

ПРОСТРАНСТВЕННЫЙ СКЕЙЛИНГ АВРОРАЛЬНЫХ ВЫСЫПАНИЙ: ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И СРАВНЕНИЕ С НАБЛЮДЕНИЯМИ

Б.В. Козелов, О.В. Мингалёв, И.В. Головчанская, М.Н. Мельник (Полярный геофизический институт, Апатиты, 184209 Россия)

1. Введение

В работе [Golovchanskaya et al., 2011] в рамках сценария Chang et al. [2004] нелинейного взаимодействия когерентных альвеновских структур было выполнено численное моделирование турбулентности в мелкомасштабных продольных токах и электрических полях, развивающейся в верхней ионосфере Земли (далее – альвеновская турбулентность). Одной из отличительных черт модельной турбулентности является временная эволюция (с характерным временем ~5-10 мин) пространственного скейлинга мелкомасштабных полей и токов на начальном этапе развития турбулентности. Она свидетельствует о том, что результатом нелинейного взаимодействия между возмущениями на разных пространственных масштабах является перекачка энергии от малых масштабов к большим (в определённом смысле, обратный каскад энергии). Эту особенность было желательно подтвердить по экспериментальным данным.

Прямые измерения электрических и магнитных полей в отдельных пролётах одиночных низковысотных спутников над авроральной зоной не пригодны для сопоставления результатов моделирования с наблюдениями, поскольку происходят в заданной точке орбиты примерно раз в 1.5 часа, дают одномерные распределения полей, не позволяют отличить временные вариации от пространственных и, соответственно, корректно рассчитать продольные токи, и т.д.

Несмотря на очевидные ограничения оптических наблюдений, связанные с ограниченным полем зрения наземных камер, недостаточно высокой разрешающей способностью спутниковых камер, геометрическими искажениями, контаминирующими эффектами светимости звёзд, тумана и прочих факторов, а также на неоднозначности связи электродинамических и авроральных возмущений, авроральные имиджи дают единственную возможность получить представление о двумерной пространственной картине альвеновской турбулентности в заданный момент времени. Кроме того, оптические наблюдения в начале брейккапа (при переходе к взрывной фазе суббури), позволяют проследить начальный этап развития турбулентности и провести сравнение с численным решением.

Далее в разделе 2 приведены результаты моделирования пространственного скейлинга

турбулентных продольных токов и потоков энергии высыпающихся частиц, а также временной эволюции скейлинга. В разделе 3 по наблюдениям спутника Polar исследована динамика авроральных возмущений в области авроральной выпуклости в начале взрывной фазы суббури в предположении о том, что эти возмущения являются оптическим проявлением альвеновской турбулентности, и выполнено сравнение с результатами раздела 2. В заключение сформулированы выводы работы.

2. Пространственный скейлинг турбулентных продольных токов и потоков энергии высыпающихся частиц: численное моделирование

В численном моделировании в $t = 0$ когерентные альвеновские структуры задавались как трубки продольного тока разных поперечных масштабов и малой интенсивности (порядка 10^{-8} - 10^{-9} А/м²), случайно распределённые по области моделирования. Коллективное взаимодействие токов под действием силы Ампера (при наличии магнитной диффузии в задаче) приводило к постепенному укрупнению структур положительной и отрицательной полярности, так что к моменту $t \sim 4$ мин. распределение “укрупнённых” продольных токов j_{\parallel} в плоскости перпендикулярной к внешнему магнитному полю B_0 имело вид, показанный на рис.1.

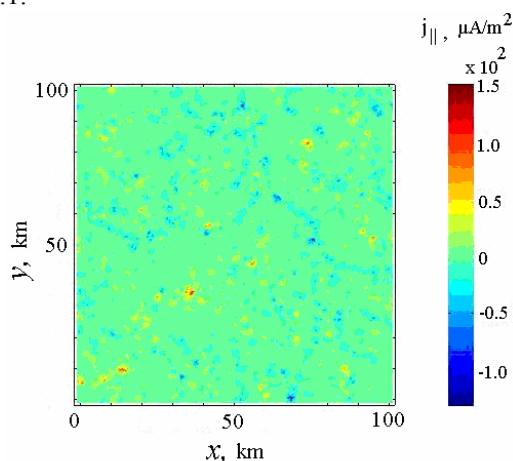


Рис.1. Распределение в перпендикулярной к B_0 плоскости продольных токов, связанных с когерентными альвеновскими структурами, после коллективного взаимодействия структур в течение ~4 мин.

При этом модельные распределения j_{\parallel} обнаруживали масштабную инвариантность (или скейлинг), которая в разные моменты времени характеризовалась различными значениями индекса масштабирования $\alpha_{j_{\parallel}}$. Индекс $\alpha_{j_{\parallel}}$ обнаруживал характерную временную эволюцию. Временная эволюция индекса $\alpha_{j_{\parallel}}$, полученная в численном моделировании нелинейного взаимодействия трубок с током, представлена на рис.2. Можно видеть, что её отличительными чертами являются: наличие начальной стадии эволюции длительностью 1.5-2 мин., в течение которой распределение продольных токов, как и в $t = 0$, можно считать близким к белому шуму, последующий достаточно быстрый рост индекса $\alpha_{j_{\parallel}}$ до значений ~ 2.4 , который сменяется “медленной” стадией эволюции, практически выходя на насыщение. Наличие “медленной” стадия эволюции указывает на то, что структуры, сформировавшиеся в результате слияния мелкомасштабных продольных токов, являются достаточно долгоживущими образованиями и, начиная с некоторого момента времени, эволюционируют медленно.

