

ПРОБЛЕМЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГЕОМАГНИТНОЙ АКТИВНОСТИ

*Е.Е. Антонова^{1,2}, М.В. Степанова³, И.П. Кирпичев²,
И.Л. Овчинников¹, В. Г. Воробьев⁴, О.И. Ягодкина⁴, Антонюк Г.И.¹*

¹НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ имени М.В. Ломоносова

²Институт Космических Исследований РАН

³University of Santiago de Chile

⁴Полярный Геофизический институт

Для улучшения предсказаний геомагнитной активности полезно было бы учесть турбулентность геомагнитного хвоста

Турбулентность хвоста фиксировалась с момента открытия хвоста, что упоминал даже Dungey (1961) в качестве **главной трудности** своей модели.

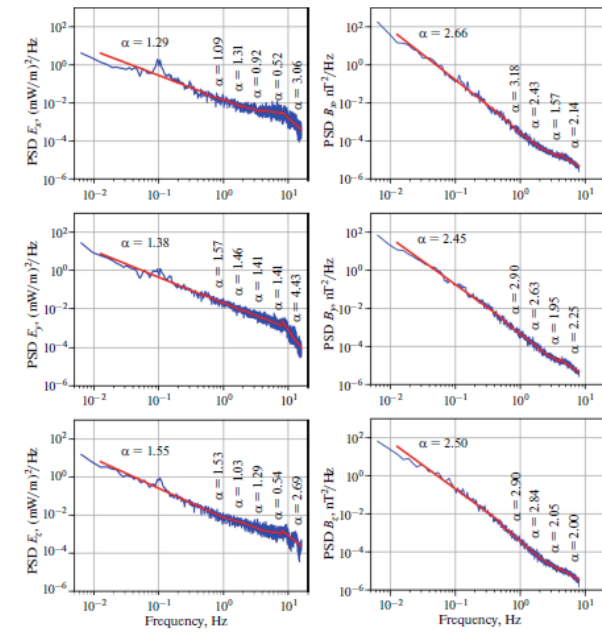
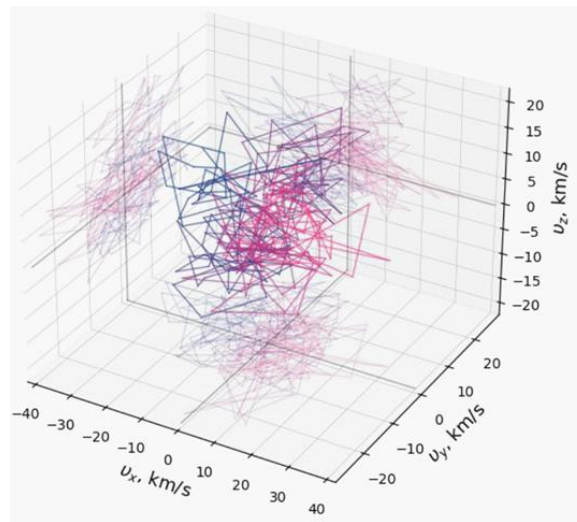


James W. (Jim) Dungey (1923–2015)

