

Формирование энергетических спектров электронов в хвосте магнитосферы: конвективный нагрев и потери

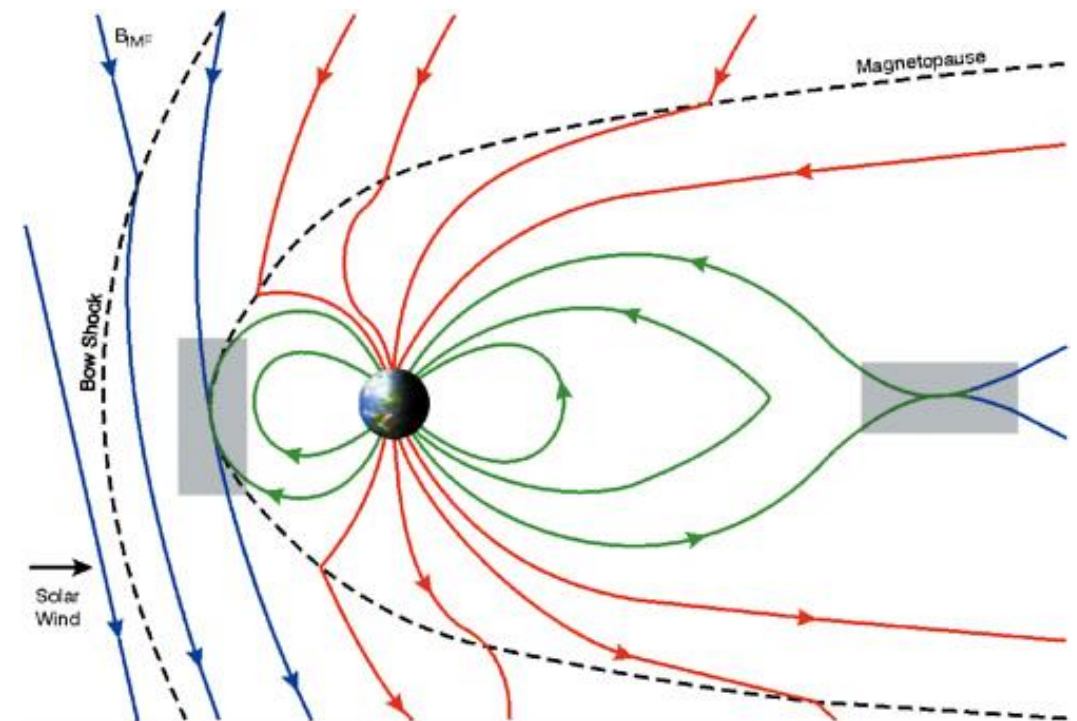
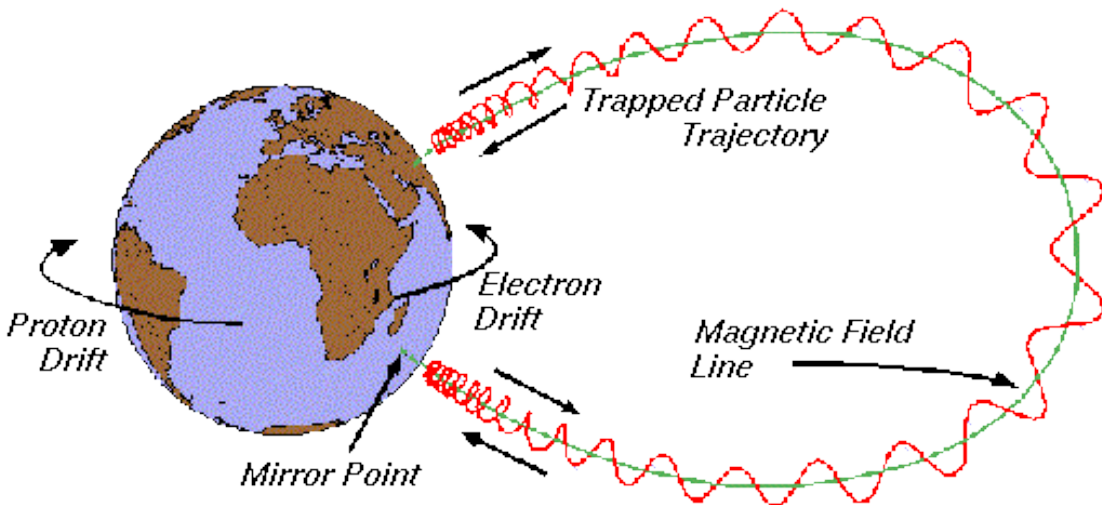
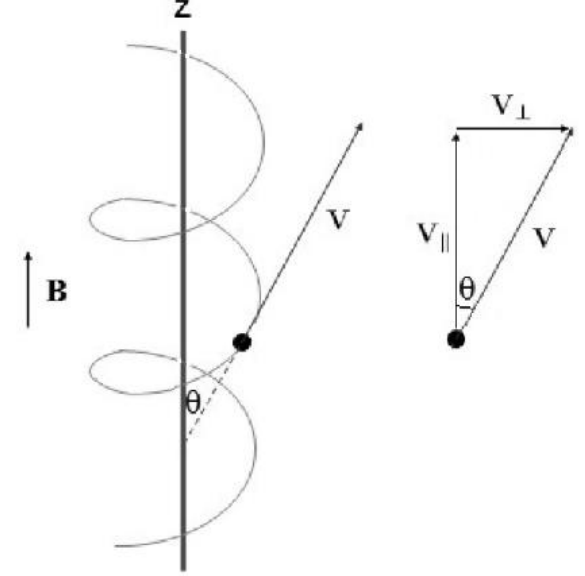
Шустов П.И., Артемьев А.В., Васько И.Ю., Петрукович А.А., Юшков Е.В.

