

**Б.А. Тверской  
и проблемы физики  
магнитосферы**

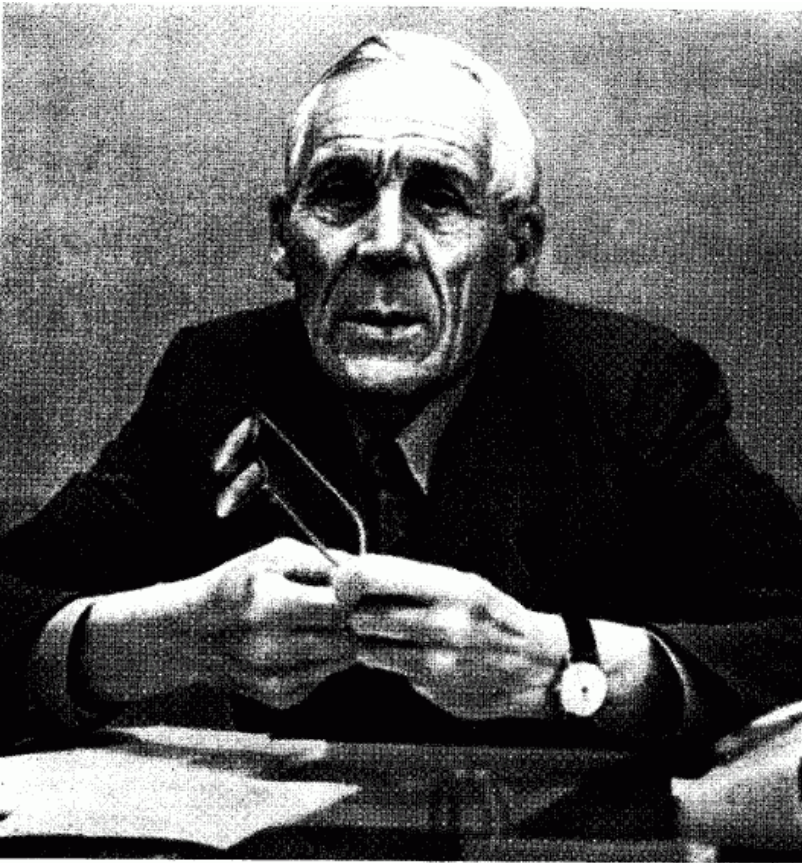
*Е.Е. Антонова*



**5.II.1936 – 6.VIII.1997**

Б.А. Тверско окончил физический факультет МГУ в 1958 г. В 1962 г. защитил кандидатскую диссертацию и в 1966 г. докторскую. Профессор МГУ с 1976 г. Стал лауреатом ломоносовской премии в 1971 г., гос. премии в 1978. В 1989 г. работы Б.А. Тверского по низкочастотным магнитосферно-ионосферным взаимодействиям были признаны в качестве открытия.

В журнале “Успехи физических наук” (т. 168, № 1, с. 111-112, 1998 г.) отмечалось, что при нем и при его непосредственном участии **зародилась космофизика как наука** и превратилась затем в большую самостоятельную область физики, в которой Борису Аркадьевичу принадлежат многие фундаментальные результаты.



МИХАИЛ АЛЕКСАНДРОВИЧ  
ЛЕОНТОВИЧ  
(1903—1981)

Научная деятельность Б.А. Тверского началась в студенческие годы в Институте атомной энергии имени И.В.Курчатова в коллективе, проводившим исследования по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу и возглавляемом академиком **М.А. Леонтовичем**. Характерной особенностью школы Леонтовича состояла в высокой научной взыскательности и требовательности к уровню научной работы, **бескомпромиссной непримеримости ко всякого рода фальши** [А.П. Александров, Е.П. Велихов, В.Л. Гинзбург, Я.Б. Зельдович, Б.Б. Кадомцев, Е.М. Лифшиц, А.М. Прохоров, С.М. Рытов, Р.З. Сагдеев, В.Д. Шафранов, УФН, т. 34, вып. 4, с. 751-752, 1981]. В 1955 г. М.А. Леонтович году подписал «Письмо трёхсот» против лысенковщины в науке. Леонтовича называли совестью Академии. На выборах в Академию наук СССР он своей бескомпромиссной позицией создавал непреодолимый барьер для последователей Лысенко и околонуучных карьеристов.

Известный специалист в области физики плазмы Анатолий Борисович Михайловский занимался выяснением индекса цитирования учёных, принадлежащих к школе академика Леонтовича, возникшей в Курчатовском институте и ввел термин “Курчатовская школа Леонтовича”, сокращённо “КШЛ” по аналогии с “Клубом знаменитых капитанов”. В этот “клуб” он “зачислял” КШЛовцев с индексом цитирования не ниже 400. Цитат-индекс Б.А. Тверского по данным Филадельфийского Института научной информации оказался близким к 1000.

## Проблемы, с которыми столкнулся Б.А.Тверской

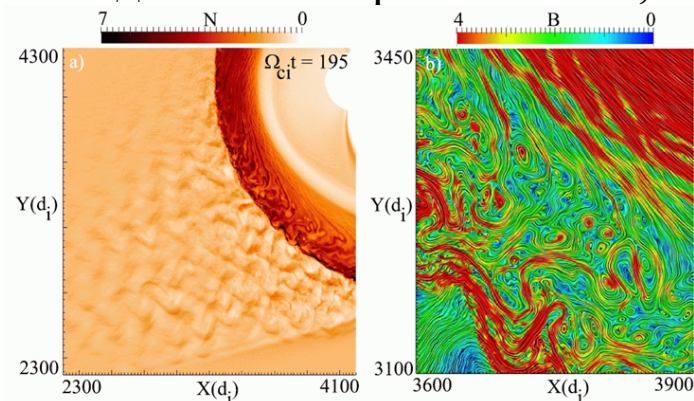
- Приходилось работать в период холодной войны  $\Rightarrow$  закрытость тематики.
- Заимствование теоретических идей и решений без ссылок (конкретные примеры – технический перевод монографии «Динамика радиационных поясов Земли» (NASA Technical Translation, F-635, June 1971) и использование без ссылок материалов доклада на Симпозиуме по солнечно-земной физике, Ленинград, 1970 г. (распространялся препринт “Electric fields in the magnetosphere and the origin of trapped radiation”, опубликованный только через 2 года в *Solar-Terrestrial Physics*, E. R. Dyer, Ed. Reidel Co., Part III, 297-317, 1972).
- Доминирование теоретических подходов в области космической плазмы несовместимых с результатами исследований по проблеме термоядерного синтеза.

**В сложившихся условиях можно было опираться только на данные экспериментальных наблюдений. Критерий адекватности теории – теория должна описывать известные закономерности и иметь предсказания, которые могли бы быть проверены экспериментально.**

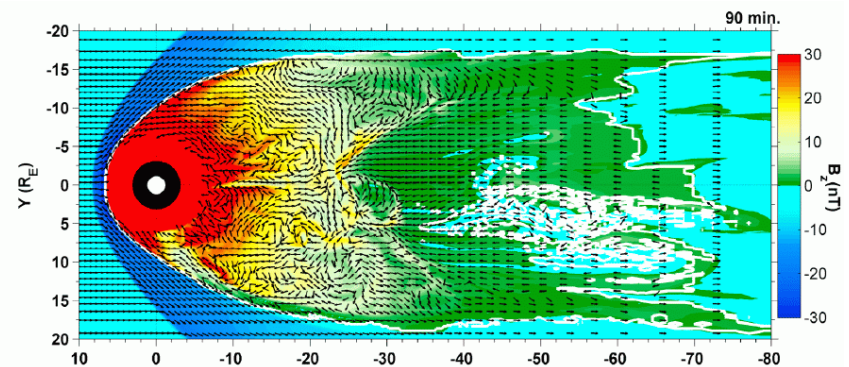


Согласно Hannes Alfvén [Cosmic plasma, 1971; Космическая плазма, М. Мир, 1983, с. 11] теория плазмы, развитая до начала термоядерных исследований «превратилась в гигантское умозрительное построение без какого-либо экспериментального подтверждения... Первые экспериментальные данные интерпретировались на основании либо старых теорий, либо новых, но построенных на основе прежних основных принципах. Однако с совершенствованием наблюдательной техники стало очевидно, что некоторые из этих теорий неверны. Оказалось, что поведение космической плазмы является столь же сложным, как и поведение лабораторной плазмы, и следует тем же основным законам».

