

## ДИНАМО ЗА ГЕЛИОПАУЗОЙ: ПРОВЕРКА ПО ИМЕЮЩИМСЯ ДАННЫМ КА ВОЯДЖЕР 2

© 2021 г. Е. С. Беленькая<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,  
НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, Москва, Россия*

*\*E-mail: elena.belenkaya.msu@gmail.com*

Поступила в редакцию 04.05.2021 г.

После доработки 15.07.2021 г.

Принята к публикации 27.07.2021 г.

Предложен возможный механизм динамо за гелиопаузой для объяснения увеличения магнитного поля без изменения его направления, наблюдаемого космическими аппаратами Вояджер 1 и Вояджер 2 при пересечении границы гелиосферы. Перечислены необходимые условия работы динамо и показано, что они выполняются за гелиопаузой. Выполнение необходимых условий не гарантирует работу механизма динамо, но создает предпосылки для него. Статья основана на докладе, сделанном на конференции “Идеи С.Б. Пикельнера и С.А. Каплана и современная астрофизика” (ГАИШ МГУ, 8–12 февраля 2021 г.).

*Ключевые слова:* солнечный ветер, межзвездная среда, гелиосфера, гелиопауза, магнитное поле

**DOI:** 10.31857/S0004629921110049

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Оба космических аппарата (КА) Вояджер, приближаясь к границе гелиосферы, обнаружили, что величина магнитного поля плавно увеличивается во внутреннем гелиошише – области между внутренней ударной волной (termination shock) и гелиопаузой (границей гелиосферы) – и резко возрастает на гелиопаузе без изменения направления. По данным Вояджер 1 (V1) напряженность магнитного поля скачком увеличивалась от 0.2 до 0.4 нТл во время пересечения гелиопаузы [1]. 25 августа 2012 г. на расстоянии 121.7 а.е. на широте  $\sim 34.5^\circ$  в гелиографической инерциальной системе координат V1 вошел во внешний гелиошиш – область между гелиопаузой и возможной головной ударной волной в межзвездной среде [2, 3]. Поскольку в межзвездной среде скорость потока, звуковая и альфвеновская скорости одного порядка, внешней ударной волны может и не быть, поэтому само понятие внешнего гелиошиша теперь часто заменяют на термин “очень близкая межзвездная среда” (VLISM). Пространственный масштаб области резкого возрастания магнитного поля на гелиопаузе при ее пересечении КА V1 составлял 0.01–0.02 а.е. [4]. Таких пересечений гелиопаузы Вояджером 1 было не одно, а пять, возможно, из-за движений границы гелиосферы [1]. Неожиданно оказалось, что направление магнитного поля не изменилось во время пересечения гелиопаузы.

Burlaga et al. [1] объясняли наблюдаемое усиление магнитного поля за гелиопаузой явлением “магнитного барьера”, наподобие того, как это происходит у Земли, когда вблизи препятствия (магнитопаузы) ослабевает скорость обтекающего потока и увеличивается напряженность поля. Однако при этом не должно сохраняться направление магнитного поля солнечного ветра при пересечении гелиопаузы. Orher and Drake [5] представили результаты расчетов в построенной ими 3Д МГД-модели, согласно которым магнитное поле солнечного ветра влияет на магнитное поле вне гелиопаузы. Из их результатов следовало, что межзвездное магнитное поле закручивается вокруг гелиосферы по мере приближения к ней, при этом растет восточно-западный и убывает нормальный к гелиопаузе компонент. Только на больших расстояниях от гелиопаузы магнитное поле в межзвездной среде восстанавливает свое направление, отличающееся от спирали Паркера. Их модель включала пять жидкостей; учитывалась перезарядка ионов с нейтралами.

Наряду с другими объяснениями этого явления был предложен механизм динамо за гелиопаузой [6, 7]. Предполагалось, что вдоль силовых линий магнитного поля, закрученных из-за вращения Солнца в спирали Паркера, вблизи гелиопаузы движется плазма. Это вращение затухает за гелиопаузой, а выделяющаяся там энергия может

трансформироваться в магнитную, усиливая поле в очень близкой межзвездной среде.