¹Институт космических исследований Российской академии наук, Москва, Россия

²Факультет физики, НИУ «Высшая школа экономики», Москва, Россия

³Физический факультет, МГУ им. Ломоносова, Москва, Россия

- Траектории частиц – спирали вокруг магнитных линий
- Питч угол (pitch angle) – между магнитным полем и скоростью
- Электроны осциллируют между точками отражения – период осцилляций τ_b - баунс период (bounce)
- Дрейф в сторону земли из-за наличия электрического поля $E \times V$ дрейф

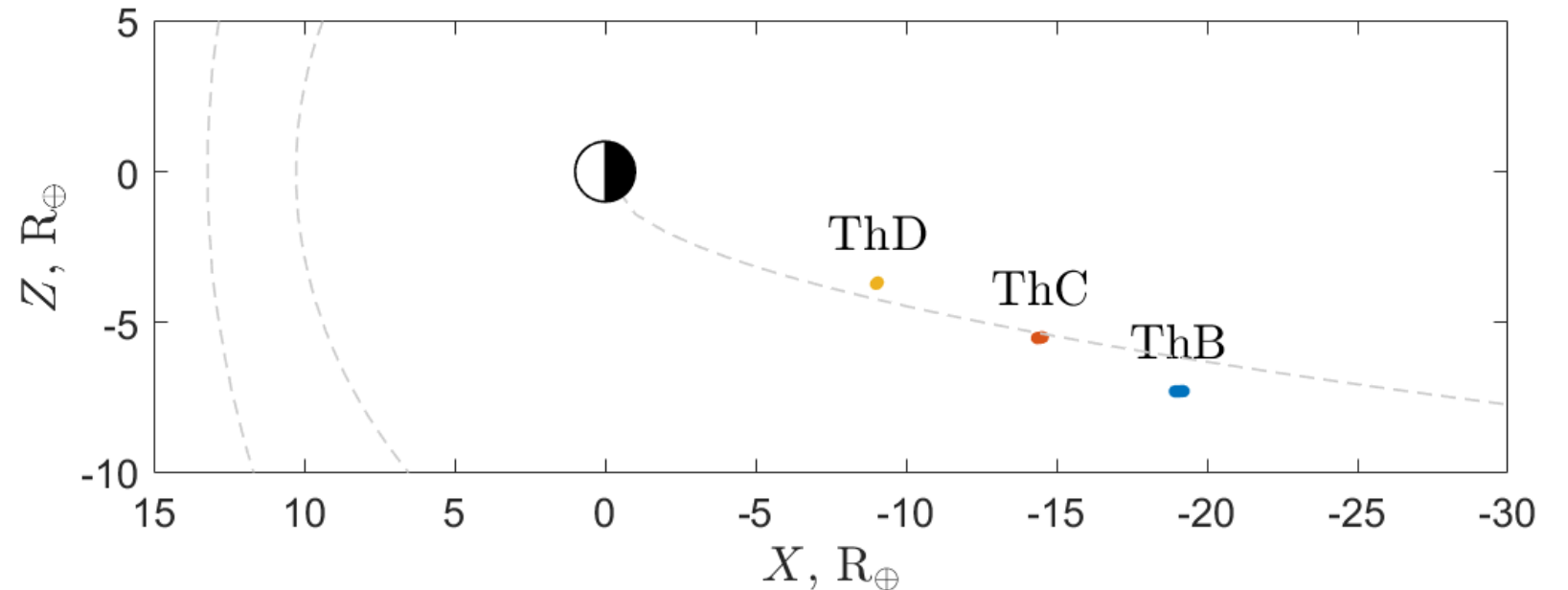
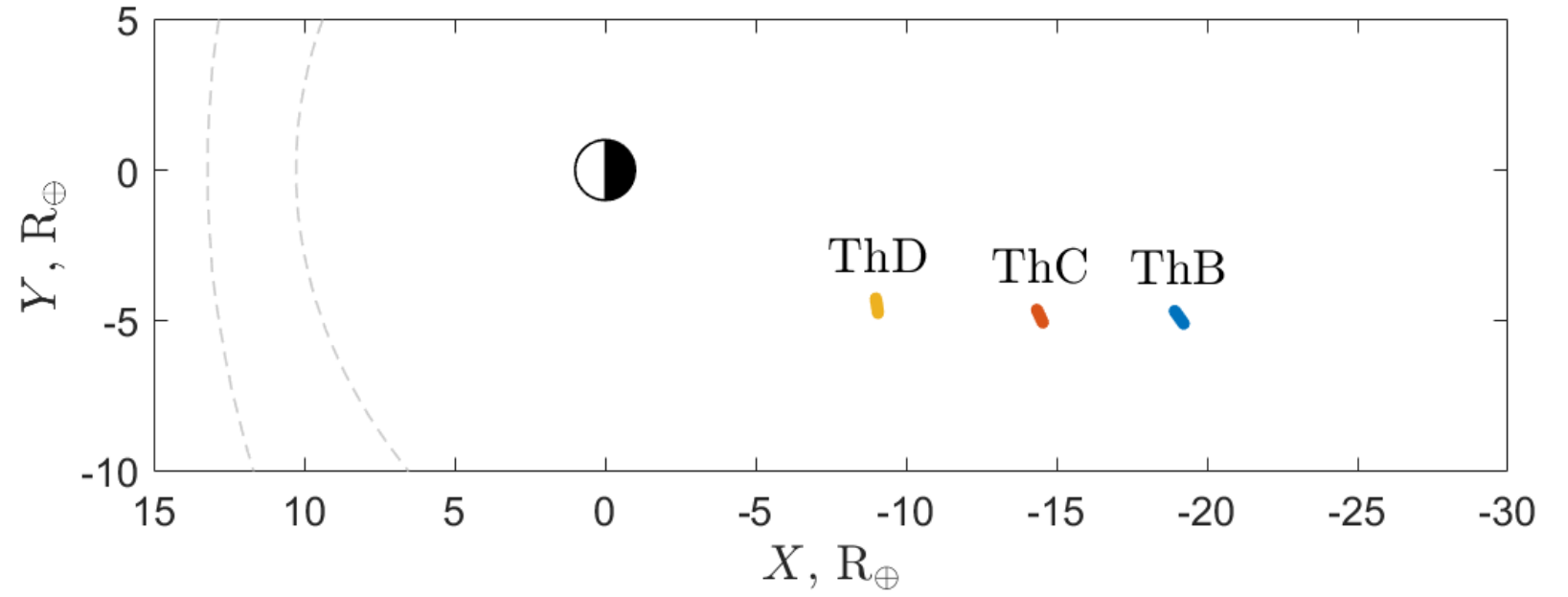


