

Турбулентный пограничный слой на границе геомагнитной ловушки

С. П. Савин¹⁾, Л. М. Зеленый, С. А. Романов, С. И. Климов, А. А. Скальский, А. А. Галеев, В. Н. Смирнов, М. Н. Ноздрачев, Ю. И. Ермолаев, Л. А. Аванов, Э. Амата⁺²⁾, Я. Бленцки*, Й. Бюхнер^{□2)}, Б. Никутовски^{□2)}, Э. М. Дубинин^{□2)}, З. Немечек^{△2)}, Я. Шафранкова^{△2)}, А. Педерсен^{▽2)}, Ж.-Л. Рош^{°2)}, Ю. Рустенбах^{⊗2)}, Ж.-А. Сово^{◇2)}, П. Сонг^{•2)}, К. Стасевич^{⊕2)}

Институт космических исследований РАН, 117997 Москва, Россия

⁺ *Istituto Fisica Spazio Interplanetario, 00133 Roma, Italy*

^{*} *Centrum Badan Kosmicznych, 00716 Warsaw, Poland*

[□] *Institute Aeronomie, 37191 Katlenburg-Lindau, Germany*

[△] *Charles University, 18000 Prague, Czech Republic*

[▽] *University Oslo, 01235 Norway*

[°] *Lab Physics, Chemistry Environment, 30037 Orleans, France*

[⊗] *Institut Physics, 11240 Berlin, Germany*

[◇] *Centre d'Etude Spatiale Rayonnements, 31028 Toulouse, France*

[•] *University Massachusetts, 01854 Lowell, USA*

[⊕] *Institute Space Physics, 75121 Uppsala, Sweden*

Поступила в редакцию 23 октября 2001 г.

После переработки 16 ноября 2001 г.

По спутниковым данным проекта Интербол мы обнаружили новое явление: термализацию потока горячей плазмы в распределенной области над полярными каспами – с “дальнодействующими” вихревыми дорожками и локальными разрывами/солитонами. Просачивание плазмы сквозь структурированную границу и вторичное пересоединение флуктуирующих магнитных полей в высокоширотном турбулентном пограничном слое объясняют основной приток плазмы солнечного ветра в магнитосферную ловушку. Термализация ионов, в отличие от ударной волны, сопровождается генерацией каскадов когерентных альфеновских волновых пакетов с масштабами от ионного гирорадиуса до радиуса кривизны магнитного поля, а также диамагнитных полостей с размагниченной и нагретой плазмой внутри. Эта “кипящая” плазма характеризуется областью частот со спектром, отличным от колмогоровского (с наклонами 1.2 и 2.4 вместо $5/3 - 3/2$). Обнаружена самоорганизация флуктуаций в погранслое – синхронизация трехволновых распадов на выделенных масштабах.

PACS: 47.27.-i, 47.32.Cc, 52.37.Ra

Работа посвящена экспериментальному исследованию сингулярных областей на высокоширотной границе геомагнитной ловушки, где набегающий поток солнечной плазмы образует зону сильной турбулентности – турбулентный погранслой (ТВЛ). В ТВЛ флуктуации магнитного поля – порядка его величины, а их полная плотность энергии от 0.1 до 1 Гц

(W_b) составляет 10–30% от плотности тепловой энергии ионов E_{th} [1]. На возможность образования ТВЛ указал Харендел [2]. В дальнейшем ряд групп продолжало изучать район внешнего полярного каспа высокоширотной области минимума магнитного поля на границе между ночными и дневными магнитными силовыми линиями, однако большинство усилий сосредоточилось на пересоединении силовых линий на низких широтах. В [3] показано практически постоянное наличие ТВЛ, а также существенно нелинейный характер флуктуаций в нем. Обсуждению

¹⁾ e-mail: ssavin@iki.rssi.ru

²⁾ E. Amata, J. Beuchner, B. Nikutowski, Z. Nemecek, J. Safrankova, A. Pedersen, J. L. Rauch, J. Rustenbach, J. A. Sauvaud, K. Stasiewicz.

свойств и природы флуктуаций в TBL по данным спутника Интербол-1 мы и уделяем основное внимание в дальнейшем.

