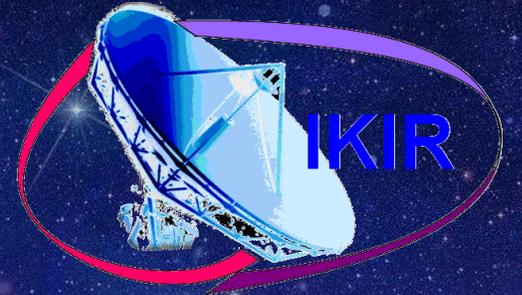


Институт космических исследований и  
распространения радиоволн ДВО РАН



*Автоматизированный метод анализа данных  
вариаций космических лучей и его применение в  
космической погоде*

Мандрикова О.В., Мандрикова Б.С.

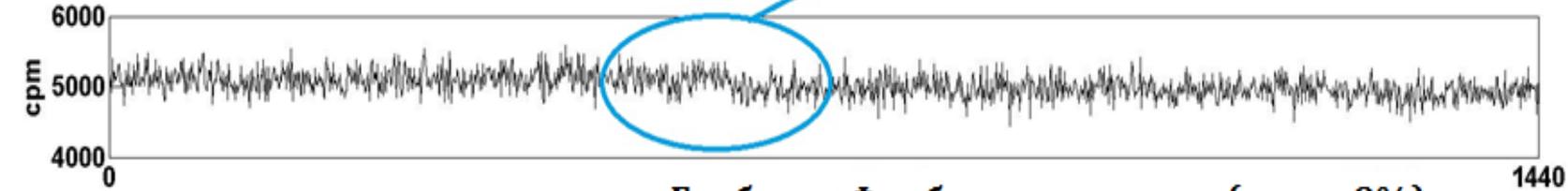
# *Космическая погода*

Одной из важных проблем обработки экспериментальных данных является проблема обнаружения аномалий космической погоды. Национальная программа космическая погода (NSWP) впервые принята в 1995 году, тогда было определено понятие «космическая погода». Это изменение условий на Солнце, в солнечном ветре, магнитосфере и ионосфере Земли, которое может оказывать негативное воздействие практически на все технические объекты и здоровье людей.

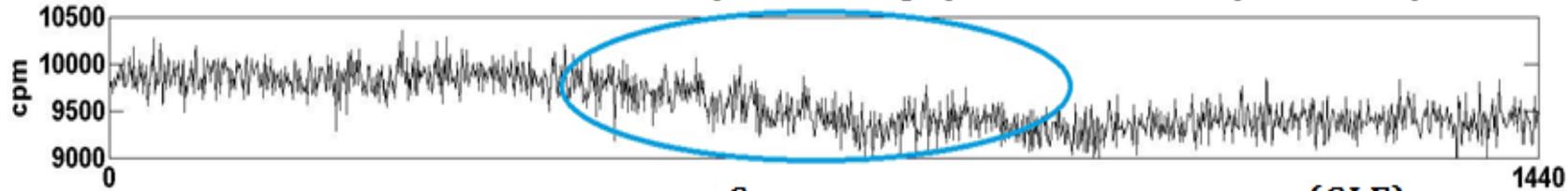
В настоящее время накоплен значительный экспериментальный материал, сформированы и оснащены средствами первичной обработки и обновления базы данных. Но вопросы создания эффективных методов обработки и анализа регистрируемых геофизических параметров и своевременного обнаружения аномальных проявлений космической погоды остаются во многом открытыми.

# Структура данных космических лучей

Малый Форбуш-эффект ( ампл. 0.3%)



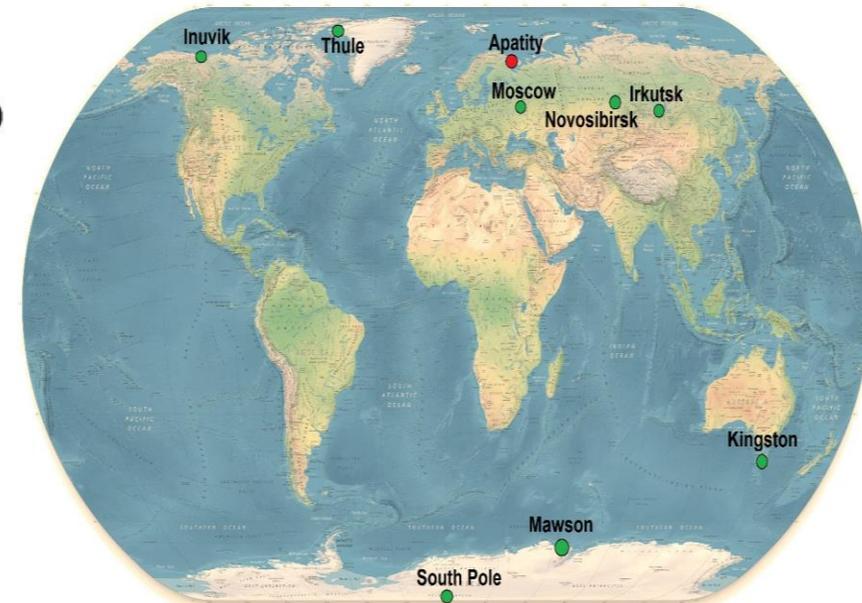
Глубокое Форбуш-понижение ( ампл. 8%)