Отобрано 6 событий
единовременного пересечения
токового слой хвоста
магнитосферы тремя
спутниками миссии Themis

- 01/01/2008 04:50-05:10
- 01/01/2008 08:20-08:40
- 17/01/2008 08:10-08:25
- 26/02/2008 05:00-05:10
- 14/01/2009 09:45-10:10
- 14/01/2009 12:00-12:15

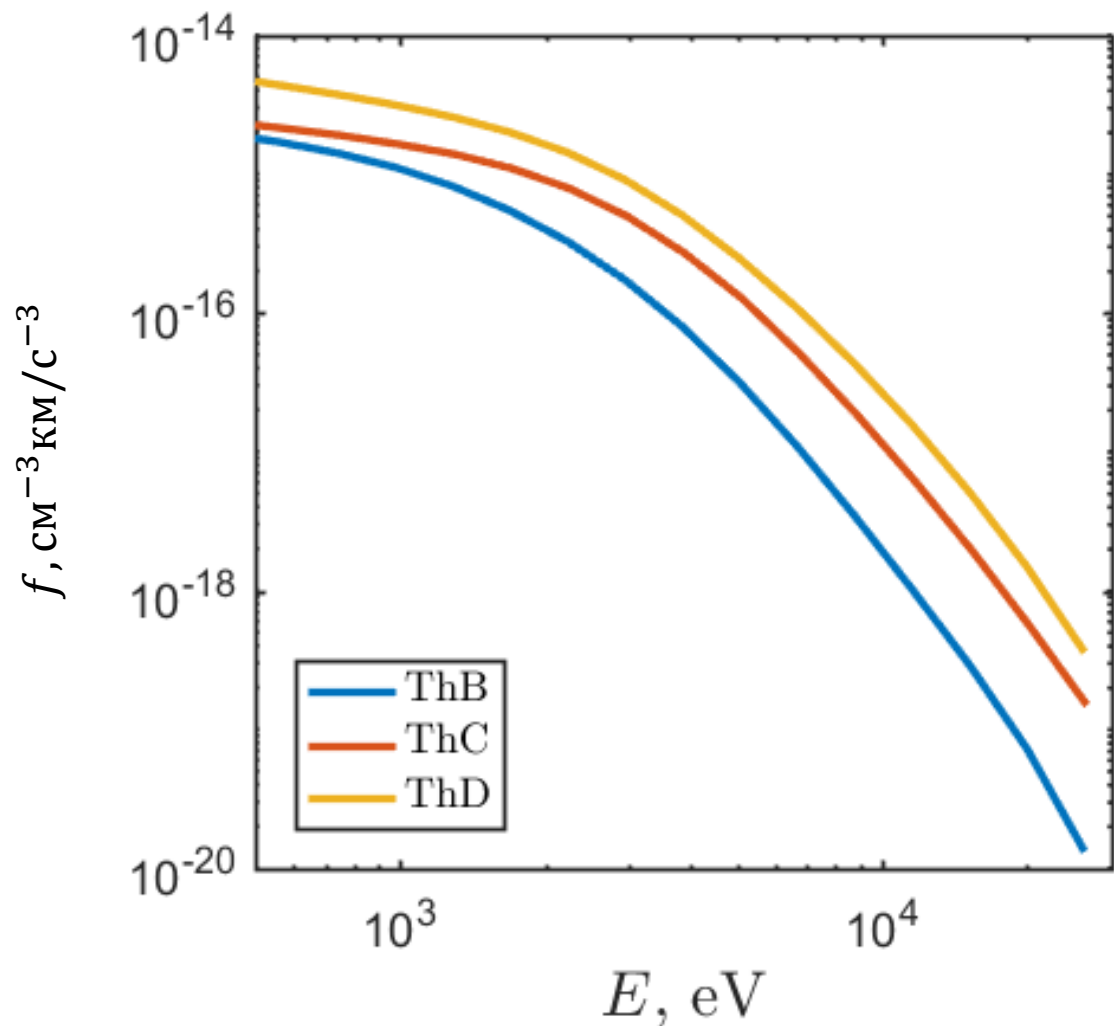
Критерии отбора:

1. Одновременность пересечения т.с. в 30 минут
2. Спутники Themis D, C и B
3. Данные по электронному спектру токового слоя доступны на всех трех спутниках хотя бы для 10 минут

