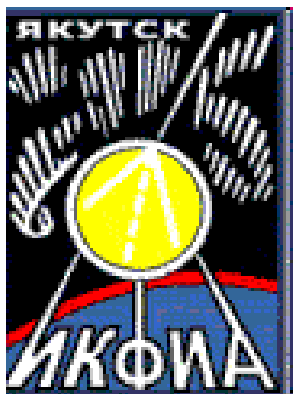


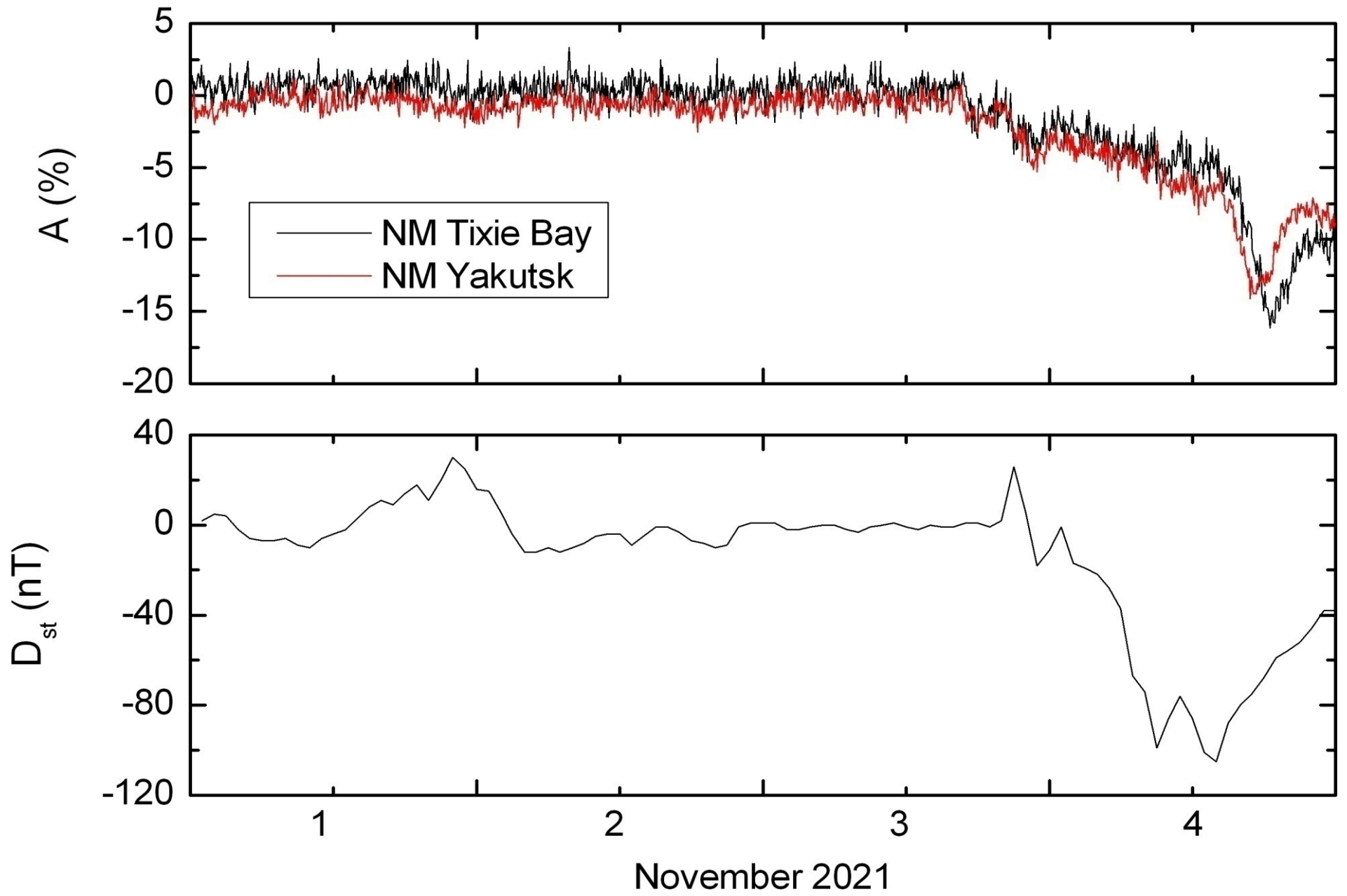
ФЛУКТУАЦИИ ИНТЕНСИВНОСТИ ГАЛАКТИЧЕСКИХ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ ВО ВРЕМЯ ВОЗМУЩЕНИЙ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В НАЧАЛЕ НОЯБРЯ 2021 ГОДА

Зверев А.С., Григорьев В.Г., Гололобов П.Ю., Стародубцев С.А.

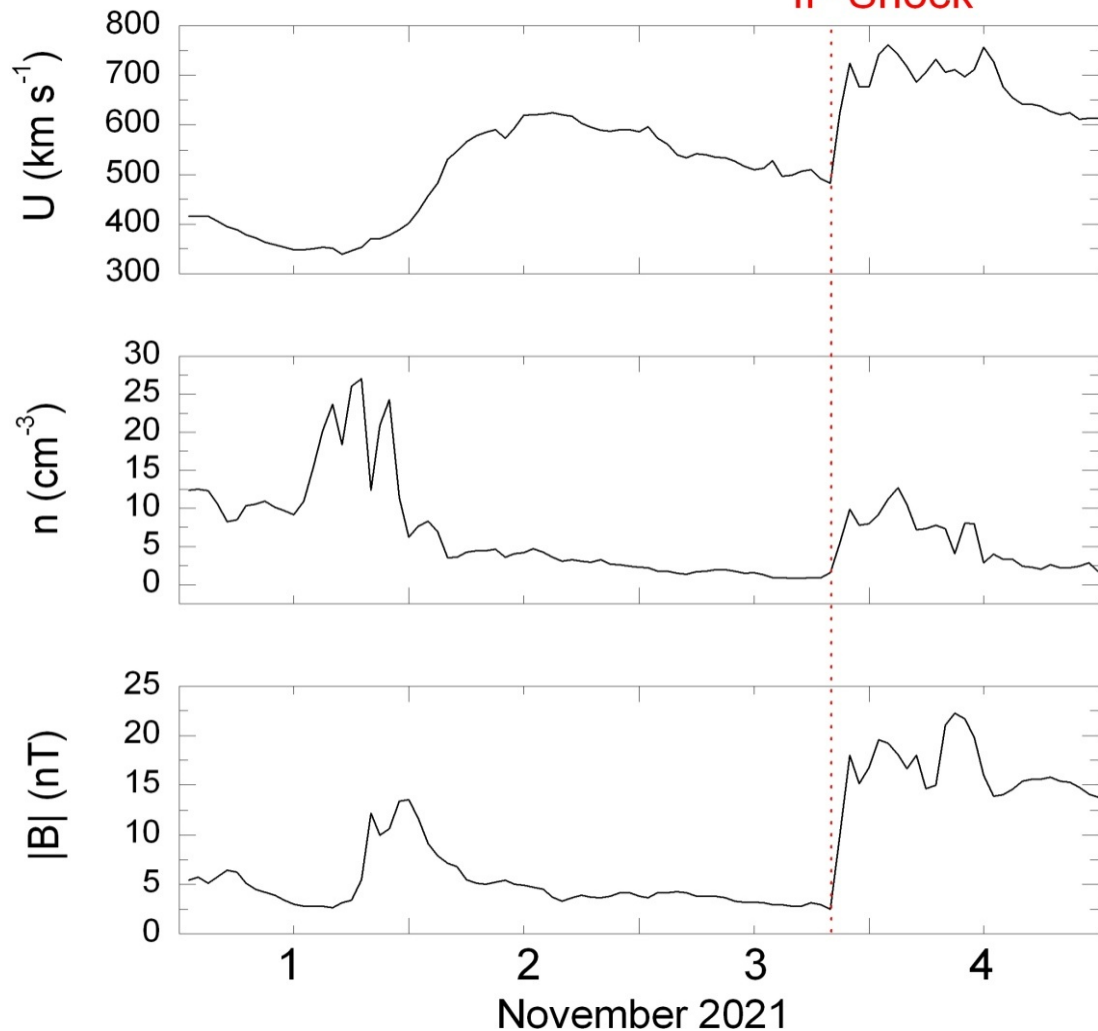
Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера
Сибирского отделения Российской академии наук, Российская Федерация, Якутск