Данное замечание стало особенно очевидным в последние годы, когда турбулентность течения плазмы в магнитослое и плазменном слое магнитосферы Земли стала не только наблюдаться экспериментально, но и изучаться в процессе численного моделирования.



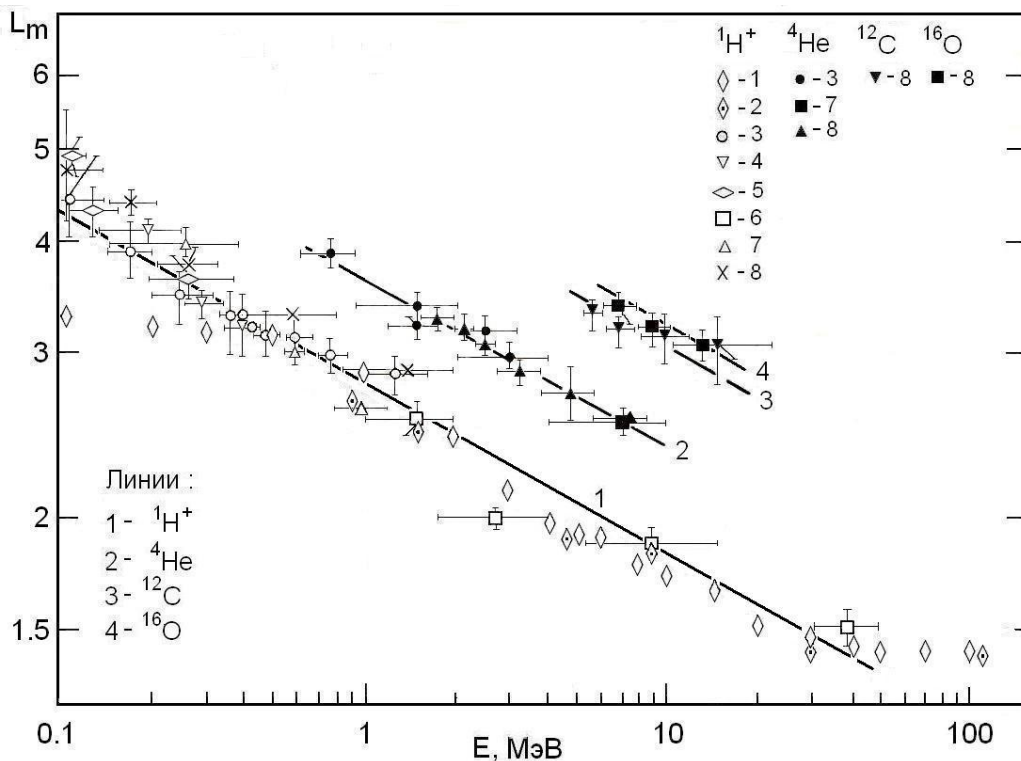
[Karimabadi et al., 2014]



El - Alaoui, et al. [2010]

# ВНУТРЕННИЙ РАДИАЦИОННЫЙ ПОЯС

В 1961-1965 г. Б.А. Тверским была разработана теория радиационных поясов Земли. Спутниковые эксперименты подтвердили предсказания данной теории. Были обнаружены предсказанные **пояс альфа-частиц** и **нестационарные диффузионные волны** релятивистских электронов.

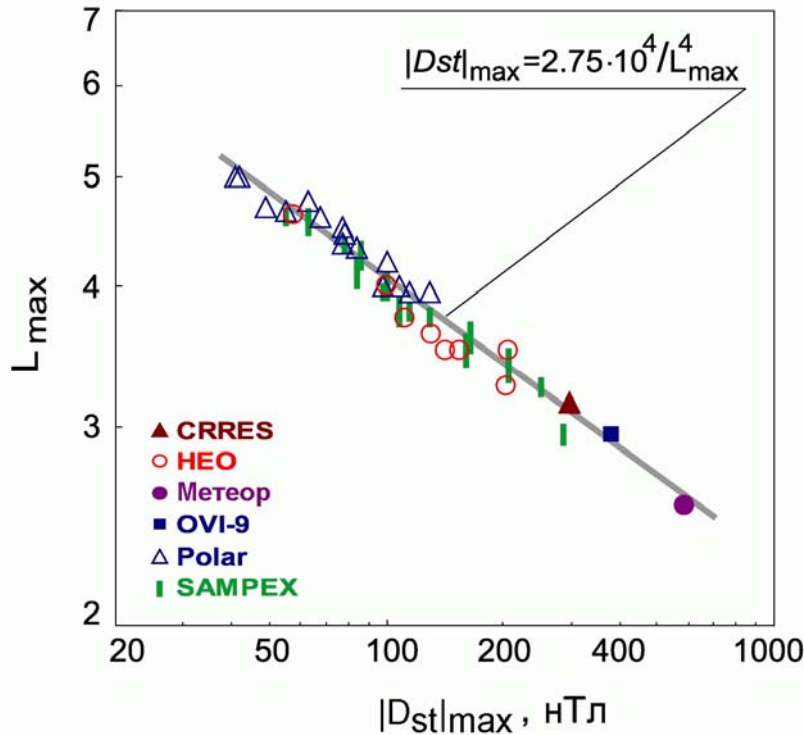


Зависимость положения максимума радиационных поясов протонов, ионов  $He$ ,  $C$  и  $O$  от энергии. 1 – модель AP-8; 2 – «Электрон-1 – 4»; 3 – «Explorer-45»; 4 – «Молния-1» (1970); 5 – «Молния-1» (1974); 6 – «Молния-2» (1974); 7 – «Молния-2» (1975); 8 – ISEE-1. Прямые линии 1 – 4 для каждого сорта ионов соответствуют теории Тверского (для ионов  $C$  и  $O$  среднее зарядовое состояние  $5+$  и  $6+$ , соответственно).

На основе теории Б.А. Тверского получил количественное объяснение процесс быстрой инжекции высокоэнергичных частиц во внутренний радиационный пояс во время мощного короткого внезапного импульса, зарегистрированный в 1991 г. на спутнике CRRES [Павлов Н.Н., Тверская Л.В., Тверской Б.А., Чучков Е.А., Геом. Аэрон., т. 33. №6, с. 41, 1993].