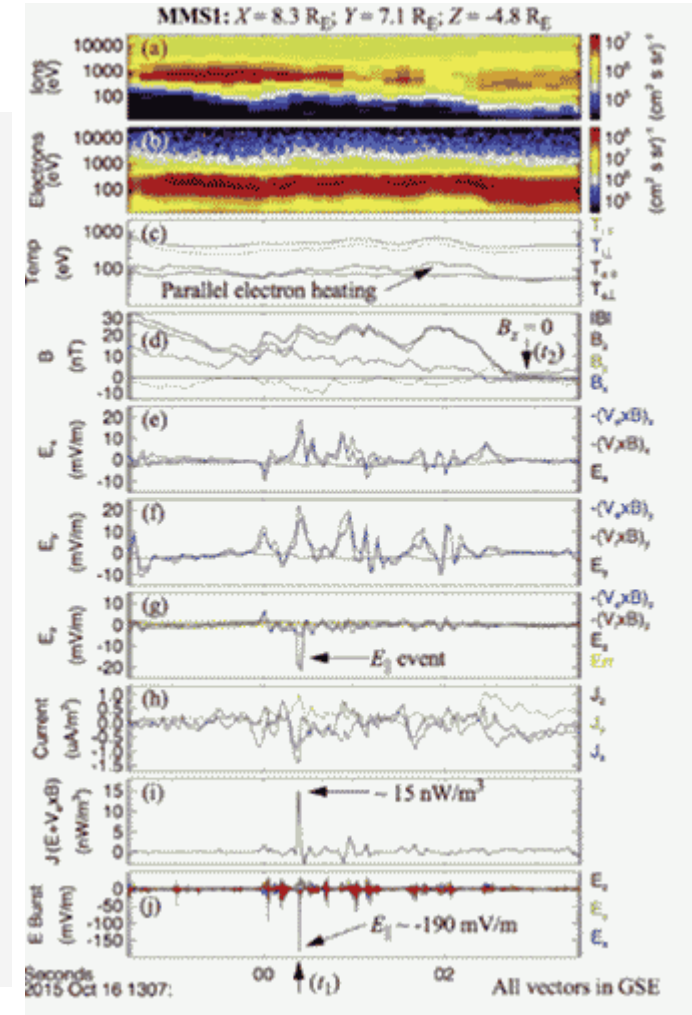
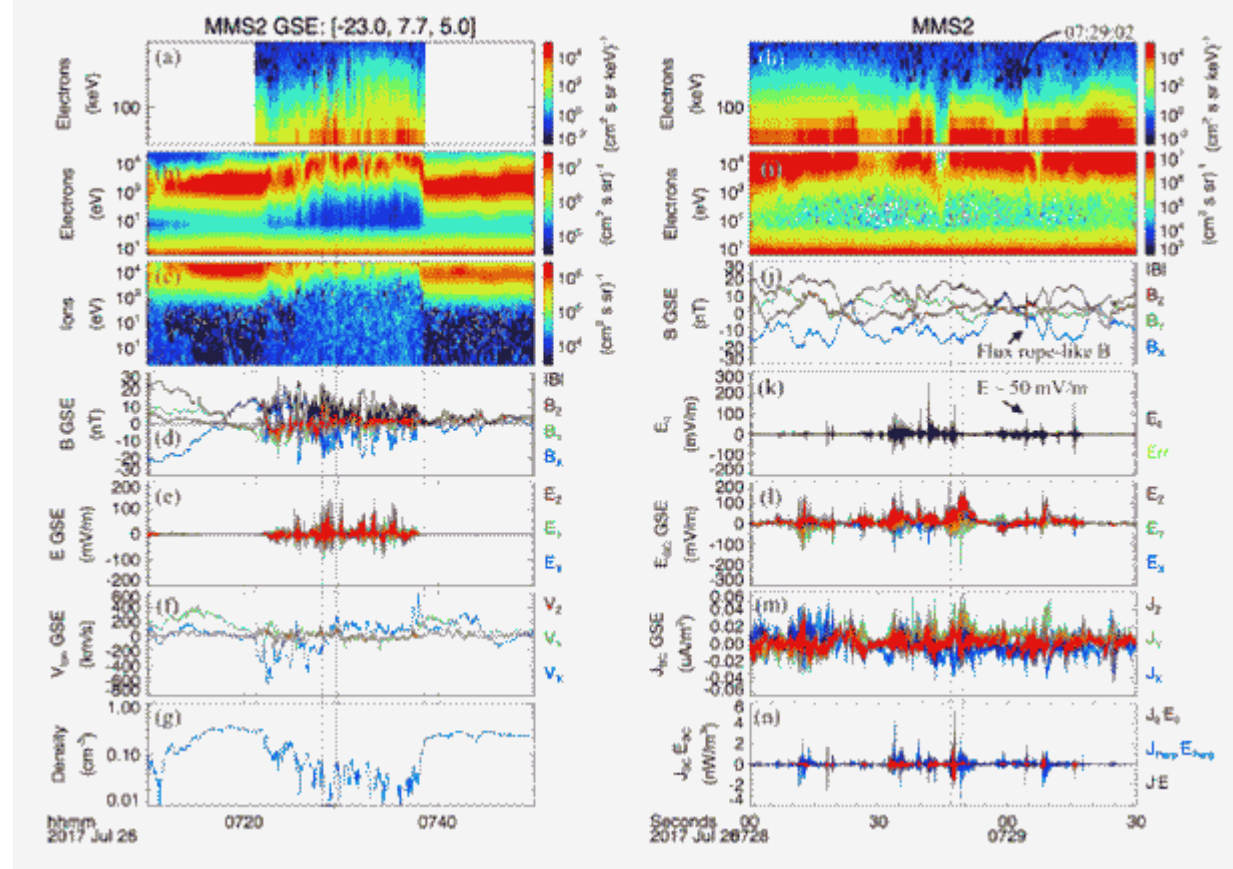
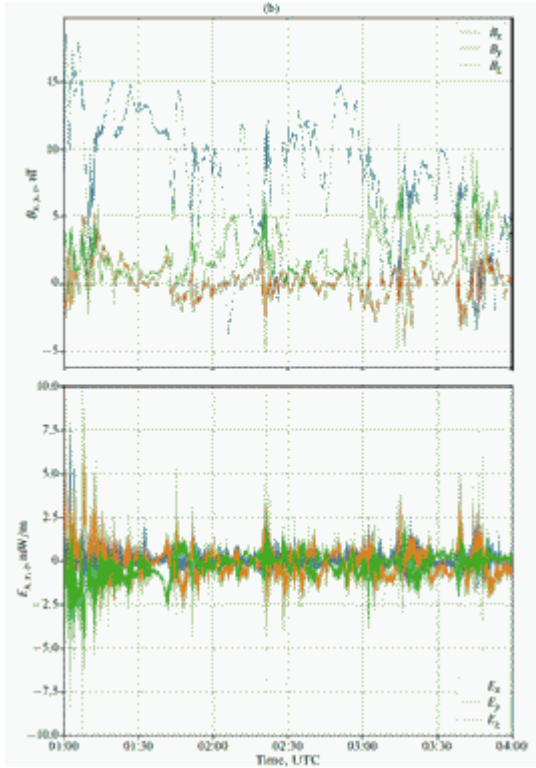
Dungey (Phys. Rev. Lett., 1961): “**A steady laminar flow** will be assumed here for **simplicity**, but it should be noted that large variations of the field were detected by **Pioneer I**”. A further difficulty is that **the flow is probably turbulent**, particularly in the "wake" of the earth, and both Pioneer I and Explorer I observations show clear indications of some hydromagnetic form of turbulence...(J.W.Dungey, Interplanetary magnetic field and auroral zones. Sci. Report No. 127, March 15, 1962)