Сильное наземное возращение (GLE)



Используемые нейтронные мониторы

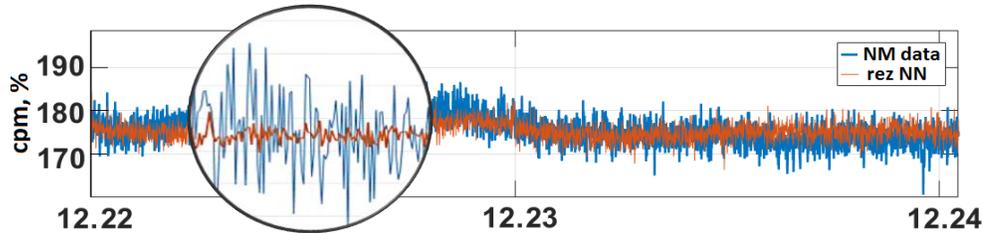


# Моделирование и анализ вариаций космических лучей

Данные КЛ

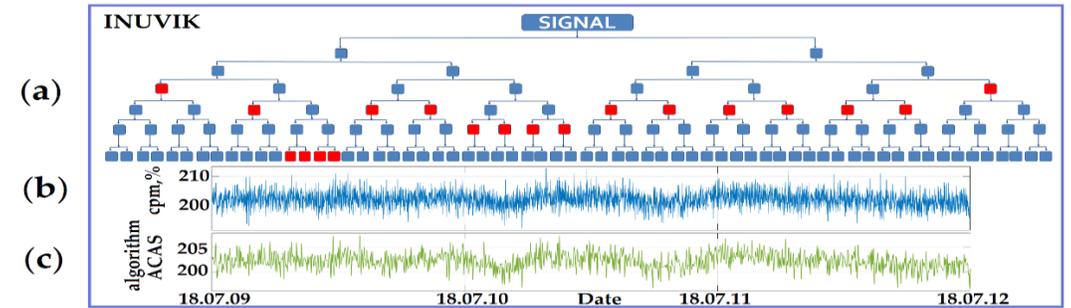
## Нейронная сеть Автокодировщик

- Снижает уровень шума в сигнале космических лучей
- Выделяет аномальные особенности узкого спектра