# ВНЕШНИЙ РАДИАЦИОННЫЙ ПОЯС

(зависимость максимума сформированного во время фазы восстановления нового радиационного пояса от минимального Dst и теория Б.А. Тверского)



Tverskaya et al. [2005]

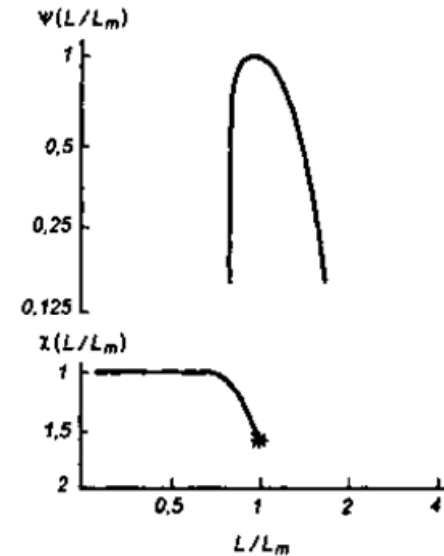
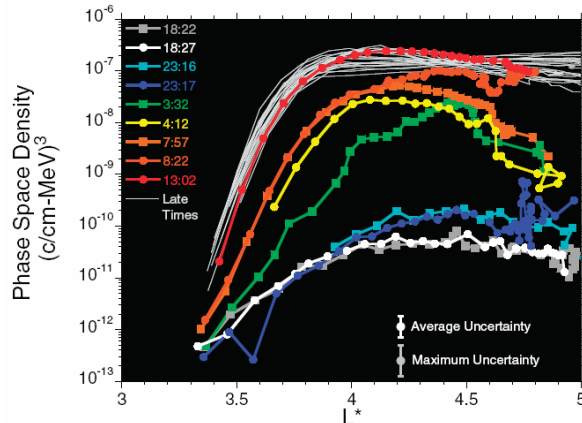
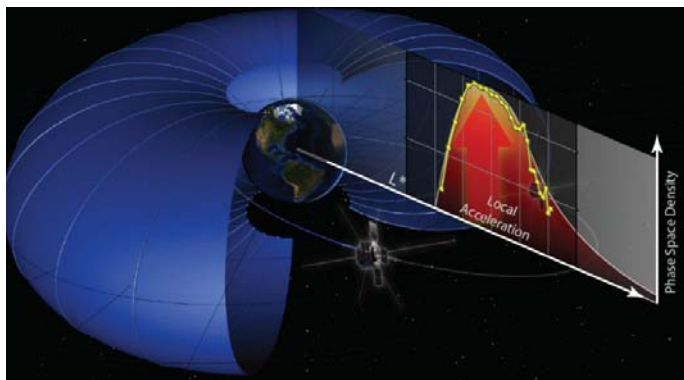


Рис. 2. Верхняя часть: распределение давления  $p = 0,06 L_m^{-7} \cdot \psi(L/L_m)$  эрг/см<sup>3</sup> в предположении дипольности поля. Нижняя часть: внесенное плазмой возмущение  $\Delta = 1,8 \cdot 10^4 L_m^{-2} \chi$  нТл. Звездочкой обозначено максимальное возмущение магнитного поля в максимуме бури и соответствующее ему положение максимума пояса релятивистских электронов после бури

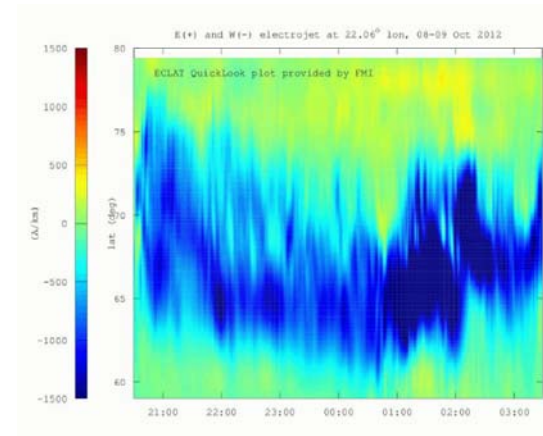
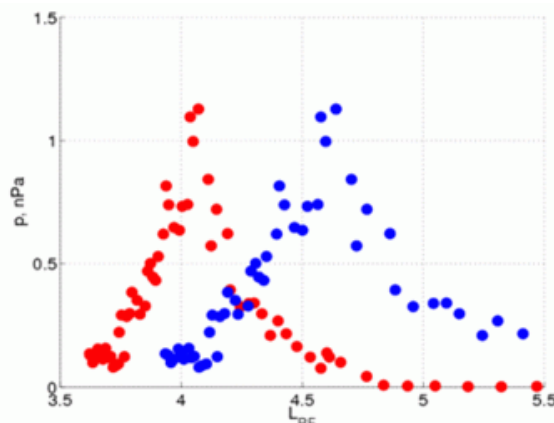
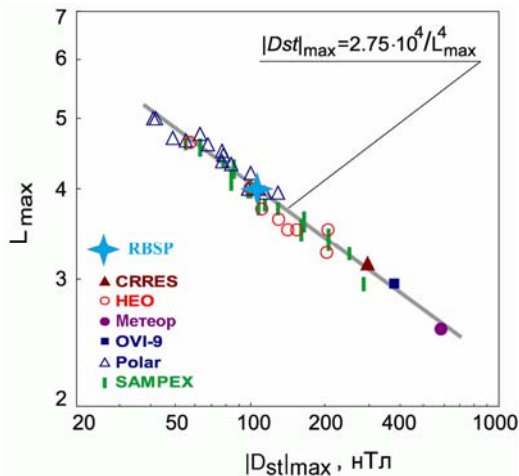
Зависимость  $|Dst|_{\max} \sim (L_{\max})^{-4}$  получила объяснение в работе [Тверской, 1997]. Было предсказано, что в районе  $L_{\max}$  должен наблюдаться крутой пик давления и экваториальная кромка западного электроджета.

Предсказания теории были проверены на примере магнитной бури 8–9 октября 2012 с минимальным  $Dst = -105$  nT



Максимум of the phase space density (PSD) локализован на  $L=4.2$ .

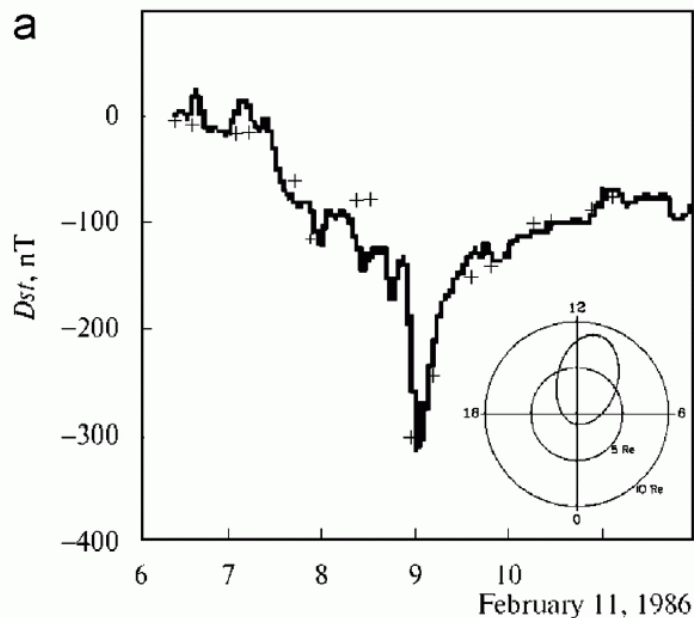
Reeves et al. [2013, doi:10.1126/science.1237743]



