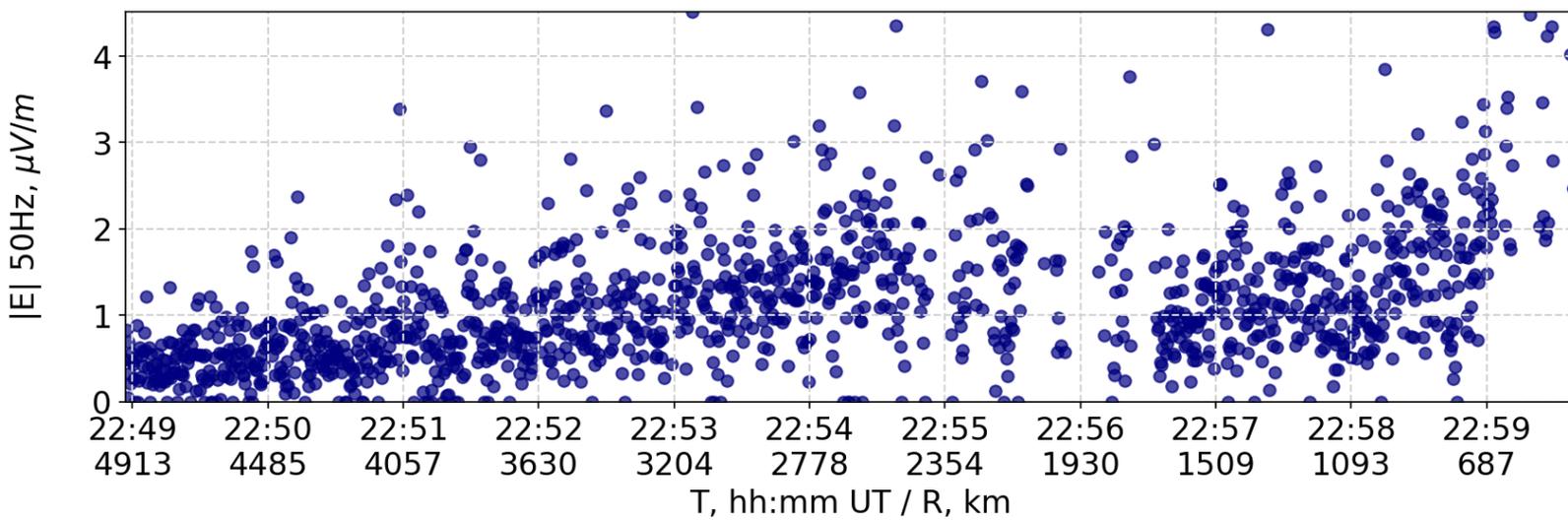
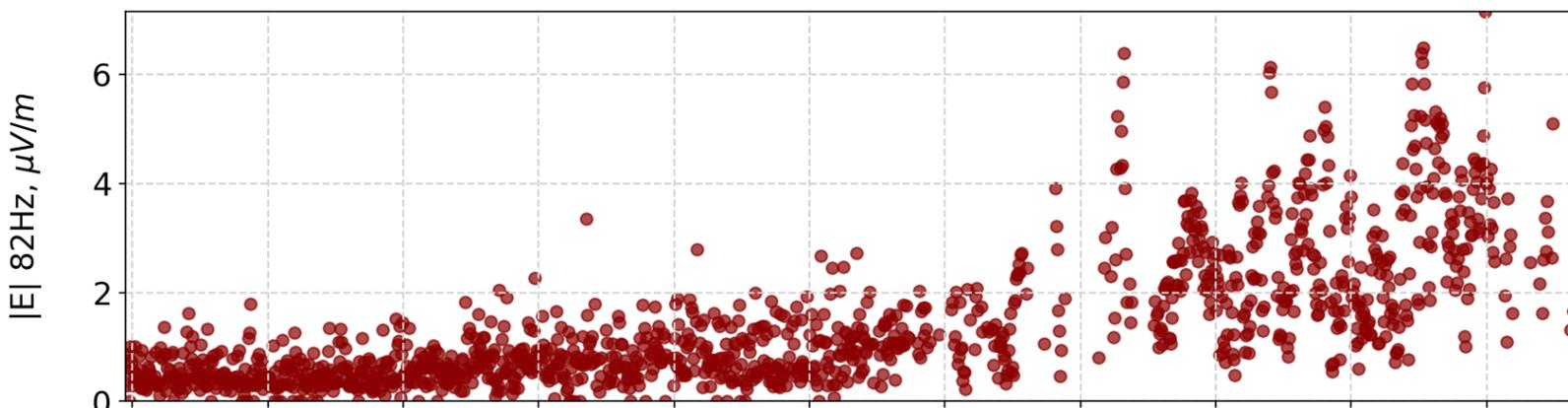
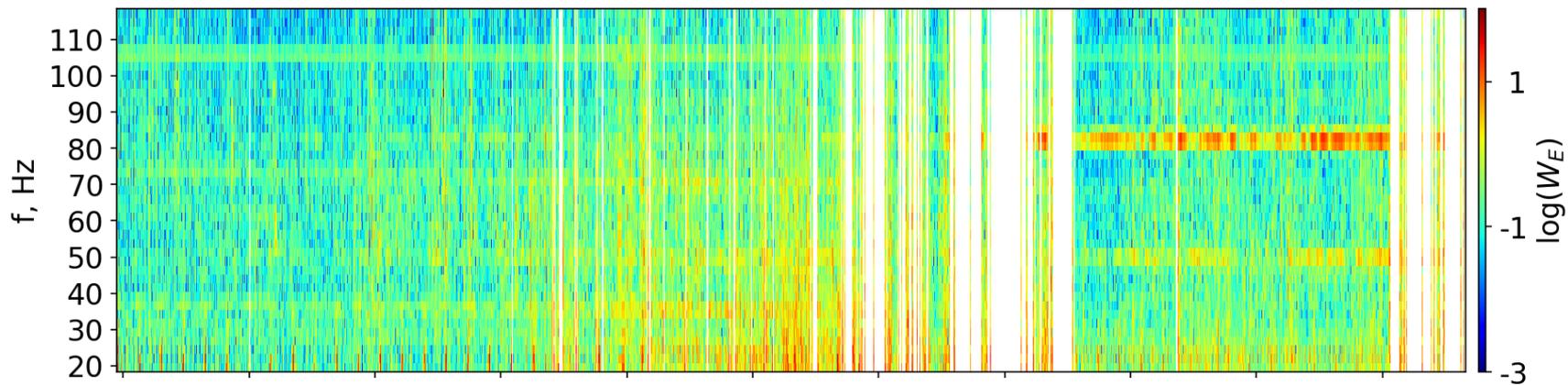
ЛЭП Северсталь 500кВ.

Сигналы 50 и 82 Гц
зафиксированы с
22:56:00 UT (+3LT) до
22:59:30 UT, на
широтах от 55 до 65
градусов С.Ш.

CSES EFD 2022.03.21 orbit 29321



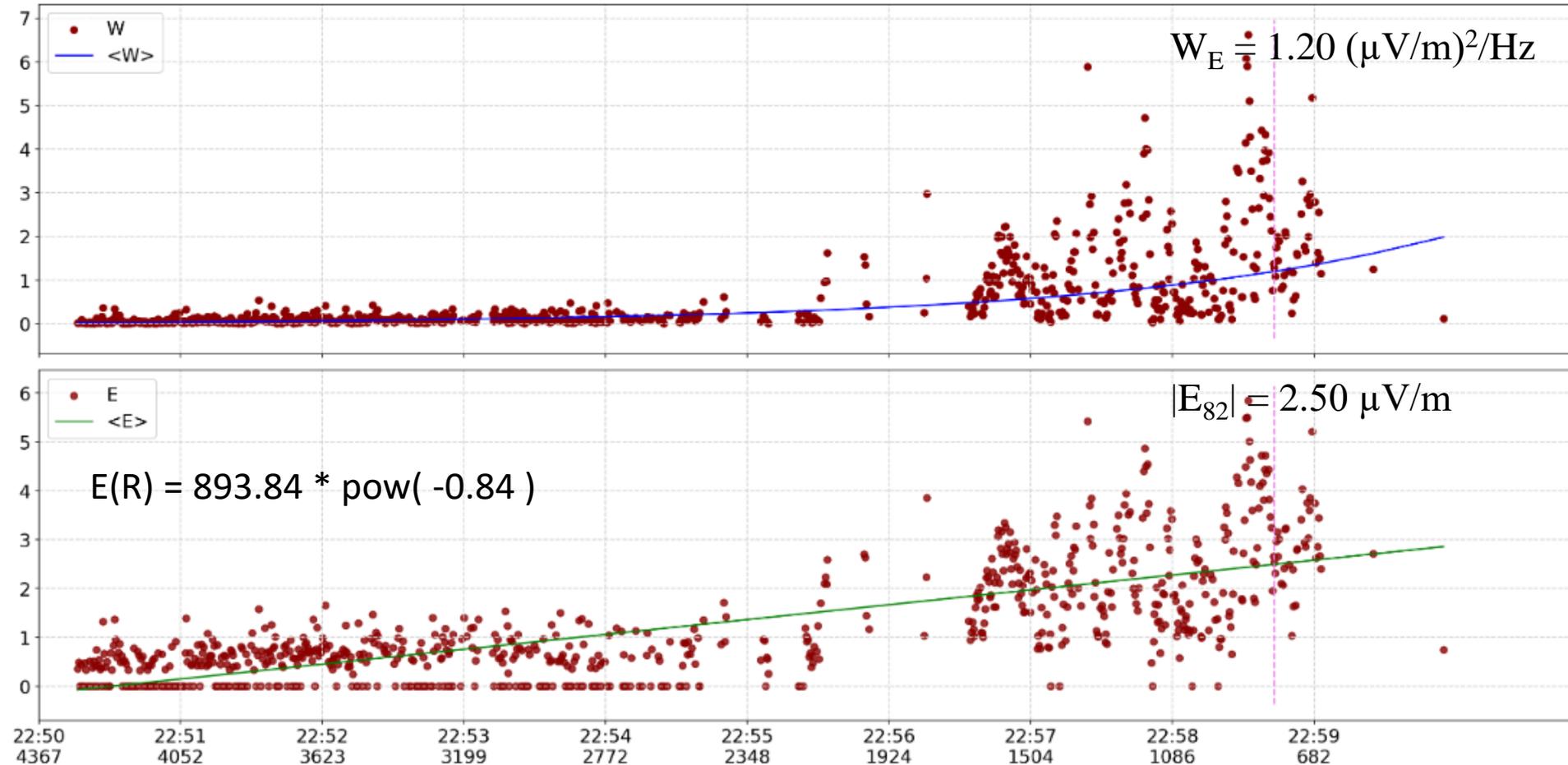
CSES EFD 2022.03.21 orbit 29321



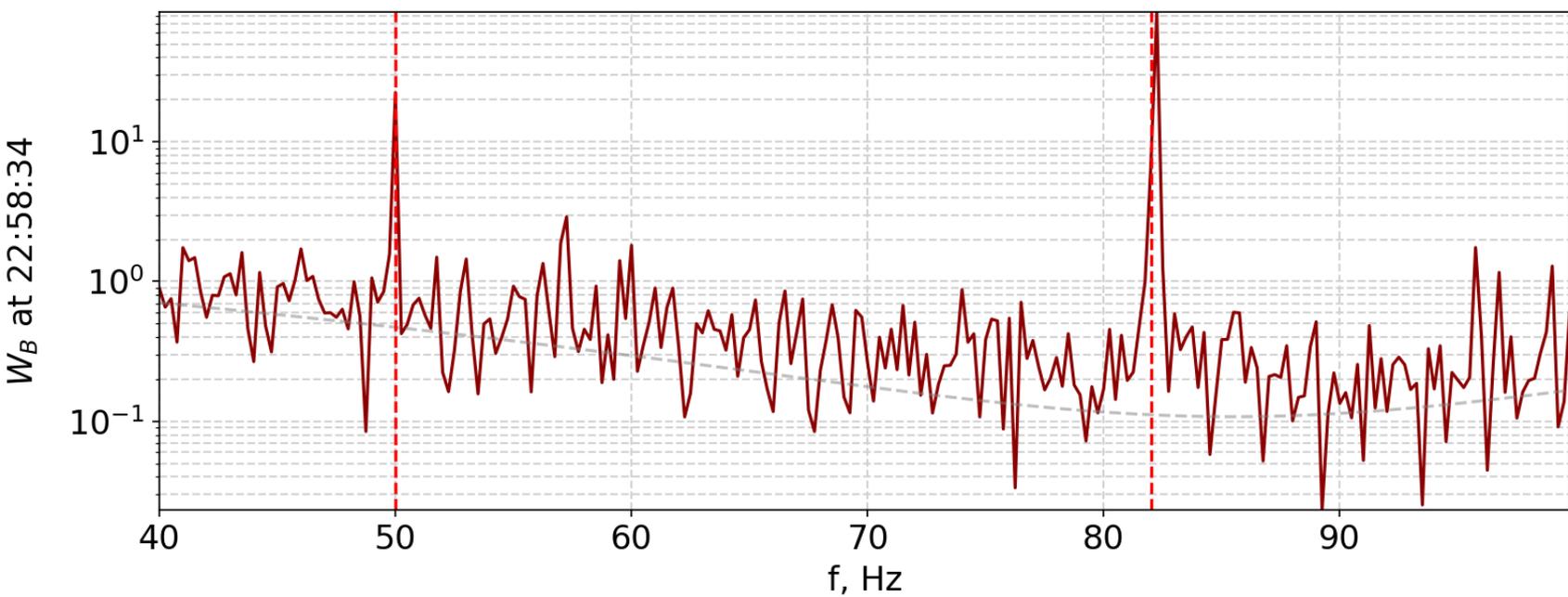
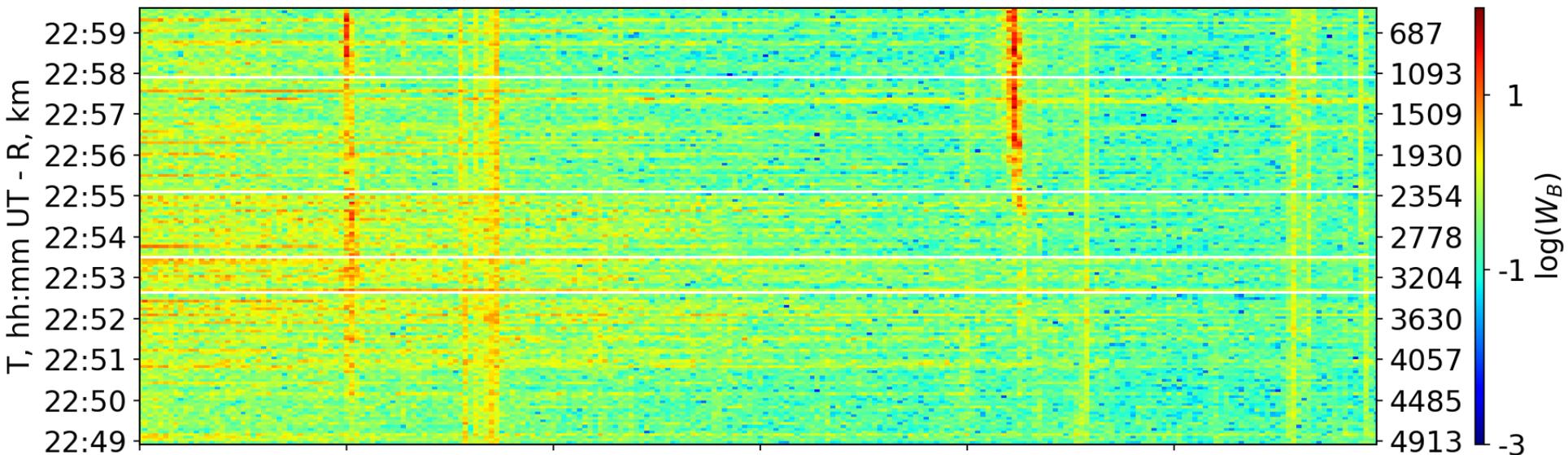
Затухание амплитуды электрической компоненты сигнала 82Гц

Сигнал 82 Гц прослеживался до расстояния в 2000 км от источника. Фиолетовым пунктиром отмечено расстояние в 800 км и соответствующие значения W_E и E .

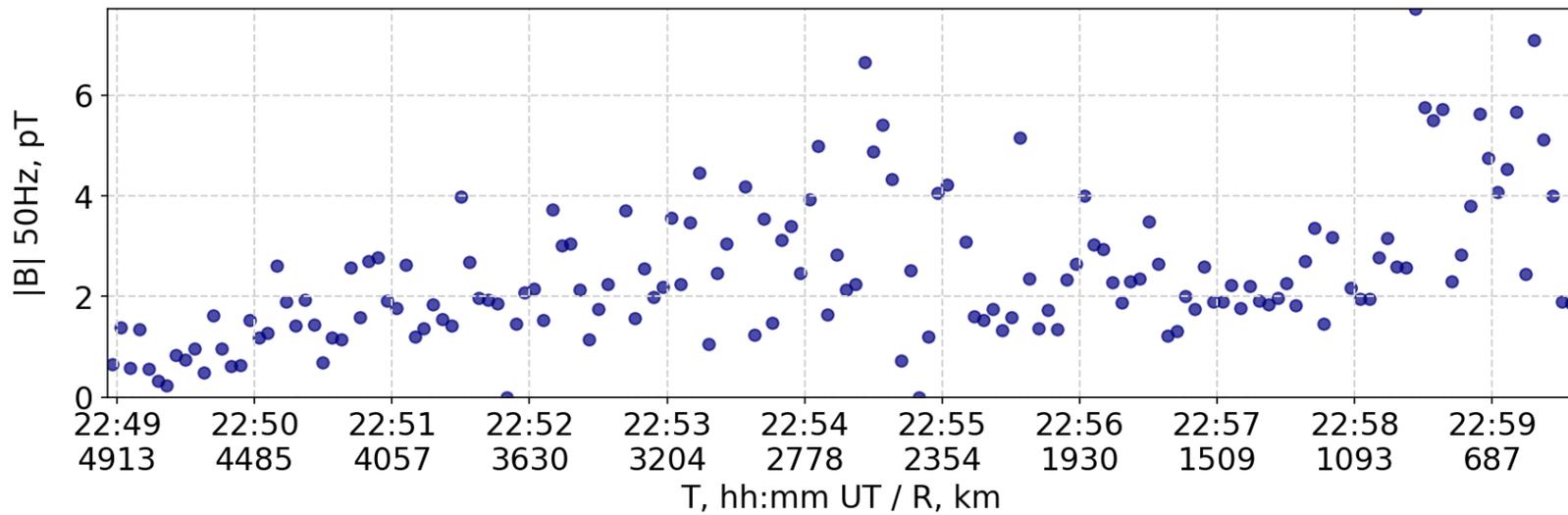
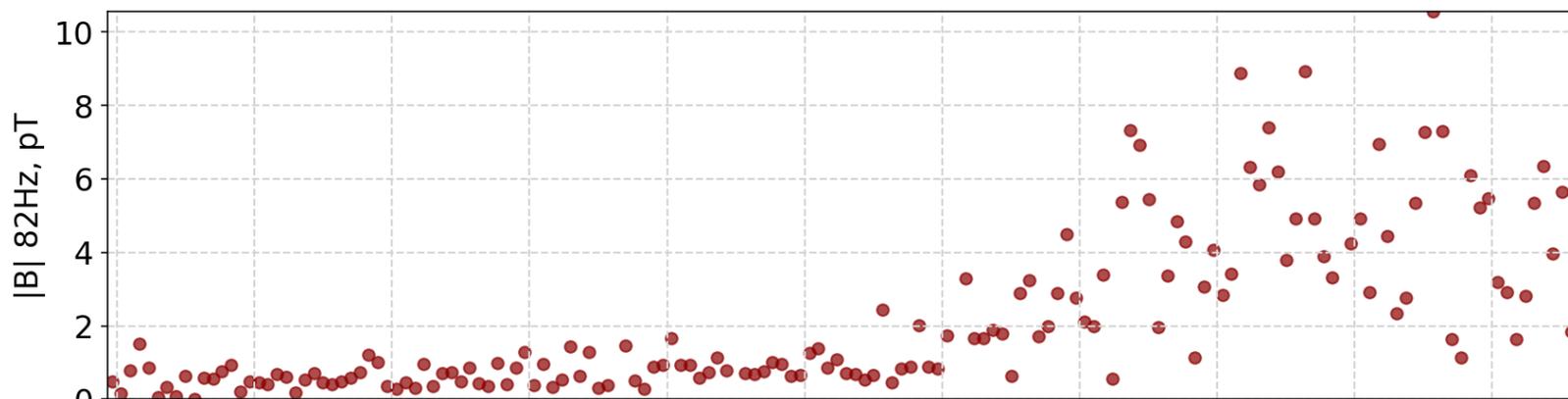
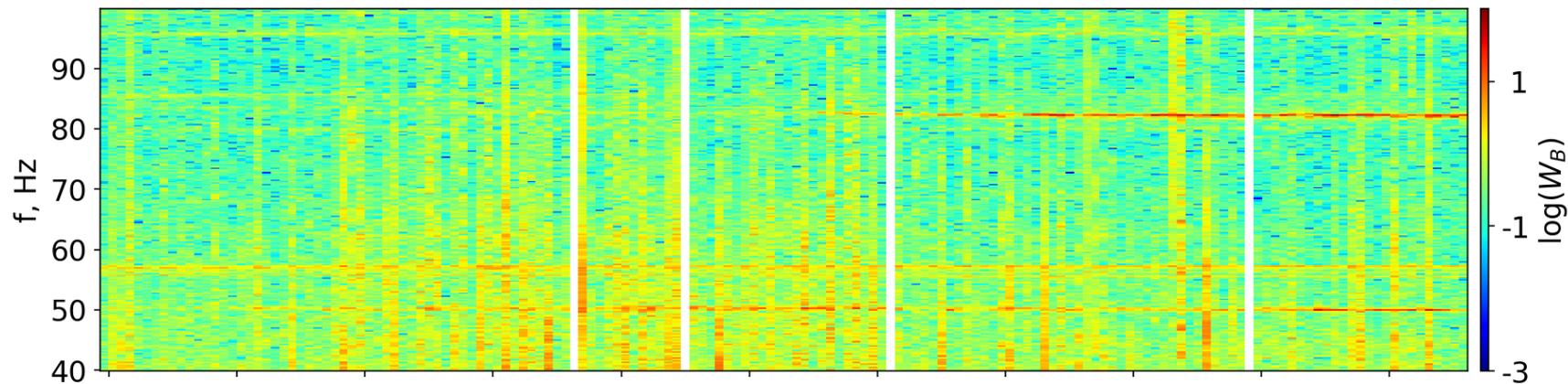
CSES, 2022/03/21, W in $[(\mu V/m)^2/Hz]$, E in $[\mu V/m]$ for 82.0 Hz



CSES SCM 2022.03.21 orbit 29321



CSES SCM 2022.03.21 orbit 29321



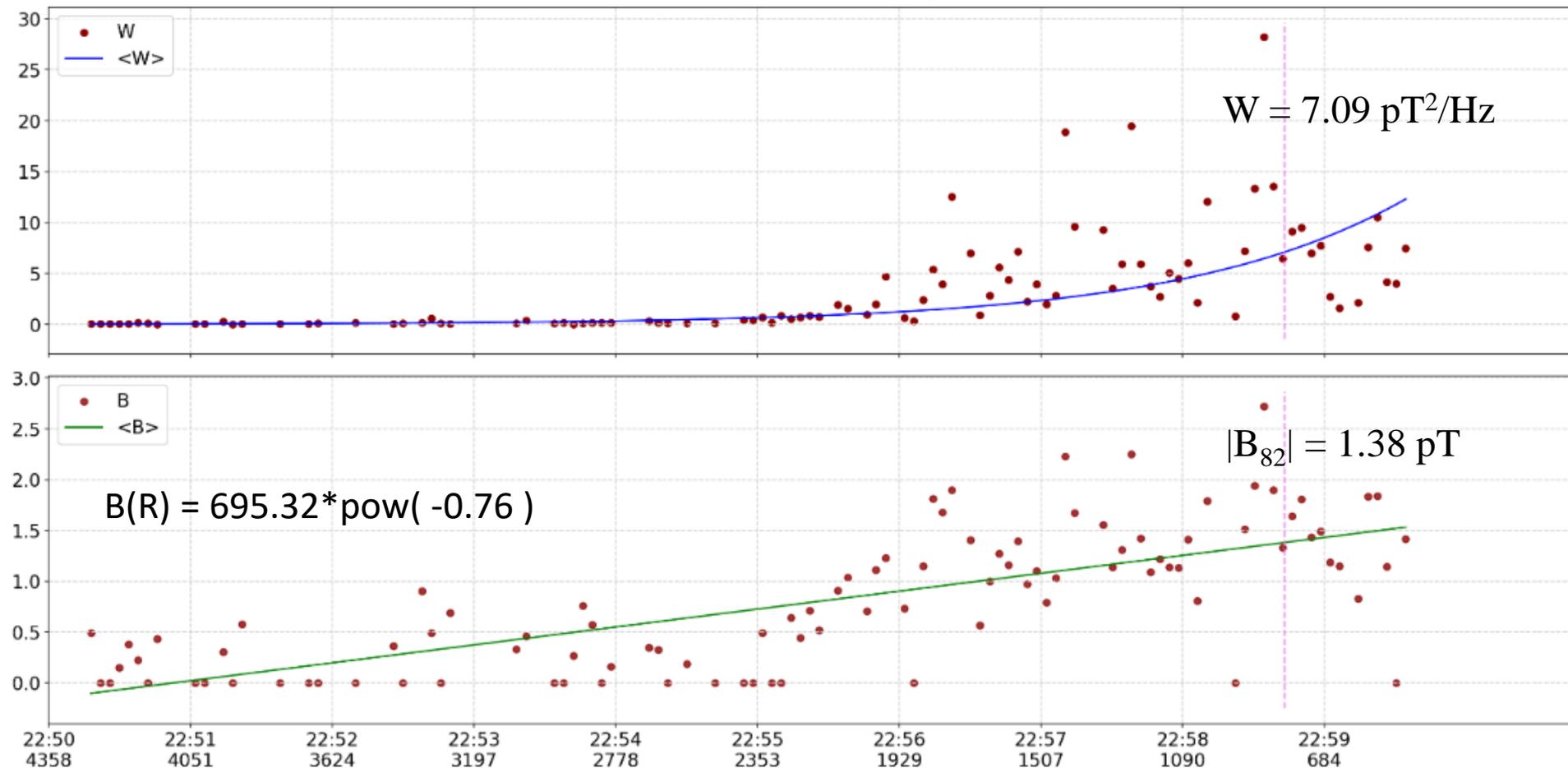
22:49 22:50 22:51 22:52 22:53 22:54 22:55 22:56 22:57 22:58 22:59
 4913 4485 4057 3630 3204 2778 2354 1930 1509 1093 687

T , hh:mm UT / R, km

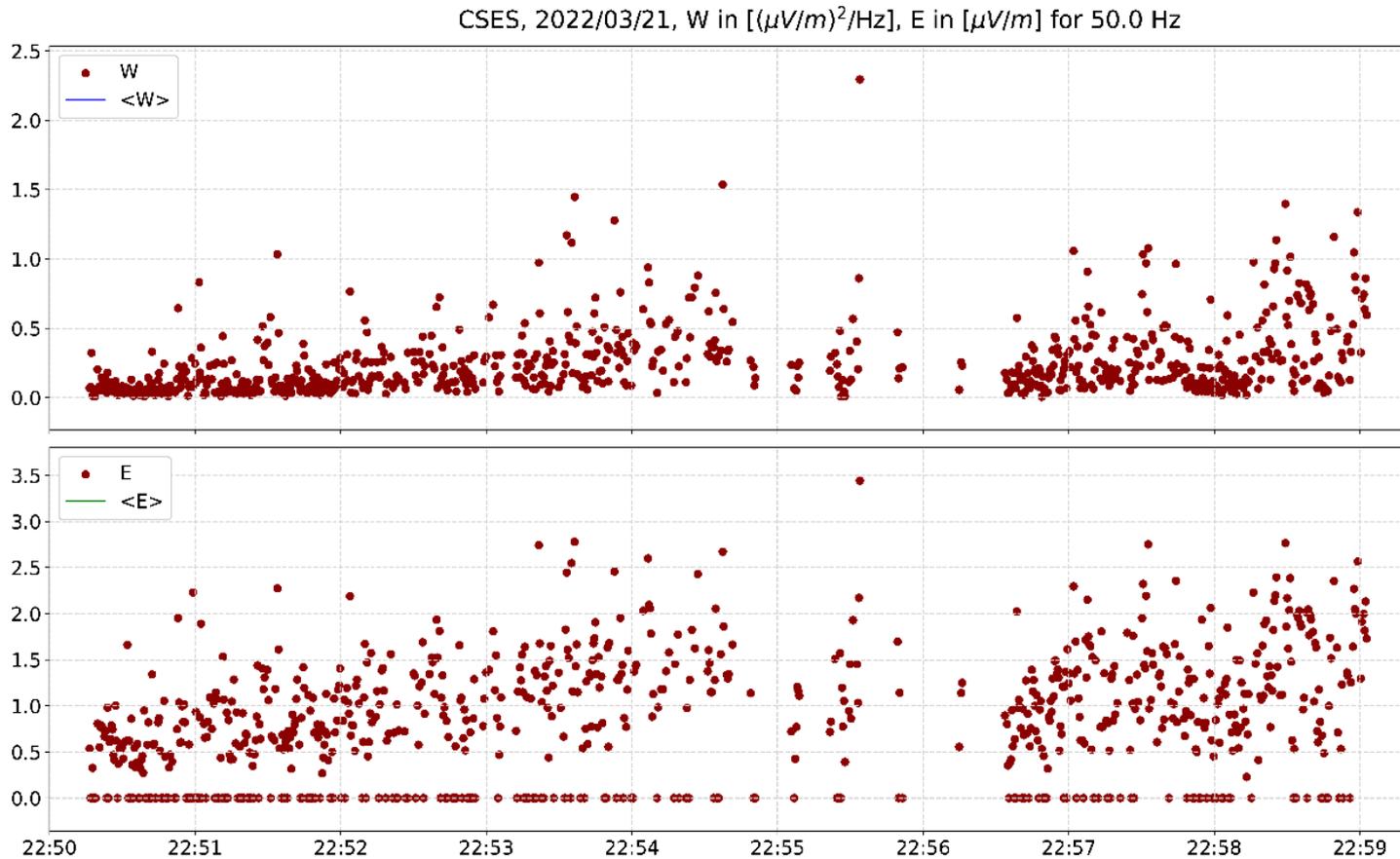
Затухание амплитуды магнитной компоненты сигнала 82Гц

Магнитная компонента наблюдалась на частотах 82.0-82.25Гц, затухание также медленное, сигнал виден до 2000 км от источника. Фиолетовым пунктиром показано расстояние 800 км от источника, рядом указаны соответствующие значения W_B и B .

CSES, 2022/03/21, W in [pT^2/Hz], B in [pT] for 82.25 Hz



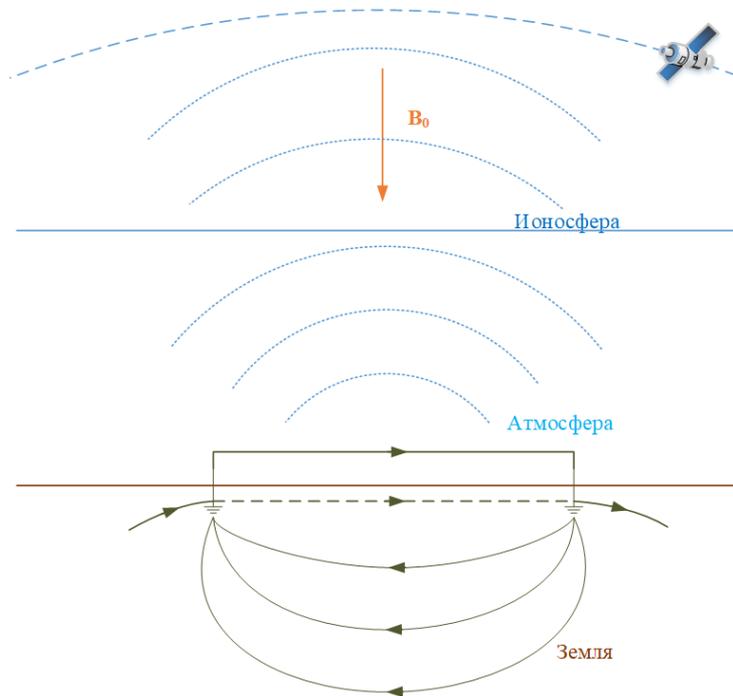
Зависимость полной спектральной мощности и амплитуды электрической компонент излучения на частоте 50 Гц от времени



До 22:58 UT спутник проходил над ЛЭП 750 кВ, а затем его орбита проходила примерно вдоль ЛЭП на 330 кВ «Северный Транзит».

На графике выделяются два «облака» точек: перестройка пространственной структуры излучения при переходе спутника от одной ЛЭП к другой.

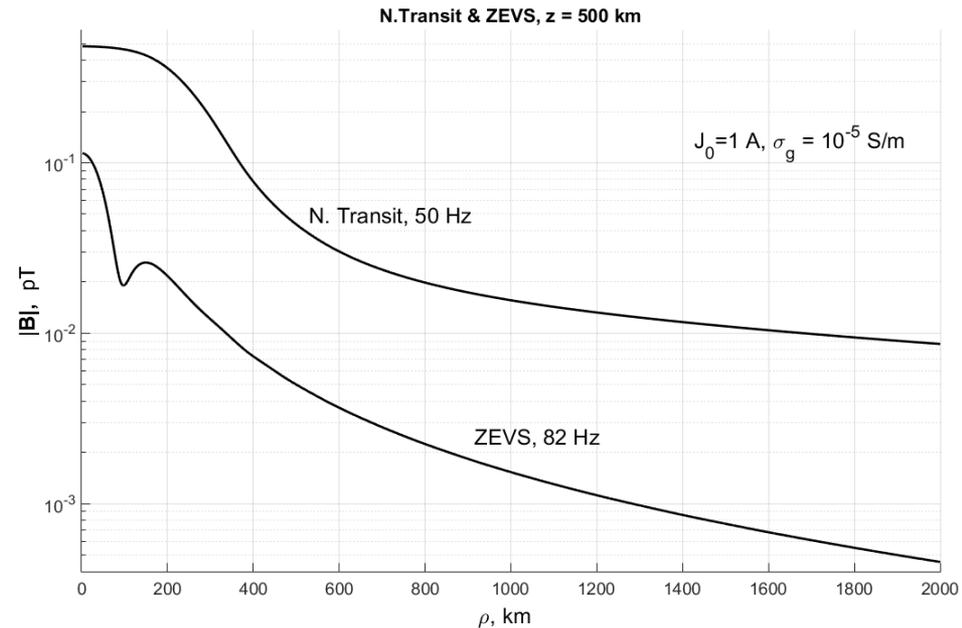
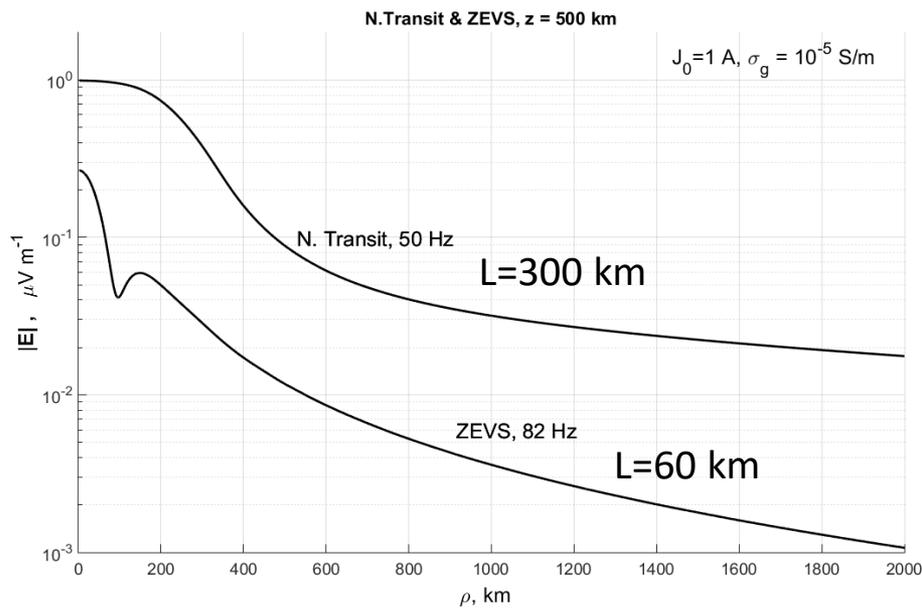
Модель возбуждения УНЧ волн в ионосфере горизонтальным проводником с током конечной длины



*Fedorov E.N. et al., Radiophysics and
Quantum Electronics, Vol. 65, No. 9,
2023.*

- ЭМ поле возбуждается горизонтальным заземленным проводником длиной 60 км, в котором течет переменный ток с частотой ω .
- Для учета токов растекания в земле с проводимостью 10^{-5} С/м источник формально погружается в Землю на малую глубину h .
- Проводимость атмосферы меняется с высотой экспоненциально.
- Параметры ионосферы выше 80 км задаются из модели IRI.
- Геомагнитное поле направлено вертикально $I=90^\circ$.
- Используется формализм, основанный на введении потенциалов поля. Ток возбуждения делится на потенциальную и вихревую составляющие, генерирующие ТЕ (поперечные электрические) и ТМ (поперечные магнитные) моды.
- Решаются уравнения Максвелла для точечного горизонтального токового диполя.
- Поле источника конечной длины вычисляется путем суммирования полей, создаваемых отдельными точечными диполями.
- Расчетные поля нормируются на величину тока источника $J=1$ А.

Пространственная структура амплитуд E и B поля, создаваемого ЗЕВС (60 км) и «Северным Транзитом» (300 км), для номинального тока $J_0 = 1$ А



Максимальная амплитуда электрического поля E над источником ($R = 0$ км):

$$|E_{50}| \approx 1.0 \mu\text{V/m}, |E_{82}| \approx 0.15 \mu\text{V/m}$$

При $R = 800$ км:

$$|E_{50}| \approx 0.04 \mu\text{V/m}, |E_{82}| \approx 0.005 \mu\text{V/m}$$

Максимальная амплитуда магнитного поля B над источником ($R = 0$ км):

$$|B_{50}| \approx 3.5 \text{ pT}, |B_{82}| \approx 0.11 \text{ pT}$$

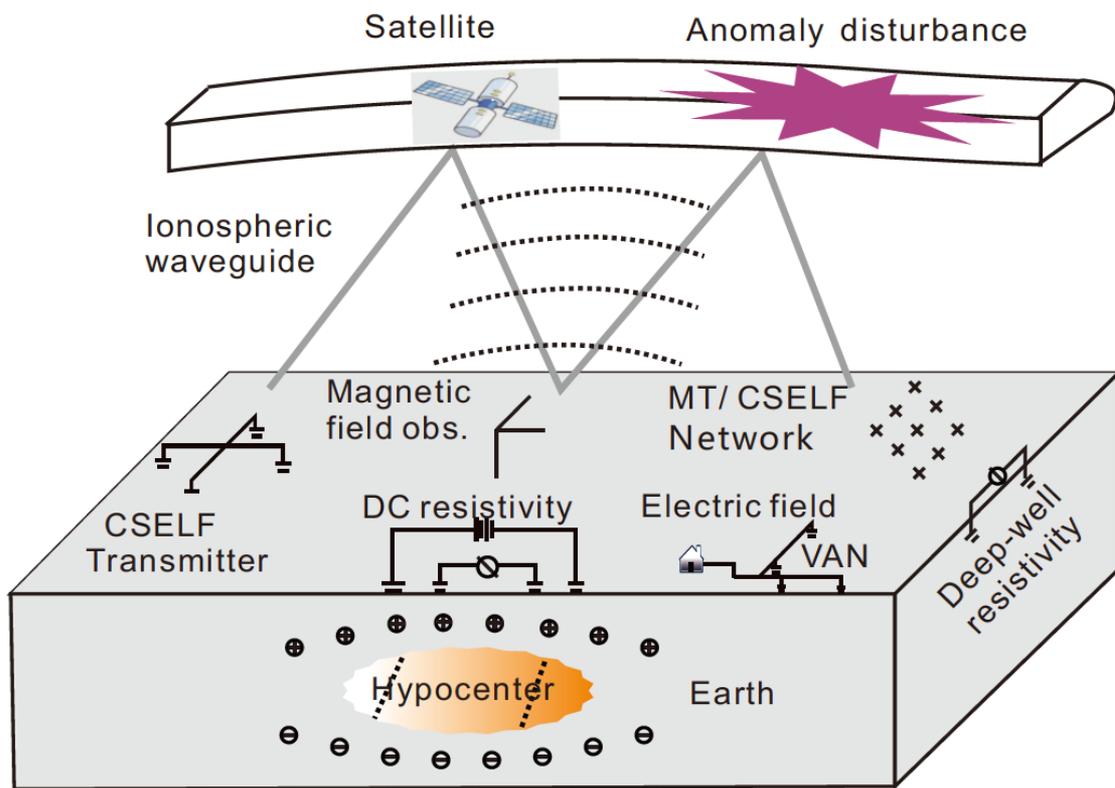
При $R = 800$ км:

$$|B_{50}| \approx 0.02 \text{ pT}, |B_{82}| \approx 0.002 \text{ pT}$$

Перспективы дальнейших исследований

Помимо описанных, есть возможность проведения активных экспериментов на более современных установках, способных генерировать искусственное излучение УНЧ диапазона, проникающее в ионосферу:

- FENICS на Кольском п-ве, включающая ЛЭП длиной 100 км;
- Установки CSELF (Control Source Extremely Low Frequency) и WEM (Wireless Electromagnetic Method) в Китае, в состав которых входят две антенны размерами 60 на 100 км.



За счет резонансного взаимодействия с частицами, ЭМ волны УНЧ диапазона (доли Гц) могут вызывать высыпания электронов радиационных поясов в атмосферу, тем самым, снижая интенсивность потоков «электронов-убийц» до уровня, безопасного для бортовой спутниковой аппаратуры.

ВЫВОДЫ

- Сигнал ЗЕВС зарегистрирован бортовой аппаратурой спутника CSES на расстоянии до **900 км** от источника 11.11.2019 и до **2000 км** 21.03.2022.
- ЭДС установки ЗЕВС (~100 А) для возбуждения относительно-сильного сигнала на частоте 82 Гц в верхней ионосфере.
- ЛЭП «Северный Транзит» с несбалансированным током ~ **1-2 А** также является источником излучения на частоте 50 Гц, достаточно интенсивного для регистрации бортовой аппаратурой спутника CSES.
- ЭМ «аура» нашей планеты в 21 веке зависит уже не только от природных процессов, но и антропогенной активности, связанной с развитием промышленных мощностей. Интенсивность излучения ЛЭП, проникающего в околоземное космическое пространство, существенно увеличилась после появления сверх-высоковольтных ЛЭП (750 и 1000 кВ), количество и общая длина которых постоянно растет.
- Развитие промышленности, разрастание промышленных зон, рост потребления электроэнергии во всем мире стимулирует ЭМ «загрязнение» околоземного космоса. **Последствия такого «загрязнения» ближнего космоса сверх-мощными ЛЭП предстоит исследовать и оценить.**

Спасибо за внимание!

Контакты:

Вячеслав Пилипенко, доктор ф.-м. н., профессор,
зав.лаб 402 ИФЗ РАН – space.soliton@gmail.com

Наталья Савельева, МНС ИФЗ РАН –
nasa2000@yandex.ru

- Fedorov E.N., Mazur N.G., Pilipenko V.A. Electromagnetic Field in the upper ionosphere from horizontal ELF ground-based transmitter of finite length // Radiophysics and Quantum Electronics, Vol. 65, No. 9, February, 2023 (Russian Original Vol. 65, No. 9, September, 2022) DOI 10.1007/s11141-023-10245-z
- Fedorov E.N., Mazur N.G., Pilipenko V.A. Generation of artificial ULF/ELF electromagnetic emission in the ionosphere by horizontal ground-based current system. ESS Open Archive . August 09, 2022. DOI: 10.1002/essoar.10512117.1
- Fedorov, E. N., Mazur, N. G., Pilipenko, V. A., & Vakhnina, V. V. (2023). Generation of artificial ULF/ELF electromagnetic emission in the ionosphere by horizontal ground-based current system. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 128, e2023JA031590. <https://doi.org/10.1029/2023JA031590>
- Pilipenko V.A., Parrot M., Fedorov E.N., Mazur N.G. Electromagnetic field in the upper ionosphere from ELF ground-based transmitter // J. Geophys. Res. V. 124. 2019. <https://doi.org/10.1029/2019JA026929>
- V. Pilipenko, S. Zhao, N. Savelieva et al., ELF emission in the topside ionosphere from the ZEVS transmitter detected by CSES satellite, Advances in Space Research, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.07.074>