## Метод нелинейной адаптивной подгонки (НАП)

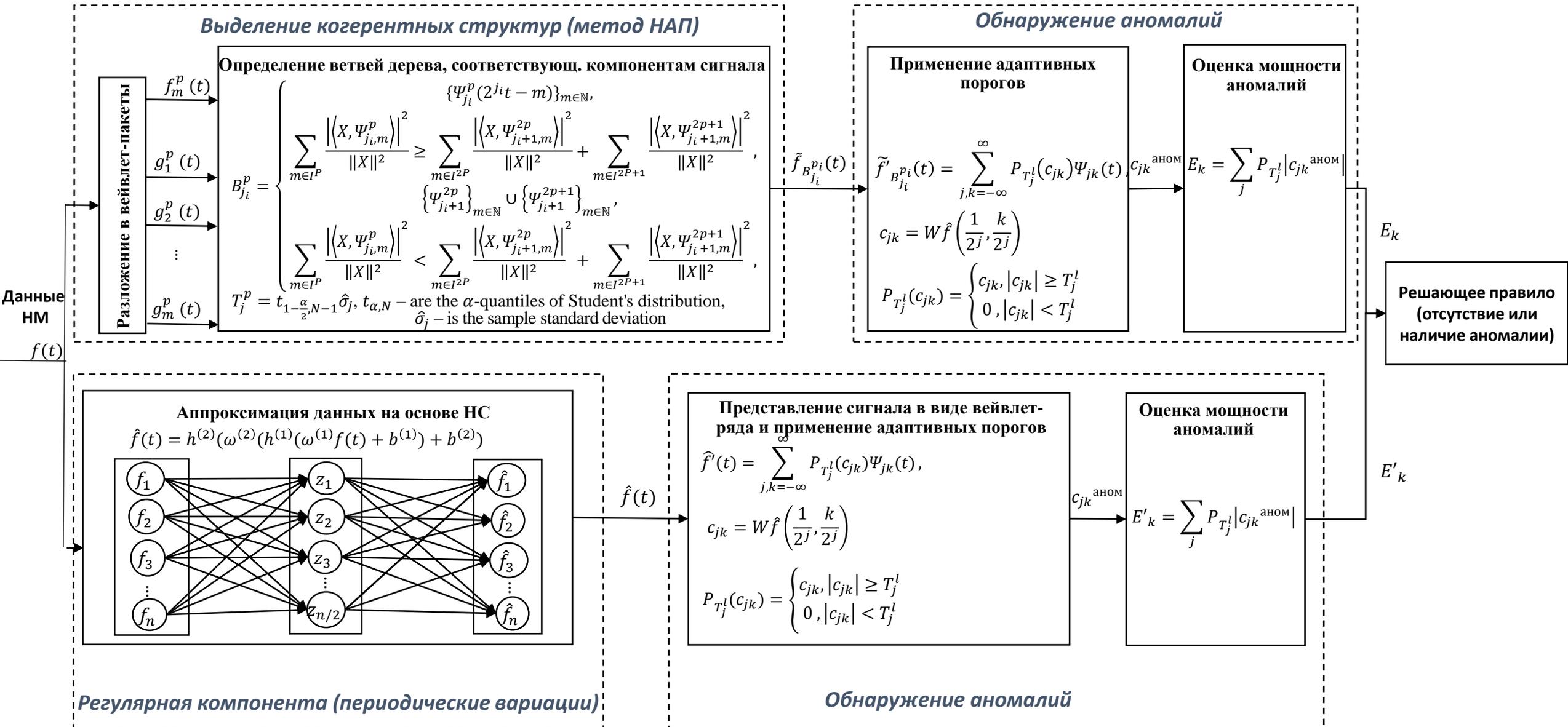
- Снижает уровень шума в сигнале космических лучей
- Выделяет разномасштабные локальные особенности



## Вейвлет-преобразование и адаптивные пороговые функции

- Детектирование и визуализация разномасштабных аномальных особенностей
- Позволяет детально изучить выделенные локальные особенности, определить их продолжительность и мощность

# Схема реализации метода анализа вариаций космических лучей



# Обнаружение аномалий на основе вейвлет-преобразования

Начало

Ввод данных

Разложение функции  $F$  в вейвлет-пакеты

Определение ветвей дерева, соответствующих компонентам сигнала

Представление сигнала  $\hat{f}[n]$  в виде вейвлет-ряда

Применение к коэффициентам  $c_{jk}$  адаптивных порогов

Оценка мощности аномалий

Конец

$$f(t)$$

$$W_j^0 = \bigoplus_{i=0}^l W_{j_i}^p, \{\psi_{j_i}^p(2^j t - m)\}_{m \in \mathbb{N}}$$