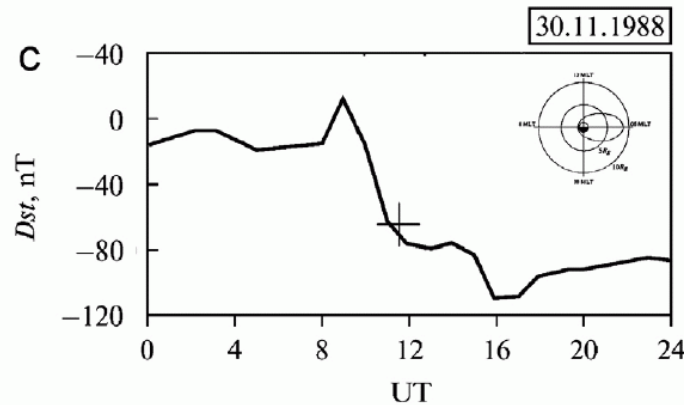
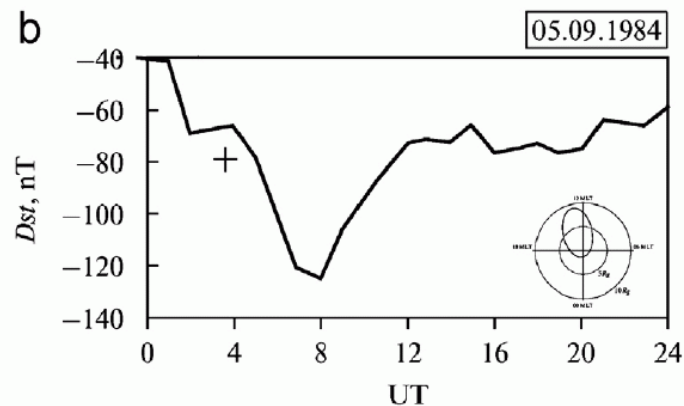
Было зарегистрировано возникновение пика давления в районе  $L_{max}$  и локализация пика на экваториальном краю аврорального электроджета [Antonova and Stepanova, 2015, doi:10.1186/s40623-015-0319-7].



Работа Тверского [1997], объясняющая зависимость положения максимума нового формирующегося на фазе восстановления магнитной бури радиационного пояса называлась «**Механизм формирования структуры кольцевого тока магнитных бурь**». ⇒ В данной работе была основана на хорошо ранее проверенном предположении об основном вкладе кольцевого тока в формировании Dst вариации. Однако данное предположение подверглось критике в результате допущенной в работе [Hamilton et al., 1988] ошибки. При вычислении Dst авторы забыли помножить энергосодержание кольцевого тока на 3/2 (вклад индукционных токов внутри Земли), что было показано в работах [Feldstein, SSR, 1992; Greenspan M.E., Hamilton, 2000]. Тем не менее стала популярной точка зрения, согласно которой ток хвоста вносит значительный вклад в Dst вариацию.

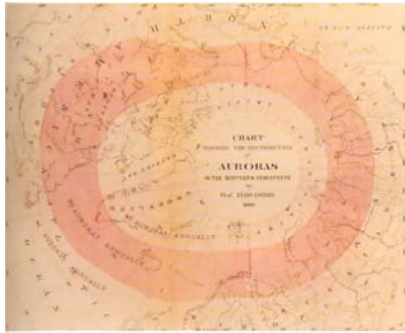


Вычисление Dst для магнитных бурь периода АМРТЕ/ССЕ февраля 1986, 4-7 сентября 1984 г. и 30 ноября 1988 г при известном профиле давления.



**В работах [Вовченко и Антонова, 2010, 2012; Antonova et al., 2013] удалось восстановить традиционную интерпретацию формирования Dst в результате развития осесимметричной части кольцевого тока и подтвердить справедливость подходов в работе [Тверской, 1997].**

# Замкнутое кольцо полярных сияний по результатам наземных и спутниковых наблюдений



The auroral zone as determined by Loomis in 1860

Loomis [1860]

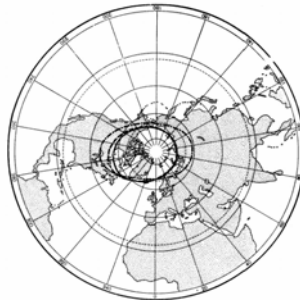
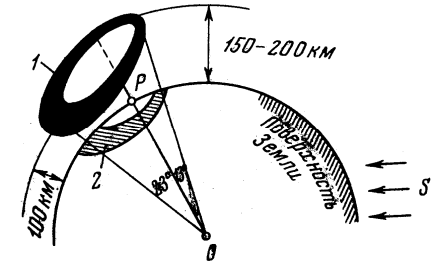
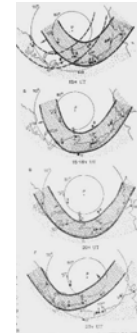
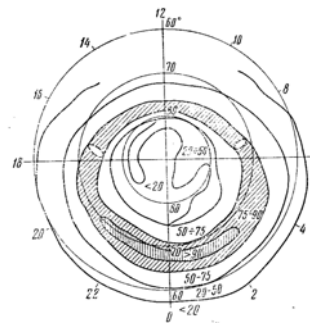
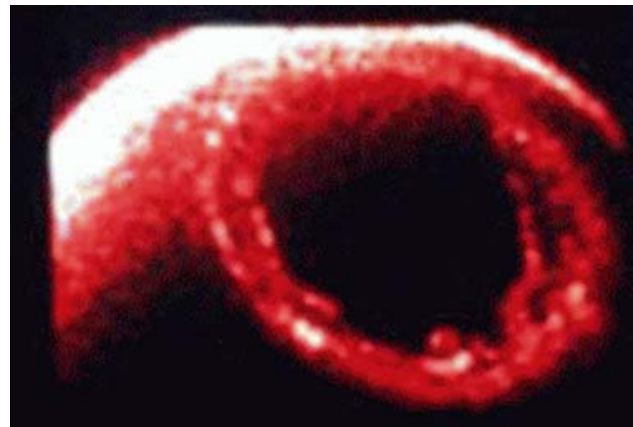
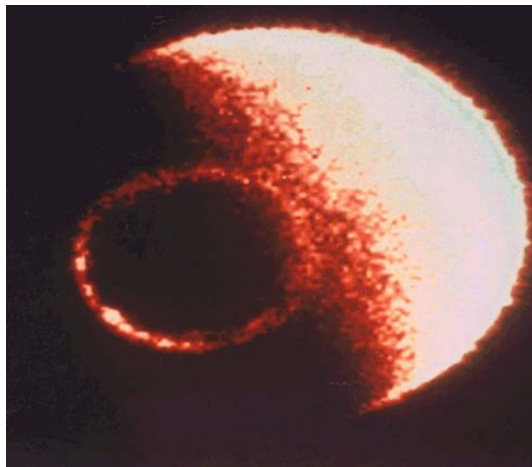


Рис. 1а. Положение зоны максимальной частоты появления полярных сияний в южной полярной зоне