Турбулентный погранслой 2 апреля 1996 г.
На рис.1 показан типичный выход спутника

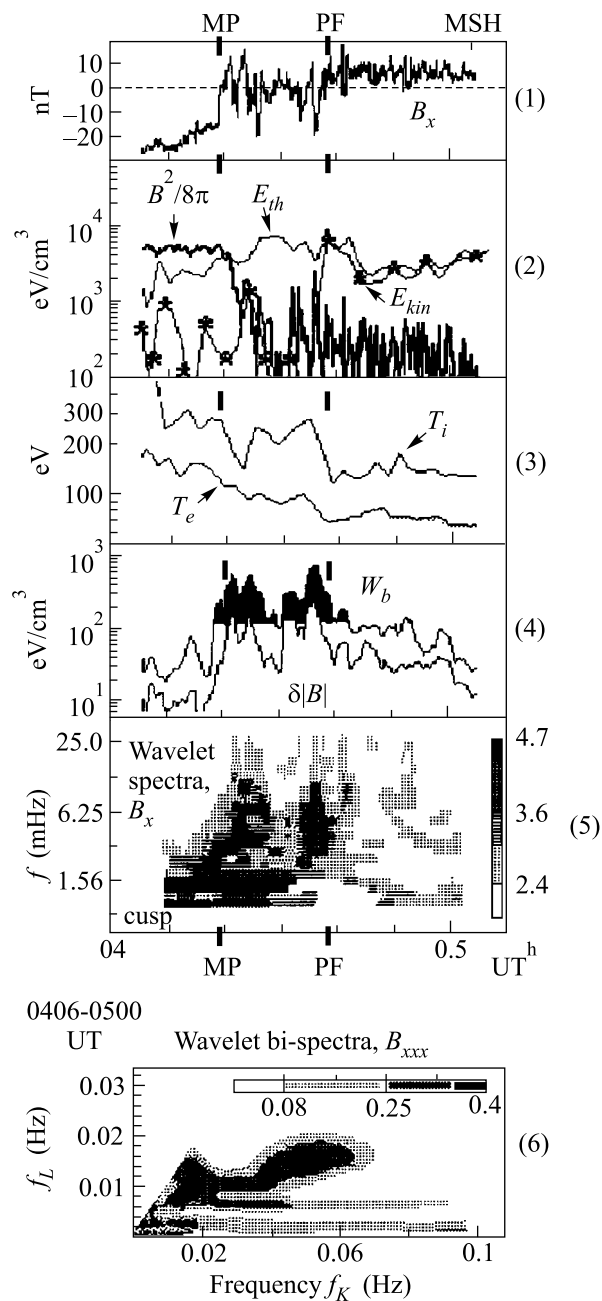


Рис.1. Выход из каспа в MSH спутника Интербол-1 2/4-1996 (см. подробности в тексте). Сверху вниз: (1) B_x – компонента магнитного поля, (2) плотности энергии ионов и магнитного поля, (3) температура ионов и электронов, (4) мощность магнитных флуктуаций, (5) вэйвлетный спектр B_x , (6) вэйвлетный би-спектр B_x

Интербол-1 из полярного каспа в переходную область (MSH) между бесстолкновительной ударной волной в солнечном ветре и магнитопаузой (MP) 2 апреля 1996г. (см. ниже рис.4). MP видна по переходу компоненты B_x магнитного поля от больших отрицательных значений к малым (в среднем) и по доминированию E_{th} над магнитным давлением $B^2/8\pi$ в TBL и MSH. Переход к обтекающему потоку (PF), где $E_{th} \sim E_{kin}$ (плотности кинетической энергии ионов), отделен от MP зоной повышенной турбулентности, то есть TBL, выделенному черной заливкой на графике полной плотности энергии флуктуаций магнитного поля W_b . Величина W_b включает в себя вариации модуля поля и его угловые колебания. Сравнение W_b с энергией флуктуаций абсолютной величины магнитного поля $\delta|B|$ в том же диапазоне частот и с E_{th} показывает, что W_b достигает здесь $3.5\delta|B|$ и $0.1 E_{th}$ (то есть доминируют несжимаемые колебания). В этой области температура ионов T_i – возрастает в 2.2 и электронов T_e в 1.3 раза, а плотность магнитной энергии $B^2/8\pi$ проваливается до низких значений, что соответствует “диамагнитным пузырям” (ДП, см. [1,3]). На нижней панели в нижнем левом углу рис.2 видно, что внутри ДП $|B| \sim 1\text{нТл}$, то