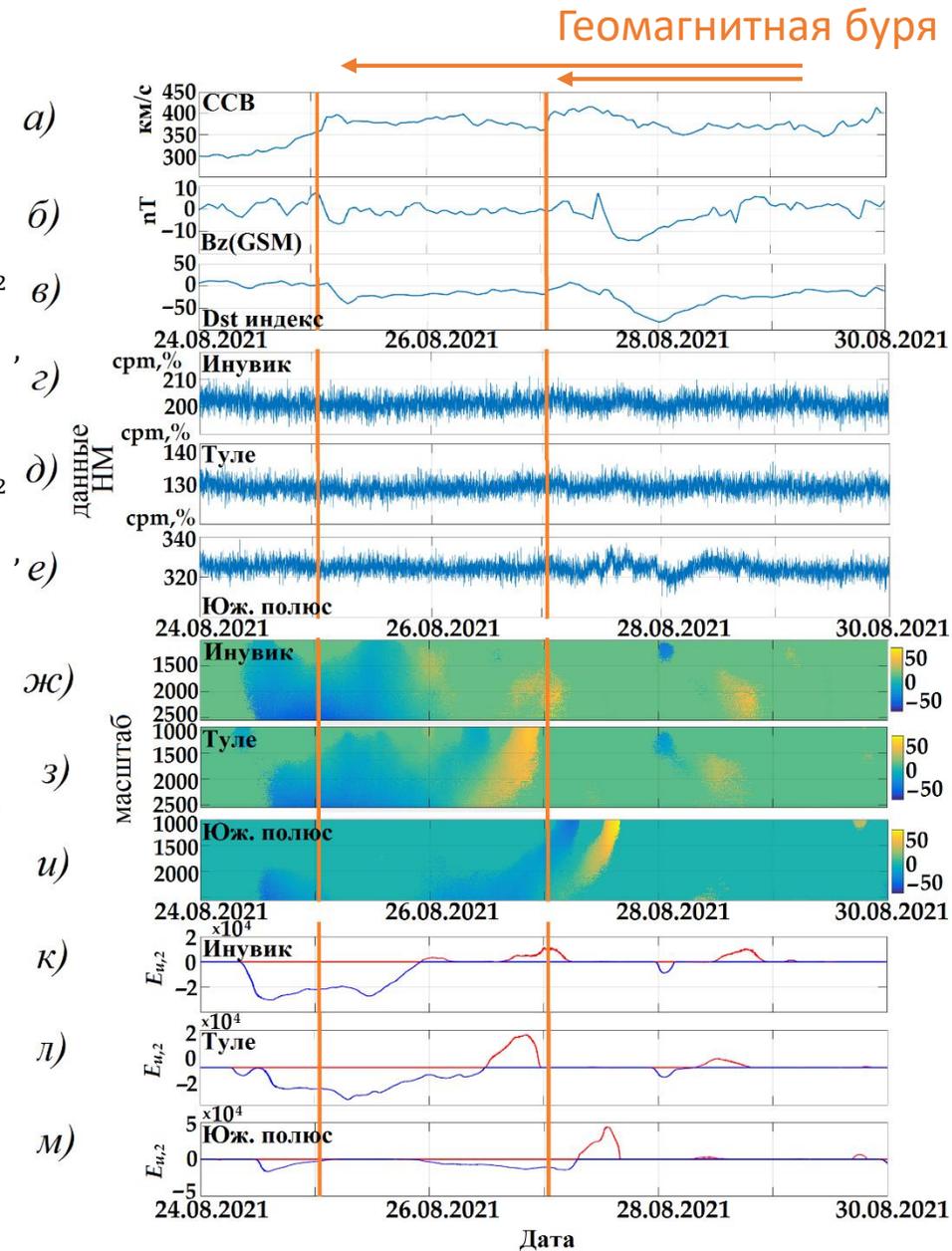
$$B_{j_i}^p = \begin{cases} \sum_{m \in I^p} \frac{|\langle X, \psi_{j_i, m}^p \rangle|^2}{\|X\|^2} \geq \sum_{m \in I^{2p}} \frac{|\langle X, \psi_{j_{i+1}, m}^{2p} \rangle|^2}{\|X\|^2} + \sum_{m \in I^{2p+1}} \frac{|\langle X, \psi_{j_{i+1}, m}^{2p+1} \rangle|^2}{\|X\|^2}, \\ \{\psi_{j_{i+1}}^{2p}\}_{m \in \mathbb{N}} \cup \{\psi_{j_{i+1}}^{2p+1}\}_{m \in \mathbb{N}}, \\ \sum_{m \in I^p} \frac{|\langle X, \psi_{j_i, m}^p \rangle|^2}{\|X\|^2} < \sum_{m \in I^{2p}} \frac{|\langle X, \psi_{j_{i+1}, m}^{2p} \rangle|^2}{\|X\|^2} + \sum_{m \in I^{2p+1}} \frac{|\langle X, \psi_{j_{i+1}, m}^{2p+1} \rangle|^2}{\|X\|^2} \end{cases}$$

$$T_j^p = t_{1-\frac{\alpha}{2}, N-1} \hat{\sigma}_j, t_{\alpha, N} - \text{are the } \alpha\text{-quantiles of Student's distr., } \hat{\sigma}_j - \text{is the sample standard deviation}$$