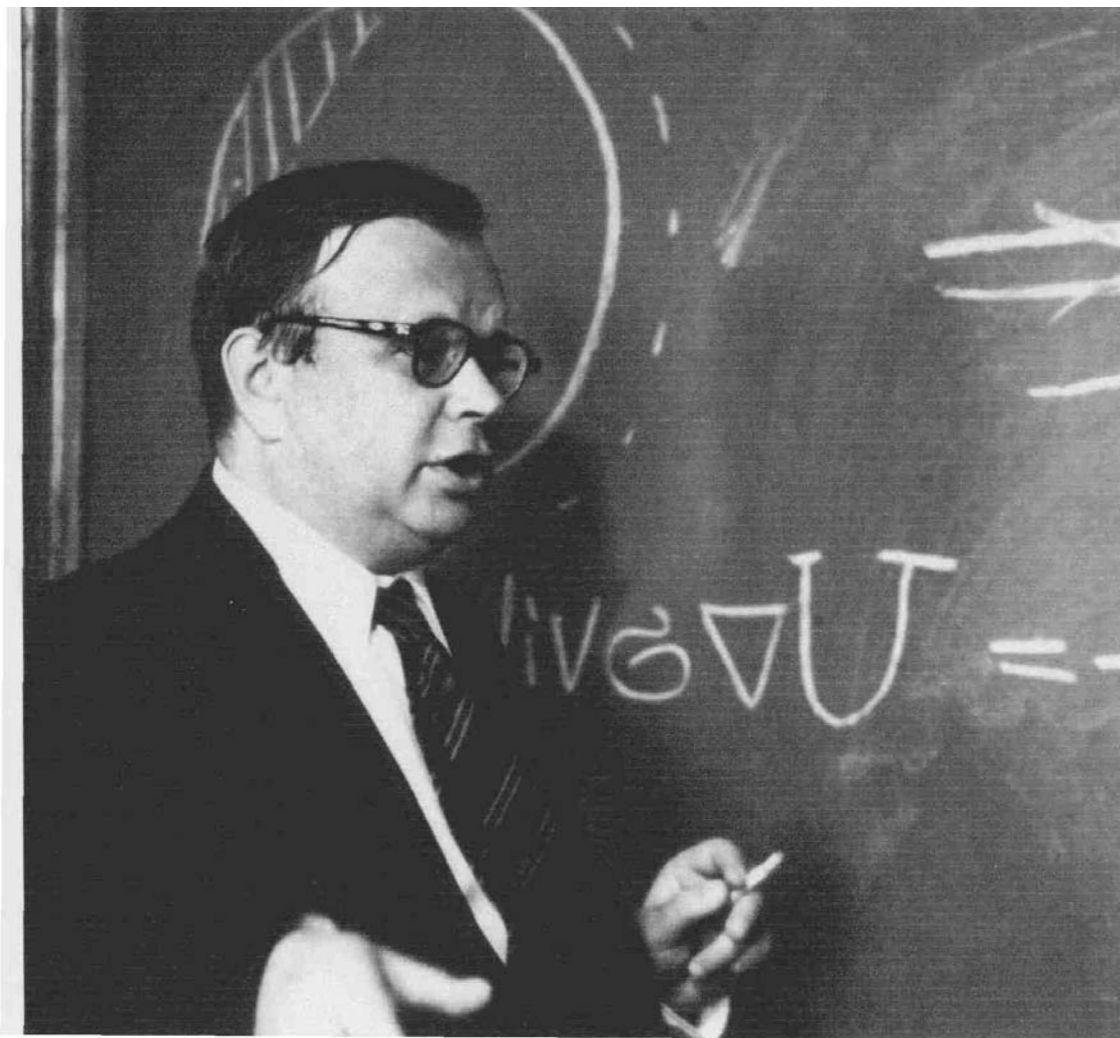
Фельдштейн [1960, 1963]



Хорошева [1961, 1967]



Хорошо наблюдаемой кольцевой структурой является авроральное кольцо/овал полярных сияний, имеющий конечную толщину в районе полудня. ⇒ Рассмотрение динамики плазменного кольца с учетом возникновения токов вдоль магнитных силовых линий привело Б.А. Тверского к созданию теории низкочастотных магнитосферно-ионосферных взаимодействий и формирования магнитосферной конвекции.



**ОТКРЫТИЕ № 369** в списке  
госрегистрации:  
**«Явление электрического  
магнитосферно-  
ионосферного  
взаимодействия при  
крупномасштабном  
возмущении магнитосферы».**

Основные публикации Тверской Б.А.,  
Об электрических полях в  
магнитосфере Земли, *ДАН СССР*,  
**188(3)**, 575-578, 1969.

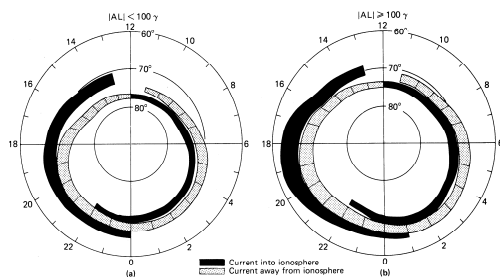
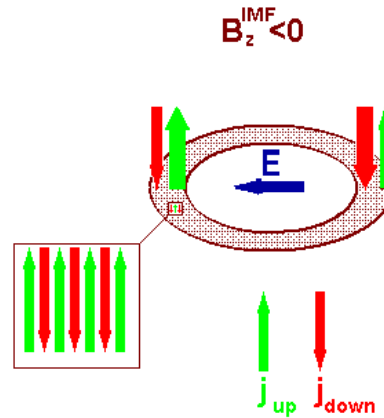
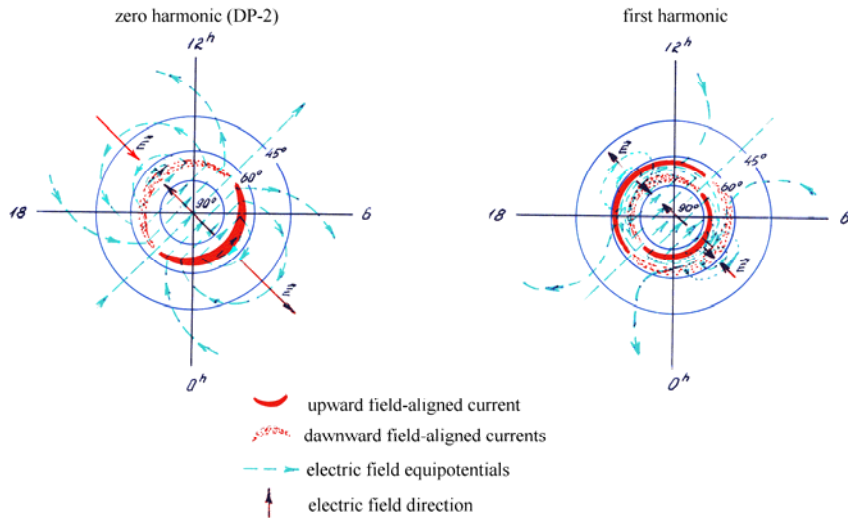
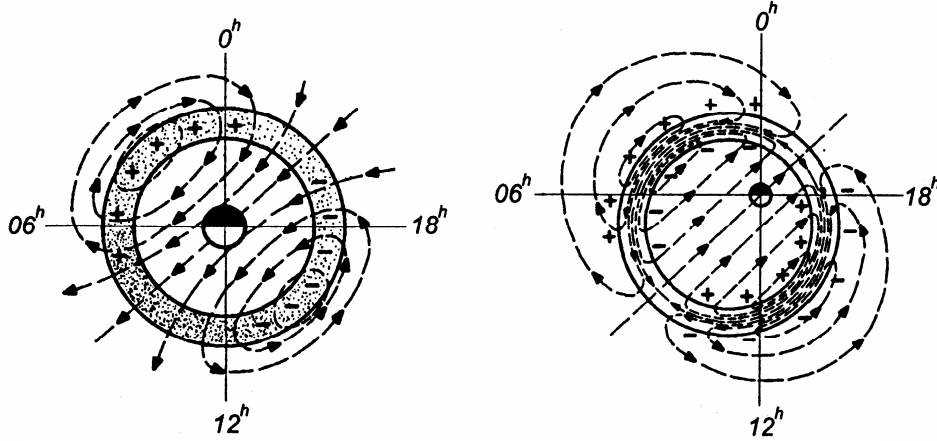
Tverskoy, B. A., Electric fields in the  
magnetosphere and the origin of trapped  
radiation. *Solar-Terrestrial Physics*,  
edited by E. R. Dyer, Dordrecht, Holland,  
297-317, 1972.