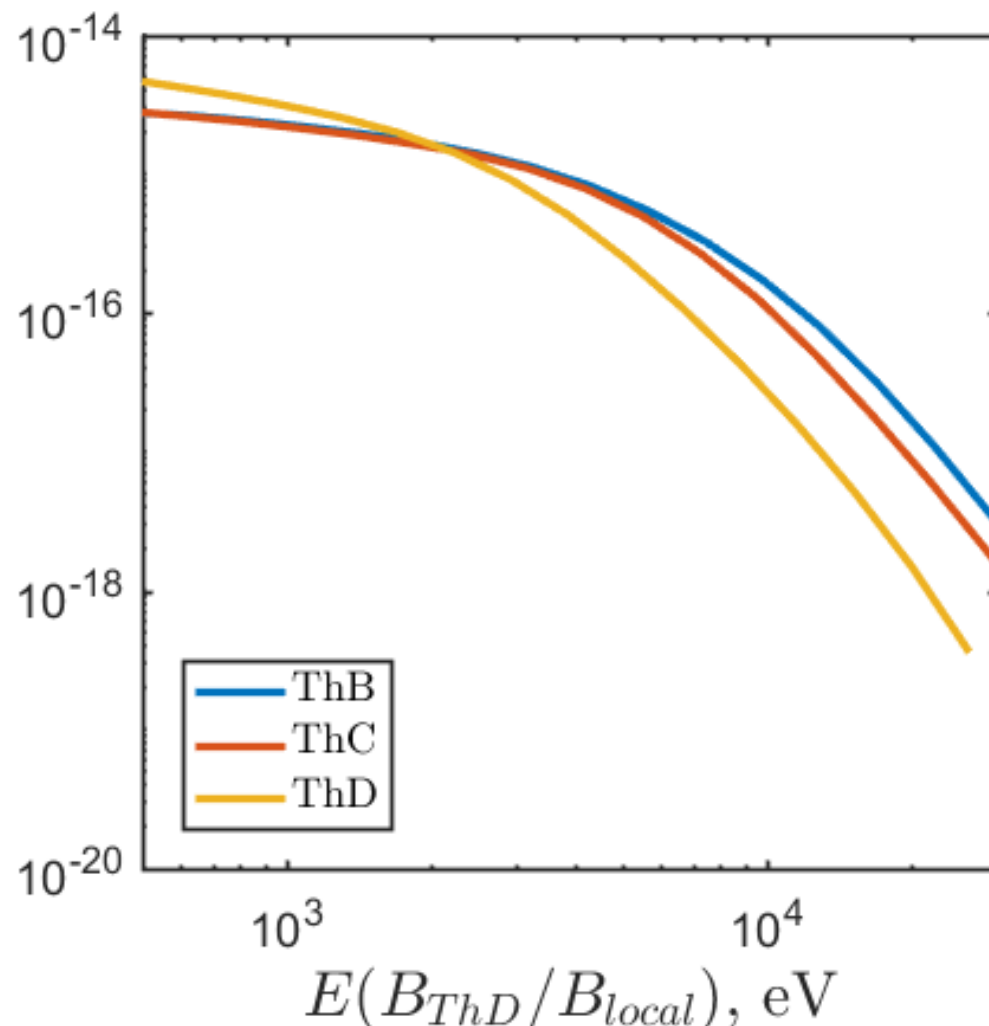


Усреднение спектров по положению вблизи экваториальной области токового слоя (ограничение $|B_x|$) в спокойной плазме (ограничение по v_x).

Ближе к Земле – больше горячих электронов
Бетатронный (адиабатический) нагрев?



Предположение адиабатического нагрева $E \rightarrow E \left(\frac{B_{ThD}}{B_{local}} \right)$
Ближе к Земле – недостаток горячих электронов



Уравнение дрейфа электронов

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{\partial f}{\partial \varepsilon} \dot{\varepsilon} - \frac{f}{\tau_{loss}(\varepsilon)}$$

