

**ВАРИАЦИИ СКОРОСТИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА
(MICROSTREAMS) В ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ
И В УДАЛЕННЫХ ОБЛАСТЯХ ГЕЛИОСФЕРЫ**

Ерофеев Д.В.

Институт прикладной астрономии РАН, Санкт-Петербург, Россия

**VARIATIONS OF SOLAR WIND VELOCITY (MICROSTREAMS) IN
NEAR-EARTH SPACE AND IN DISTANT HELIOSPHERE**

Erofeev D.V.

Institute of Applied Astronomy of the RAS, St. Petersburg, Russia

<https://doi.org/10.31725/0552-5829-2023-103-106>

We compare microstreams (solar wind velocity variations with time scales $\sim$ day) observed in near-Earth heliosphere with those observed by Ulysses spacecraft at distances of 1.9 to 5.4 AU, in particular, in polar wind. It is found that microstreams observed near Earth and in polar wind show similar variations of transversal velocity, proton temperature, density, and magnetic pressure, and these variations tend to decrease with increasing distance. In addition, microstreams indicate compressions (rarefactions) at leading (tailing) fronts. However, microstreams in low-latitude zone at distances ≈ 5 AU show little or no such compressions.

Микропотоками (*microstreams*) были названы возрастания скорости с амплитудой в десятки км/с и временным масштабом порядка суток, наблюдавшиеся КА Ulysses в полярном солнечном ветре (СВ) в периоды минимумов солнечного цикла [1, 2]. В [2] было показано, что микропотоки связаны с вариациями параметров плазмы (плотности, температуры, изотопного состава и др.) и имеют сжатия и разрежения на переднем и заднем фронтах, хотя и менее выраженные по сравнению с областями взаимодействия быстрого и медленного СВ. Позднее было найдено, что микропотоки, вероятно, связаны с полярными джетами и с быстрыми инверсиями радиального магнитного поля (*switchbacks*) [3, 4]. Поскольку неоднородности скорости СВ с масштабом порядка суток имеют место и в низкоширотном СВ (мы будем называть их также микропотоками), интересно сравнить характеристики этих структур на разных гелиоширотах и разных гелиоцентрических расстояниях. Такое сравнение частично (не касаясь мелкомасштабной структуры микропотоков) проделано в настоящей работе.

Для наших целей использованы измерения СВ в околоземной гелиосфере из базы данных OMNI-2 и измерения КА Ulysses за 1992–2008 гг. Данные содержат часовые значения вектора скорости $\mathbf{V}$ (в системе отсчета RTN), плотности N_p и температуры T_p протонов, а также вектора магнитного поля $\mathbf{B}$. Предварительная обработка данных состояла в отборе тех интервалов времени, когда СВ был сравнительно спокойным (отсутствовали сильные возмущения). Затем из данных Ulysses было сформировано три

выборки. Две из них (далее обозначаемые U1 и U2) включают измерения, полученные в периоды вблизи минимумов солнечного цикла в полярном ветре (в тех областях, где отсутствовала секторная структура ММП и медленный СВ). Выборка U1 охватывает гелиографические широты от 35° до 60° и интервал гелиоцентрических расстояний $2.9 < D < 4.5$ АЕ, а U2 - широты 60° – 80° и $1.9 < D < 3.2$ АЕ. Третья выборка (ниже обозначаемая U3) включает данные, полученные на широтах ниже 35° и $4.5 < D < 5.4$ АЕ. Т.к. выборки U1 и U2 содержат исключительно данные о быстром СВ, из U3 и из данных об околоземном СВ (обозначим их NE) были исключены измерения в медленном СВ. При анализе данных применялось разбиение их на короткие временные интервалы длиной 4 сут. Поскольку параметры плазмы (кроме скорости) сильно зависят от D , мы рассматриваем их вариации по отношению к средним значениям для каждого 4-суточного интервала.

Для исследования применен метод наложенных эпох (МНЭ), который делался по следующей схеме: (1) Для каждого интервала длиной 4 сут. по сглаженной временной зависимости вариаций скорости $\delta V_R(t)$ находится момент максимума t_{MAX} ; (2) Временные зависимости δV_R и всех других параметров (не сглаженные) приводятся к шкале временных лагов $\Delta t = t - t_{\text{MAX}}$; (3) Производится усреднение по множеству 4-суточных интервалов, что дает усредненные зависимости всех параметров от Δt . Аналогично делается МНЭ для минимумов δV_R . Результаты МНЭ удобно представить в виде годографов – зависимостей, связывающих каждый из параметров с δV_R . При этом результаты МНЭ для максимумов и минимумов скорости комбинируются таким образом, чтобы интервалы временных лагов были ограничены теми значениями Δt , при которых $\delta V_R(\Delta t)$ обращается в ноль.

На рис. 1 показаны полученные с помощью МНЭ зависимости между вариациями плотности δN_p и скорости δV_R (слева), а также температуры δT_p и скорости δV_R (справа): красным – для околоземного СВ, зеленым и синим – для полярного СВ в интервалах широт 35 – 60° и 60 – 80° (напомним, что вариации всех параметров, кроме скорости – относительные). Каждая из показанных на рис.1 зависимостей демонстрирует (1) изменение соответствующего параметра, происходящее в теле микропотоков и связанное с δV_R приблизительно линейной зависимостью, и (2) наличие значительного гистерезиса, который очевидно связан с присутствием сжатий и разрежений в областях больших градиентов скорости на передних и задних фронтах микропотоков (на рис. 1 переднему фронту соответствуют верхние ветви годографов). Аналогичными свойствами обладают годографы для газового и магнитного давлений, однако зависимость между δV_T и δV_R показывает только их линейную связь без заметного гистерезиса. Годографы для выборки U3 (не показаны) существенно отличаются тем, что все они не

имеют заметного гистерезиса, т.е. микропотоки в низкоширотной зоне и $D \approx 5$ АЕ не обладают уплотнениями и разрежениями на фронтах.

На рис. 1 также можно заметить, что амплитуда изменения скорости в микропотоках по разным выборкам данных получается разной. Оценки показывают, что амплитуда скорости падает от 56 км/с в околоземном ветре до 32 км/с на расстоянии $D = 2.5$ АЕ, и затем, более медленно, до 25 км/с на $D = 4.9$ АЕ. Амплитуда изменения трансверсальной скорости также уменьшается с расстоянием, от 10 км/с до практически нулевого значения.

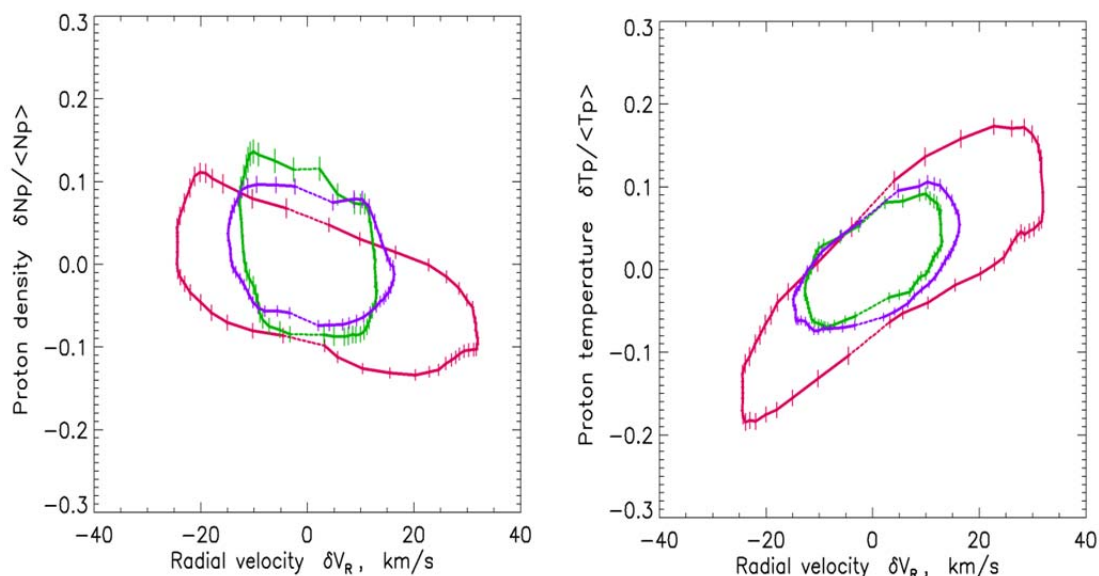


Рис. 1.

Исходя из результатов МНЭ, для всех выборок данных были оценены амплитуды вариаций параметров плазмы внутри микропотоков, т.е. вариаций, линейно связанных с вариациями скорости (амплитуда может быть >0 или <0 , в зависимости от знака корреляции между вариациями параметра и δV_R). Полученные значения амплитуд рассмотрим в зависимости от D , поскольку их изменения с расстоянием оказались более гладкими по сравнению с гелиоширотными. На рис. 2, слева показаны амплитуды вариаций плотности и температуры (синяя и красная линии), а справа – газового P_g и магнитного B^2 давлений (черная и зеленая линии), в зависимости от D . Как можно видеть, для микропотоков характерно возрастание температуры и уменьшение плотности протонов с ростом скорости, и это свойство сохраняется во всем диапазоне расстояний от 1 до ≈ 5 АЕ. Так как изменение температуры больше по абсолютной величине, в микропотоках происходит некоторое возрастание давления плазмы P_g , по крайней мере при $D < 4$ АЕ. Однако при возрастании V_R магнитное давление уменьшается, что отчасти компенсирует возрастание P_g , так что микропотоки можно отнести к классу сбалансированных по давлению структур (PBS). Отметим также, что

амплитуды вариаций плотности и температуры изменяются с расстоянием примерно пропорционально изменению амплитуды радиальной скорости.

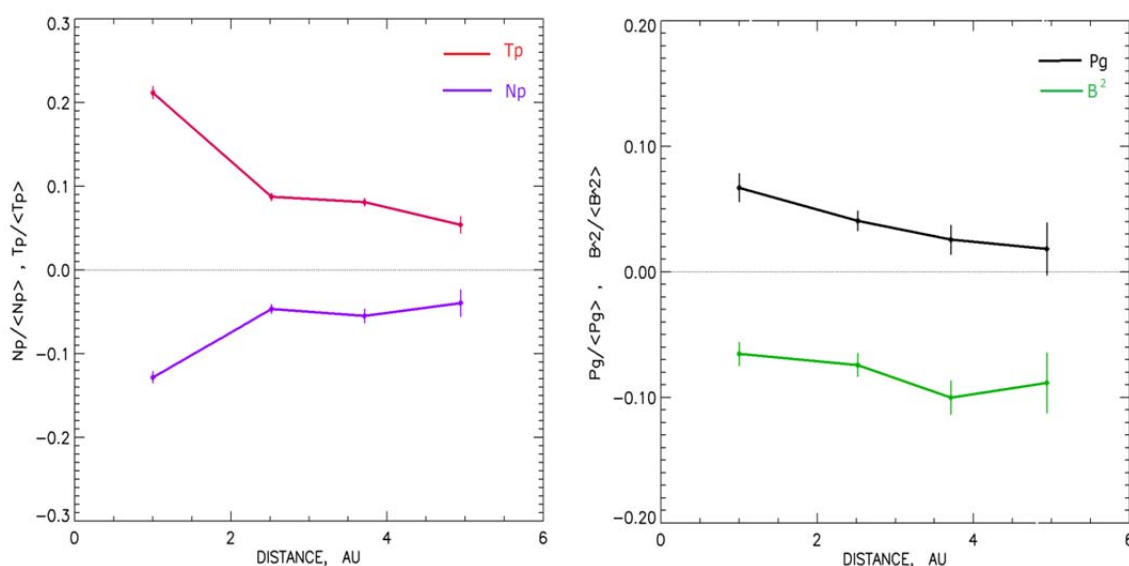


Рис. 2.

По результатам МНЭ, были также оценены амплитуды вариаций параметров за счет сжатий и разрежений на фронтах микропотоков. Значения амплитуд, полученные по выборкам данных NE, U1 и U2 (т.е. для $1 \leq D < 4$ AE), почти не зависят от расстояния и составляют ≈ 0.15 для плотности и температуры, и ≈ 0.3 для магнитного и плазменного давлений. Однако в случае выборки U3 ($D \approx 5$ AE, широты ниже 35°) амплитуды изменения всех параметров падают до близких к нулевым значениям, т.е. сжатия и разрежения выражены гораздо слабее или отсутствуют. Маловероятно, чтобы столь сильное изменение свойств микропотоков произошло только за счет относительно небольшого возрастания расстояния. По-видимому, в данном случае играет роль структурное различие между сравнительно однородным полярным и более неоднородным низкоширотным СВ.

Использованные в работе экспериментальные данные взяты из архивов NASA GSFC (<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>)

Литература

1. McComas, D.J. et al. // JGR, 1995, V. 100, A10, P. 19, 893-19, 902
2. Neugebauer, M. et al. // JGR, 1995, V. 100, A12, P. 23, 389-23, 395
3. Neugebauer, M. // Astrophys. J., 2012, V. 750:50
4. Neugebauer, M. & Sterling, A.C. // Astrophys. J. Lett., 2021, V. 920:31