ИКИР ДВО РАН

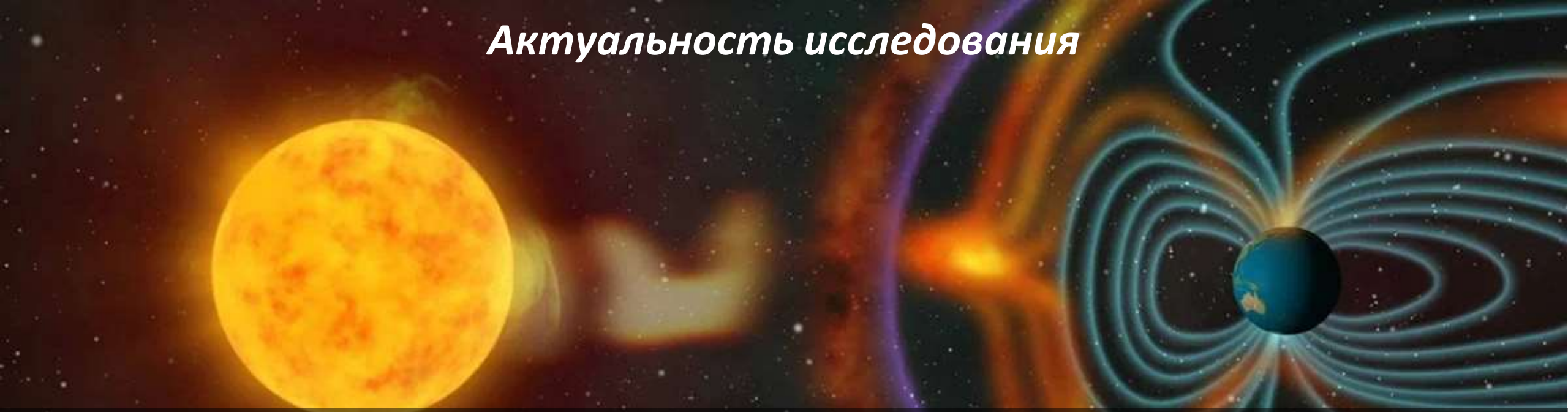
ФГАУ «ВИТ «ЭРА»

Анализ вариаций интенсивности потока галактических космических лучей в периоды повышенной авроральной активности и магнитных бурь

Мандрикова О.В., Мандрикова Б.С., Спирин М.С.

«Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса - 2026»

Актуальность исследования



Исследование космических лучей является одной из важнейших задач астрофизики. Помимо этого, космические лучи активно используются в ряде прикладных исследований, связанных с космической погодой. Во время возмущений в околоземном космическом пространстве происходят значительные изменения в радиационных поясах, наблюдается деформация магнитосферы, сжатие радиационного пояса и смещение его максимальной протяжённости, что может приводить к сбоям в работе наземных и спутниковых технологических систем, особо актуальна тема космической погоды в арктической зоне, большая часть которой принадлежит Российской Федерации.

Поэтому проблема создания методов, обеспечивающих возможность проведения анализа и контроля состояния природной среды в режиме реального времени с приемлемой точностью приобретает особую актуальность.

Метод исследования

Модель вариаций ГКЛ

$$f(t) = R(t) + I(t) + e(t) = \underbrace{\sum_r S_r(t, \theta_r)}_{\text{Регулярная составляющая}} + \underbrace{\sum_m \sum_k p_{m,k} \Psi_{m,k}(t)}_{\text{Аномальная составляющая}} + \underbrace{e(t)}_{\text{Шум}},$$

Помеха — Полезный сигнал — Помеха

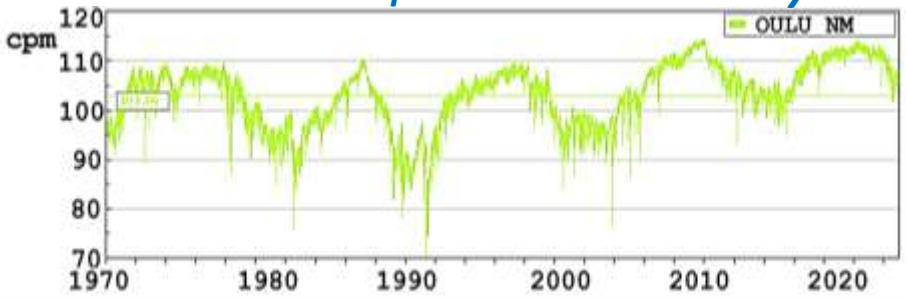
Решаемая задача:

Гипотеза H_0: $f(t) = \sum_r S_r(t, \theta_r) + e(t)$ – аномалии в вариациях ГКЛ нет (состояние s_0);

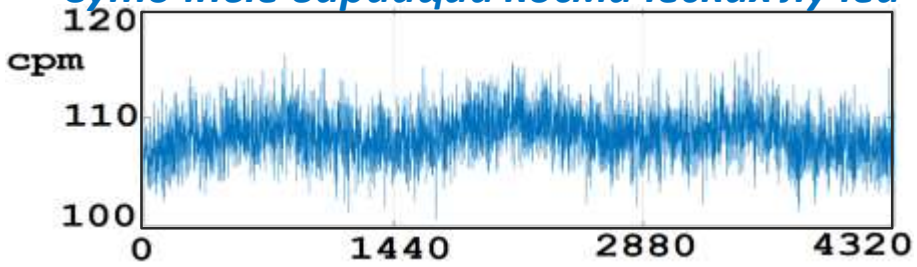
Гипотеза H_1: $f(t) = \sum_M \sum_k p_{M,k} \Psi_{M,k}(t) + e(t)$ – аномалия в вариациях ГКЛ есть (состояние s_1).

$R(t)$ включает периодичности разной амплитуды и длительности

11-летний цикл космических лучей



Суточные вариации космических лучей



$I(t)$ содержит разномасштабные аномалии в виде всплесков, серии пиков, ступенеобразной формы и др.