37 Всероссийская конференция по космическим лучам
27 июня - 1 июля 2022 г., Москва, НИИЯФ МГУ,
Физический факультет МГУ



IP Shock

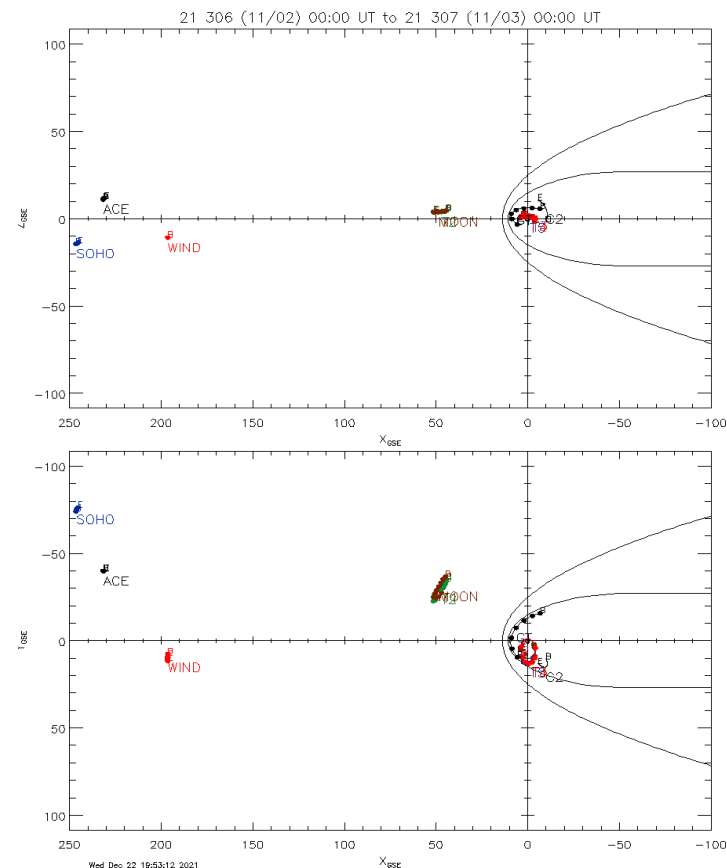


Message from Australian Solar Terrestrial and Space Physics Date: Wed, 03 Nov 2021 20:17:19 +0000
From: rwc@ips.gov.au (Regional Warning Centre)
To: ips-sws-alert@ips.gov.au
Subject: [Ips-sws-alert] MODERATE SHOCK DETECTED IN SOLAR WIND AT 03 11 2021 1954UT issued 2017 UT on 03 Nov 2021

MODERATE SHOCK DETECTED IN SOLAR WIND AT 03 11 2021 1954 UT

Mean Solar Wind Parameters Pre/Post Shock:

Param.	Unit	Pre Shock	Post Shock	Pre/Post Change
Density	part/cc	8.2	10.9	2.7
Velocity	km/sec	597.3	679.0	81.7
Temp	Degree K	450928.6	583000.0	132071.4
Bt	nT	9.7	14.1	4.4
Bz	nT	-1.4	-3.3	-2.0



Измерения параметров СВ на космическом аппарате WIND вблизи точки либрации L1.

Время прихода УВ от WIND на Землю составляет около 40 мин.

Можно ли что-то реально предпринять за это время ???