Последние результаты со спутников MMS

(Найко и др., 2024,
doi:10.31857/S0016794024020032;
Овчинников и др. (2024, doi:
10.31857/S0023420624010021)



MMS дал возможность изучать все 3 компоненты электрического поля в хвосте



Овчинников и др. (2024, doi: 10.31857/S0023420624010021)

Ergun et al. (2018, GRL, doi:10.1002/2018GL076993)

Ergun et al. (2016, doi: 10.1103/PhysRevLett.116.235102)

В спокойных условиях ~ 5 мВ/м, внутри VBF $\sim > 100$ мВ/м. + Зарегистрированы двойные слои. $\Rightarrow$ Не требуется «пересоединения» для объяснения пучков частиц.

В чем причина популярности модели Dungey, несмотря на явные противоречия с экспериментом? Видимо, в **уверенности применимости** приближения **вмороженности** и **отсутствие внимания** к анализу вклада различных членов в Обобщенный закон Ома

$$\mathbf{E}' \equiv \mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} = \frac{\mathbf{j}}{\sigma} + \frac{\mathbf{j} \times \mathbf{B}}{ne} - \frac{\nabla \cdot \mathbf{P}_e}{ne} + \frac{m_e}{ne^2} \left[\frac{\partial \mathbf{j}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v} \mathbf{j} + \mathbf{j} \mathbf{v}) \right]$$

Оценки содержатся, но не учитываются при анализе, в ряде монографий и учебников (например, в водной части монографии Прист и Форбс МАГНИТНОЕ ПЕРЕСОЕДИНЕНИЕ)

В бесстолкновительной магнитосферной плазме $\sigma \rightarrow \infty$. Пренебрегая инерционным членом, получаем

$$\mathbf{E}' \equiv \mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} = \frac{\mathbf{j} \times \mathbf{B}}{ne} - \frac{\nabla \cdot \mathbf{P}_e}{ne}$$

$$\nabla \approx \frac{1}{L_0}, \quad |\mathbf{j}| \approx \frac{B_0}{\mu L_0}, \quad \frac{\partial}{\partial t} \approx \frac{V_0}{L_0}, \quad |\mathbf{v} \times \mathbf{B}| \approx V_0 B_0$$

$$\frac{c}{\omega_{pi}} = \lambda_i = 2.27 \cdot 10^8 n^{-1/2} \text{ (m)}$$

$$L_{Hall} \approx c \left(\frac{m_p \epsilon_0}{ne^2} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{V_A}{V_0} = \frac{c}{\omega_{pi}} \frac{V_A}{V_0} = \lambda_i \frac{V_A}{V_0}$$