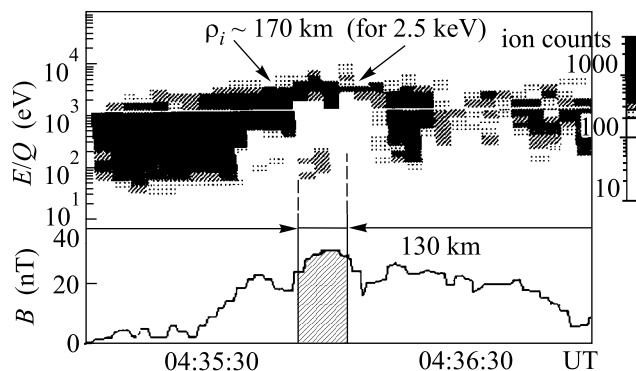


Рис.2. Структура границы PF: распределение энергии на заряд ионов, летящих от Солнца (вверху), и $|B|$

есть магнитное поле вытеснено разогретой плазмой. Структура границы PF отличается существенно от ударной волны наличием магнитного барьера, в максимуме которого $B^2/8\pi \sim E_{th} \sim E_{kin}$ в MSH, причем магнитный барьер представляет собой солитон с масштабом $\sim 130 \text{ км}$ (\sim гирорадиуса ионов в MSH) вдоль направления минимальных магнитных вариаций (нормали к фронту), включающий захваченные внутрь гиротропные ионы с энергией $< 300 \text{ эВ}$ (верхняя панель рис.2, область, выделенная вертикальными линиями). Ионы же с гирорадиусом

свыше размера барьера (> 170 км) свободно его преодолевают. Масштаб оценивался по задержке между спутником и субспутником, которая дает скорость плазмы ~ 12 км/с в системе спутника вдоль нормали. На рис.3а показан годограф скорости

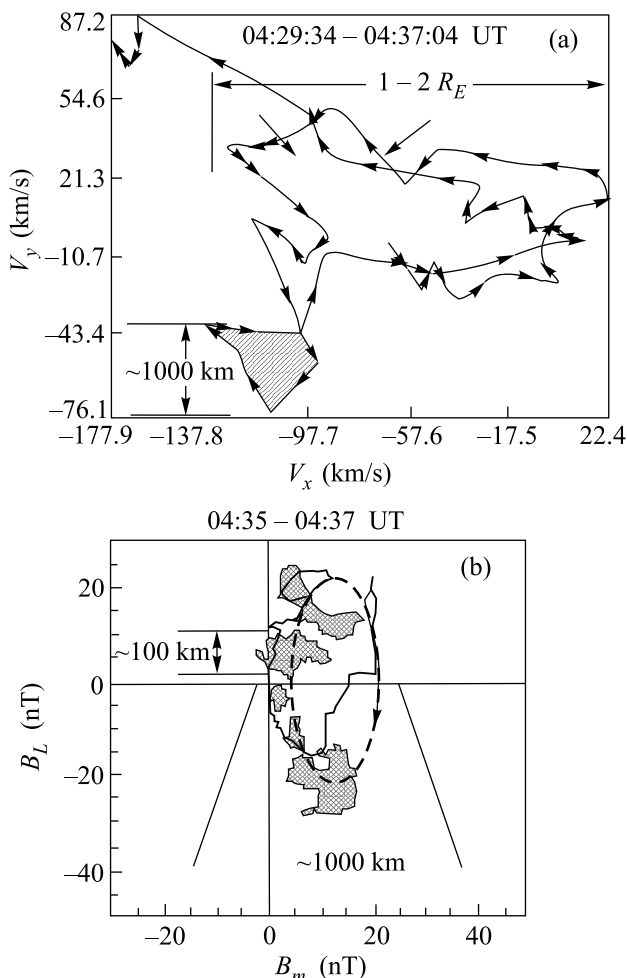


Рис.3. (а) Годограф скорости ионов в TBL; (б) годограф магнитного поля на PF

ионов (V_x , V_y) в эклиптической солнечно-земной системе координат для перехода из TBL в MSH. MSH характеризуется постоянным направлением вектора скорости, переход – замедлением скорости с $(-175; 75)$ до $(-60; 0)$ км/с и появлением “петель”, которые наиболее естественно объясняются вихревой дорожкой в TBL (ср. [2,1]). Максимальный вихревой масштаб оценивается в несколько тысяч километров по задержке спутник / субспутник поперек границы PF и в ~ 10000 км по средней скорости “петель” (то есть вдоль PF). Для наиболее мелких вихрей скорости характерен масштаб в ~ 1000 км. На рис.3б вектор магнитного поля на барьере PF также демонстрирует вихреобразный переход на