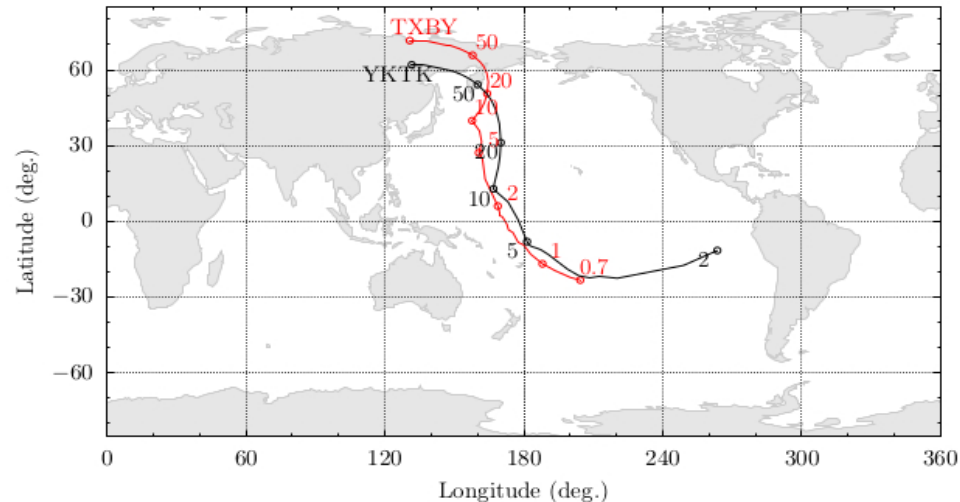
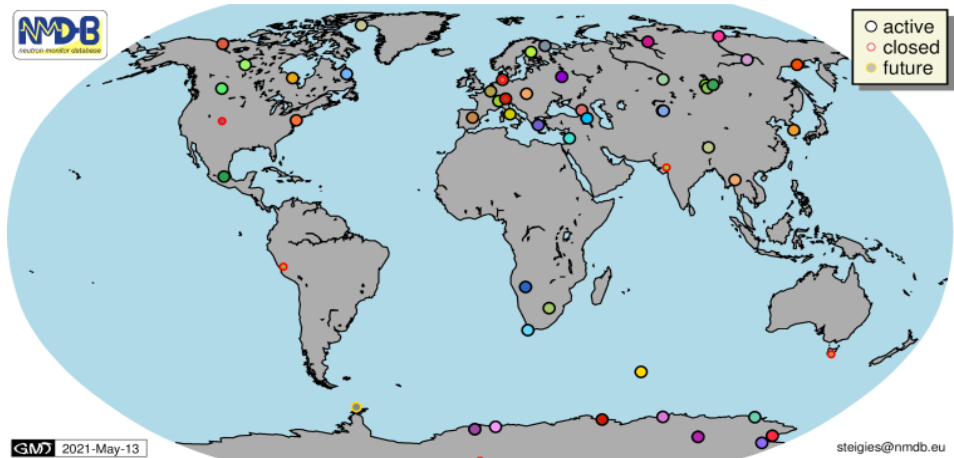
Флуктуации - это короткопериодные вариации интенсивности КЛ ($T < 3$ час), которые возникают эпизодически и связаны с крупномасштабными возмущениями СВ - ударными волнами, выбросами корональной массы, высокоскоростными потоками и пр.

Первые работы: Dhanju. Phys. Rev. Lett. 1967; Chirkov and Ipatyev. Proc. 11-th ICRC. Budapest, Hungary. 1969; Ruthenberg S. Acta Physicae Academiae Scientiarum Hungaricae. 1970.

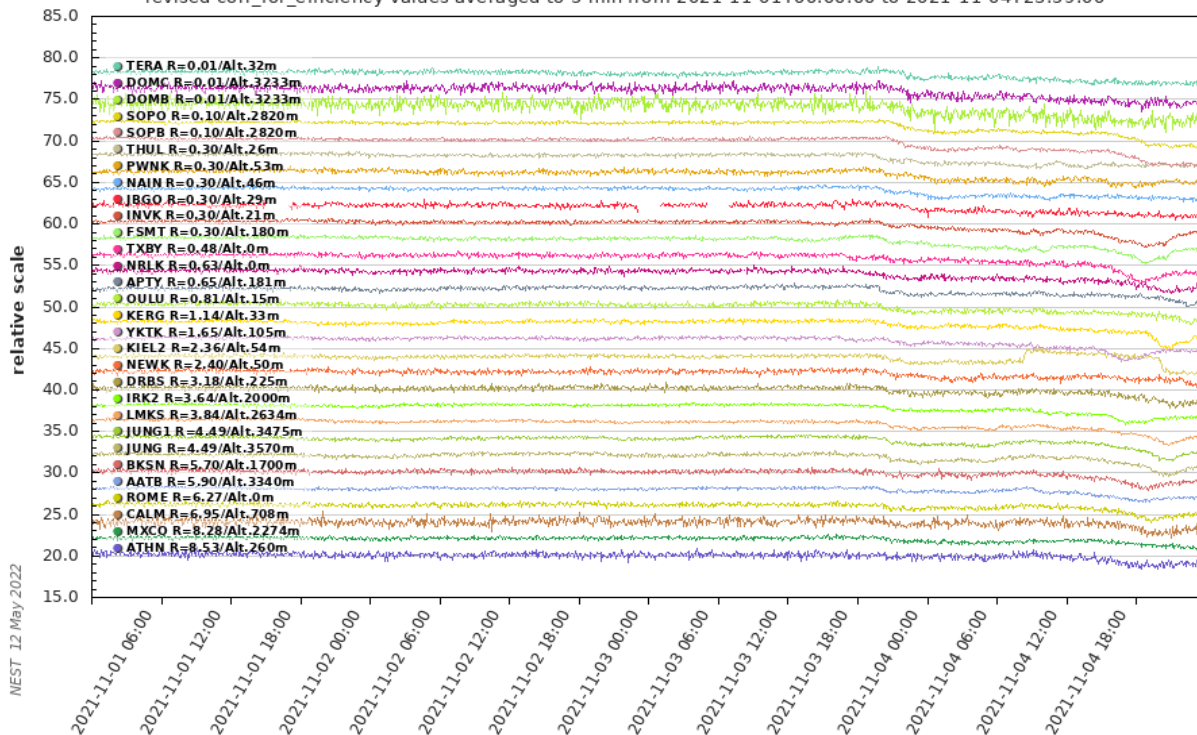
Систематические исследования начались в ИКФИА СО РАН в начале 70-х годов: Kozlov, Kuzmin, Krymsky et al. Proc. 13-th ICRC. Denver, USA. 1973.

Возможность прогноза эффектов Форбуша: Козлов В.И. Возможный метод диагностики состояния межпланетной среды по данным динамического спектра флуктуаций космических лучей. // Бюл. НТИ. Проблемы космофизики и аэронавтики. - Якутск: ЯФ СО АН СССР, январь 1976. С.9-11.

Природа флуктуаций КЛ: Модуляция интенсивности галактических КЛ быстрыми магнитозвуковыми волнами, генерированными потоками надтепловых частиц в окрестности крупномасштабных возмущений СВ. (Бережко и Стародубцев, Изв. АН СССР, сер. физич., 1988)



revised corr_for_efficiency values averaged to 5 min from 2021-11-01T00:00:00 to 2021-11-04T23:59:00



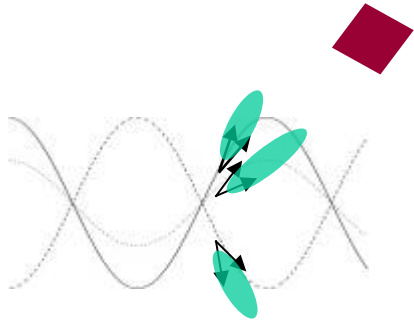
Станции КЛ Бухта Тикси и Якутск являются частью УНУ «Российская наземная сеть национальная станций КЛ» (14 станций)

Данные измерений 30-ти станций мировой сети нейтронных мониторов в режиме реального времени доступны в цифровом и графическом виде для исследований флуктуаций интенсивности КЛ доступные на сервере NMDB

ПРИРОДА ФЛУКТУАЦИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ:

Альфвеновские волны:
(Owens, Astrophys. J., 1974)

$$\frac{P_{КЛ}(v, \mu, V)}{j_0^2} = C(v, \mu) \frac{P_{B\perp}}{B_0^2} (\delta_{\parallel})^2 \sim 10^{-6} \frac{P_{B\perp}}{B_0^2} \quad (1)$$

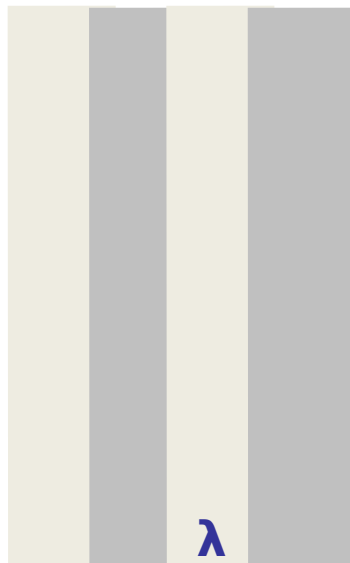


Колебание силовой линии ММП ведет к флуктуациям анизотропной части интенсивности КЛ, регистрируемых в фиксированном направлении. При этом важно, что анизотропия КЛ составляет величину $\delta_{\parallel} \ll 1\%$.

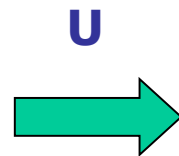
Быстрые магнитозвуковые волны:

(Бережко и Стародубцев, Изв. АН СССР, сер. физич., 1988)

Max $B, I_{КЛ}$ Min $B, I_{КЛ}$



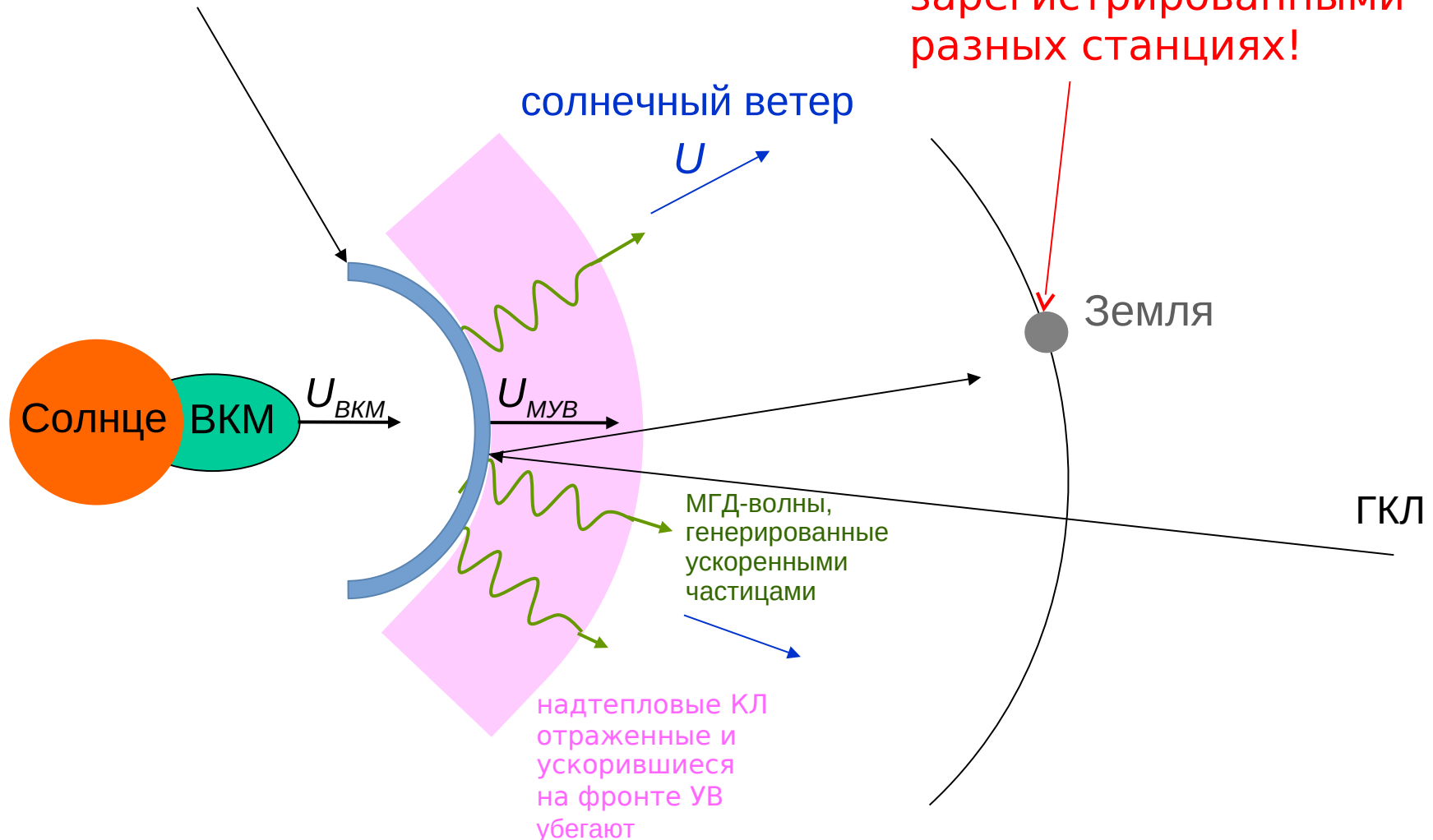
$$\frac{P_{КЛ}(v)}{j_0^2} = \left[\frac{(\gamma+2)C_a(C_W + U \sin \varphi)}{3\pi\sqrt{2k_{\perp}v}} \right]^2 \frac{P_B(v)}{B_0^2} \sim (10^{-2} \div 1) \frac{P_B(v)}{B_0^2} \quad (2)$$



Неподвижный наблюдатель «видит» флуктуации изотропной части интенсивности КЛ с периодом $T = \lambda/U$. Изотропная часть интенсивности КЛ значительно больше анизотропной!

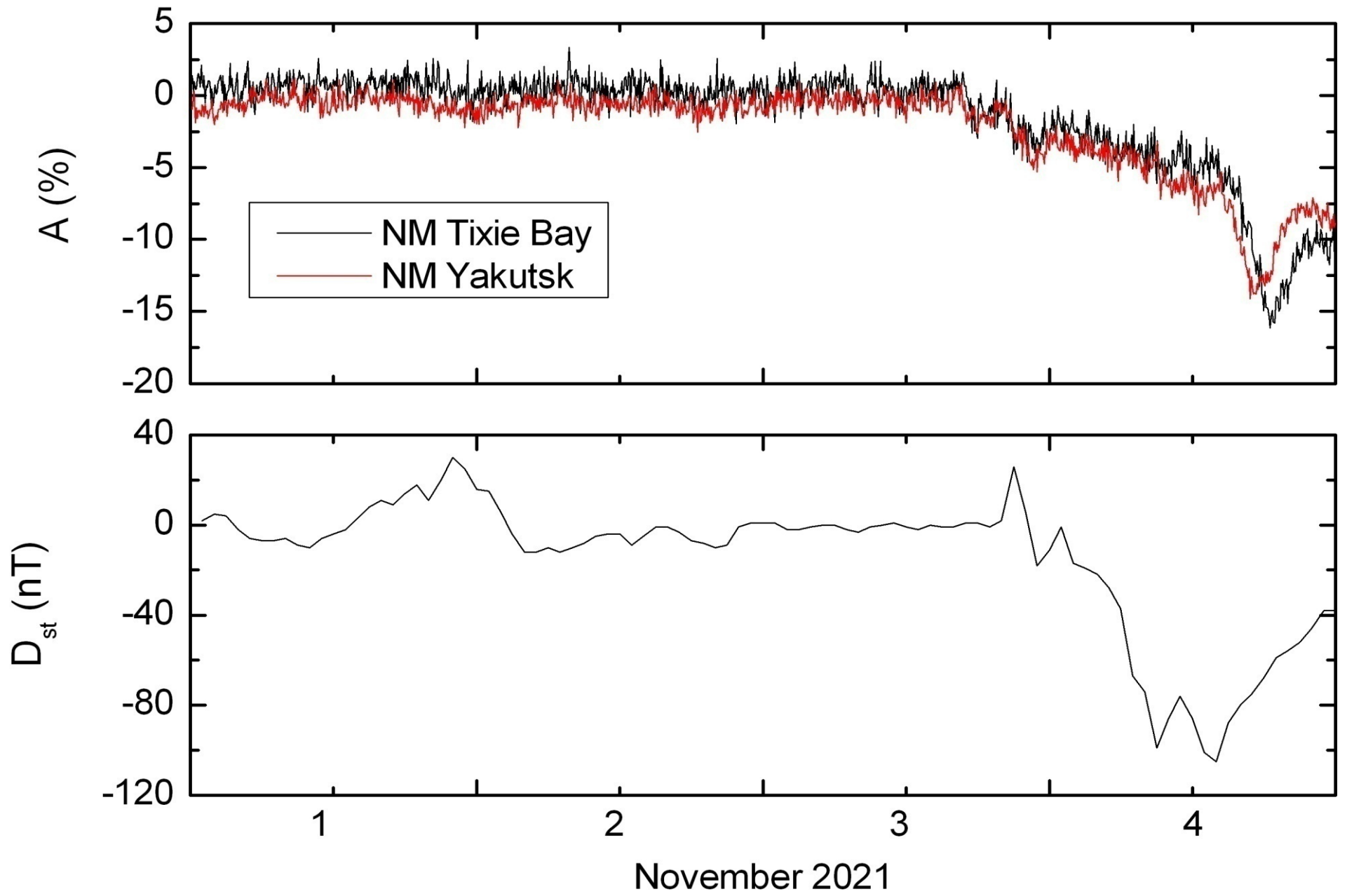
Физическая картина возникновения флуктуаций КЛ:

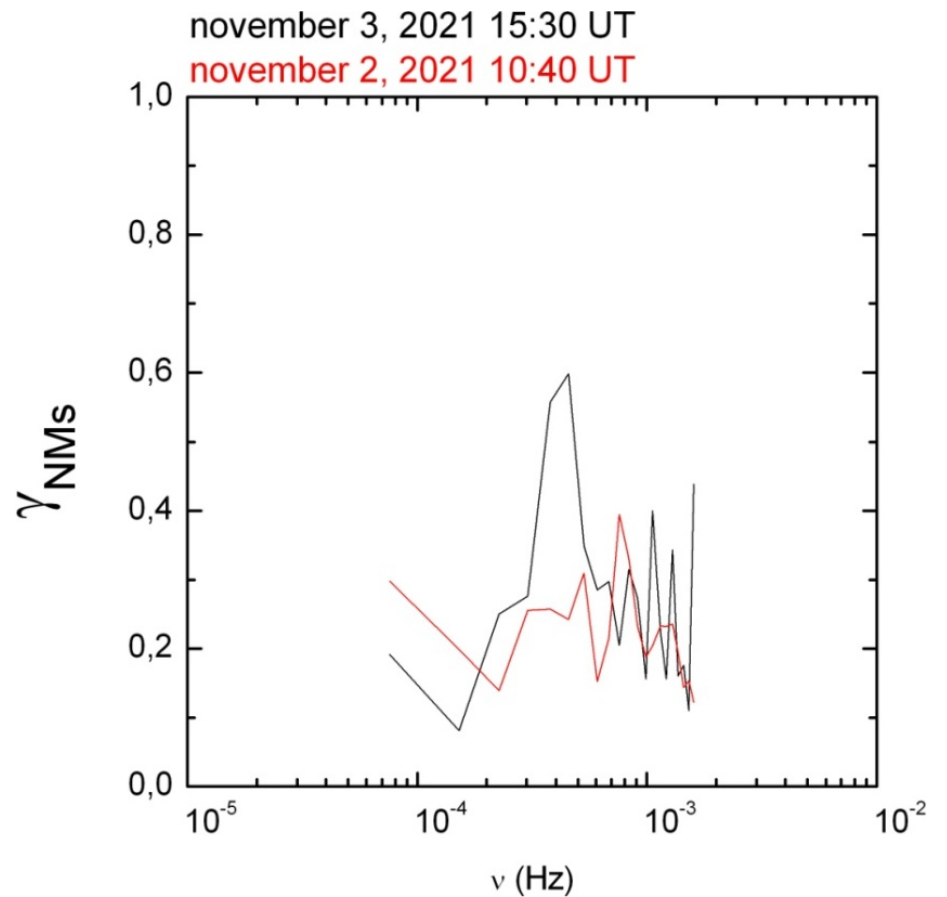
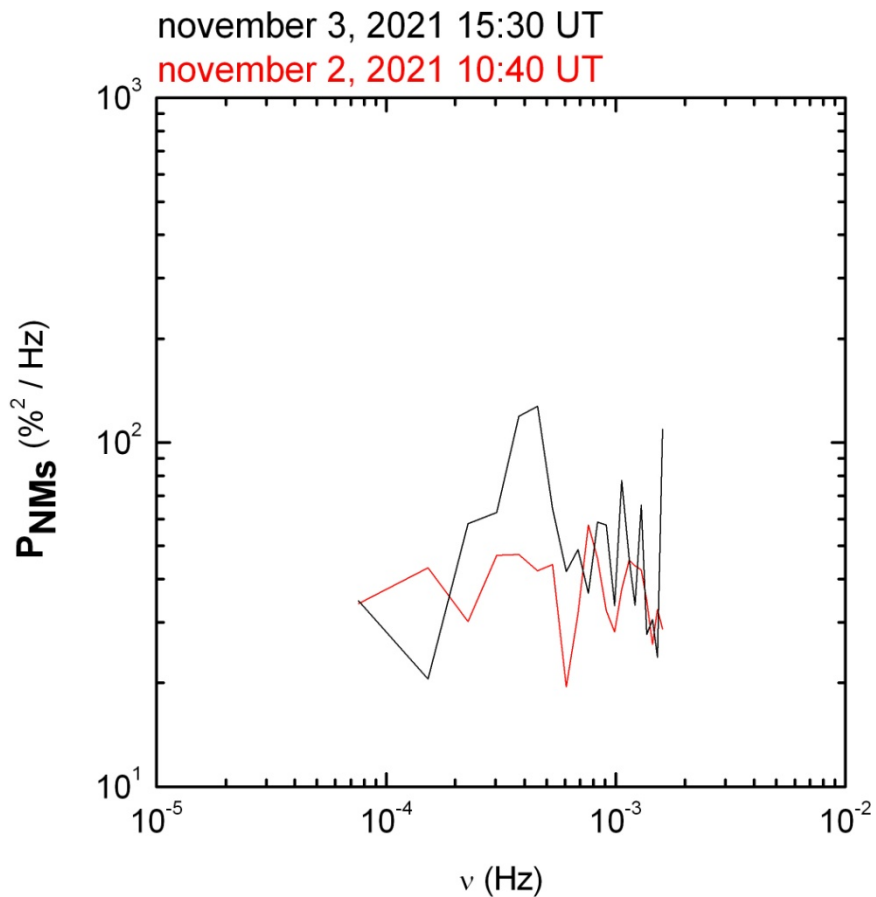
межпланетная ударная волна