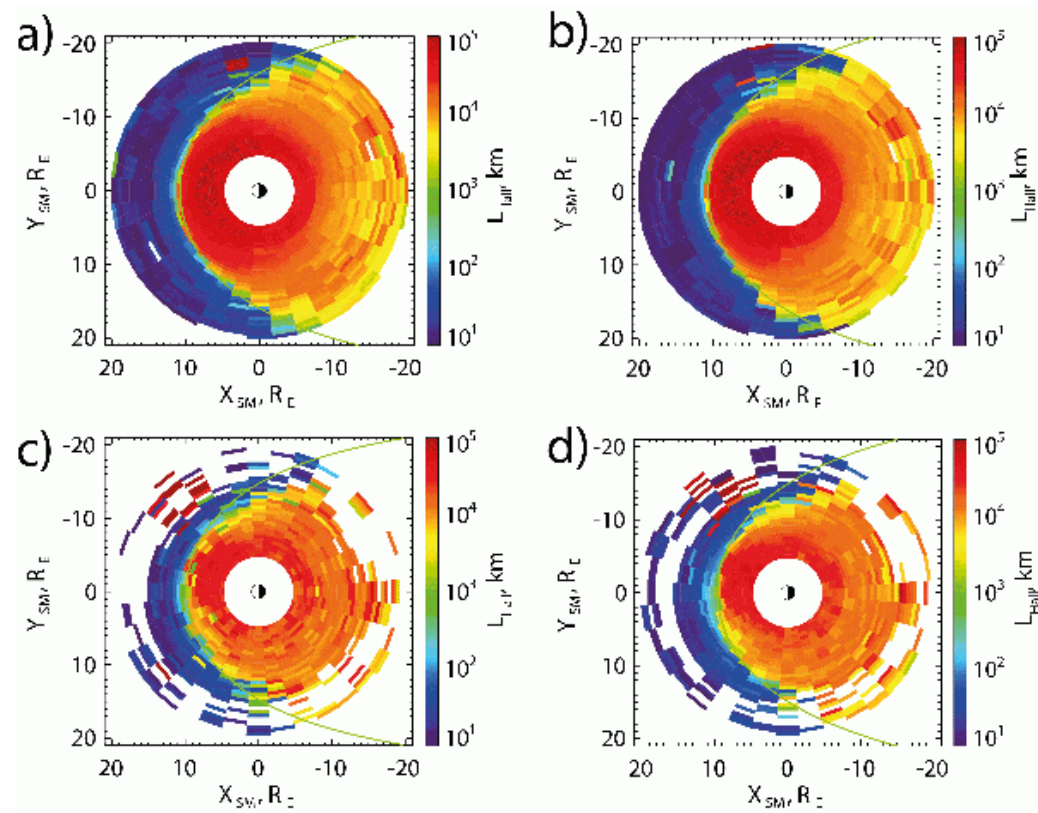


Все выводы о применимости условия вмороженности основывались на оценках параметров при альвеновских скоростях (!!!).

При малых скоростях ($V_0 \rightarrow 0$) уравнение вмороженности неприменимо.



Холловский масштаб в магнитосфере Земли в зависимости от параметров межпланетного магнитного поля и геомагнитной активности (**GRL, 2025, doi:10.1029/2024GL114315**) по данным за 12 лет наблюдений частиц и магнитного поля миссией THEMIS.



Двумерное распределение холловского масштаба во внутренней магнитосфере Земли и в геомагнитном хвосте в зависимости от параметров солнечного ветра и геомагнитной активности. а) ММП Bz>0, |Dst| <20 нТл, AL≥ −300 нТл (модель Shue et al. (1998) при Pdyn = 1.5 нПа, IMF Bz=1.6 нТл), б) ММП Bz<0, |Dst| <20 нТл, AL≥ −300 нТл (модель Shue et al. (1998) при Pdyn = 1.5 нПа, ММП Bz = −1.4 нТл), в) ММП Bz>0, Dst < − 20 нТл, AL< −300 нТл (модель Shue et al. (1998) при Pdyn = 2.6 нПа, IMF Bz = 1.8 нТл), д) ММП Bz<0, Dst < − 20 нТл, AL< −300 нТл (модель Shue et al. (1998) при Pdyn = 2.2 нПа, IMF Bz = −3.7 нТл)

$$L_{Hall} \approx c \left(\frac{m_p \epsilon_0}{ne^2} \right) \frac{V_A^{\frac{1}{2}}}{V} = \frac{c}{\omega_{pi}} \frac{V_A}{V} = \lambda_i \frac{V_A}{V}$$

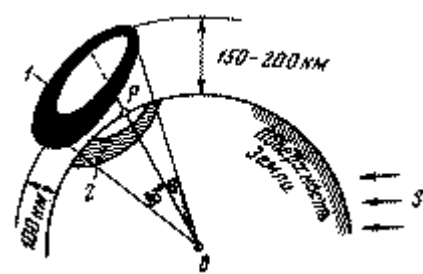
Холловский масштаб превышает магнитосферные масштабы внутри магнитосферы, поперек хвоста и в Y направлении.

$$L_{Hall} \gg L_{mag}; \quad \mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} \neq \mathbf{0} \text{ и } [\mathbf{j} \times \mathbf{B}] \approx \nabla p$$

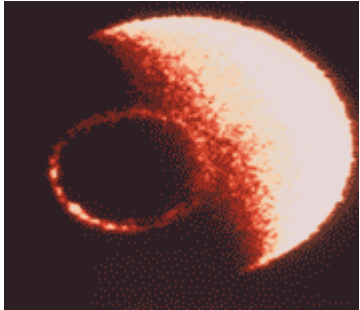
Для улучшения предсказаний геомагнитной активности хорошо бы учесть, что приближение вмероженности и предположение о переносе магнитного потока не могут быть использованы, а ММП может свободно проникать внутрь магнитосферы и модулировать магнитосферные токовые системы.