средних масштабах 1000 км, вместе с наличием мелких вихрей ~ 100 км. Рассмотрение данных высокого разрешения показало, что турбулентный каскад в TBL простирается до масштабов в несколько километров – до инерционной длины электронов. Это свидетельствует о нарушении вмороженности силовых линий в TBL. Однако значительно меньший нагрев электронов – признак наибольшей диссипации энергии в области гирорадиуса ионов (см. рис.2 и 3а). Вэйвлетная спектрограмма (см. [3]) на панели 5 рис.1 демонстрирует каскадообразное развитие возмущений в TBL: спектральные максимумы, связанные между собой, появляются на нескольких частотах, причем наблюдаются переходы как от низких частот к высоким (прямой каскад), так и в обратном направлении (обратный каскад). Обращает на себя внимание также максимум на частоте ~ 1.5 мГц, который виден как в TBL, так и в MSH и каспе; судя по интенсивности, он возникает в TBL около MP. Каскадообразным возмущениям соответствует наклон спектра мощности B_x – 1.18 на частотах 1–45 мГц, для 0.05–0.4 Гц наклон – 2.4. Оба отличаются от наклонов колмогоровских спектров гидродинамической или альфвеновской турбулентности ($5/3$ или $3/2$, см. [4]), наклон 1.18 характерен для токового слоя в состоянии критической самоорганизации [5]. Регистрация флуктуаций с разными свойствами говорит о двухфазовости плазмы (в статистическом смысле) в TBL: вкрапления ДП аналогичны появлению воздушных пузырей в кипящей жидкости.

Влияние свойств турбулентности на процессы переноса. Схематически процесс обтекания потоком плазмы (двойные толстые стрелки) области расхождения геомагнитных силовых линий (тонкие линии со стрелками) в окрестности полярного каспа показан на рис.4. Магнитопауза MP здесь вогнута (толстая черная линия), силовые линии солнечного ветра (обозначены квадратиками) деформированы и вытянуты вдоль MP, орбита Интербола-1 2/4-96 проходила примерно по диагонали снизу справа – налево вверх, граница регулярного обтекания PF показана толстым штрихом. Более чем в 80% случаев (из ~ 400 с 1995 по 2000 гг.) внутри PF наблюдаются нерегулярные магнитные поля и потоки плазмы с характерными чертами вихревых каскадов [1,3]. Собственно TBL прилегает к MP (показан вертикальной штриховкой), PF в центре изучаемой области, как и на рис.1, обычно отделена от TBL областью с пониженным W_b и нерегулярной скоростью плазмы. Среднее направление поля в TBL контролируется межпланетным магнитным полем (ММП). Внут-

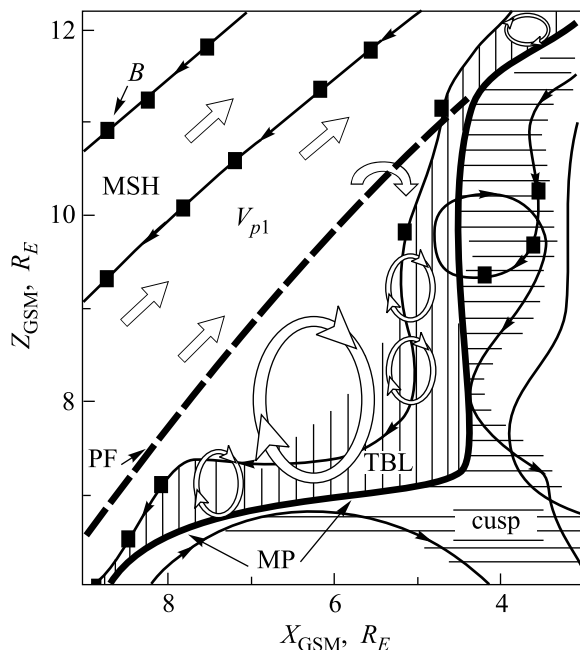


Рис.4. Схема обтекания высокоширотной МР над каспом (см. детали в тексте)