Адиабатическое изменение энергии

$$\varepsilon = \varepsilon_0 b^q, \quad b = B_z / B_{z0}$$

Функция потерь

$$\frac{1}{\tau_{loss}(\varepsilon)} = \frac{1}{\tau_0} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_1} - 1 \right)^\beta$$

Предположим, что полученное уравнение описывает эволюцию спектров электронов



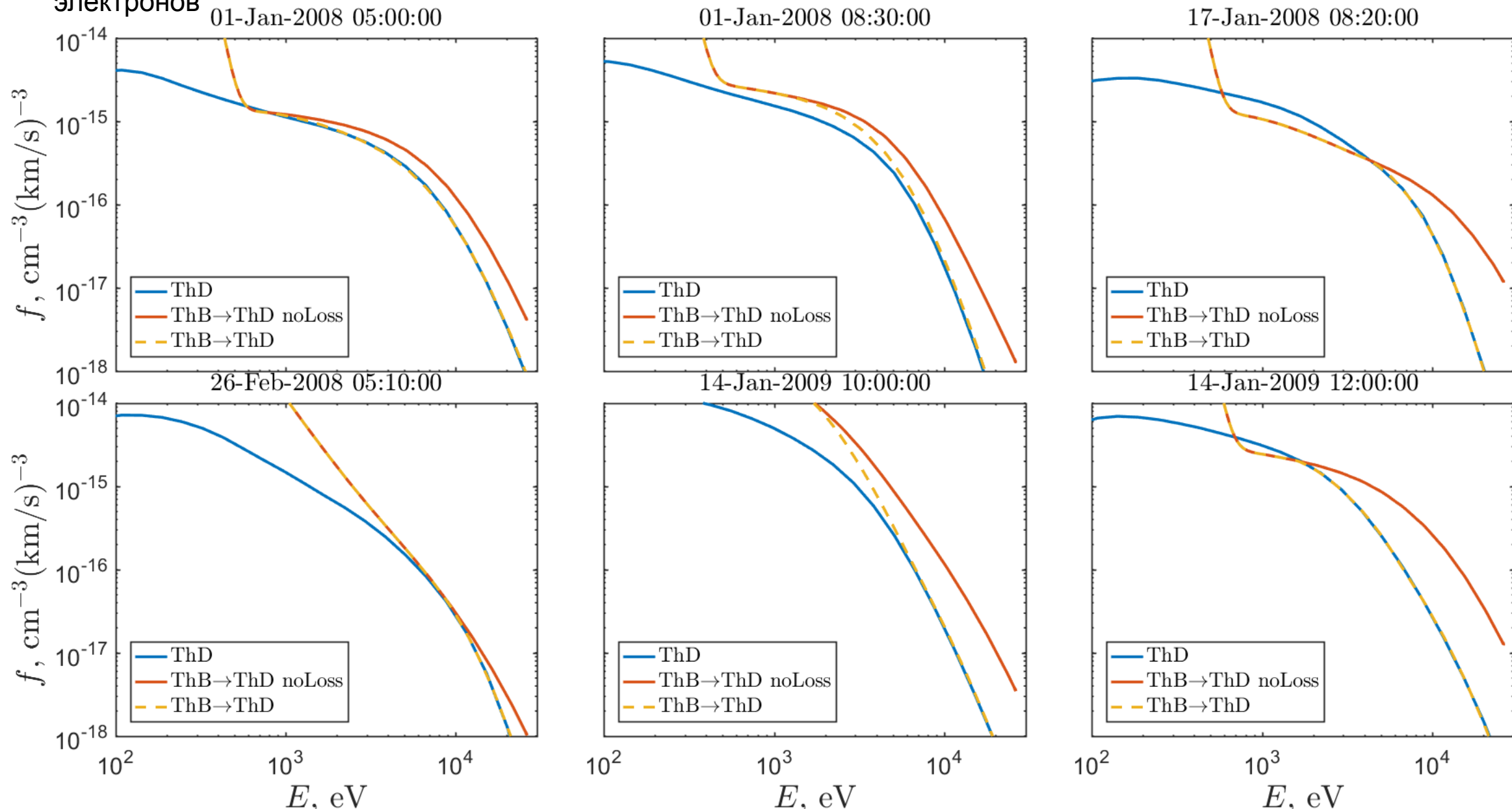
Зная магнитное поле $B(x)$, сравнение с наблюдением даст нам $\tau_{loss}(\varepsilon)$