Ожидается высокая когерентность между ГКЛ, зарегистрированными на разных станциях!

Возможность прогноза: рост когерентности флуктуаций КЛ по мере приближения к Земле межпланетной ударной волны.



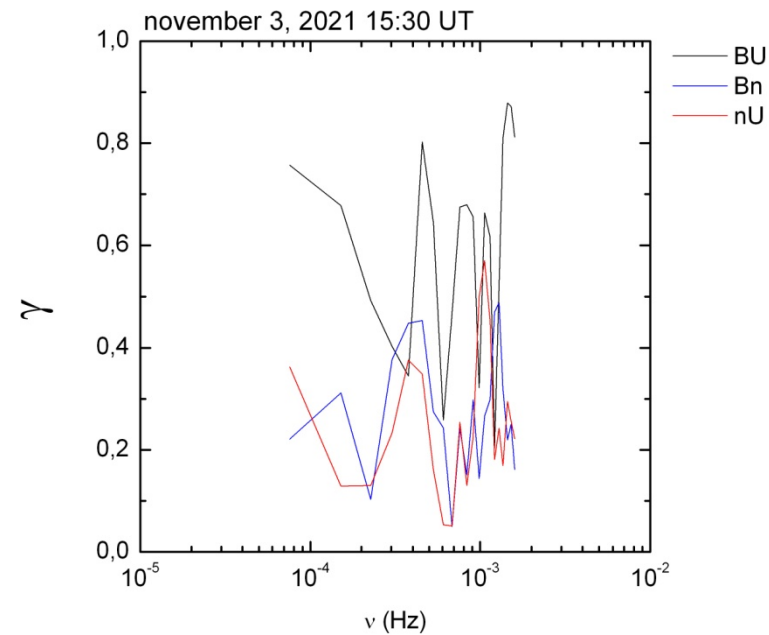
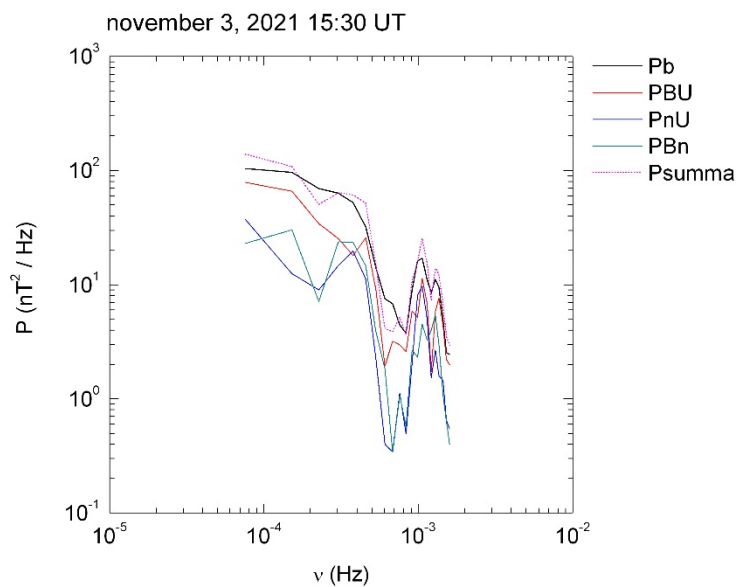
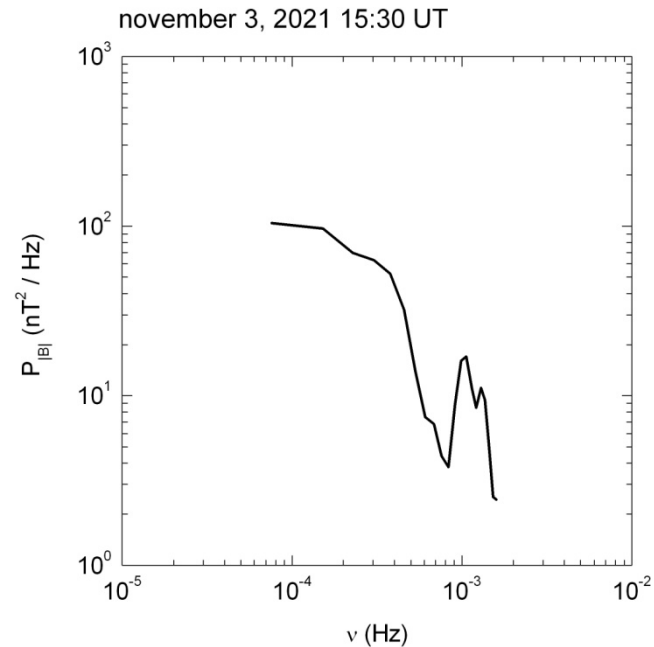
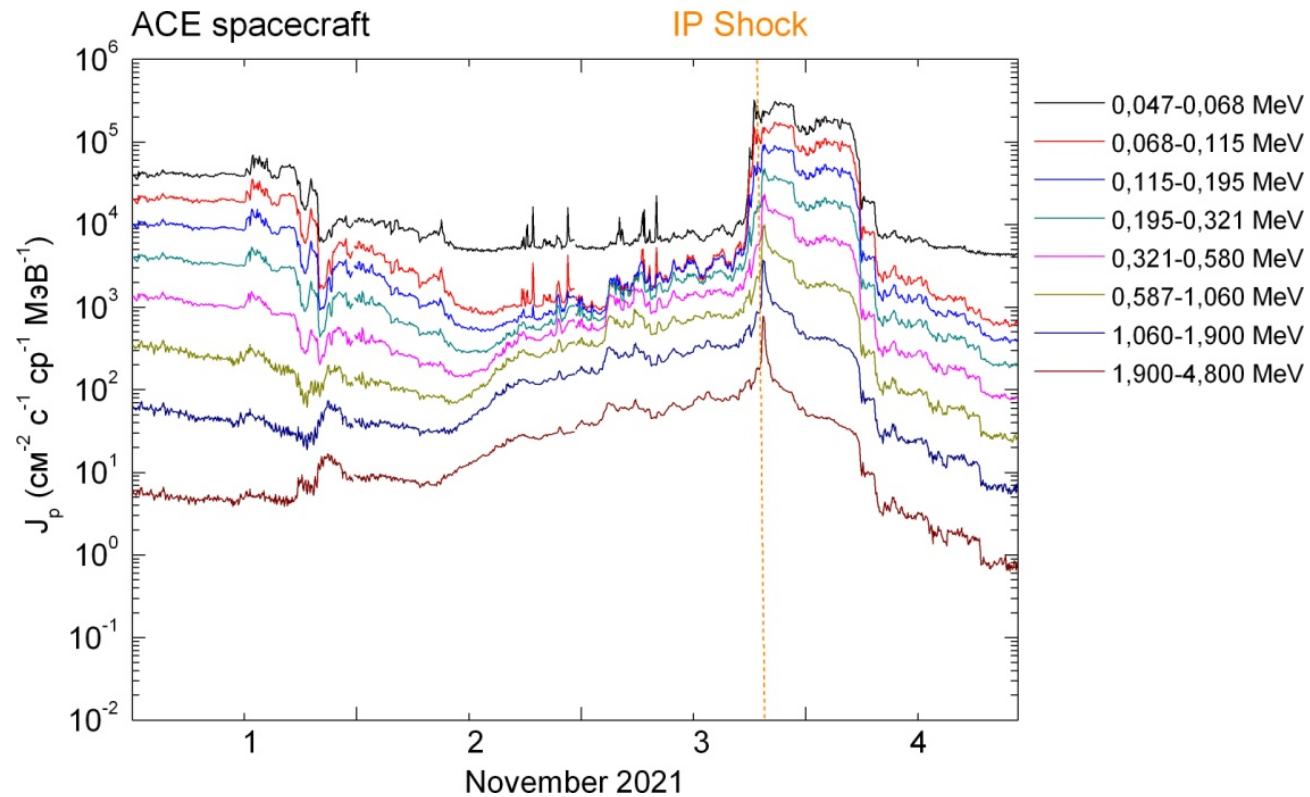


Кросс-спектры флуктуаций КЛ

**Мощность флуктуаций КЛ
 изменяется на порядок
 величины в зависимости от
 уровня солнечной активности.**

Коэффициенты когерентности
 флуктуаций КЛ

**Величина когерентности
 всегда изменяется в пределах
 [0;1] независимо от уровня
 солнечной активности!**



Выводы:

- Установлено, что непосредственно перед приходом межпланетной ударной волны 3 ноября 2021 г., порожденной выбросом корональной массы, на орбиту Земли на инерционном участке спектров турбулентности солнечного ветра в области частот $10^{-4} \div 2 \cdot 10^{-3}$ Гц наряду с другими наблюдались быстрые магнитозвуковые волны (БМЗВ) значительной амплитуды.
- БМЗВ были сгенерированы потоками надтепловых частиц ($E_p \sim 1$ МэВ) в окрестности ударного фронта.
- Поток галактических КЛ был подвержен модуляции БМЗВ, что проявилось в когерентности как появление значимых флуктуаций КЛ на частоте $\approx 4 \cdot 10^{-4}$ Гц ($T \approx 42$ мин).
- Полученные результаты указывают на возможность разработки и реализации в режиме реального времени на основе наземных измерений интенсивности КЛ метода прогноза сильных геофизических проявлений космической погоды.

При анализе использовались данные измерений станций КЛ Бухта Тикси и Якутск, входящих в состав уникальной научной установки «Российская национальная наземная сеть станций космических лучей». Работа поддержана грантом РНФ №22-22-20045.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Односторонняя плотность спектра мощности:

$$\hat{P}_{xx}(v) = 2 \int_0^m w(\tau) R_{xx}(\tau) \cos(2\pi v\tau) d\tau$$

корреляционное окно Тьюки:

$$w_T(\tau) = \frac{1}{2} \left(1 + \cos \frac{\pi\tau}{m} \right), (\tau) \leq m$$

$$w_T(\tau) = 0, (\tau) > m$$

$R_{xx}(\tau)$ - автоковариационная функция

стандартный набор частот:

$$v_k = \frac{k}{2m\Delta t}, k=0,1,\dots,m$$

k - номер соответствующей гармоники.

цифровой, нерекурсивный, полоснопропускающий фильтр:

$$y_n = \sum_{k=-M}^M c_k x_{n-k}$$

Коэффициенты фильтра связаны с его амплитудно-частотной характеристикой через обратное преобразование Фурье:

$$c_k = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} H(\omega) \exp(j\omega) d\omega$$

При наличии 2-х реализаций случайных величин и появляется возможность вычисления плотности кросс-спектра. Его значения можно записать через сумму действительной и мнимой частей:

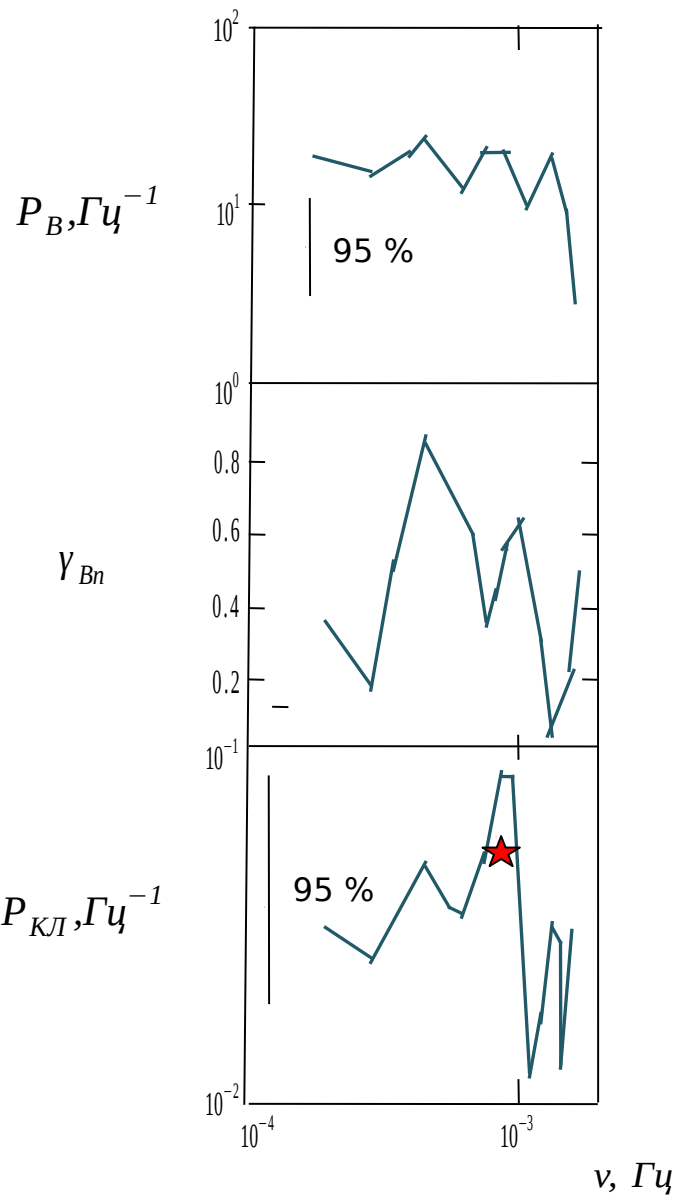
$$P_{xy}(v) = C_{xy}(v) + jQ_{xy}(v)$$

абсолютное значение плотности кросс-спектра:

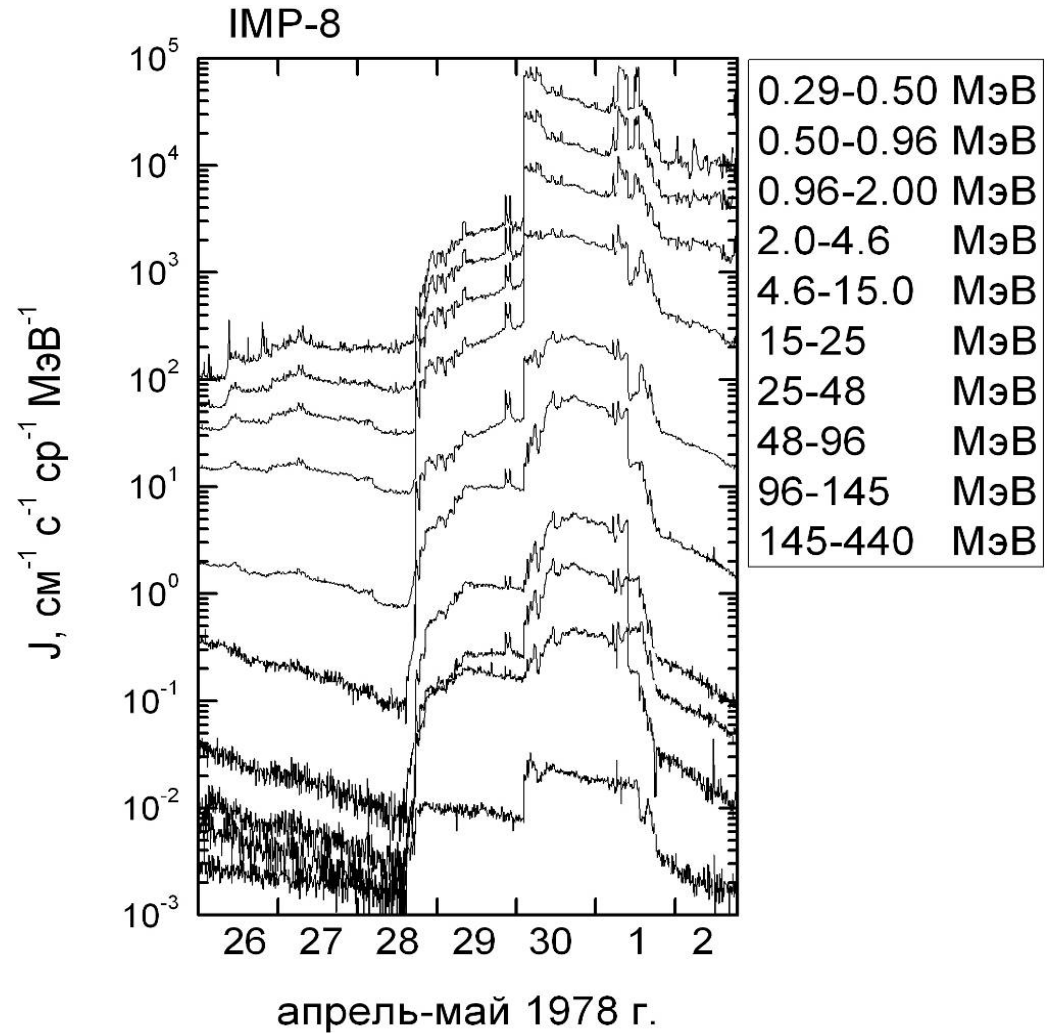
$$|P_{xy}(v)| = \sqrt{C_{xy}^2(v) + Q_{xy}^2(v)}$$

коэффициент когерентности определяется как положительное значение квадратного корня из функции когерентности:

$$\gamma_{xy}^2(v) = |P_{xy}^2| / (P_{xx} P_{yy})$$



Пример: межпланетная ударная волна 30 апреля 1978г.



(Бережко и Стародубцев, Изв. АН СССР, сер. физич., 1988)

Ожидаемая мощность флуктуаций КЛ по измерениям нейтронного монитора Тикси, рассчитанная на основании соотношения (2).