Фобруш-понижение



Аномальное повышение



Теоретические аспекты метода

Адаптация параметров к изменяющимся потокам данных:

данные содержат особенность в окрестности точки $t = n$ *на масштабе* k*, если* $|c_{k,n}|$ *удовлетворяет условию*

$$|c_{k,n}| > Qk^{q+0.5} = \Pi_k$$

тогда по критерию отношения

$$\frac{W(|c_{k,n}||\Gamma_1)}{W(|c_{k,n}||\Gamma_0)} \geq T_{k,n},$$

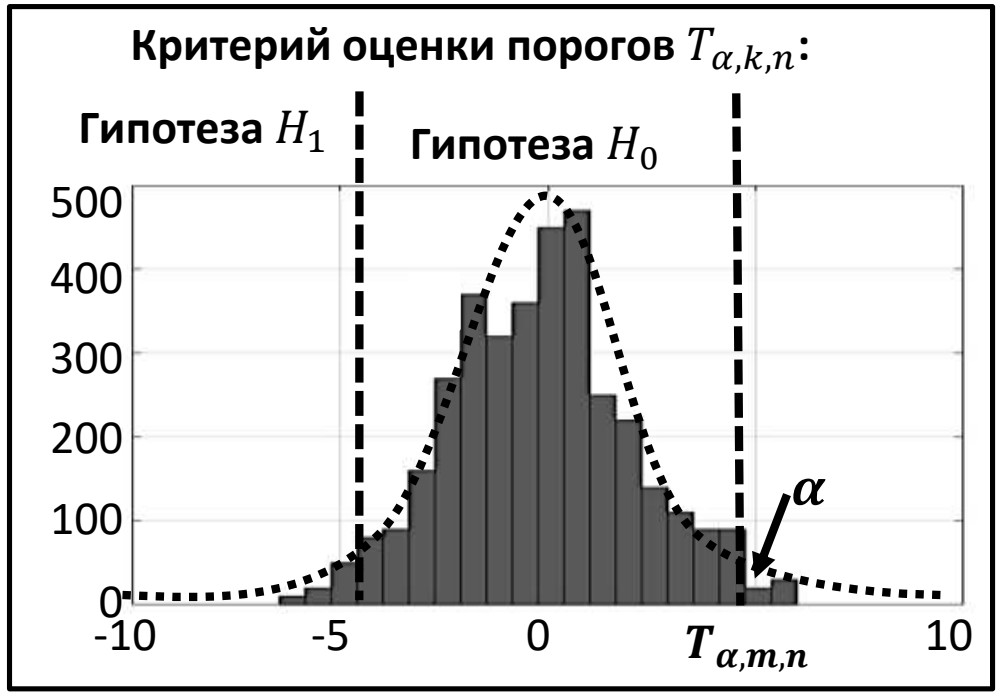
где $W(|c_{k,n}||\Gamma_0)$ *и* $W(|c_{k,n}||\Gamma_1)$ – плотности вероятностей $|c_{k,n}|$.

получаем, что наименьший риск дает оценка:

$$\hat{I}(t) = D_{A\Psi}^{best} f(t) = \sum_k \sum_n P_{T_{\alpha,k,n}}(c_{k,n}) \Psi_{k,n}(t),$$

где $P_{T_{\alpha,k,n}}(c_{k,n}) = \begin{cases} c_{k,n}, \text{если } |c_{k,n}| \geq T_{\alpha,k,n} \\ 0, \text{если } |c_{k,n}| < T_{\alpha,k,n} \end{cases}$, $T_{\alpha,k,n} = h_\alpha * \hat{\sigma}_{k,n}$

оценивается по критерию Неймана-Пирсона из условия $\int_I W(|c_{k,n}||\Gamma_0) d|c_{k,n}| = \alpha$*, где* α *– ошибка I рода.*



Преимущества:

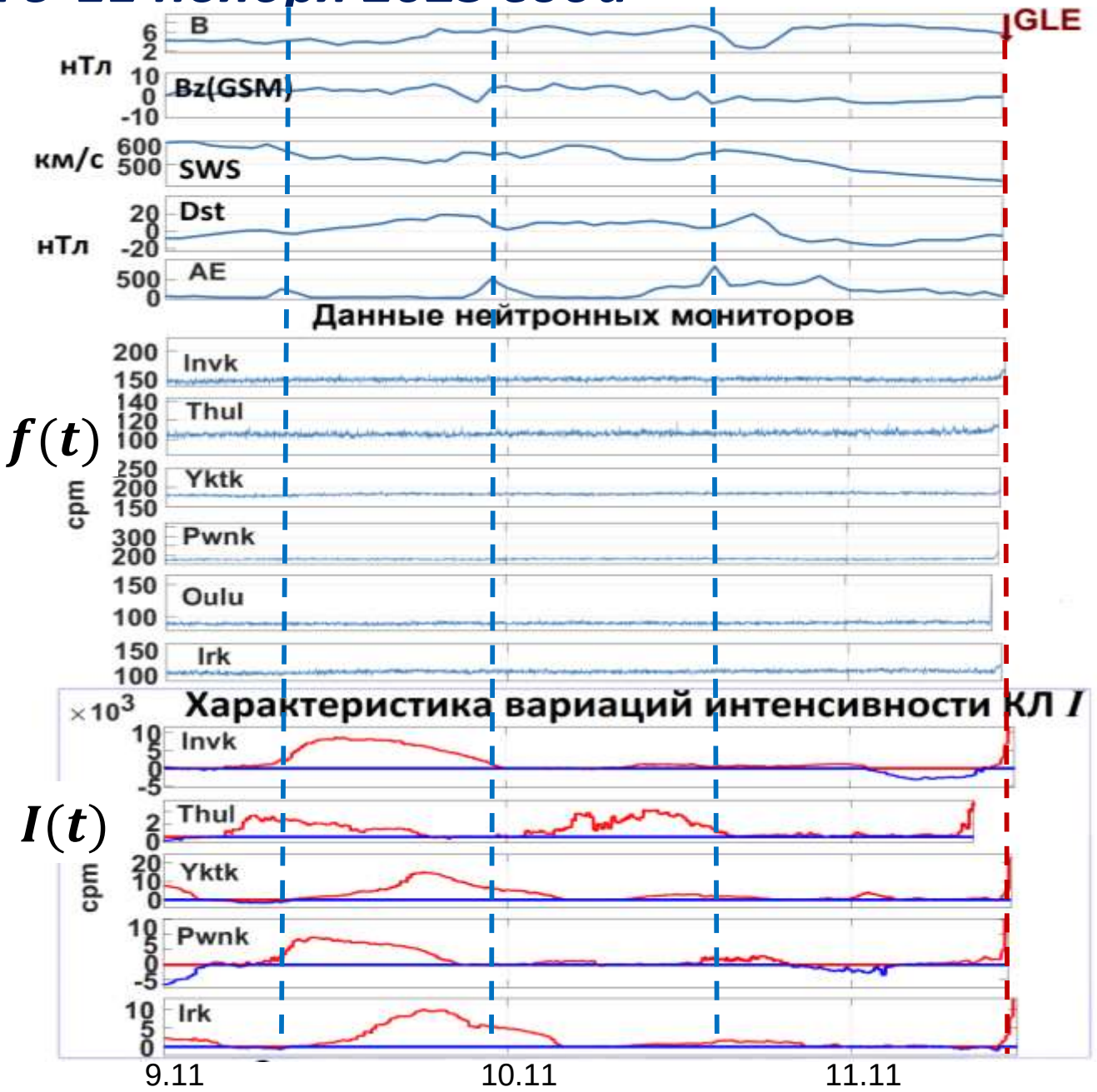
- получение близкого к оптимальному решения;
- адаптация порогов под аномалии разной формы;
- подавление коррелированного шума.

Анализ данных нейтронных мониторов во время расширенной суббури и начала GLE-события 9-11 ноября 2025 года

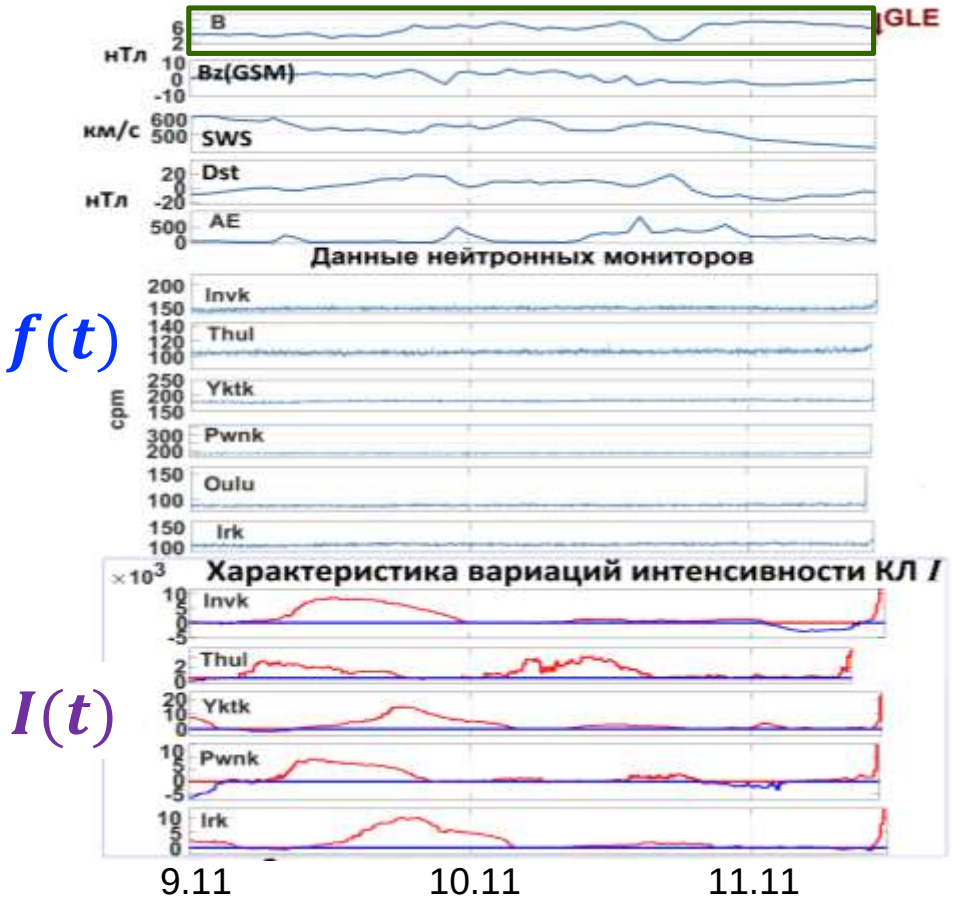
В начале периода состояние ОКП было спокойным. Во второй половине суток 9 ноября значения магнитного поля B и Dst-индекса возросли, Bz-компонента ММП повернулась на юг; к концу суток Кр=3. По результатам метода, на всех станциях НМ возникло аномальное повышение интенсивности ГКЛ длительностью около 17 ч.

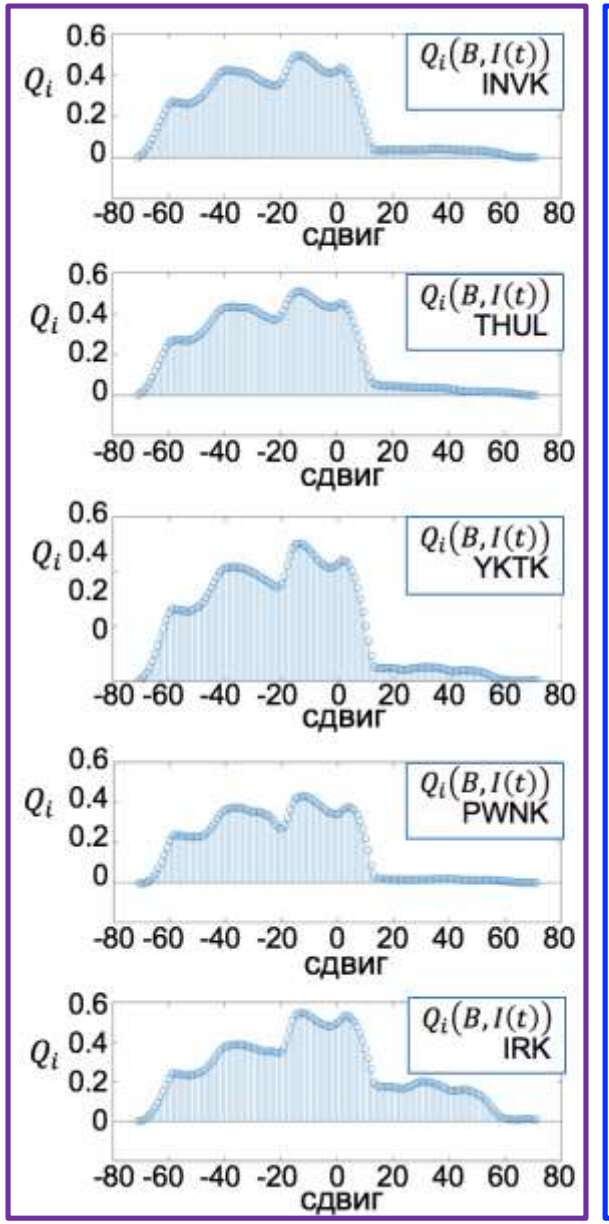
10 ноября состояние ОКП стало неустойчивым: Кр = 4, AE достиг значения 825 нТл при одновременном снижении Dst. По результатам метода, возникло аномальное повышение интенсивности ГКЛ с 3:00 UT на ст. Туле (~15 ч). В 13:00 UT на ст. Новосибирск отмечено начало магнитной бури.

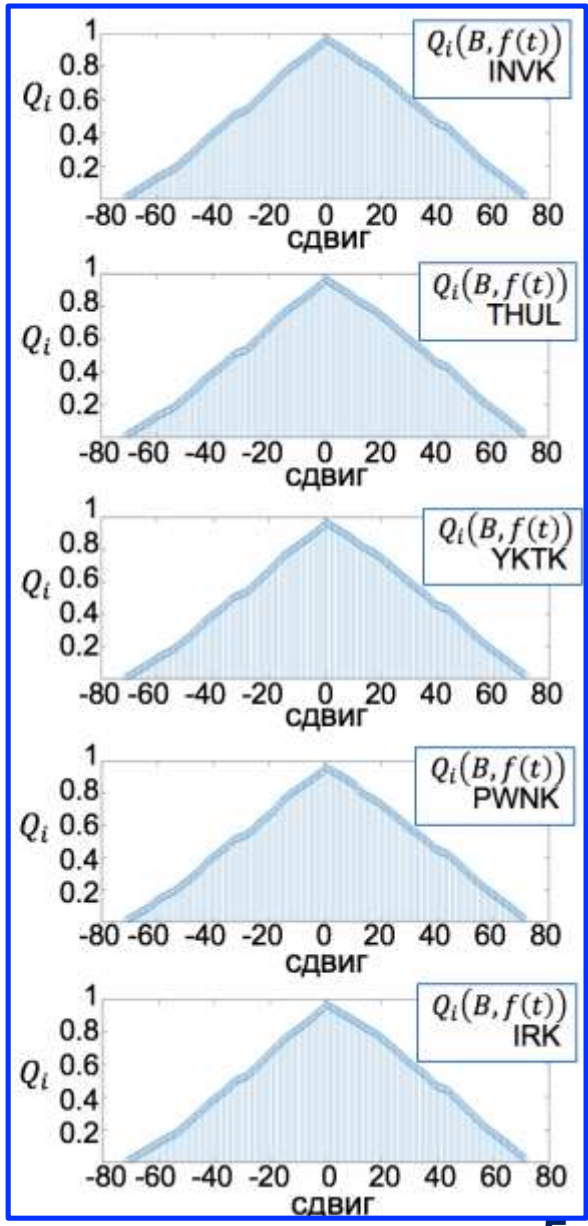
11 ноября в 10:10 UT зарегистрировано начало GLE77, которое, по результатам метода, сопровождалось резким ростом интенсивности ГКЛ: 8:50 UT (Туле), 09:20 UT (Инувик, Иркутск, Пиванук, Якутск).



Анализ корреляционных зависимостей между интенсивностью обнаруженных аномалий $I(t)$ и магнитным полем B





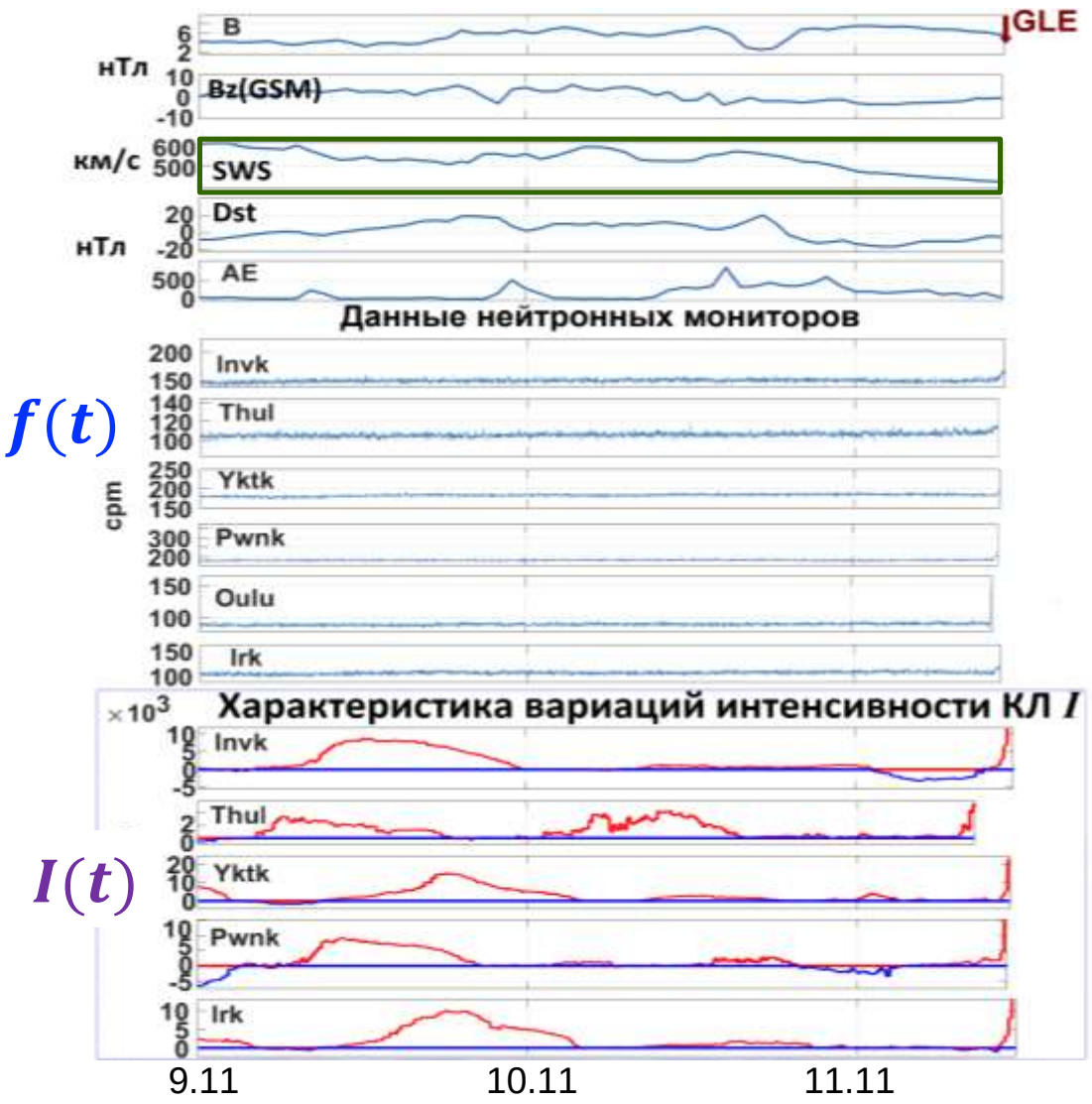


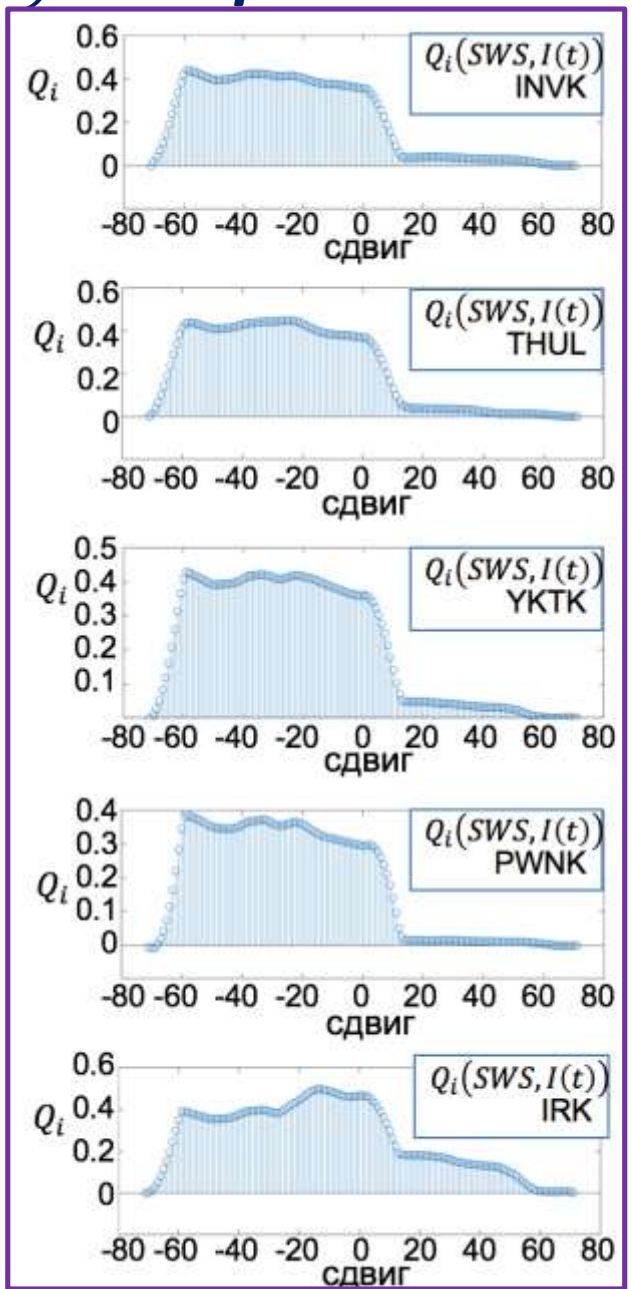
Оценка корреляционной зависимости выполнялась по формуле:

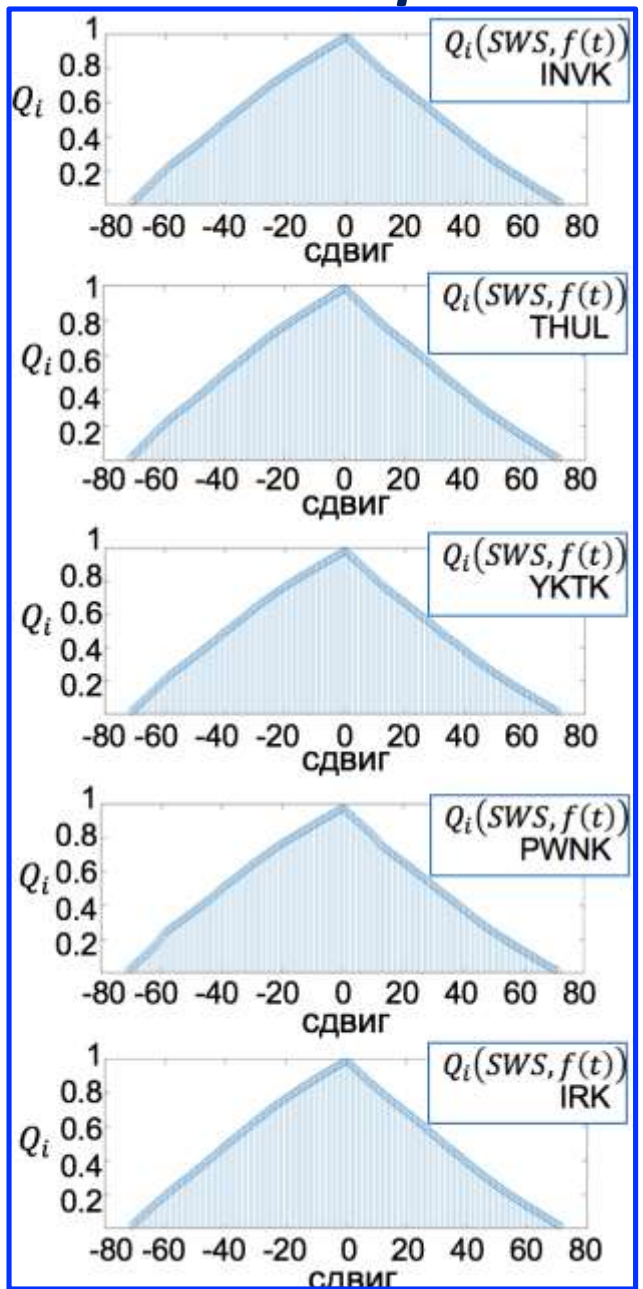
$$Q_i = \frac{R_i}{\sqrt{D_{Par} \times D_I}} = \frac{\sum_j Par_j \times I_{j+i},}{\sqrt{D_{Par} \times D_I}}$$

где R_i – взаимнокорр. функция, D_{Par} и D_I – СКО соответствующих последовательностей, i – сдвиг между последовательностями относительно друг друга.

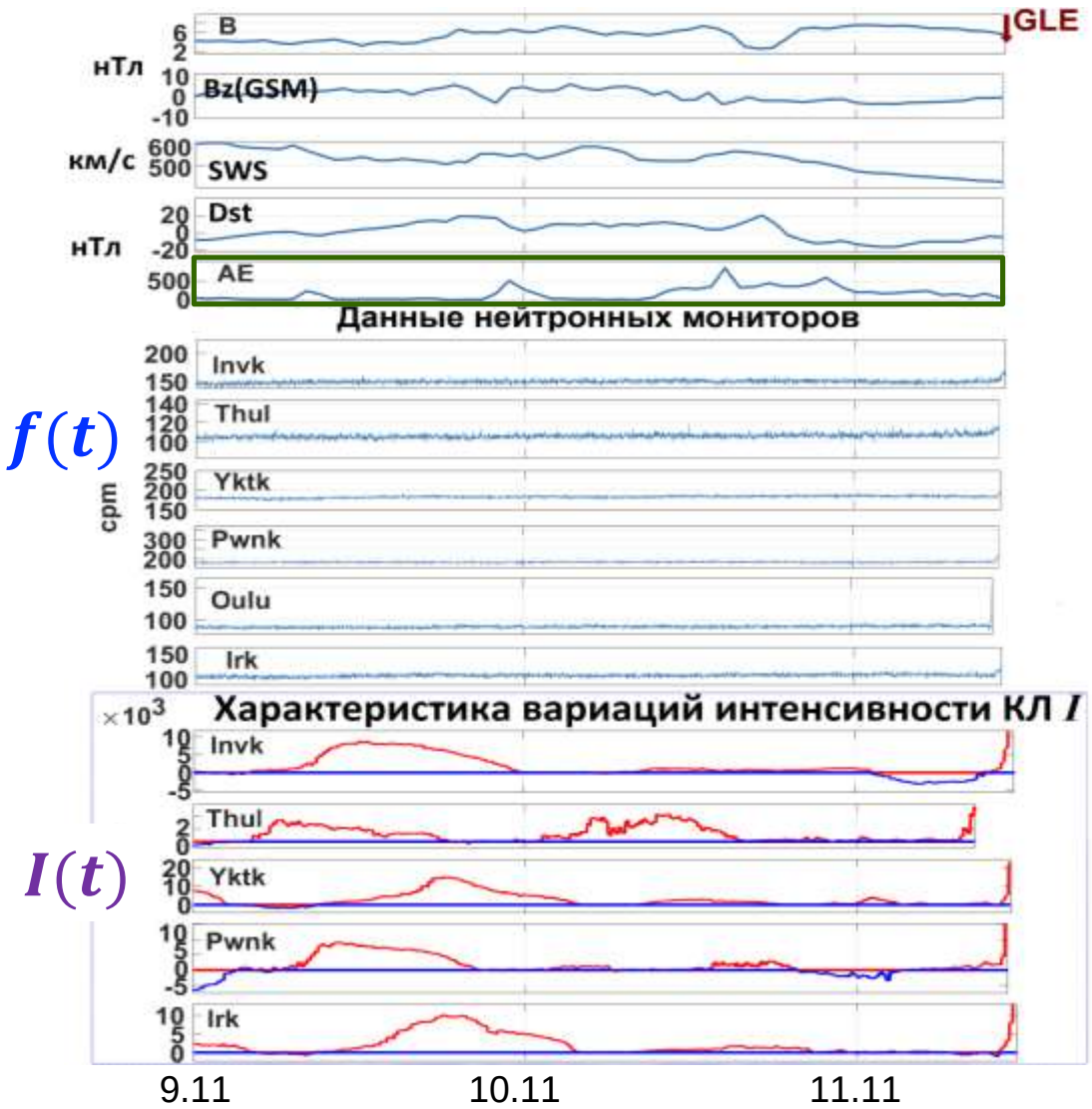
Анализ корреляционных зависимостей между интенсивностью обнаруженных аномалий $I(t)$ и скоростью солнечного ветра

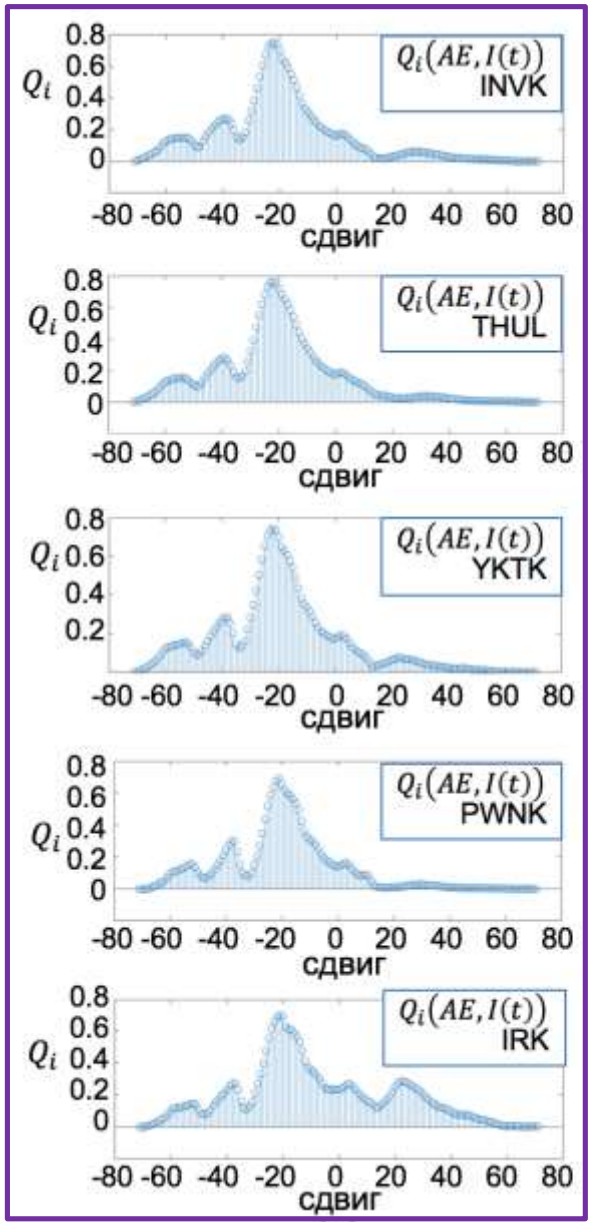


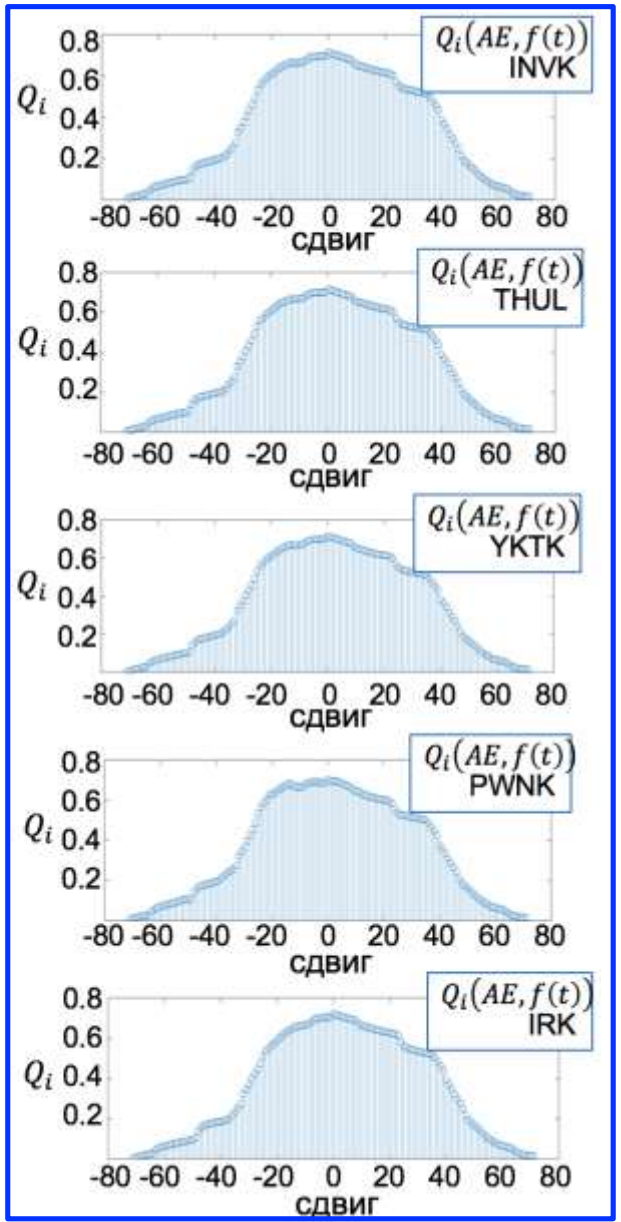




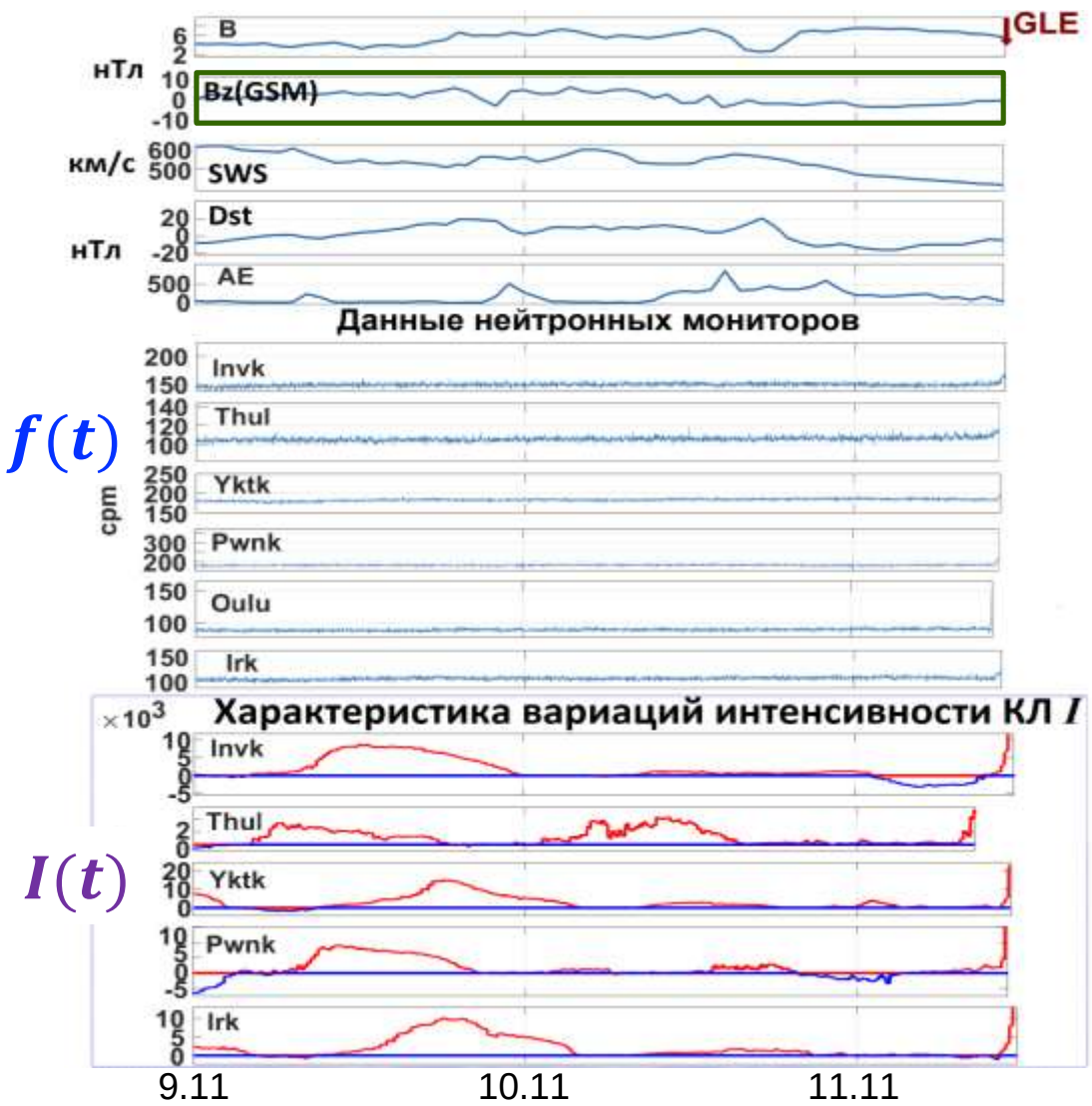
Анализ корреляционных зависимостей между интенсивностью обнаруженных аномалий $I(t)$ и геомагнитным индексом AE

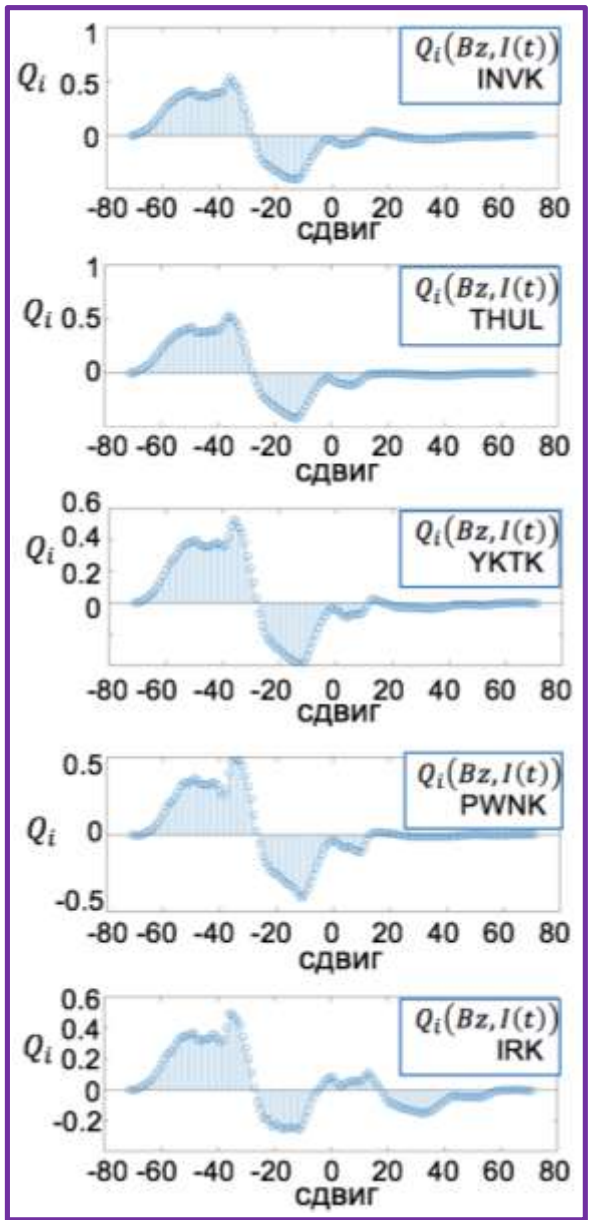


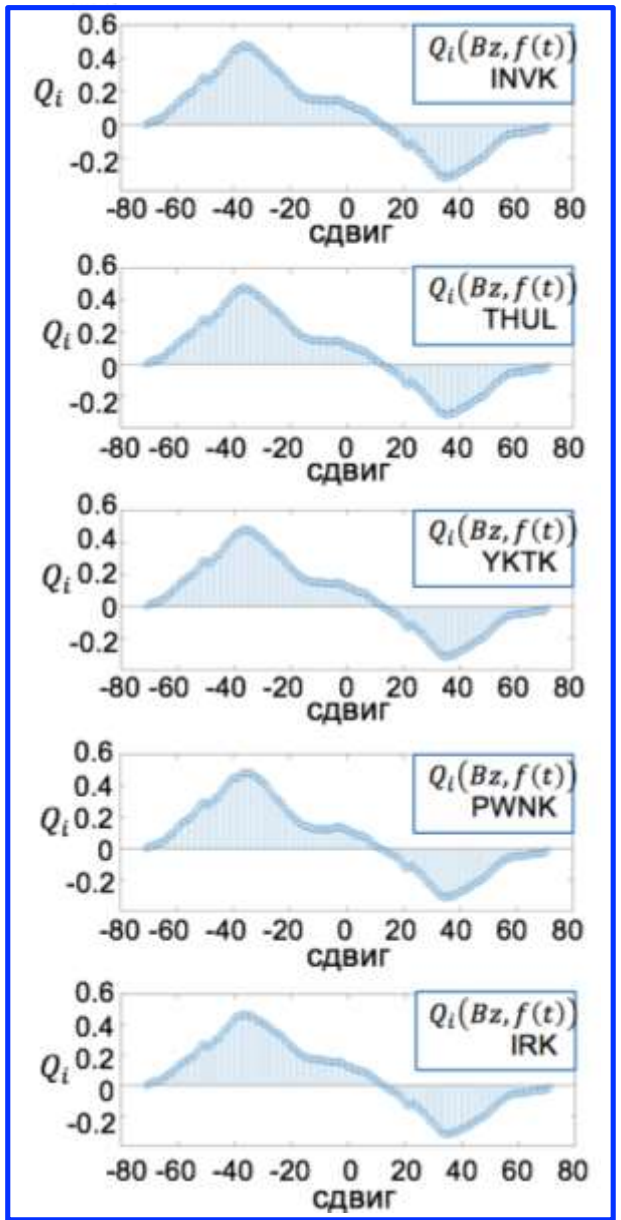




Анализ корреляционных зависимостей между интенсивностью обнаруженных аномалий $I(t)$ и Bz-компонентой ММП







Выводы

- Применение метода позволило по данным нейтронных мониторов заблаговременно, до начала суббурь в высоких широтах, обнаружить Форбуш-эффекты, а также своевременно выделить момент начала GLE, что важно для прогноза космической погоды.
- Оценка корреляционных связей между геомагнитным индексом AE, параметрами межпланетной среды и полученной на основе метода интенсивностью аномалий в космических лучах $I(t)$, показала наличие временной задержки от 7 до 38 часов, что свидетельствует о возможности краткосрочного прогноза авроральной активности и геомагнитных бурь на основе разработанного метода. Результат важен для задач космической погоды и построения эффективных геоинформационных систем в этой области.

Работа выполнена за счет Гос. задания ИКИР ДВО РАН (рег. № темы 124012300245-2).

Последние статьи с частично опубликованным материалом:

1. Мандрикова О., Мандрикова Б. Когнитивная методика обнаружения аномальных изменений интенсивности потока космических лучей // Геомагнетизм и аэрономия. 2025. Т. 65. № 5. С. 656-668. DOI: 10.7868/S303450222505009 1.
2. Мандрикова О., Мандрикова Б. Обнаружение аномалий в наблюдениях нейтронных мониторов с использованием вейвлет-разложений и правил теории статистических решений // Оптика атмосферы и океана. 2026. Т. 39. № 02. С. 129–137. DOI: 10.15372/AOO20260206.
3. Mandrikova O., Mandrikova B. Hybrid model of natural time series with neural network component and adaptive nonlinear scheme: application for anomaly detection // Mathematics. – 2024. – 12. – 1079. https://doi.org/10.3390/math12071079.