Синий – спектр рядом с Землей (ThD)

Красный – спектр далеко от Землей (ThB) + бетатронный нагрев

Желтый – спектр далеко от Землей (ThB) + бетатронный нагрев + потери электронов

электронов



Конус потерь – конус с осью вдоль силовой линии, частицы с вектором скорости внутри которого выпадают в атмосферу Земли

- Характерное время заполнения конуса потерь $\tau_{LC} = D^{-1}$ – обратный коэффициент диффузии по питч-углам
- Коэффициент диффузии $D = 4\alpha_{LC}^2/\tau_b$, где α_{LC} – угол конуса потерь и τ_b - баунс период.

Характерное время потерь τ_{loss} , не может быть больше характерного времени заполнения конуса потерь $\tau_{LC} = D^{-1}$

$$\tau_{loss} \leq \frac{\tau_b}{4\alpha_{LC}^2}$$

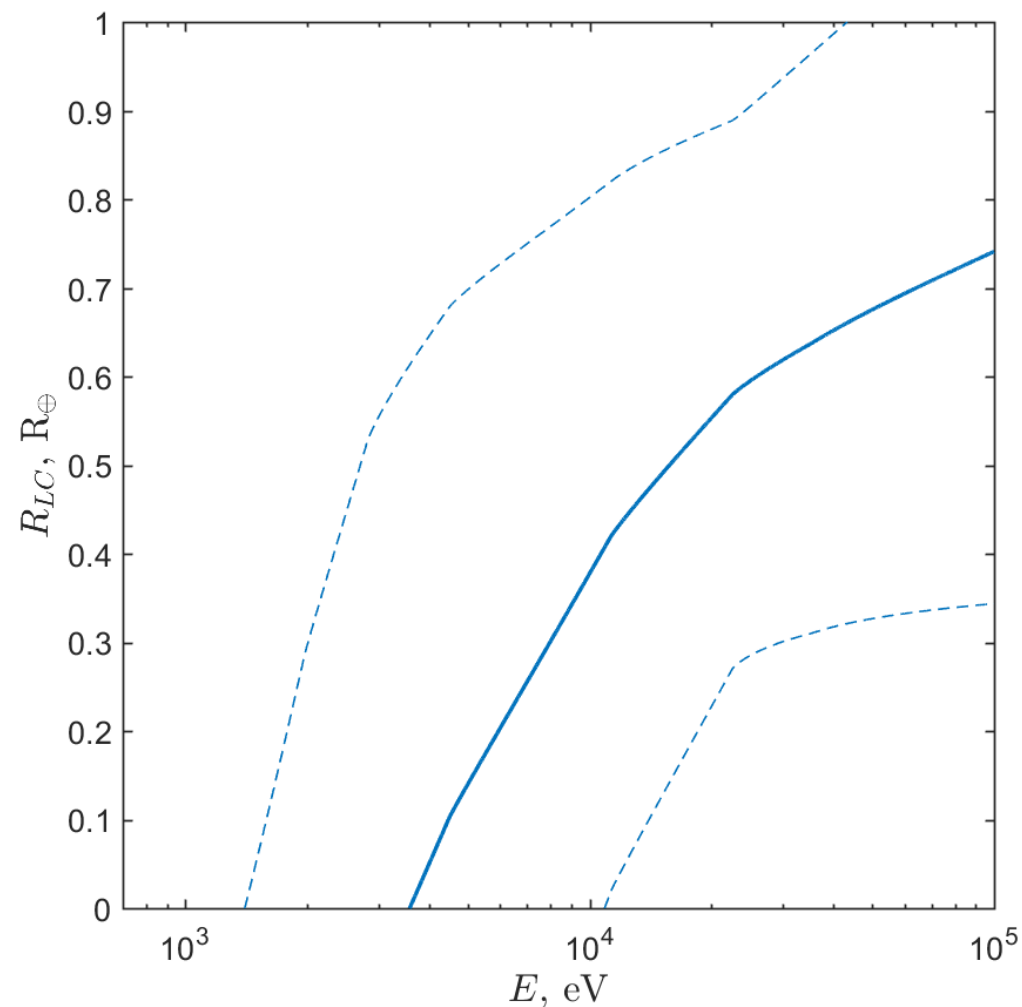
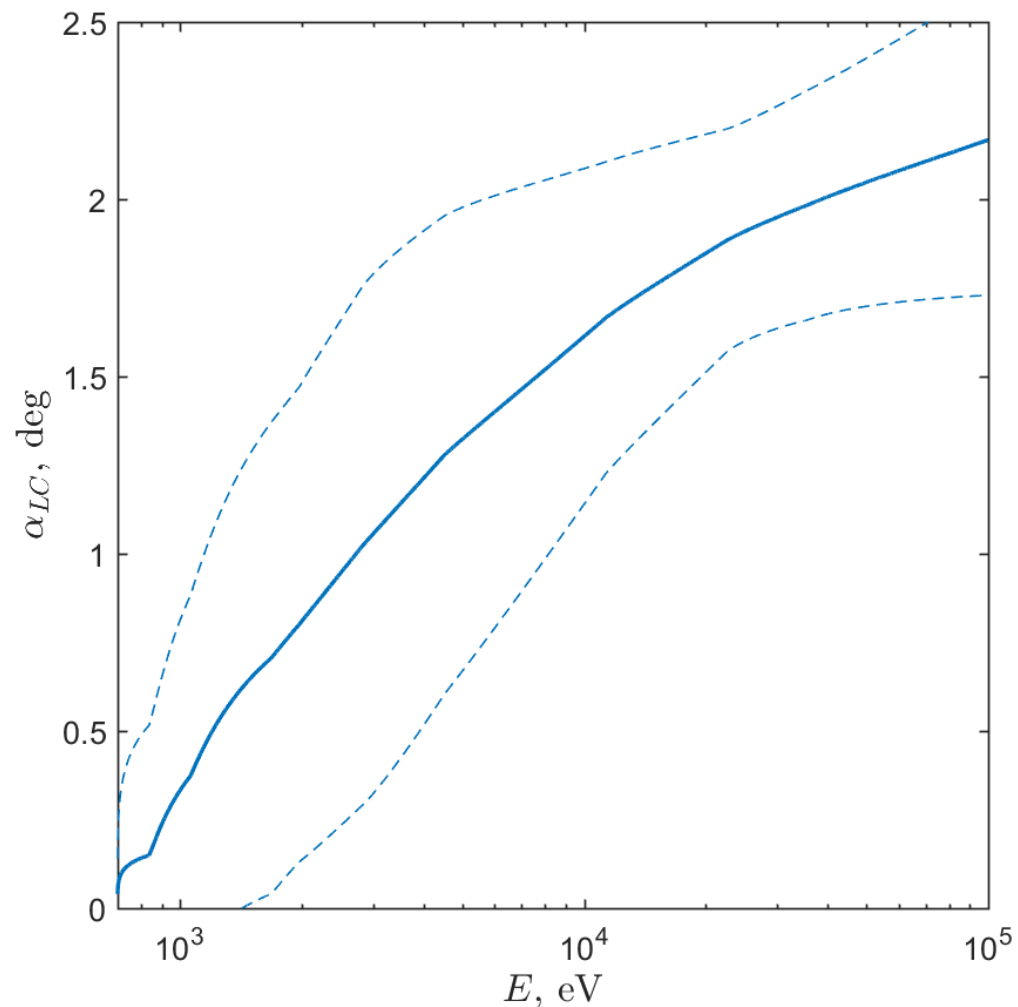
Предел сильной диффузии – когда два данных времени практически равны

Баунс-период можно оценить, как: $\tau_b(\varepsilon) = \sqrt{\frac{m_e}{2\varepsilon}} \int_0^{s_m} \frac{ds}{\sqrt{1 - \sin^2 \alpha_{LC} (B(s)/B_{eq})^2}} = \sqrt{\frac{m_e}{2\varepsilon}} g(B(s); \alpha_{LC})$