ри МР поле контролируется земным диполем, тогда как плазма проникает внутрь МР (в касп, показан горизонтальной штриховкой на рис.4) с незначительным падением E_{th} и увеличением T_i , то есть граница оказывается фактически, прозрачной при существовании хорошо видимых токовых слоев (см. B_x на рис.1). Эта картина слабо зависит от ММП, что критично для проникновения плазмы внутрь “чужого” для плазмы магнитного поля. Пересоединение антипараллельных силовых линий на гладкой ламинарной МР считалось главным механизмом проникновения плазмы внутрь МР. Однако слабая зависимость каспа и TBL от направления ММП и обнаружение сильных возмущений вплоть до электронной инерционной длины указывает также и на другие механизмы. В [2] автор предположил, что поток в MSH тормозится на препятствии в виде ступеньки на МР с образованием TBL, в котором кинетическая энергия ионов преобразуется в тепловую. Действительно, на больших масштабах на рис.1 (например, в 0430 и в 0500 UT) $E_{th} + E_{kin} \sim \text{const}$, причем внутри PF $E_{th} \gg E_{kin}$. Вблизи PF наблюдается локальное ускорение потока до значений E_{kin} больших, чем в MSH. Это может действительно объясняться ускорением за счет натяжения пересоединенного магнитного поля, причем пересоединение возможно как вблизи геомагнитного экватора, так и локально вблизи каспа (см. рис.4, где петлей силовой линии с квадратами показан пример пересоединения). В

TBL также происходит эффективное пересоединение мелкомасштабных флуктуирующих полей, о чем свидетельствует нарушение вмороженности силовых линий (за счет флуктуаций на электронной инерционной длине). Это позволяет плазме проникать внутрь МР и обеспечивает эффективный перенос магнитного потока с дневной стороны магнитосферы на ночную. Однако мы считаем, что в существенно нелинейной ситуации в TBL основной вклад в процесс локального переноса массы внутрь МР дает просачивание (percolation) плазмы сквозь структурированную границу. Беря соответствующую оценку коэффициента диффузии из [6], мы имеем: $D_p \sim 0.66 (\delta B/B_0) \rho_i \Omega_i \sim (5-10) \cdot 10^9 \text{ м}^2/\text{с}$ – для типичных параметров у МР, где $\delta B/B_0$ – отношение возмущенного и среднего магнитных полей, ρ_i и Ω_i – гирорадиус и гирочастота ионов. Это дает поток $(1-2) \cdot 10^{27}$ частиц / с через северный и южный TBL, которого достаточно для заполнения магнитосферы солнечной плазмой.

Обратимся теперь к природе колебаний в TBL. Одним из свойств, позволяющих отождествить низкочастотные возмущения с кинетическими альфвеновскими волнами (КАВ), является фазовая скорость. Мы проверили по данным электрического (E) и магнитного (B) полей спутников Интербола-1 и Поляра в TBL 26/8-95, 29/5-96, 19 и 23/6-98, что: (а) как и 2/4-96, магнитный спектр имеет 2 характерных наклона, (б) фазовая скорость $V_{ph} = E/B$ на низких частотах близка к альфвеновской V_A и имеет тенденцию в среднем следовать частотной зависимости, характерной для пролета спутника сквозь пространственные структуры КАВ, до частоты в несколько Гц (в несколько раз меньшей нижегибридной). Эта зависимость выражается формулой [3]

$$(E/B)^2 \sim V_A^2 (1 + (\rho_i \omega / V)^2) \quad (1)$$

где ω – частота, а V – скорость структур КАВ относительно спутника, $(\rho_i \omega / V)^2$ – кинетическая добавка, учитывающая конечность гирорадиуса ионов, откуда и название “КАВ”. В большинстве рассмотренных случаев (E/B) выходит на асимптоту формулы (1) $\sim \omega$. Это, однако, неотличимо от регистрации волн с постоянным волновым вектором \mathbf{k} , так как преобразование Фурье плоских волн подчиняется уравнению Максвелла: $kE \sim \omega B$. Таким образом, в асимптотической области (1) не позволяет отождествить КАВ. Другой характерной чертой TBL являются 3-волновые распадные процессы, удовлетворяющие условию: $f = f_L + f_K$ (см. подробнее в [3]). На изучаемом интервале произведения соответствующих трех амплитуд дают максимумы до 40% для частот $f_L \sim 1.5; 5$ и 15 МГц (вертикальная ось