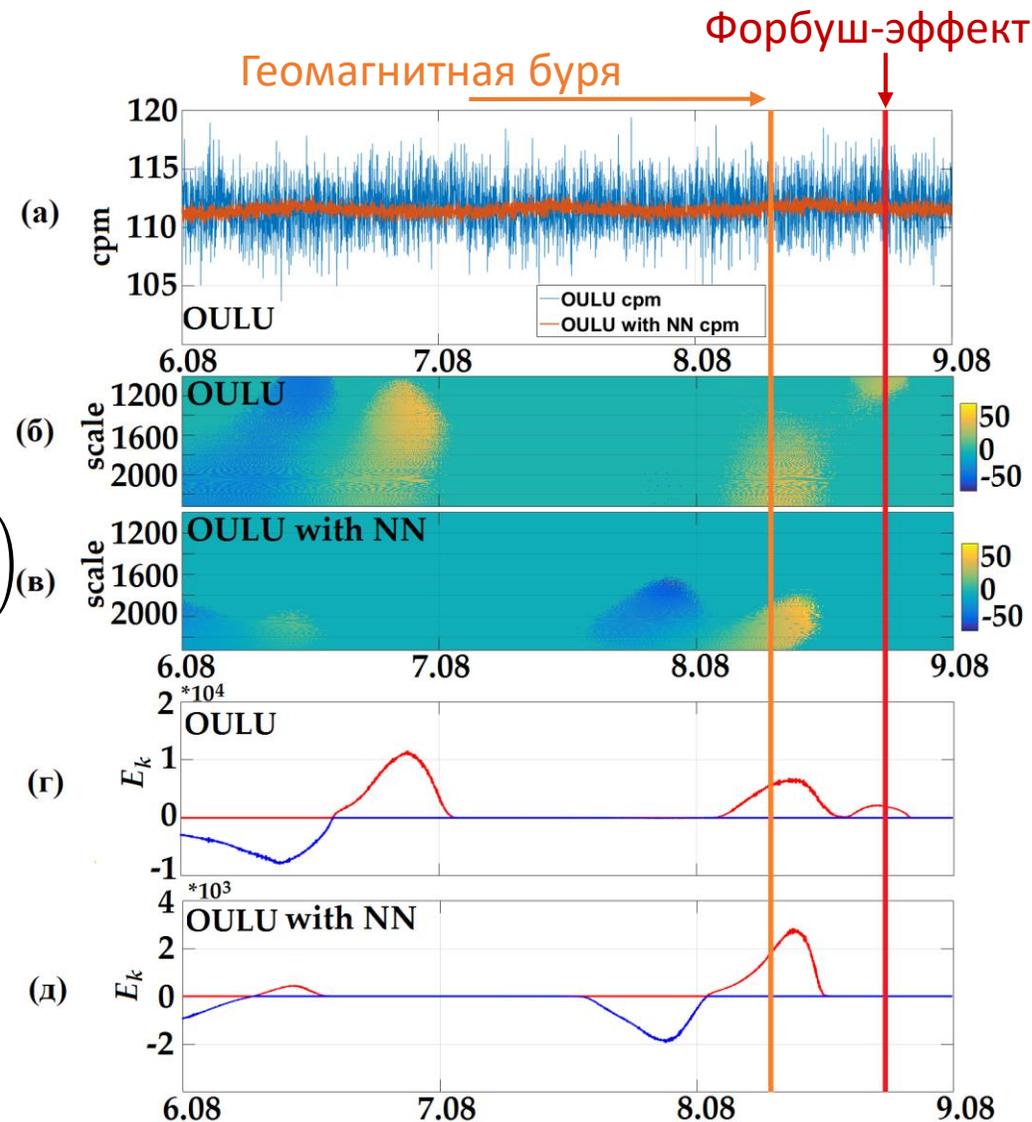
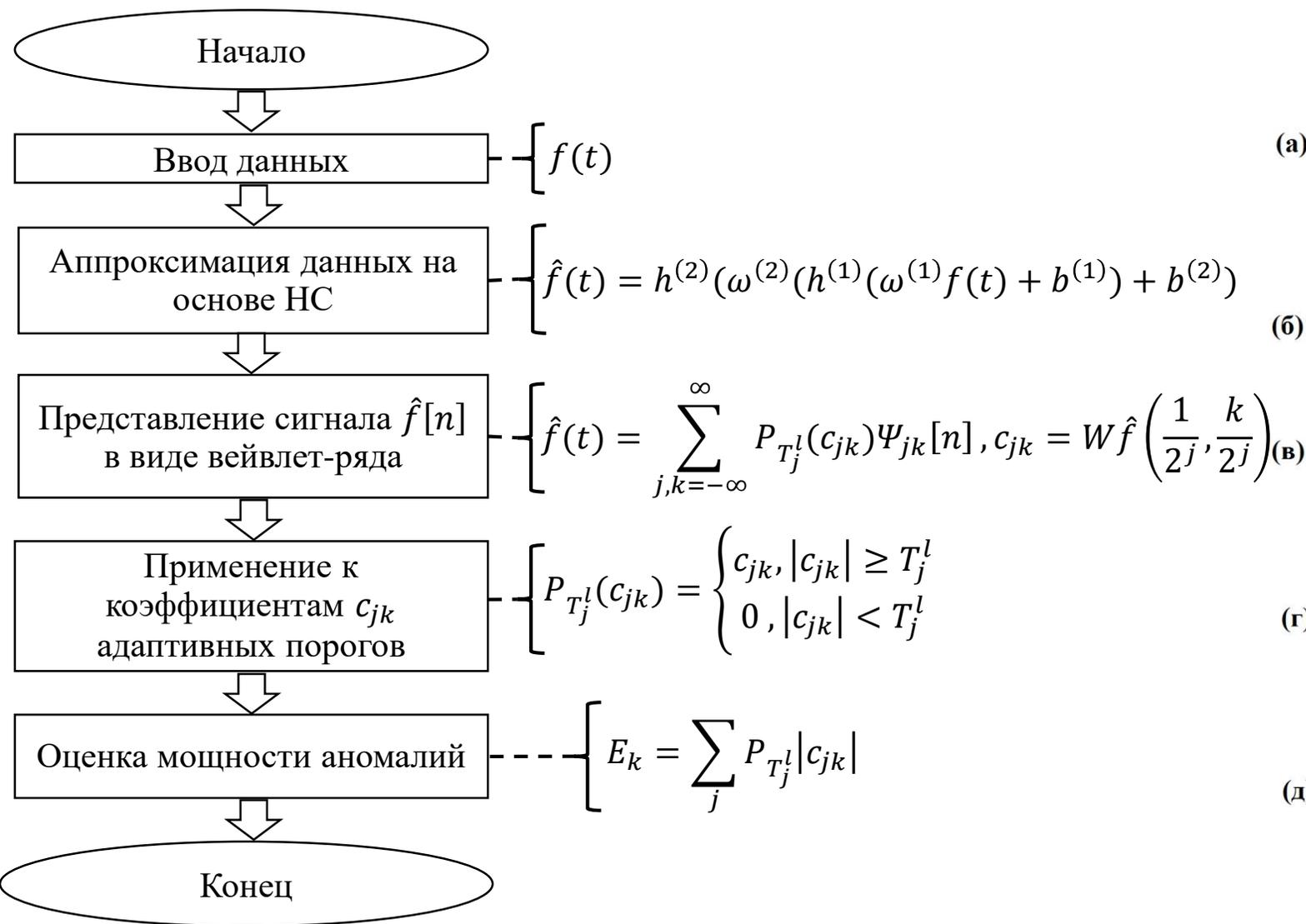
$$\tilde{f}_{B_{j_i}^p}(t) = \sum_{j, k=-\infty}^{\infty} P_{T_j^l}(c_{jk}) \psi_{jk}[n], c_{jk} = W \hat{f} \left( \frac{1}{2^j}, \frac{k}{2^j} \right)$$

$$P_{T_j^l}(c_{jk}) = \begin{cases} c_{jk}, & |c_{jk}| \geq T_j^l \\ 0, & |c_{jk}| < T_j^l \end{cases}$$

$$E_k = \sum_j P_{T_j^l} |c_{jk}^{\text{аном}}|$$

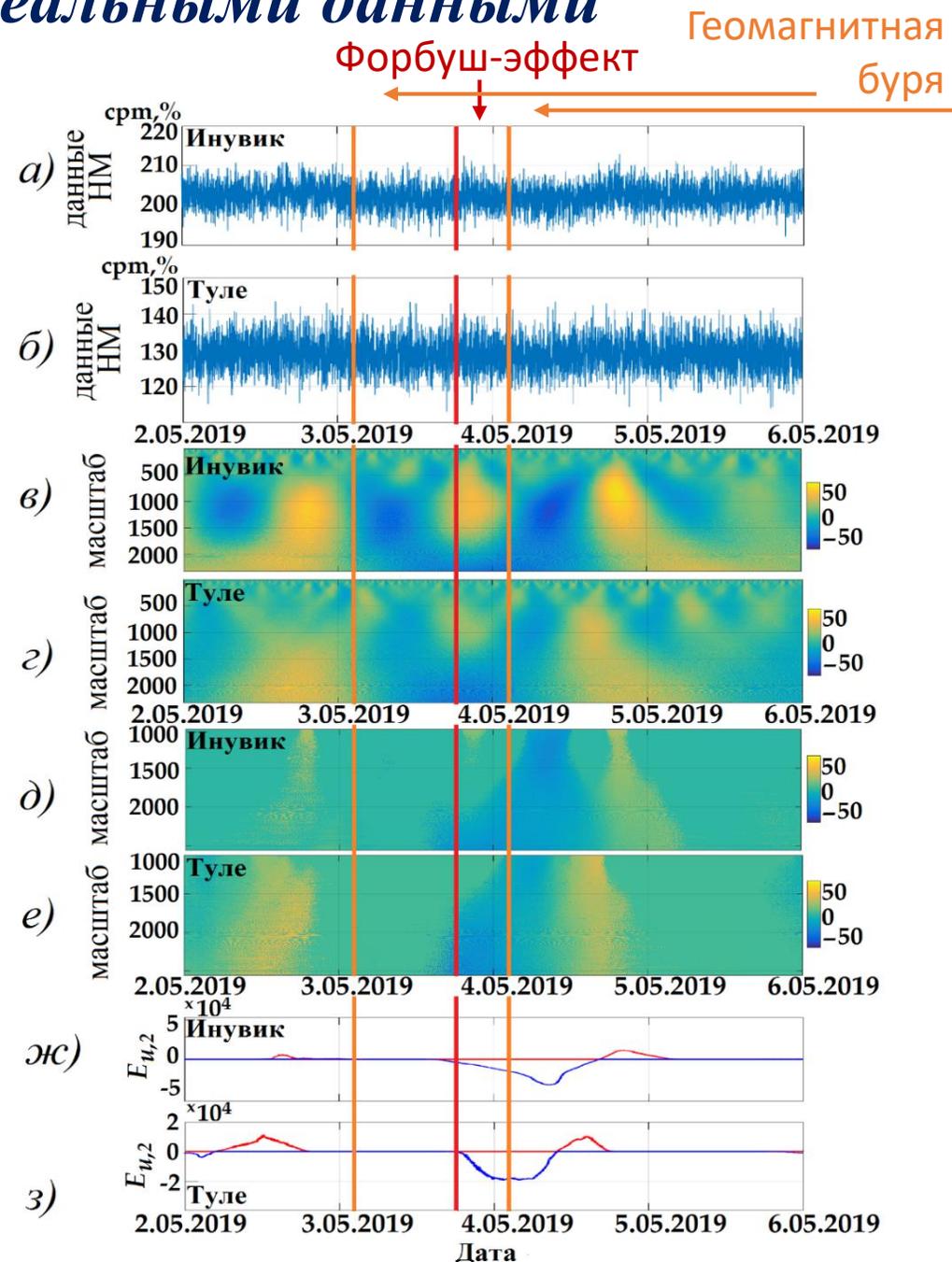


# Обнаружение аномалий на основе применения нейронной сети



# Результаты экспериментов с реальными данными

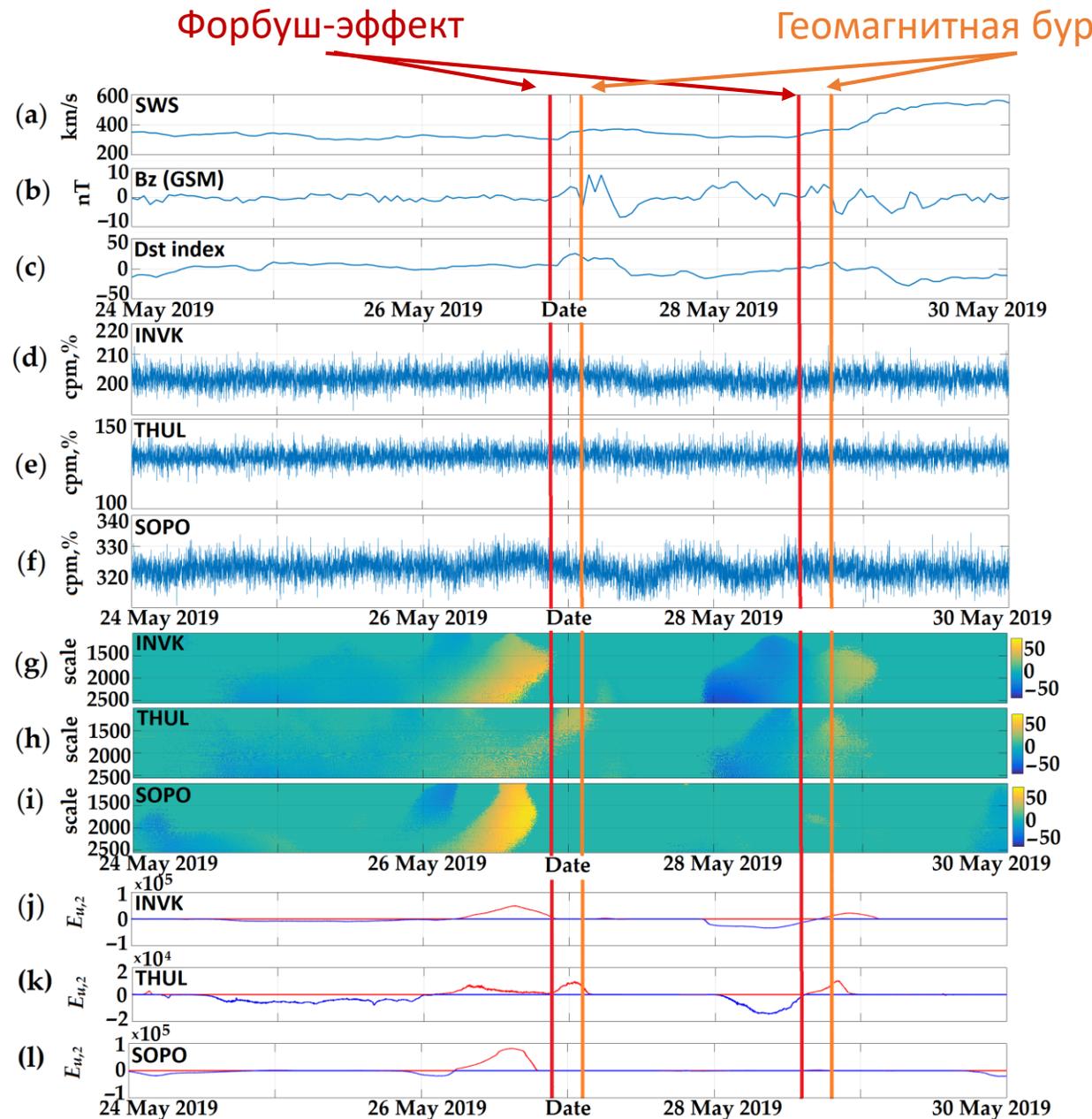
Форбуш-эффект зафиксирован 3 мая 2019 г. в 18:00 UT. В конце суток 3 мая по данным обработки в момент зарегистрированного Форбуш-эффекта, на анализируемых станциях наблюдается аномалия, которая имела большую амплитуду на станции Туле. Сравнение результатов метода с результатами НВП подтверждает эффективность и высокую точность метода. Результаты НВП согласуются с результатами метода, но, вследствие влияния шумовых факторов, детектирование аномалий на основе непосредственного применения НВП малоэффективно. Также преимущество метода заключается в возможности получения более точной количественной меры изменчивости сигнала космических лучей.