Чтобы произвести количественное сопоставление авроральных и электродинамических характеристик масштабирования, необходимо перейти от продольных токов к потоку энергии высыпающихся электронов ε , поскольку именно эта величина определяет интенсивность свечения I , в том числе, и на начальной стадии аврорального брейкапа (например, [Bythrow and Potemra, 1987]).

Как известно, поток энергии высыпающихся электронов во многих случаях можно считать пропорциональным j_{\parallel}^p , где показатель степени $p = 1.5-2.0$ [Lyons, 1979]. На рис.3а,б показана временная эволюция индекса масштабирования α_{ε} потока энергии высыпающихся электронов ε , который считался пропорциональным j_{\parallel}^p , где показатель p принимался равным $p = 1.5$ (рис.3а) и $p = 2.0$ (рис.3б). В данном случае индекс масштабирования α_{ε} находился как $2H+1$, где показатель масштабирования H , в свою очередь, определялся из наклона структурной функции второго порядка.

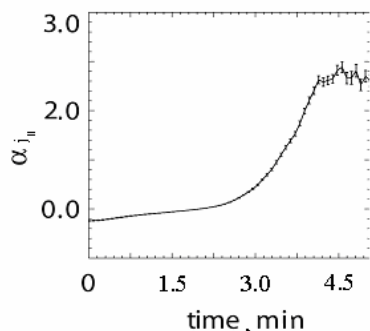


Рис.2. Временная эволюция индекса масштабирования продольных токов $\alpha_{j_{\parallel}}$, полученная в численном моделировании нелинейного взаимодействия когерентных альвеновских структур.

3. Временная эволюция индекса масштабирования авроральных структур в начале взрывной фазы суббури

Если связывать начало взрывной фазы суббури со всплеском альвеновской активности в ближнем плазменном слое хвоста магнитосферы, сопровождающимся развитием альвеновской турбулентности в верхней ионосфере, то авроральный брейкап даёт нам уникальную возможность проследить нелинейный процесс, моделирование которого описано в разделе 2, в полярных сияниях.

В работе [Kozelov et al., 2011] рассматривалось начало (временной интервал в 20 мин) суббуревой активизации 07 февраля 2000, UT = 12:27 по наблюдениям UVI имиджера высокоапогейного спутника Polar в эмиссии LBH-L. Имиджер давал изображения с пространственным разрешением ~ 25 км на один пиксель. Всего был проанализирован тридцать один имидж в рассматриваемом временном промежутке. Для флуктуаций свечения в центральных областях имиджей строились логарифмические диаграммы [Abry et al., 2000] в диапазоне масштабов 50-400 км, из наклона которых определялся индекс масштабирования α_A . На рис.4 показано поведение индекса α_A во времени.

Можно видеть, что временная эволюция индекса α_A обнаруживает качественное сходство с эволюцией индексов $\alpha_{j_{\parallel}}$ (рис.2) и α_{ε} (рис.3): мелкомасштабным структурам требуется некоторое время, чтобы перейти в режим кластеризации, который затем продолжается 2-3 минуты (“быстрая” стадия), после чего процесс практически выходит на насыщение, сопровождаясь более медленными вариациями α_A (“медленная” стадия).

4. Выводы

1. Продемонстрировано качественное сходство временной динамики характеристик масштабирования когерентных альвеновских структур, полученных в численном моделировании, и авроральных возмущений, наблюдаемых в начале взрывной фазы суббури.

2. Полученное соответствие может являться аргументом в пользу того, что причиной аврорального структурирования на начальной стадии брейкапа является альвеновская турбулентность, развивающаяся в ближней магнитосфере.

Работа поддержана Программой 22 Президиума РАН «Фундаментальные проблемы исследований и освоения Солнечной системы».

Список литературы

Abry P., Flandrin P., Taqqu M.S., and Veitch D. Wavelets for the analysis, estimation and synthesis of scaling data, in: *Self-Similar Network Traffic and Performance Evaluation*, 2000.

Bythrow, P.F., and Potemra T.A. Birkeland currents and energetic particles associated with optical auroral signatures of a westward traveling surge, *J. Geophys. Res.*, 92, A8, 8691-8699, 1987.

Chang T., Tam S.W.Y., and Wu C. Complexity induced anisotropic bimodal intermittent turbulence in space plasmas. *Phys. Plasma*, 11 (4), 1287-1299, 2004.

Golovchanskaya I.V., Kozelov B.V., Mingalev O.V., Fedorenko Y.V., and Melnik M.N. Magnetic perturbations in the events of broadband ELF turbulence observed by

FAST, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L17103, doi:10.1029/2011GL049003, 2011.

Kozelov B.V., Golovchanskaya I.V., and Mingalev O.V. Inverse cascade in the structure of substorm aurora and non-linear dynamics of field-aligned current filaments, *Ann. Geophys.*, 29, 1349-1354, 2011.

Lyons L.R., Evans D.S., and Lundin R. An observed relation between magnetic field-aligned electric fields and downward electron energy fluxes in the vicinity of auroral forms, *J. Geophys. Res.*, 84, 457, 1979.

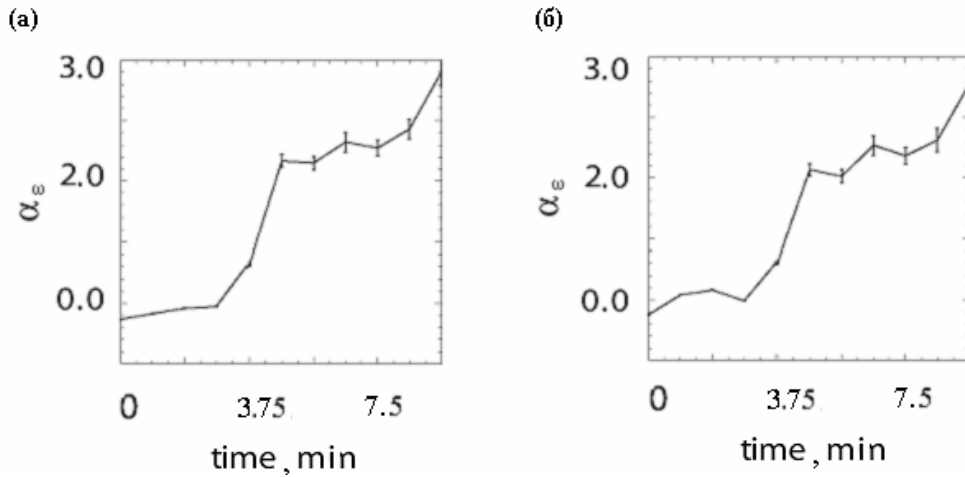


Рис. 3. Временная эволюция индекса масштабирования α_ϵ потока энергии высыпавшихся электронов ϵ , рассчитанного как $\sim j_{\parallel}^p$, где (а) $p = 1.5$ и (б) $p = 2.0$; продольный ток j_{\parallel} получен в численном моделировании нелинейного взаимодействия когерентных альвеновских структур.

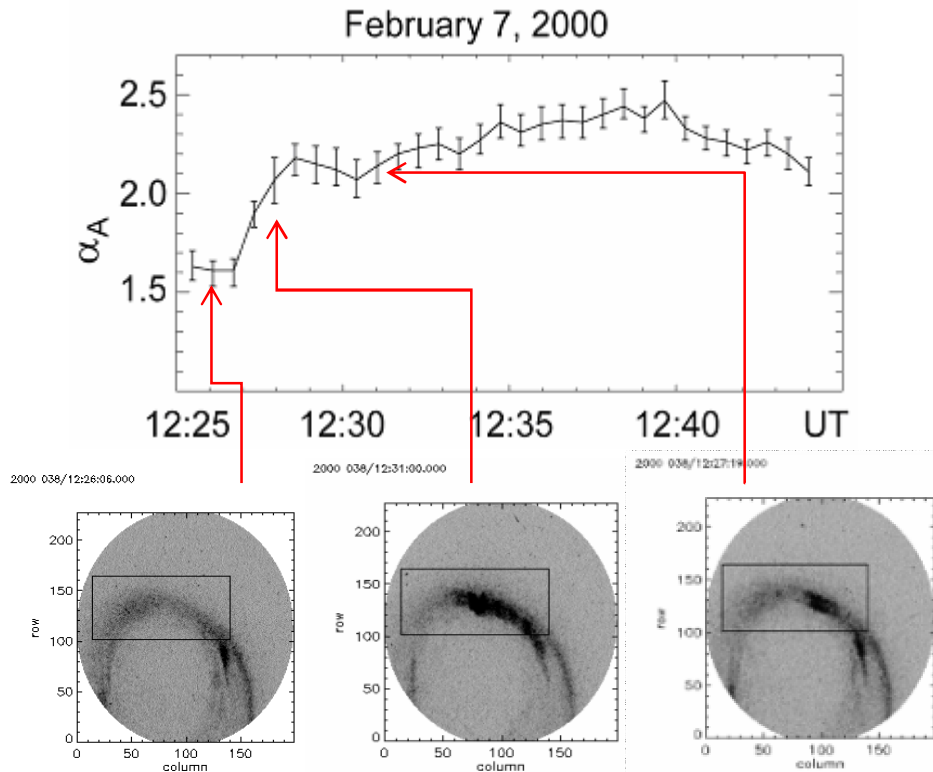


Рис. 4 Временная эволюция индекса масштабирования α_A флуктуаций интенсивности аврорального свечения, наблюдаемых имиджером на спутнике Polar в начале суббуриевой активизации 07 февраля 2000; [Kozelov et al., 2011].