Что приводит к следующему неравенству: $\tau_{loss}(\varepsilon) \sqrt{2\varepsilon/m_e} \leq \frac{g(B(s); \alpha_{LC})}{4\alpha_{LC}^2}$

Таким образом, зная функцию потерь $\tau_{loss}(\varepsilon)$ и зависимость $B(s)$, можно оценить угла конус потерь α_{LC} , соответствующего пределу сильной диффузии

Верхний предел для угла конуса потерь α_{LC} и высоте соответствующей точки отражения над Земной поверхностью. Пунктирной линией обозначена область стандартного отклонения по 6 событиям.



На энергиях выше нескольких keV, точка отражения становится существенно выше высоты ионосферы. Это означает, что:

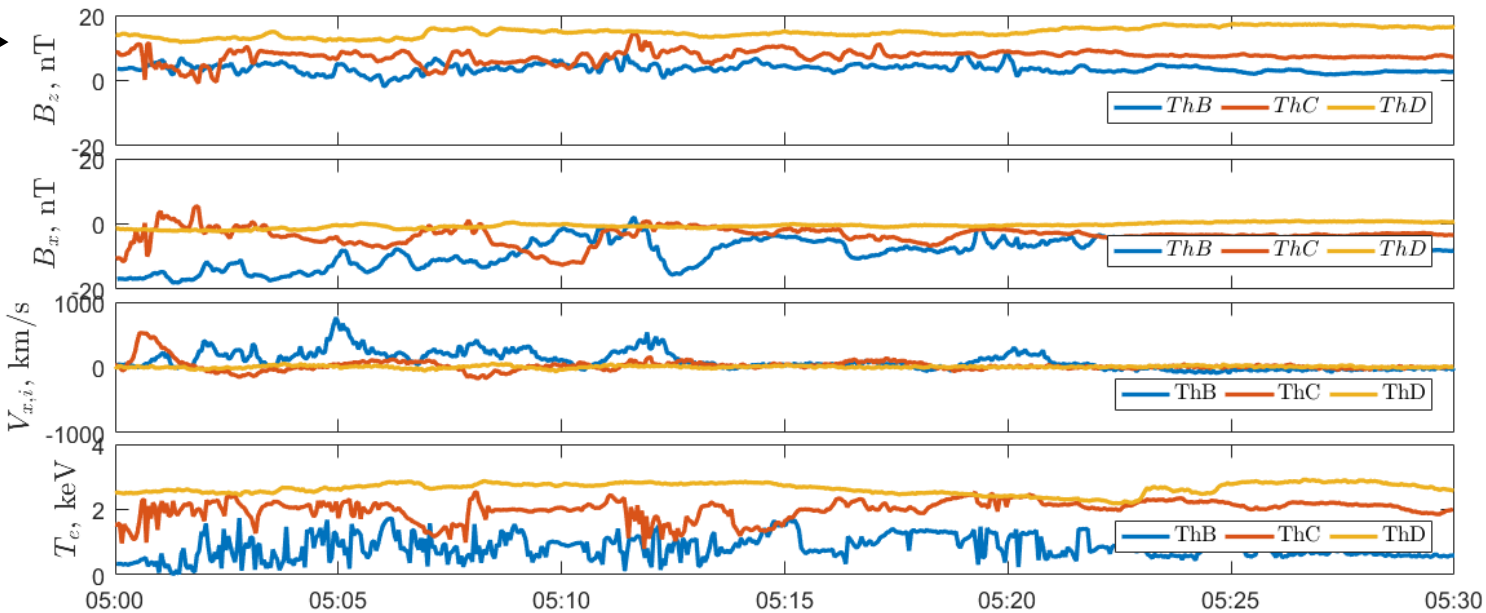
- Выпадение частиц происходит в пределе сильной диффузии
- Высокоэнергичные частицы теряются выше ионосферы, в области аврорального ускорения

Выводы

- I. Продемонстрировано, что потеря электронов имеет существенное влияние на формирование спектров электронов и существенно ограничивает популяцию высокоэнергичных электронов в ближней магнитосфере Земли.
- II. Выпадение электронов происходит со скоростью близкой к пределу сильной диффузии — наблюдения демонстрируют что конус потерь должен быть заполнен.
- III. Превышение предела сильной диффузии может быть объяснено потерями электронов области аврорального ускорения ($\sim 0.5-1R_E$ над ионосферой)

Данная работа спонсирована грантом РФФИ 18-32-00054

Пример типичного события



Отбираем данные по критериям
«вблизи экваториальной области т.с.»

Аппроксимируем зависимость
магнитного поля функцией степенного
вида:

