

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МАГНИТОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ ЗА ДВАДЦАТЬ ПЯТЬ ЛЕТ.

Е. А. Пономарев (ИСЗФ СО РАН, Иркутск).

С тех пор, как в работах Акасофу [1] было достигнуто понимание того, что все явления, сопровождающие околополуденное геомагнитное возмущение, представляют собой единый процесс, вызванный изменениями в Солнечном ветре и названный Акасофу суббурей, не прекращаются попытки описания этого процесса в терминах физики.

По существу проблема распалась на несколько субпроблем, решение каждой из которых являлось непременным условием понимания процесса в целом. Субпроблемы это были такие:

- Как кинетическая энергия солнечного ветра передается в магнитосферу.
- Как формируется магнитосферная конвекция.
- Откуда берутся токи, (и мощности!), питающие ионосферные токовые системы.
- Что такое «суббуревой взрыв» (Break up).

Каждая из этих субпроблем распадается на ряд задач, требующих постановки и решения в терминах физики.

Для целей практики понимание физической сути наблюдаемых процессов не очень нужно. На сегодня предложено достаточно много эмпирических и полуэмпирических моделей, которые вполне удовлетворительно **описывают** ход и исход, например, суббури при заданных входных параметрах [2,3]. Мы называем такие модели функционально - адекватными, (ФАМ), подчеркивая в названии тот факт, что они адекватно описывают **функции** системы. Модели же, которые воспроизводят физическую суть происходящих процессов, мы называем структурно - адекватными, (САМ). Естественно, что ФАМ не нуждаются в проверке на достоверность описания. Они так и сконструированы, чтобы дать описание максимально точно. Зато бесполезно пытаться на их основе выяснить физическую суть дела, как это пытаются сделать некоторые исследователи. Наоборот, САМ нуждаются в проверке и в определении пределов применимости. Такой процесс называется **верификацией**, и он является неотъемлемой частью создания САМ.

Далее наше обсуждение будет касаться лишь структурно-адекватных моделей.

Первые физические механизмы, предложенные для объяснения проникновения энергии Солнечного ветра (СВ) в магнитосферу принадлежат Данжи и Эксфорду [4,5]. Данжи предположил, что часть внешних магнитных силовых линий магнитосферного магнитного поля проникает в солнечный

ветер, приобретает потенциал этого течения, который переносится в магнитосферу и ионосферу. Принципиальная слабость этого подхода заключалась в том, что магнитосфера и ионосфера являются потребителями энергии и туда должна быть передана конечная электрическая мощность, а не просто электрический потенциал. А для этого вне магнитосферы должен существовать еще и источник тока, который предложен не был. Впоследствии этот подход много раз модифицировался. На его основе пытались сконструировать трансформаторы, преобразующие кинетическую энергию в электромагнитную, и наоборот, но физические состоятельные механизмы (механизмы «пересоединения») для бесстолкновительной плазмы предложены не были. Ни одну из перечисленных выше проблем на основе подхода «пересоединения» решить так и не удалось. Второй механизм – Эксфорда и Хайнса, механизм квазивязкого взаимодействия плазмы СВ с магнитосферой требовал наличия квазистолкновительного режима в переходном слое от СВ к магнитосфере, который экспериментально обнаружить не удалось. Строго говоря, и процесс «пересоединения», если его формулировать грамотно в терминах физики, так же требует наличия квазистолкновительного режима.

В нашем Институте с конца 80-х годов развивался альтернативный подход к объяснению магнитосферных явлений, прежде всего – суббуревого «взрыва» на базе идей Кеннела [6] об одновременном воздействии на плазму конвекции и питч-угловой диффузии. Вкратце идея состоит в следующем. Вообразим себе силовую трубку в магнитном поле Земли. Она имеет вид банана. Назовем плазменное содержимое этой трубки – плазменной трубкой. Можно показать, что в электрическом поле, всюду ортогональном магнитному, плазменная трубка (из-за $[\mathbf{ExV}]$ дрейфа) будет переходить из одной силовой трубки в другую без остатка и избытка. Если движение будет происходить в земном (квазидипольном) поле в направлении к Земле, плазма начнет сжиматься, давление в направлении движения будет увеличиваться. Это означает, что сторонние силы должны производить над плазмой работу. Единственной такой силой в магнитосфере может быть Амперова – $[\mathbf{j} \times \mathbf{V}] / c$. Следовательно, для реализации дрейфа плазмы в магнитосфере в сторону Земли нужен внешний ток. Наоборот, если плазма будет дрейфовать туда, где давление падает, она сможет производить работу над внешними силами. Например, производить ток, в точности как в МГД – генераторе.

Если давление плазмы – изотропное, то силовая трубка заполнена плазмой от экватора до «атмосферного конца» равномерно. Но частицы, попадающие в атмосферу, гибнут из-за столкновений с нейтральной средой. Такие частицы в экваториальной плоскости должны иметь малый угол вектора скорости с направлением силовой линии (питч угол). Из-за гибели в атмосфере, частицы с малыми питч углами в угловом распределении должны отсутствовать. Конус углов, в котором частицы отсутствуют из-за потерь, назван конусом потерь. Наблюдения (и теория, созданная Кеннелом)

показали, что в большом диапазоне расстояний от центра Земли (от 3.5 до 7-8 радиусов) этот конус – не пустой! Следовательно, он заполняется за время, равное баунс – периоду частицы, умноженному на число частиц в конусе потерь, т.е. в нашем случае пропорционально объему самого конуса. Конус этот мал для силовой трубки, находящейся далеко от Земли и увеличивается по мере приближения к ней. Соответственно растут и потери частиц, а следовательно – падает давление. Теперь процесс изменения давления в плазменной трубке по мере приближения ее к Земле выглядит так. Сначала давление растет из-за уменьшения объема, а потери – незначительны. Однако, начиная с некоторого расстояния вдоль траектории дрейфа, потери начнут превышать прибыль от сжатия, и давление начнет падать! Таким образом, из-за взаимодействия двух упомянутых процессов в магнитосфере образуется **рельеф газового давления** а, следовательно, и структура объемных токов. Эти токи, текущие поперек магнитного поля и газового градиента, оказываются дивергентными и дают начало продольным токам, уходящим в ионосферу вдоль силовых линий. Ясно, что генераторами этих токов являются области, где давление падает вдоль линий конвекции. Эти области являются вторичными генераторами электрической мощности, питающими ионосферных потребителей. А как обстоит дело с первичным генератором? Вернемся к этому вопросу чуть позже, а пока обратим внимание на следующий факт. Все рассуждения мы проводили для стационарного случая, когда со «стартовой линии» уходили в дрейф одинаковые трубки. А что будет, если среди них появятся трубки с повышенной концентрацией плазмы? Допустим – в два раза. Тогда и газовое давление в максимуме, и эффект высыпаний возрастет в два раза на короткое время, пока трубка будет находиться вблизи максимума.. Возрастут и токи из-за роста градиента плазменного давления, в том числе и продольные. Все это будет происходить быстро и вполне напоминать взрыв. Так легко, «в автомате» получает объяснение феномен Break up. [7]. Теперь обратимся к источнику внешнего тока – Головной Ударной Волне (ГУВ). При переходе через фронт ГУВ параметры плазмы Солнечного ветра и магнитного поля закономерно меняются. Область между ГУВ и магнитопаузой называется переходным слоем (ПС). В ПС скорость массового движения плазмы меньше, чем в СВ, плотность и температура – больше, но что особенно важно – напряженность тангенциальной (по отношению к фронту ГУВ) компоненты магнитного поля больше примерно в 4 раза. Это значит, что вдоль фронта течет ток! Его нетрудно рассчитать, что и сделано в [8,9]. Этот ток существенно дивергентный. Куда же он «заворачивается»?

Частично – в переходный слой. Тогда он помогает ускорять плазму ПС. А частично замыкается через тело магнитосферы, образуя как раз тот внешний ток, какой необходим для дрейфа плазменных трубок. Надо сказать, что принцип максимального роста энтропии предопределяет распределение тока между ПС и магнитосферой. Поскольку в последней входящая энергия

превращается, в конечном счете, в тепло, т.е. полностью деградирует, ей отдается предпочтение при распределении тока ГУВ. Такой же принцип действует и при распределении тока, ответвляющегося в ионосферу при выходе из вторичного МГД генератора. Ионосфера забирает весь ток, который может «освоить». Остальной – замыкается в магнитосфере и уходит на энергоснабжение МГД компрессора, прибавляясь к внешнему току. Теория этого процесса развита П.А. Седых [9]. Ток, который готова потребить ионосфера, определяется напряженностью ионосферного электрического поля (общего с магнитосферой!) и проводимостью, в свою очередь определяемой высыпаниями электронов из магнитосферы (в ночное время). Оба тока – «запрашиваемый» и «предлагаемый» можно рассчитать. Интересно посмотреть их сравнение, приведенное в [11]. Заметно большое сходство со схемой Ииджимы и Потемры [10].

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 02-05-64066.

Л и т е р а т у р а

1. *Akasofu S.-I. and Chapman S. Solar-Terrestrial Physics.*Oxford at the ClarendonPress. 1972.
2. *Layons L.R. J.Geophys.Res. 100. A10, 19069. 1995.*
3. *Fedder J.A., S.P. Slinker, J.G. Lyon, R.D. Elfinstone. J.Geophys. Res . 100. A10, 19083.1995.*
4. *Dungey J.W. Phys.rev. Lett. 1961. 6, 47,*
5. *Axford W.I. and C.O. Hines. Can. J. Phys. 1961. 39, 1433.*
6. *Кеннел Ч.Ф. Следствия существования магнитосферной плазмы. М.: Мир. 1972. С. 462 – 516*
7. *Пономарев Е.А. Механизмы магнитосферных суббурь. М.: Наука, 1985. 159 с.*
8. *Ponomarev E.A. On the excitation mechanism of magnetospheric convection by the solar wind. Proc. 5th International Conference on Substorms. 16-20 May 2000/ St. Petersburg, Russia*
9. *Седых П.А., Пономарев Е.А. Геомагнетизм и аэрономия, 2002. Т. 42, №5. С. 613-618.*
10. *Iijima T., Potemra T.A., J. Geophys. Res. .1972. 81. P. 2165-2174.*
11. *Mager O.V., Sedykh P.A., Ponomarev E.A. et al. Concerning the conjugation of field-aligned currents. [http:// arxiv.org / abs /physics / 0307089](http://arxiv.org/abs/physics/0307089)*