# Теория нестационарной конвекции Тверского

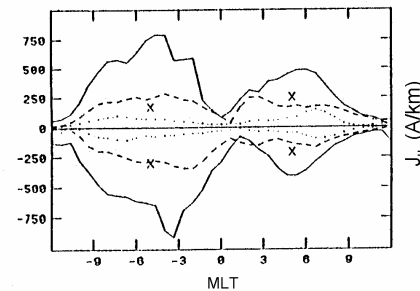
Модель возбуждения магнитосферной конвекции при асимметричной инжекции плазмы Тверской [1969], Tverskoy, [1970, 1972].

Б.А. Тверским в 1969-1970 гг. предсказана конфигурации системы крупномасштабных продольных токов Ииджимы и Потемры, определены амплитуды токов и характерные времена их изменений.

Поле утро-вечер возникает при замыкании токов зоны 1 Ииджимы и Потемры. Для возникновения конвекции **не требуется** проникновения электрического поля из солнечного ветра.

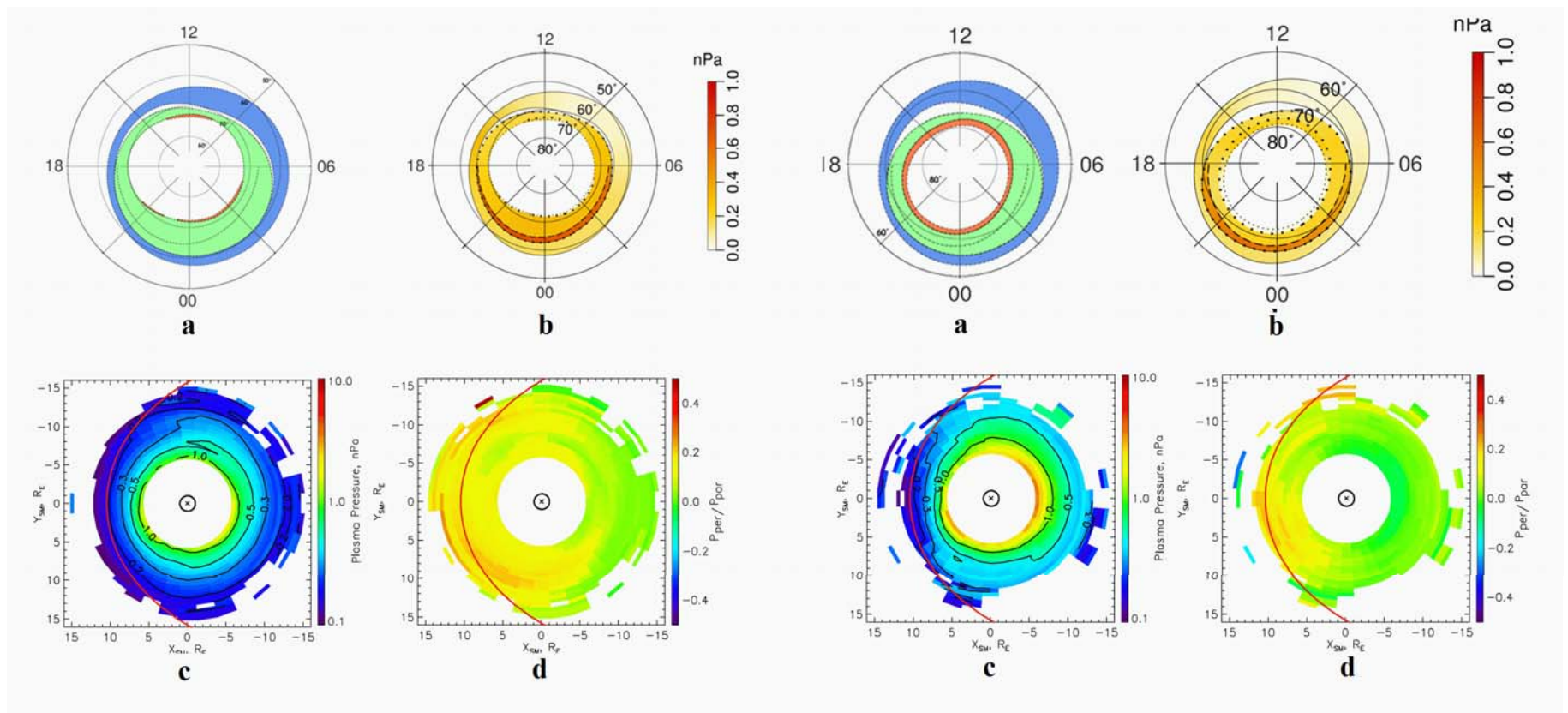


Iijima and Potemra [1976]



Foster et al. [1989]

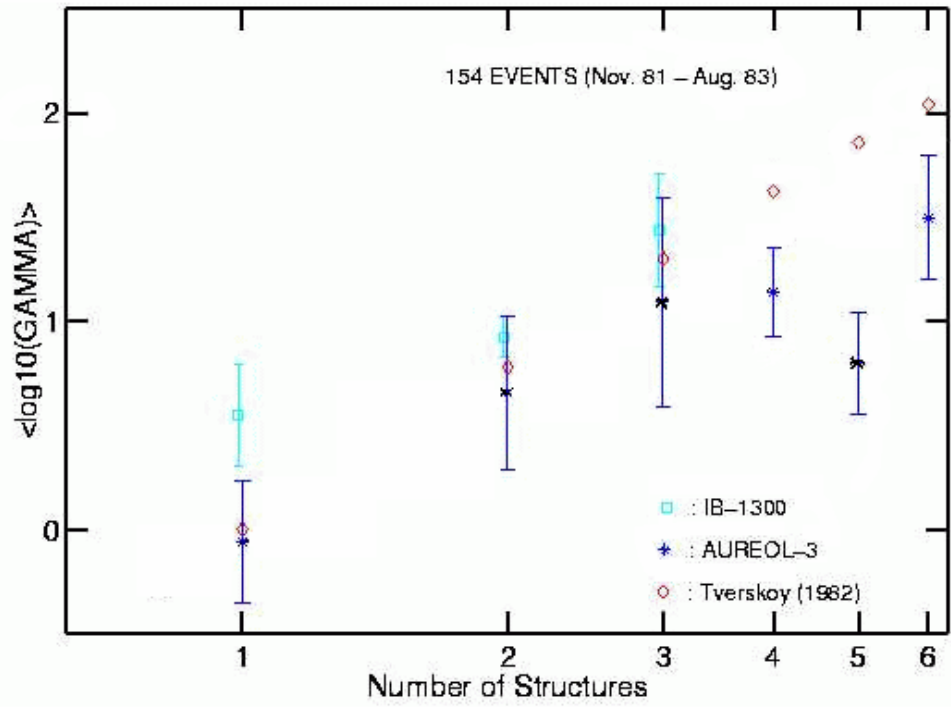
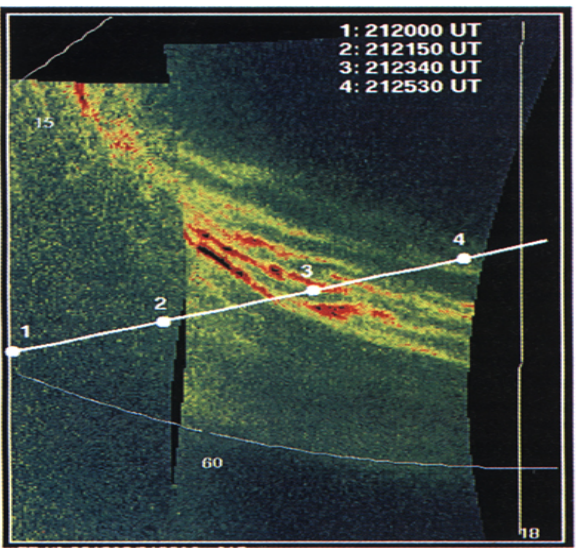
Справедливость подхода Б.А. Тверского к описанию магнитосферных процессов удалось продемонстрировать в ходе анализа распределения давления на малых высотах и в экваториальной плоскости [Антонова и др., 2014; Antonova et al., 2015], в ходе которого удалось показать, что авроральный овал проецируется не на плазменный слой, а на окружающую Землю на геоцентрических расстояниях от  $\sim 6R_E$  до  $\sim 10-12R_E$  плазменное кольцо.



