

Влияние активных солнечных областей на измеряемую около Земли скорость солнечного ветра

Богачев С.А., Кириченко А.С., Рева А.А., Лобода И.П.

Институт космических исследований Российской академии наук

Введение

Проблема:

Солнечный ветер (СВ) неоднороден по скорости и температуре. Его разделяют на быстрый ($\approx 600\text{--}700$ км/с) и медленный ($\approx 400\text{--}500$ км/с) компоненты.

Что известно:

Быстрый СВ формируется в корональных дырах — областях с открытыми магнитными линиями.

Медленный СВ имеет более высокую температуру и обогащён элементами с низким потенциалом ионизации (FIP-эффект).

Вопрос:

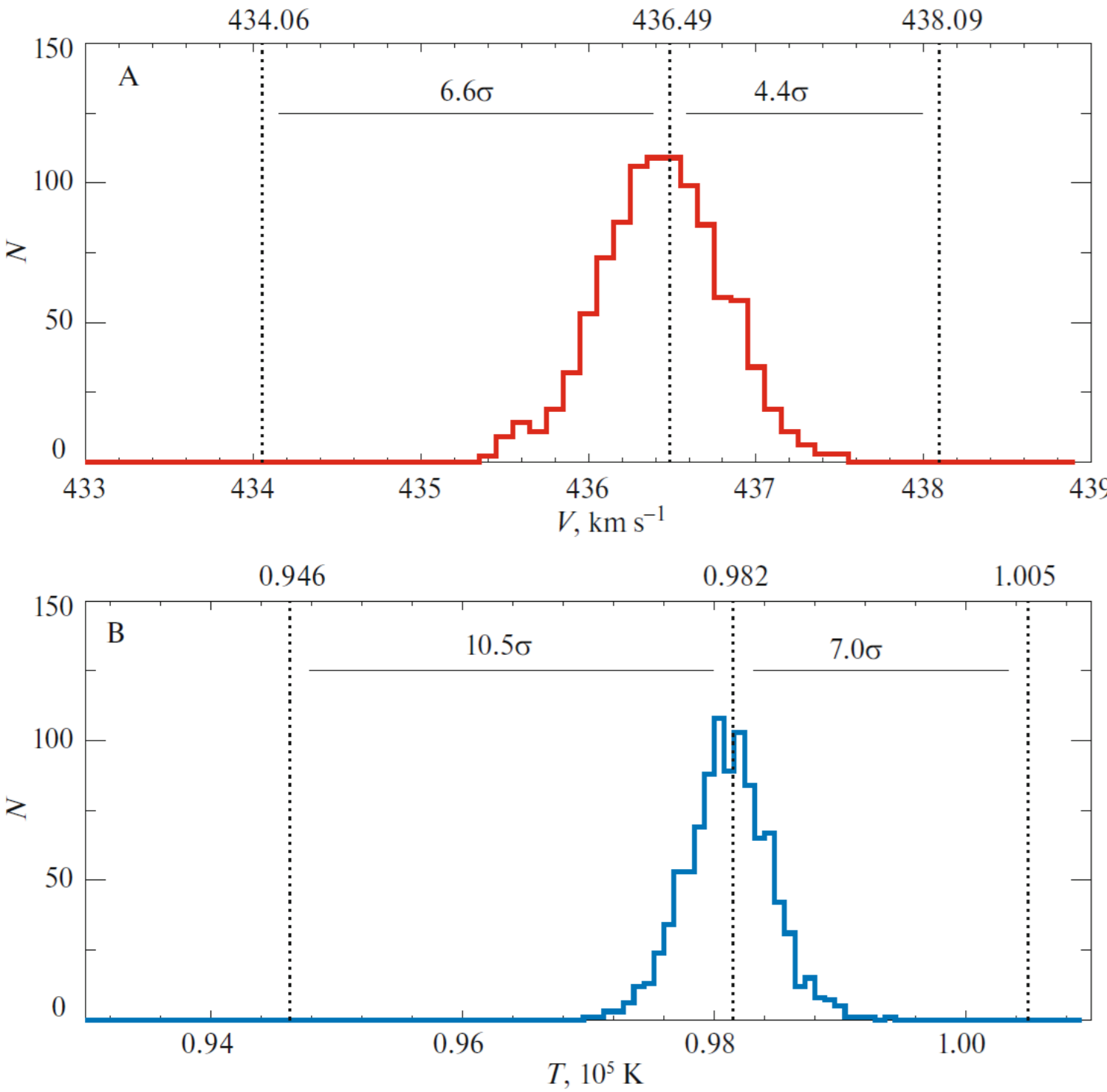
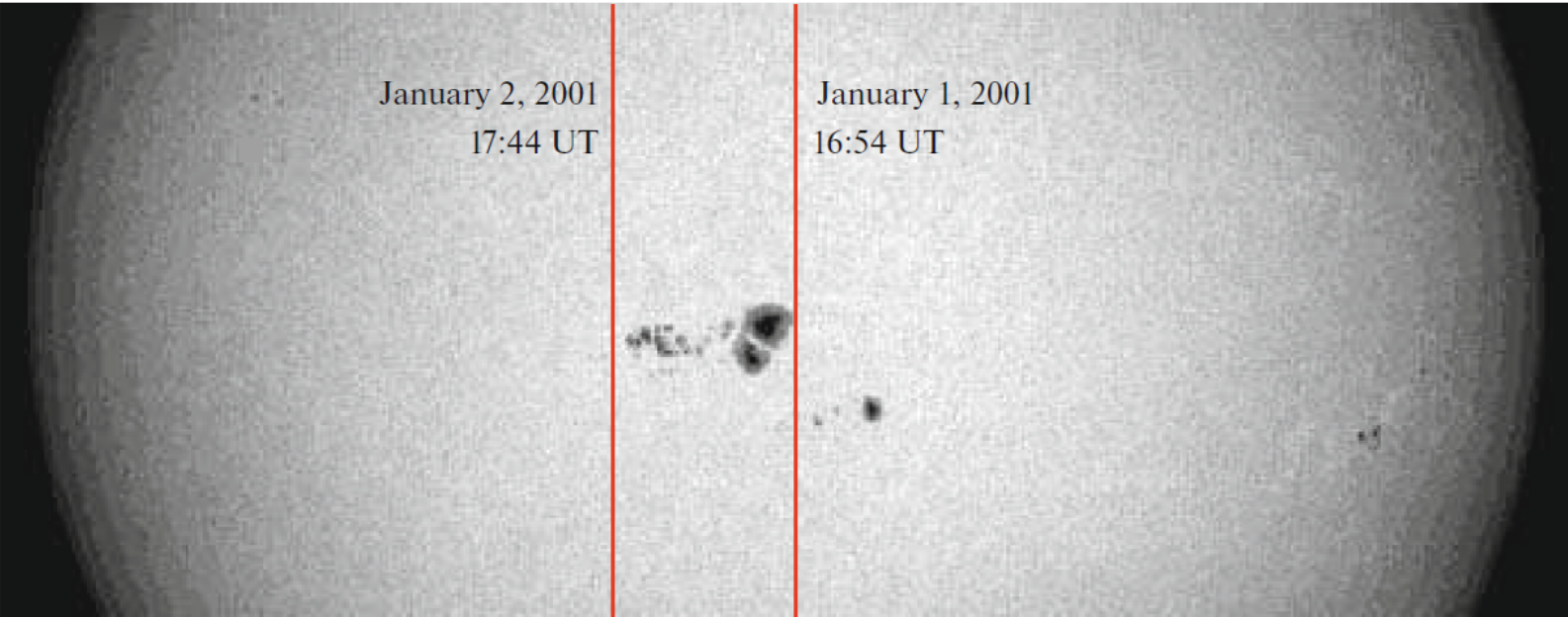
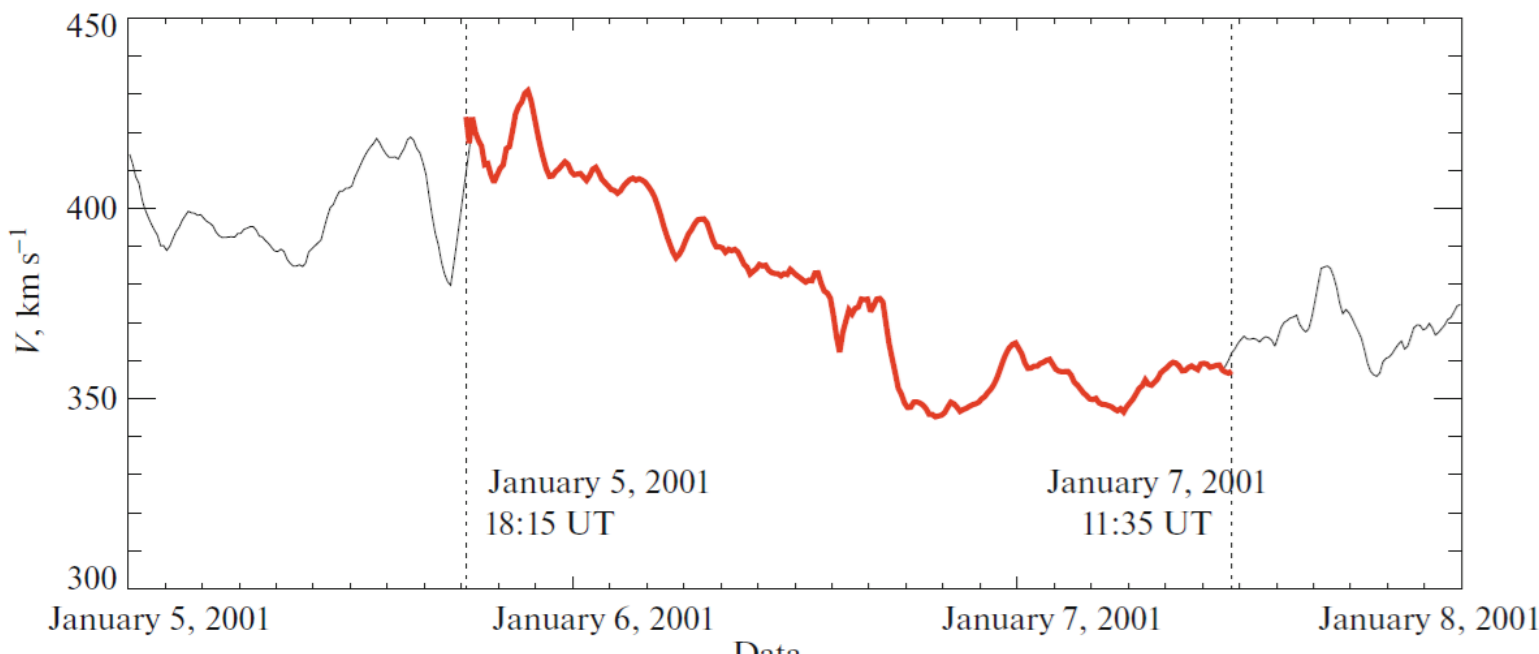
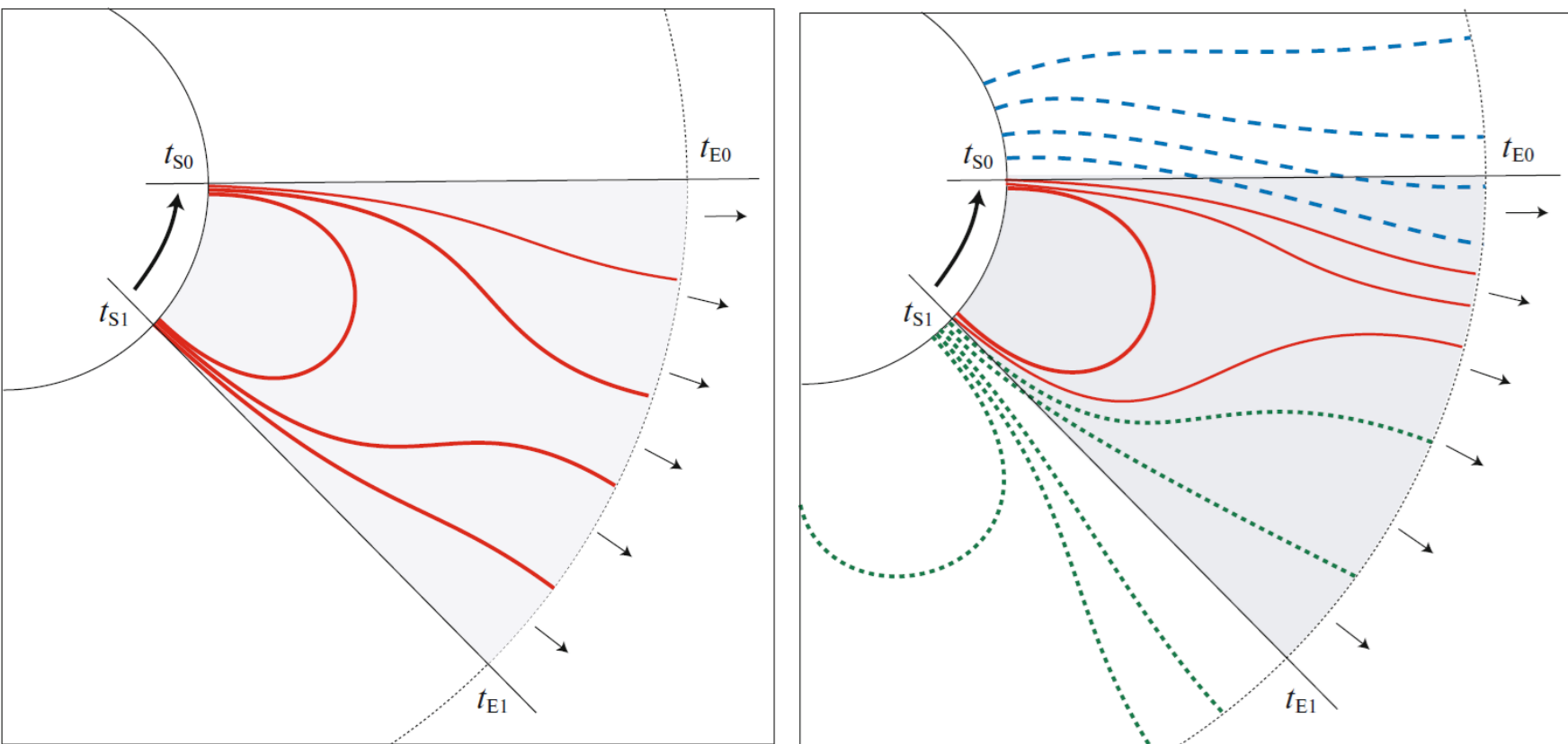
Происхождение медленного СВ остаётся дискуссионным. Предполагается, что его источником могут быть активные области (АО) — замкнутые магнитные петли.

Главная трудность:

Для выхода плазмы из АО в межпланетное пространство необходимы открытые магнитные линии. Возможный механизм — пересоединение на границах АО.

Цель работы:

Статистически проверить, влияют ли активные области на параметры солнечного ветра у Земли.



Рисунки

Рис. 1. Идеализированная (левая панель) и реалистичная (правая панель) структуры межпланетного магнитного поля. Сплошные линии на обеих панелях обозначают магнитное поле исследуемой активной области (АО).

Рис. 2. Иллюстрация метода обработки
Рис. 3. Распределения скорости (верхняя панель) и температуры (нижняя панель) солнечного ветра (СВ) для 1000 случайных выборок из рядов наблюдений за 2000–2002 годы.

Выводы

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ: Мы обнаружили, что в присутствии активных областей (АО) на центральном меридиане скорость солнечного ветра (СВ) в среднем на 1% ниже, а температура — на 6% ниже, чем при отсутствии АО. Эффект мал по величине, но статистически очень значим: отклонение 6.6σ (скорость) и 10.5σ (температура).

ВОЗМОЖНЫЙ МЕХАНИЗМ: Почему АО снижают параметры СВ? 1. Замкнутые магнитные петли АО не выпускают плазму так эффективно, как открытые линии корональных дыр. 2. Плазма может покидать АО только через пересоединение на их границах (interchange reconnection). 3. Этот процесс приводит к формированию более медленного и холодного потока по сравнению с корональными дырами.

СОГЛАСИЕ С ДРУГИМИ ИССЛЕДОВАНИЯМИ: Neugebauer et al. (2002): АО дают более низкую скорость и более высокие ионизационные фракции. Macneil et al. (2019): FIP-эффект (обогащение элементами с низким потенциалом ионизации) в СВ, связанном с АО. Stansby et al. (2021): до 80% магнитного потока открытых линий в максимуме цикла может формироваться в АО.

ОГРАНИЧЕНИЯ РАБОТЫ: 1. Приближение радиального распространения СВ с постоянной скоростью. 2. Спираль Паркера не учитывалась. 3. Интервалы с корональными выбросами массы (СМЕ) не исключались (171 событие за период 2000-2002)
РАЗВИТИЕ: Исключение СМЕ из анализа может усилить наблюдаемый эффект. Это задача для будущих исследований.

Данные и метод

Источники данных:

- ACE (SWEPAM) — скорость (v) и температура (T) протонов солнечного ветра (СВ) у Земли (точка L1)
- NOAA — каталог активных областей (АО): долгота L , протяжённость H , время наблюдения

Период: январь 2000 — декабрь 2002 (максимум 23 цикла)
Всего АО: 1427 (946 пересекли центр. меридиан)

Метод:

1. Для каждой АО определяем время нахождения на центральном меридиане (ЦМ): $[t_0, t_1]$
2. Рассчитываем время прибытия СВ к Земле:
$$t_E = t_S + a / v$$
(a — расстояние до Земли, v — скорость СВ)
3. Все измерения СВ делим на две группы:
 - Группа 1: есть АО на ЦМ ($\approx 40\%$ времени)
 - Группа 2: нет АО на ЦМ ($\approx 60\%$ времени)
4. Сравниваем средние v и T между группами

Статистика:

- 155 155 измерений скорости
- 136 258 измерений температуры
- Рандомизация: 1000 случайных выборок для оценки значимости (отклонение в σ)

Результаты (часть 2: верификация)

Проверка точности

Вопрос: может ли разница в 1% (скорость) и 6% (температура) возникнуть случайно?

Метод проверки:

1. Из 155 155 измерений случайно выбираем 61 950 точек (столько же, сколько в группе 1)
2. Вычисляем среднюю скорость (или температуру)
3. Повторяем 1000 раз
4. Строим распределение случайных средних

Результаты проверки:

Скорость (v):

- Реальное среднее группы 1: 434.06 км/с
- Отклонение от случайного: 6.6σ

Температура (T):

- Реальное среднее группы 1: 94 600 К
- Отклонение от случайного: 10.5σ

Вывод

Вероятность случайного совпадения — менее 10^9
Различия статистически значимы с высоким уровнем доверия.

Параметр	Группа 1	Группа 2	Разница
Скорость	434.0 км/с	438.1 км/с	-1%
Температура	94 600 К	100 500 К	-6%

БЛАГОДАРНОСТИ:

Российский научный фонд (проект 23-72-30002)