Вояджер 2 (V2) пересек гелиопаузу 5 ноября 2018 г. на расстоянии  $\sim 119$  а.е., на эклиптической широте  $-32.2^\circ$  [8]. Во время этого пересечения напряженность магнитного поля резко увеличилась с  $\sim 0.5$  до  $\sim 0.65$  нТл [8, 9], при этом его направление почти не изменилось (в пределах  $3^\circ$ ) [8]. Burlaga et al. [8] отмечали, что скорость и магнитное поле были параллельны поверхности гелиопаузы в точке пересечения. Авторы оценили толщину слоя с резким нарастанием магнитного поля на гелиопаузе по данным КА V2  $\leq 0.005$  а.е. Наблюдалось всего одно пересечение гелиопаузы Вояджером 2.

Солнечный ветер, распространяясь от Солнца, вначале следует за магнитным полем до критических точек, расположенных на гелиоцентрическом расстоянии  $\leq 20$  солнечным радиусам, где звуковое ( $M_S$ ) и Альфвеновское ( $M_A$ ) числа Маха равны единице. За этими точками остается только радиальная составляющая скорости солнечного ветра, азимутальный и нормальный компоненты малы. Этот режим сохраняется до внутренней ударной волны, расположенной на радиальном расстоянии от Солнца  $\sim 94$  а.е. для V1 и  $\sim 84$  а.е. для V2 [10], за которой скорость снова может следовать за магнитным полем (см. раздел 2). Среднее направление магнитного поля за внутренней ударной волной совпадает со спиралью Паркера [10]. Описание того, как меняется режим течения плазмы при прохождении точки, где Альфвеновское число Маха равно единице, см., например, в [11, 12].

В настоящей работе дается дополнительная проверка выполнения необходимых условий генерации динамо в эпоху пролета Вояджера 2 для контроля гипотезы, высказанной после пересечения гелиопаузы Вояджером 1 [6, 7]. В работах [6, 7] впервые было показано выполнение необходимых условий возбуждения динамо за гелиопаузой. В разделе 2 описаны основные особенности действия динамо за гелиопаузой и рассмотрены условия вблизи места пересечения КА V2 с гелиопаузой для проверки выполнения необходимых условий работы динамо. В разделе 3 представлены выводы.

## 2. ДИНАМО ЗА ГЕЛИОПАУЗОЙ

Мы кратко перечислим здесь некоторые элементы предлагаемого механизма динамо, действующего за гелиопаузой, рассмотренные в работе Belenkaia [6, 7] для V1, и проверим, актуален ли этот механизм для КА V2. Мы полагаем, что до гелиопаузы (в гелиосфере) магнитное поле создано Солнцем и системой гелиосферного токового слоя, а за ней — звездами и межзвездной

средой. По данным обоих космических аппаратов направление магнитного поля во внутреннем гелиошиесе было в среднем близко к спирали Паркера [10]. Магнитное поле вне гелиопаузы драпировано вокруг нее [10]. При пересечении V1 и V2 с гелиопаузой направление магнитного поля практически не менялось (т.е. тоже описывалось спиралью Паркера), а его напряженность возрастала.

Elsasser [13] утверждал, что для работы динамо необходимо существование диффузионной области, поэтому в зоне динамо существенны вязкость и турбулентность. Вопрос о диффузии в области гелиопаузы рассматривали, например, Quenby and Webber [14]. В ближней локальной межзвездной среде турбулентность анизотропна [15].

Для формирования азимутального магнитного поля ( $\mathbf{B}_{\text{VLISM}_\phi}$ ) из фонового полоидального ( $\mathbf{B}_{\text{VLISM}_p}$ ) механизмом динамо за гелиопаузой необходимо существование дифференциального вращения [см., например, 16]. Дифференциальное вращение за гелиопаузой может быть из-за торможения вращения в слое с более низкой проводимостью по сравнению с высокой продольной проводимостью вне его. Baranov and Fahr [17] отмечали, что из-за наличия большого количества нейтральных атомов водорода в VLISM сечение их столкновений с заряженными частицами может превышать сечение столкновений заряженных частиц между собой.

Если в грубом приближении гелиопаузу аппроксимировать параболоидом вращения, то к ней можно применить подход, разработанный Алексеевым [18] и Алексеевым и Калегаевым [19]. В этих работах оценивалось эффективное магнитное число Рейнольдса  $R_{m\text{-eff}} = (R_1/\delta_B)^2$  для параболоидного диссипативного слоя магнитопаузы Земли, где  $R_1$  — пространственный масштаб магнитопаузы, определяемый геоцентрическим расстоянием до ее подсолнечной точки, а  $\delta_B$  — толщина диссипативного слоя, на котором резко меняется магнитное поле. Характерный размер гелиопаузы, рассматриваемой как тонкий параболоидный диссипативный слой, на котором резко меняется магнитное поле, порядка  $R_1 \approx 120$  а.е., судя по данным Вояджеров (расстояние от центра Солнца). Толщина  $\delta_B$ , согласно данным Вояджер 1, порядка  $0.01-0.02$  а.е. Отсюда следует, что эффективное магнитное число Рейнольдса, определяемое уравнением  $(R_{m\text{-eff}})^{1/2} = R_1/\delta_B \approx 8000$ , порядка  $R_{m\text{-eff}} \approx 64 \times 10^6$ . По определению  $R_{m\text{-eff}} = \mu_0 \sigma_{\text{eff}} R_1 V_{\text{eff}}$ , где  $\sigma_{\text{eff}}$  — эффективная электрическая проводимость в тонком диффузионном слое гелиопаузы, а  $V_{\text{eff}}$  — характерная скорость. Если считать, что средняя скорость за гелиопаузой порядка скорости в ближней межзвездной среде  $\sim 26$  км с $^{-1}$  [20], то получим  $\sigma_{\text{eff}} = R_{m\text{-eff}}/(\mu_0 R_1 V_{\text{eff}}) \approx$

$\approx 10^9 \text{ с}^{-1}$ . Таким образом, эффективную проводимость в тонком диффузионном слое гелиопаузы можно оценить как  $\sigma_{\text{eff}} \approx 10^9 \text{ с}^{-1}$  [6], а проводимости солнечного ветра и VLISM:  $\sigma_{\text{sw}} = 10^{14} - 10^{16} \text{ с}^{-1}$  [21] и  $\sigma_{\text{VLISM}} = 3.5 \times 10^{12} \text{ с}^{-1}$  (для частично ионизованной плазмы VLISM) [17]. Это означает, что проводимость на гелиопаузе ниже, чем вне нее, что может служить причиной возникновения дифференциального вращения.

Для роста  $\mathbf{V}_{\text{VLISM}_\phi}$  необходимо наличие фонового полоидального магнитного поля  $\mathbf{V}_{\text{VLISM}_p}$ . Фоновое полоидальное магнитное поле в межзвездном пространстве  $\sim 0.3 \text{ нТл}$  [22–24]. Рост полоидального компонента магнитного поля из растянутого тороидального может быть реализован за гелиопаузой за счет  $\alpha$ -эффекта. Для  $\alpha$ -эффекта важна средняя плотность спиральности  $h = \mathbf{V}_{\text{VLISM}}(\nabla \times \mathbf{V}_{\text{VLISM}})$ , так как она пропорциональна коэффициенту  $\alpha$ , который связывает среднее магнитное поле  $\langle \mathbf{V}_{\text{VLISM}} \rangle$  со средней электродвижущей силой  $\epsilon$  ( $\epsilon = \alpha \langle \mathbf{V}_{\text{VLISM}} \rangle$ ). Среднюю электродвижущую силу можно записать как  $\epsilon = \langle \mathbf{V}_{\text{VLISM}_p} \times \mathbf{V}_{\text{VLISM}_s} \rangle$  [6], где  $\mathbf{V}_{\text{VLISM}_p}$  — полоидальная составляющая скорости в VLISM, а  $\mathbf{V}_{\text{VLISM}_s}$  — составляющая магнитного поля в VLISM в направлении  $s$ , перпендикулярном оси вращения Солнца. Межзвездная плазма, обтекающая гелиопаузу, обеспечивает полоидальную скорость  $\mathbf{V}_{\text{VLISM}_p}$ , а отклонение направления фонового магнитного поля в межзвездной среде от оси вращения Солнца дает неосесимметричный компонент  $\mathbf{V}_{\text{VLISM}_s}$ . Таким образом, необходимые условия для усиления магнитного поля межзвездной среды рассмотренными здесь движениями проводящей плазмы могут реализоваться за гелиопаузой в динамо-области.

Магнитное насыщение может быть грубо оценено из равномерного распределения магнитной и кинетической энергий [25], что означает, что плотность энергии магнитного поля должна быть порядка плотности кинетической энергии потока, генерирующего динамо [26]. Кинетическая энергия, которая может быть потрачена на усиление магнитного поля, представляет собой энергию затухающего вращения за гелиопаузой.

Krimigis et al. [3] отмечали, что флуктуации тангенциальной скорости, измеренной КА V2 во внутреннем гелиошиесе, составляли от 60 до 160 км  $\text{с}^{-1}$ . Вблизи гелиопаузы тангенциальная скорость достигала  $\sim 147 \text{ км с}^{-1}$  [3]. Данные по скорости за пределами гелиопаузы отсутствуют. Значения скорости, полученные на V2, были измерены во внешней гелиосфере напрямую впервые, так как на КА V1 непосредственных измерений скорости и плотности не было с 1980 г. Все три компонента скорости во внутреннем гелио-

шиесе по данным V2 изменились после прохождения внутренней ударной волны [9].

По данным о средних значениях плотности  $\langle n \rangle \sim 0.002 \text{ см}^{-3}$  [27], магнитного поля  $\langle B \rangle \sim 0.4 \text{ нТл}$  и тангенциальной скорости  $\langle V \rangle \leq 147 \text{ км с}^{-1}$  во внутреннем гелиошиесе [9] можно найти соотношение между средней скоростью плазмы и альфвеновской скоростью  $U_A \sim 200 \text{ км с}^{-1}$  в этой области:  $\langle V \rangle \leq U_A$ . Следовательно, во внутреннем гелиошиесе течение плазмы становится доальфвеновским. При этом магнитное поле снова контролирует движение плазмы, как вблизи Солнца, и плазма движется вдоль спиральных магнитных силовых линий (восстанавливается вращение плазмы, прерванное при прохождении солнечным ветром критических точек).

Opher and Drake [5] представили модель, в которой они показали, что для ненулевого магнитного поля солнечного ветра межзвездное магнитное поле за гелиопаузой вращается в направлении вращения Солнца. Мы полагаем, что максимальная азимутальная скорость за гелиопаузой меньше/равна азимутальной скорости во внутреннем гелиошиесе у гелиопаузы. Для того, чтобы усилить магнитное поле в межзвездной среде, азимутальная скорость в VLISM ( $V_{\text{VLISM}_\phi} = 147 \text{ км с}^{-1}$ ) должна быть больше скорости потока в межзвездной среде ( $\sim 26 \text{ км с}^{-1}$ ), что подтверждается измерениями.

Кроме того, если во время затухания вращения высвободившаяся энергия идет на усиление магнитного поля за гелиопаузой (гидромагнитное динамо), то плотности кинетической энергии вращения и магнитной энергии усиленного поля должны быть одного порядка [26]. Это эквивалентно условию  $V_{\text{VLISM}_\phi} \geq U_{A\text{-VLISM}}$ , где  $U_{A\text{-VLISM}}$  — альфвеновская скорость в межзвездной среде вблизи гелиопаузы. За гелиопаузой плотность плазмы во время пролета V2 в январе 2019 г., найденная по измеренной частоте 1.78 кГц ленгмюровских колебаний электронов, была  $\sim 0.04 \text{ см}^{-3}$  [9]. Для измеренного магнитного поля 0.65 нТл значение альфвеновской скорости в VLISM было  $U_{A\text{-VLISM}} \sim 69 \text{ км с}^{-1}$ . Если азимутальная скорость вращения, которое тормозится за гелиопаузой, больше  $U_{A\text{-VLISM}}$ , необходимое условие работы динамо выполнено. По измерениям Вояджера 2  $V_{\text{VLISM}_\phi} \sim 147 \text{ км с}^{-1}$  [3], следовательно,  $V_{\text{VLISM}_\phi} > U_{A\text{-VLISM}}$ .

Ширина внешнего магнитошиеса, предположительно,  $\sim 150 \text{ а.е.}$  или больше [28]. Burlaga and Ness [29] отмечали, что влияние Солнца сказывается во внешнем гелиошиесе, несмотря на то, что плазма и магнитное поле из гелиосферы не проникают туда. Динамо механизм действует в относительно тонком слое с эффективной диссипацией. В рассматриваемом случае таким слоем

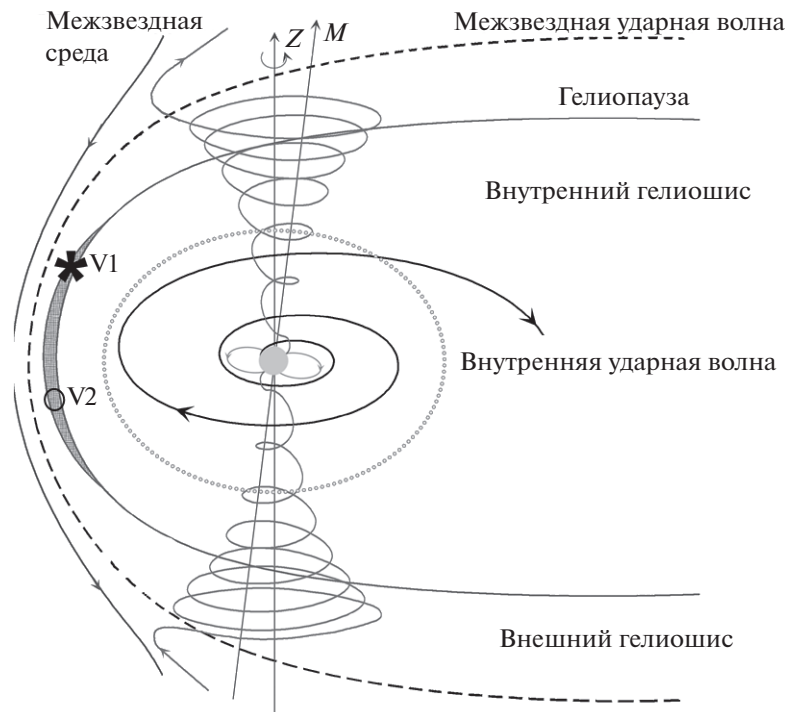


Рис. 1. Схема переноса вращения Солнца на гелиопаузу.

являются гелиопауза и ближайшая к ней область межзвездной среды. Можно выделить два граничных слоя. В одном из них с толщиной  $\delta_v$  меняется скорость, в другом с толщиной  $\delta_B$  меняется магнитное поле. Отношение толщин этих граничных слоев зависит от свойств среды [30]:

$$\delta_v/\delta_B = (\mu_0\sigma\nu)^{1/2}.$$

Здесь  $\mu_0$  — магнитная постоянная,  $\sigma$  — проводимость,  $\nu$  — эффективная вязкость. В предложенной модели для генерации магнитного поля необходимо, чтобы  $\delta_v/\delta_B > 1$ . Мы полагаем, что циркуляция переносится из гелиосферы за пределы гелиопаузы и тормозится в прилегающем к ней слое во внешнем гелиошисе. При этом магнитное поле меняется в очень узкой области ( $\delta_B$ ). Если это измененное направление межзвездного магнитного поля сохраняется на масштабе, по крайней мере, 20 а.е. за гелиопаузой [29, 31], то согласно предложенной нами теории, это означает, что в этой области все еще не изменилась скорость ( $\delta_v > 20$  а.е.), что соответствует условию  $\delta_v/\delta_B > 1$ . Это неравенство совпадает с необходимым условием, полученным Ландау и Лифшицем [30] для спонтанного возбуждения магнитного поля во время возрастания малых магнитных возмущений. Оно означает, что для работы динамо магнитное число Прандтля должно превышать 1 ( $Pr_m = \mu_0\sigma\nu > 1$ ). Если  $\delta_B \sim 0.01-0.02$  а.е. для Вояджера 1 [4] и  $\delta_B \leq 0.005$  а.е. для Вояджера 2 [8], а  $\delta_v$

во внешнем гелиошисе по данным Вояджер 1 больше 20 а.е. [29, 31], то это не противоречит предложенной модели. Необходимое условие работы динамо выполнено. Другие необходимые условия: отсутствие зеркальной и аксиальной симметрии в магнитном поле и поле скоростей, большие значения числа Рейнольдса до, после и на гелиопаузе [см. 6, 7], упомянутая выше меньшая величина проводимости гелиопаузы по сравнению с проводимостями в окружающем пространстве также выполнены. Выполнение необходимых условий существования динамо создает предпосылки для его работы за гелиопаузой.

На рис. 1 схематически показана межзвездная среда, окружающая гелиосферу, ограниченную гелиопаузой; возможная межзвездная ударная волна нарисована штриховой линией; точками показана внутренняя ударная волна (termination shock). Между межзвездной ударной волной и гелиопаузой расположен внешний гелиошис, между гелиопаузой и внутренней ударной волной — внутренний гелиошис. Открытые гелиосферные силовые линии образуют спирали Паркера. Показаны низкоширотные замкнутые силовые линии. Между открытыми и замкнутыми силовыми линиями расположен гелиосферный токовый слой. Заштрихована область динамо на гелиопаузе. V1 и V2, отмеченные звездочкой и кружком, показывают места пересечения гелиопаузы космическими аппаратами Вояджер 1 и 2.

## 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вояджеры 1 и 2 обнаружили неожиданные свойства в изменении магнитного поля при пересечении гелиопаузы: быстрый рост величины поля на короткой пространственной шкале с сохранением его направления. Belenkaya [6, 7] ранее предложила для объяснения этого явления возможный механизм динамо за гелиопаузой. В настоящей работе мы проверили выполнение необходимых условий для работы динамо по данным КА Вояджер 2. Мы показали, что за внутренней ударной волной (termination shock) движение солнечного ветра при пролете Вояджера 2 стало доальфвеновским, восстановился контроль магнитного поля за движением плазмы вдоль магнитных силовых линий, имеющих форму спиралей Паркера. Таким образом, за счет энергии вращения Солнца может восстановиться вращение плазмы вблизи гелиопаузы, отсутствовавшее на гелиоцентрических расстояниях от критических точек, где звуковое и Альфвеновское числа Маха равны 1 (14–20 радиусов Солнца), до внутренней ударной волны в солнечном ветре (84–94 а.е.) Затухание этого вращения в очень близкой межзвездной среде может служить источником энергии для работы динамо, усиливающего магнитное поле межзвездной среды. Рассматриваемая проблема может быть актуальной для усиления магнитного поля за границей астросферы быстро вращающейся магнитной звезды.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Автор благодарит правительство Российской Федерации и Министерство высшего образования и науки РФ за поддержку по гранту 075-15-2020-780 (N13.1902.21.0039).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *L. F. Burlaga, N. F. Ness, and E. C. Stone*, *Science* **341**, 147 (2013).
2. *D. A. Gurnett, W. S. Kurth, L. F. Burlaga, and N. F. Ness*, *Science* **341**, 1489 (2013).
3. *S. M. Krimigis, R. B. Decker, E. C. Roelof, M. E. Hill, C. O. Bostrom, K. Dialynas, G. Gloeckler, D. C. Hamilton, E. P. Keath, and L. J. Lanzerotti*, *Nature Astron.* **3**, 997 (2019).
4. *W. R. Webber and F. B. McDonald*, *Geophys. Res. Lett.* **40**, 1665 (2013).
5. *M. Opher, J. F. Drake*, *Astrophys. J. Lett.* **778**, L26 (2013).
6. *E. S. Belenkaya*, *Solar Phys.* **290**, 2077 (2015).
7. *E. S. Belenkaya*, in *Electric currents in Geospace and Beyond*, eds. A. Keiling, O. Marghitu, M. Wheatland, AGU Geophysical Monograph Series **235**, 207 (2018).
8. *L. F. Burlaga, N. F. Ness, D. B. Berdichevsky, J. Park, L. K. Jian, A. Szabo, E. C. Stone, and J. D. Richardson*, *Nature Astron.* **3**, 1007 (2019).
9. *J. D. Richardson, J. W. Belcher, P. Garcia-Galindo, and L. F. Burlaga*, *Nature Astron.* **3**, 1019 (2019).
10. *L. Burlaga*, *Journal of Physics: Conf. Ser.* **642**, 012003 (2015).
11. *E. S. Belenkaya and M. L. Khodachenko*, *International Journal of Astronomy and Astrophysics* **2**, 81 (2012).
12. *E. S. Belenkaya, M. L. Khodachenko, and I. I. Alexeev*, in *Characterizing Stellar and Exoplanetary Environments*, eds. H. Lammer and M. Khodachenko, Astrophys. and Space Science Library **411**, 239 (2015).
13. *W. M. Elsasser*, *J. Geophys. Res.* **61**, 340 (1956).
14. *J. J. Quenby and W. R. Webber*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **453**, 1297 (2015).
15. *F. Fraternali, N. V. Pogorelov, J. D. Richardson, and D. Tordella*, *Astrophys. J.* **872**, 40 (2019).
16. *H. K. Moffat* *Magnetic field generation in electrically conducting fluids* (Cambridge University Press, Cambridge, 1978).
17. *V. B. Baranov and H. J. Fahr*, *J. Geophys. Res.* **108**, A3, 1110 (2003).
18. *I. I. Alexeev*, *J. Geomag. Geoelectr.* **38**, 1199 (1986).
19. *I. I. Alexeev and V. V. Kalegaev*, *J. Geophys. Res.* **100**, 19267 (1995).
20. *M. Witte*, *Astron. and Astrophys.* **426**, 835 (2004).
21. *I. I. Alexeev, A. P. Kropotkin, and I. S. Veselovsky*, *Solar Phys.* **79**, 385 (1982).
22. *E. N. Parker*, *Astrophys. J.* **401**, 137 (1992).
23. *P. C. Frisch, A. Berdyugin, H. O. Funsten, A. M. Magalhaes, et al.*, *Journal of Physics: Conf. Ser.* **577**, 012010 (2014).
24. *N. A. Schwadron, F. C. Adams, E. Christian, P. Desiati, et al.*, *Journal of Physics: Conf. Ser.* **531**, 012010 (2014).
25. *A. Shluter and L. Biermann*, *Z. Naturforsch.* **5a**, 237 (1950).
26. *С. И. Вайнштейн, Я. Б. Зельдович*, *Усп. физ. наук* **106**, 431 (1972).
27. *D. A. Gurnett and W. S. Kurth*, *Nature Astron.* **3**, 1024 (2019).
28. *G. P. Zank*, *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.* **53**, 449 (2015).
29. *L. F. Burlaga and N. F. Ness*, *Astrophys. J.* **829**, 134 (2016).
30. *Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц* *Электродинамика сплошных сред* (Москва, Наука, 1982).
31. *L. F. Burlaga, W. S. Kurth, D. A. Gurnett, D. B. Berdichevsky, L. K. Jian, N. F. Ness, J. Park, and A. Szabo*, *Astrophys. J.* **911**, 61 (2021).