AL = -100 nT, Dst = -5 nT

AL = -600 nT, Dst = -20 nT

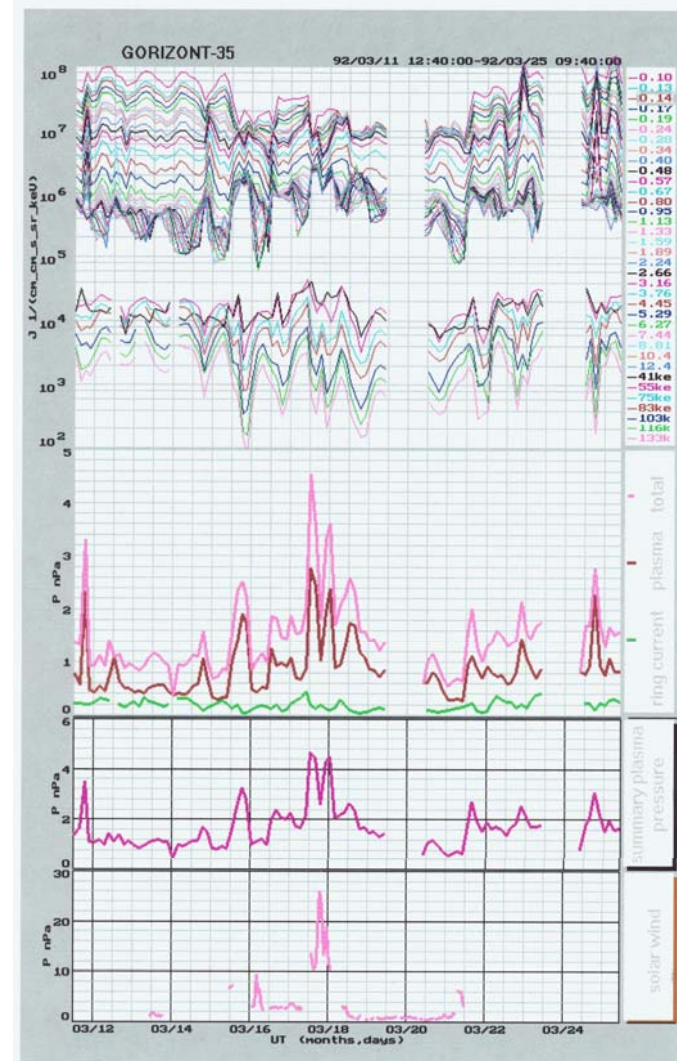
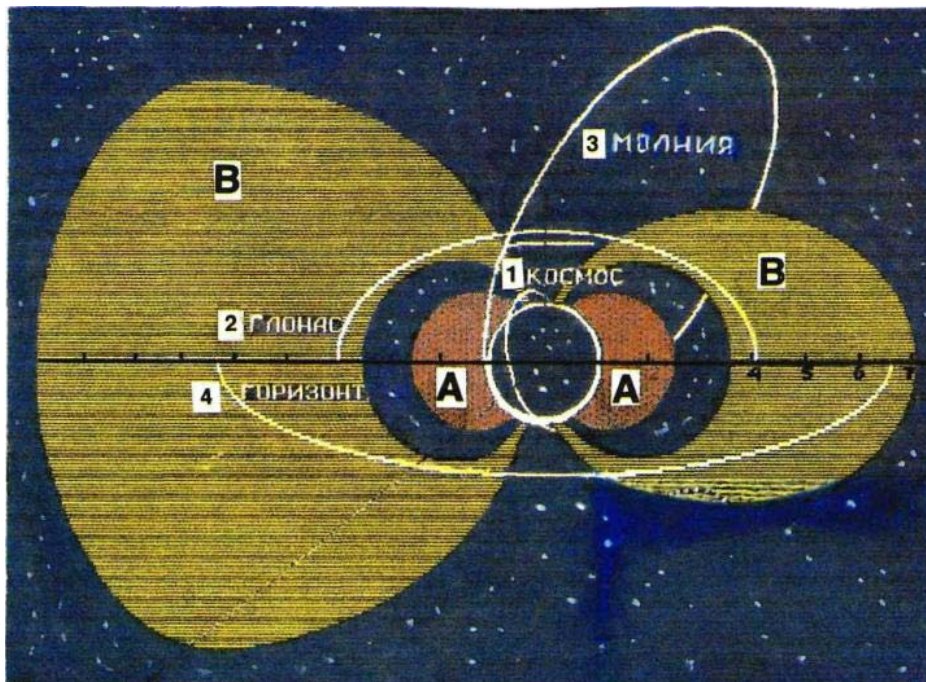
Теория Б.А. Тверского [Тверской, 1982; Antonova et al., 1998] формирования мультиплетных плазменных структур типа перевернутого V (спокойных дуг полярного сияния) в авроральном овале предсказывала число образующихся структур. Теория получила подтверждение в ходе анализа данных спутников Интеркосмос-Болгария-1300 и AUREOL-3.