на би-спектрограмме на нижней панели рис.1) и для f_K в непрерывном диапазоне 1.5–80 мГц. Это означает выполнение частотно-фазовых соотношений для 3-волнового распада (в пренебрежении нелинейными процессами более высокого порядка), причем структуры с выделенными частотами f_L распадаются в широком диапазоне частот f_K и f . То есть процессы на “выделенных” по вертикальной оси частотах синхронизируют каскады в широкой области частот (по горизонтальной оси). Хорошо видимый максимум на частотах $(f_L; f_K) \sim (15; 50)$ мГц свидетельствует о возможности накачки обратного каскада на высоких частотах КАВ. Поэтому мы полагаем, что неоднородности в набегающем потоке при взаимодействии с токовым слоем МР генерируют КАВ, часть из которых отражается назад, фокусируется вогнутой МР и взаимодействует с набегающим потоком. В результате самосогласованным образом возникает ряд каскадов, синхронизированных на выделенных частотах f_L . Если использовать V_A для оценки сверху характерного масштаба на 1.5 мГц, то значение $L \sim V_A/f_L \sim 3 - 7R_E$ (радиусов Земли) сравнимо с протяженностью TBL на рис.4, L также порядка радиуса кривизны невозмущенной МР или толщины MSH на дневной стороне. С другой стороны, наличие максимума на 1.5 мГц как в MSH, так и в каспе внутри МР на рис.1 тоже говорит о глобальности наблюдаемого процесса. Для понимания детальной картины подобного резонанса необходимы дополнительные измерения в нескольких точках на расстояниях как в несколько тысяч километров, так и в несколько радиусов Земли. Мы сравнили нагрев ионов в TBL с соотношениями Рэнкина-Гюгонио на ударной волне по магнитозвуковому числу Маха M_m в MSH, альфвеновскому числу и нормальной к PF проекции скорости ионов ($M_{An} \sim M_m \sim 1.2$) и по полной скорости ($M_A \sim 3.5$): $T_i/T_{MSH} \sim 1 + (\gamma - 1)M^2 \sim 1.6$ и ~ 5 , соответственно, для показателя адиабаты $\gamma \sim 5/3$ (с учетом $E_{th} \gg E_{kin}$ в TBL). Наблюдаемый нагрев

ионов в TBL (~ 2.2) выше, чем на косой ударной волне, и значительно меньше максимально возможного. Таким образом, наблюдаемый процесс преобразования энергии существенно отличается от бесстолкновительной ударной волны: вся возмущенная область (см. рис.4) должна рассматриваться как единое целое – с “дальнодействующими” каскадами КАВ и вихревыми дорожками, а также с локальными разрывами / солитонами (МР и PF).

В заключение мы хотели бы отметить, что исследование роли и свойств турбулентности в критической точке геомагнитной ловушки – турбулентном погранслое – выявляет ключевое значение турбулентных микропроцессов во взаимодействии потоков плазмы с магнитными препятствиями – будь то поля планет, звезд, “черных дыр” или лабораторных ловушек, и показывает реальные механизмы преобразования энергии в бесстолкновительной плазме.

Авторы выражают благодарность за поддержку работы над статьей со стороны International Space Science Institution, а также грантов INTAS/ESA # 99-1006, INTAS # 2000-465, CLG # 975277, Humboldt Foundation и Госконтракта # 10-10 (00) – П-Д 01.

1. S. P. Savin, N. L. Borodkova, E. Yu. Budnik et al., *Interball tail probe measurements in outer cusp and boundary layers*, Geophys. Monograph **104**, AGU, Washington, 1998, p. 25.
2. G. Haerendel, J. Atmos. Terr. Phys. **40**, 343 (1978).
3. S. Savin, L. Zelenyi, J. L. Rauch et al., *Ann. Geophys.*, **19**, in press (2001).
4. П. С. Ирошников, *Астрономический журнал* **40**, 742 (1963).
5. L. M. Zelenyi and A. V. Milovanov, *Multiscale magnetic structure of the distant tail: self-consistent fractal approach*, Geophys. Monograph **105**, AGU, Washington, 1998, p.321.
6. А. А. Галеев, Л. М. Зеленый, М. М. Кузнецова, *Письма в ЖЭТФ* **41**, 316 (1985).