# Результаты экспериментов с реальными данными

По результатам метода накануне первого Форбуш-эффекта (26 мая) на всех анализируемых станциях наблюдался плавный рост интенсивности КЛ. Эта ситуация совпала с приходом неоднородного ускоренного потока от коронального выброса массы (СМЕ).

Следующий Форбуш-эффект зарегистрирован 28 мая в 15:00:00 UT. Несмотря на различия данных нейтронных мониторов разных станций, результаты обработки показывают наличие ярко выраженного общего характера в динамике ГКЛ как до, так и во время события.



# *Выводы*

Проведенный анализ подтвердил сложную динамику галактических космических лучей во время экстремальных солнечных явлений и магнитных бурь. Изучение процессов в околоземном пространстве и выявление сложных зависимостей и взаимосвязей требуют комплексного подхода и разработки методов анализа данных геофизического мониторинга с использованием широкой сети наблюдений. Результаты предложенного метода показали его высокую эффективность для обнаружения аномалий в КЛ. Использование нейронной сети Автоэнкодер совместно с вейвлет-преобразованием позволяет более точно фиксировать моменты аномальных изменений КЛ.

Экспериментально подтверждена важность учета динамики КЛ при прогнозировании космической погоды.

# *Опубликованные статьи с результатами исследований*

1. Mandrikova O, Mandrikova B, Rodomanskay A. Method of Constructing a Nonlinear Approximating Scheme of a Complex Signal: Application Pattern Recognition. Mathematics. 2021; 9(7):737. <https://doi.org/10.3390/math9070737>.
2. Мандрикова О.В., Родоманская А.И., Мандрикова Б.С. Применение новой методики вейвлет-декомпозиции для анализа геомагнитных данных и вариаций космических лучей. Геомагнетизм и аэрномия, 2021, том 61, № 4, с. 428-444. DOI: 10.31857/S0016794021030111.
3. Геппенер В.В., Мандрикова Б.С. Автоматизированный метод анализа данных космических лучей и выделения спорадических эффектов, Журнал вычислительной математики и математической физики, 2021, Т. 61, № 7, стр. 1137-1148, DOI: 10.31857/S0044466921070061.
4. Mandrikova, O.; Mandrikova, B. Method of Wavelet-Decomposition to Research Cosmic Ray Variations: Application in Space Weather. Symmetry 2021, 13, 2313. <https://doi.org/10.3390/sym13122313>.
5. Mandrikova O, Mandrikova B. Hybrid Method for Detecting Anomalies in Cosmic ray Variations Using Neural Networks Autoencoder. Symmetry. 2022; 14(4):744. <https://doi.org/10.3390/sym14040744>.

*Спасибо за внимание!*