$$\Gamma = \frac{ej_0L^2}{\Sigma_p T_i}$$

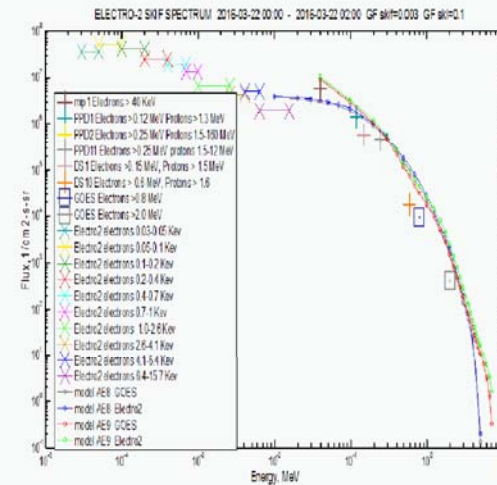
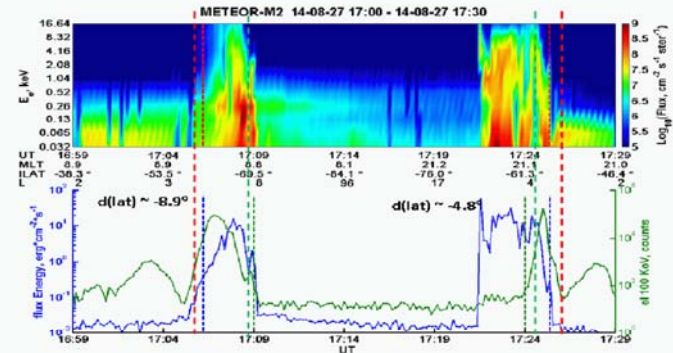
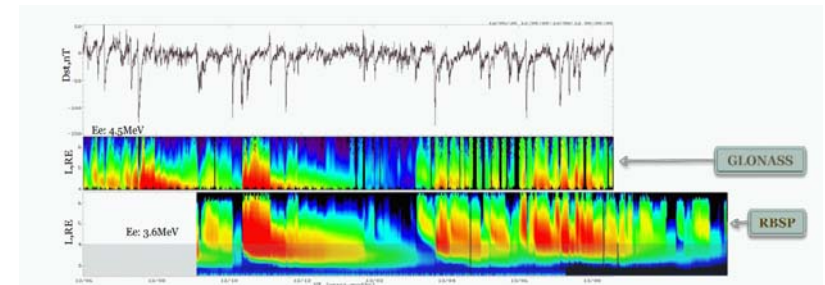
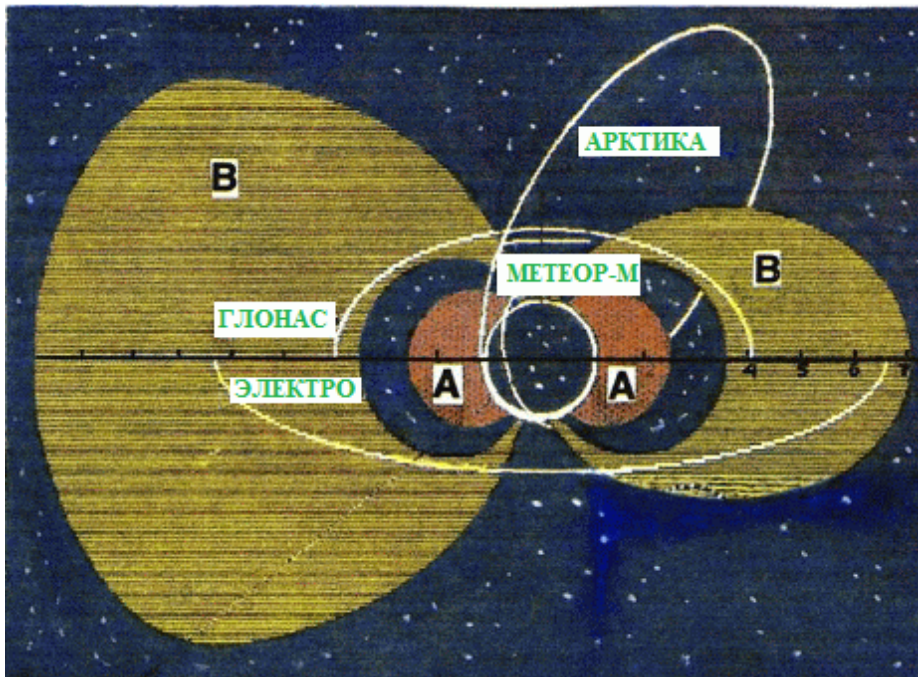
где  $j_0$  – амплитуда тока в полосе,  $L$  – ширина полосы,  $\Sigma_p$  – проводимость Педерсена,  $T_i$  – температура магнитосферных ионов.

Под руководством Б.А. Тверского был создан комплекс аппаратуры для исследования плазмы и жесткой корпускулярной радиации в диапазоне энергий от эВ до десятков МэВ.



Временной профиль вариаций давления на геостационарной орбите и динамическое давление солнечного ветра в марте 1992 г. по результатам наблюдений на спутнике Горизонт-35 [Riazantseva et al., 2000].

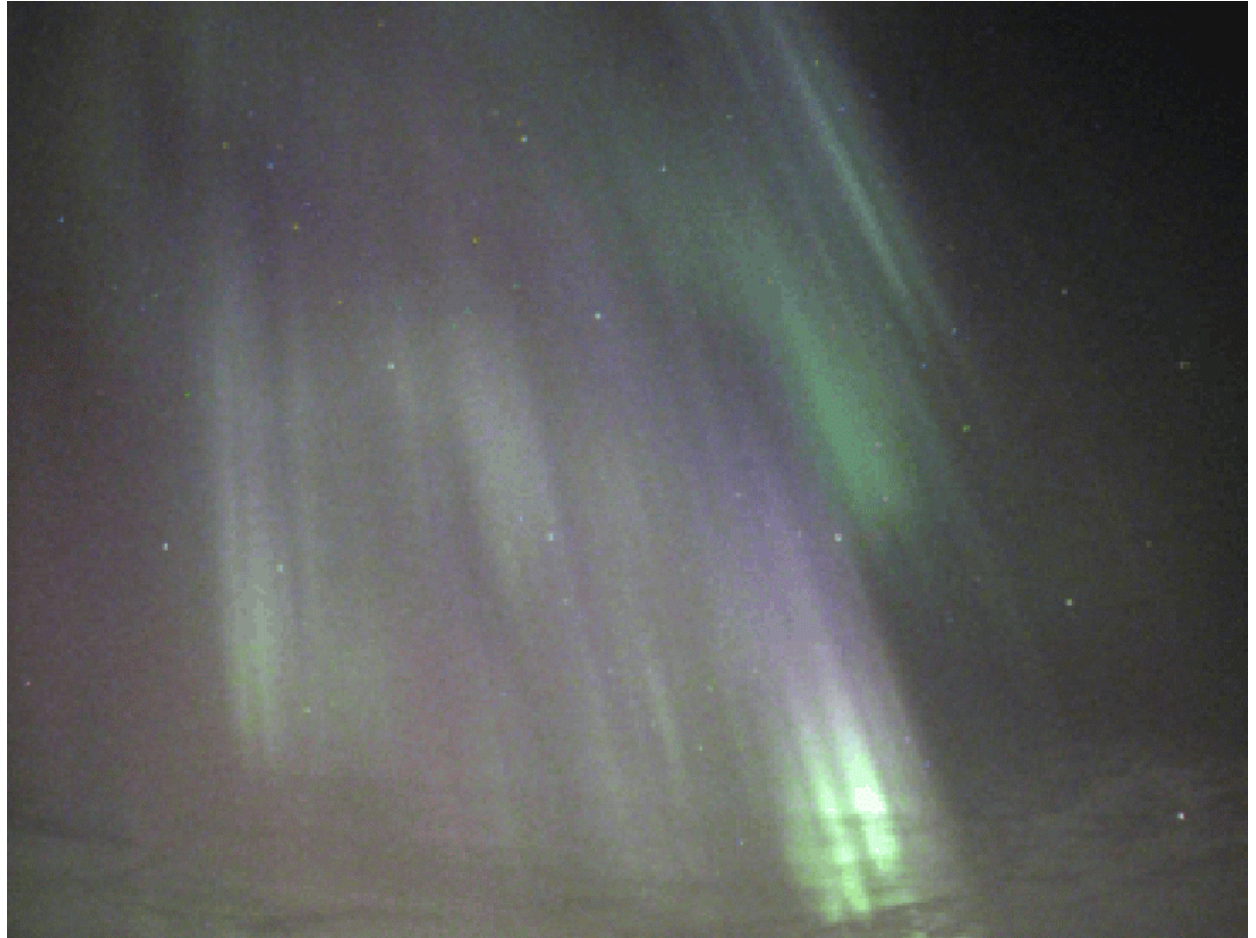
Одновременные наблюдения энергичных частиц и плазмы на спутниках МЕТЕОР-М № 1,2 и ЭЛЕКТРО-2 (последние полученные данные) дают возможность прояснить ряд фундаментальных вопросов физики магнитосферы.





**Нерешенные  
проблемы физики  
магнитосферы,  
сформулированные  
Б.А. Тверским:**

- **Обтекание плазмой  
солнечного ветра  
геомагнитного диполя  
со свободной границей.**
- **Магнитостатическое  
равновесие и природа  
поля утро-вечер.**
- **Физика тонкой  
авроральной дуги.**



Борис Козелов, 2011

**Спасибо за внимание**