Для улучшения предсказаний геомагнитной активности полезно было бы учесть изменения в топологии магнитосферных доменов и магнитосферных токовых систем (GRL, 2025, doi:10.1029/2024GL114315)

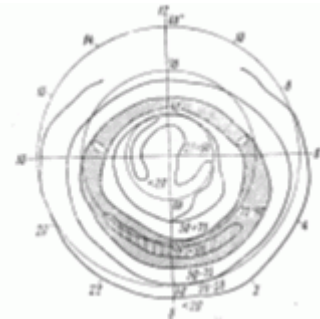
Замкнутое кольцо полярных сияний



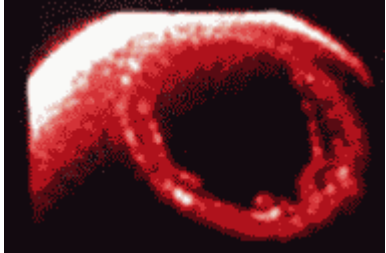
Хорошева (1961, 1967)



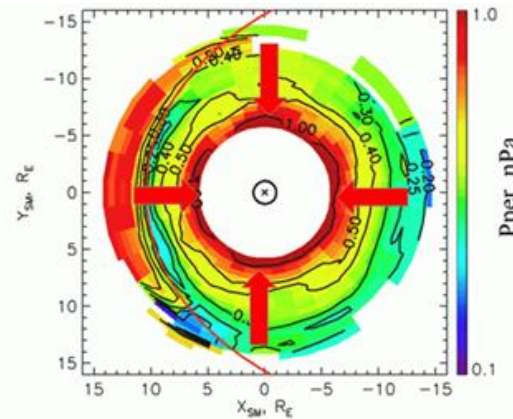
De-1



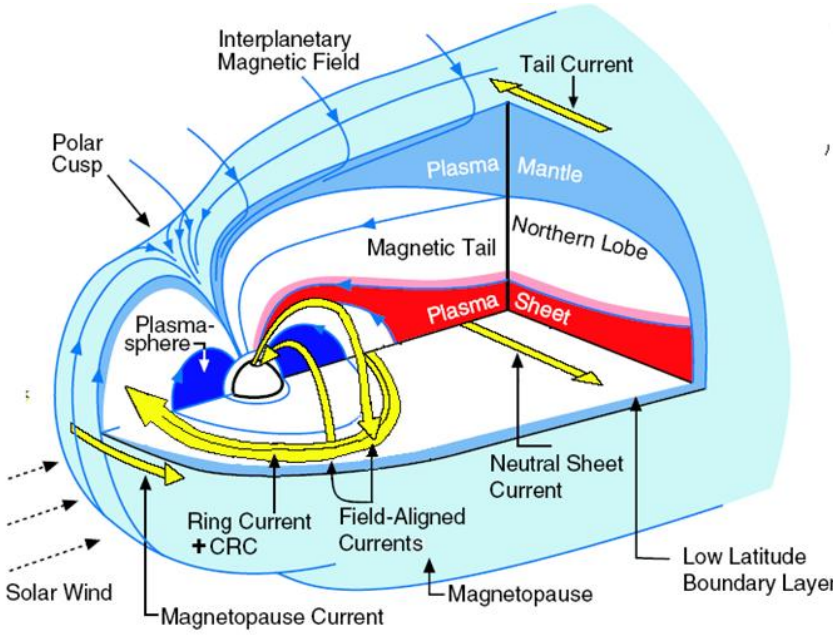
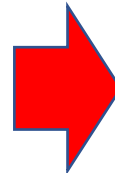
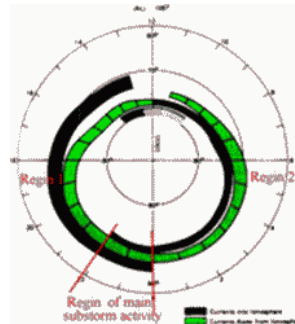
Фельдштейн [1960, 1963]



IMAGE



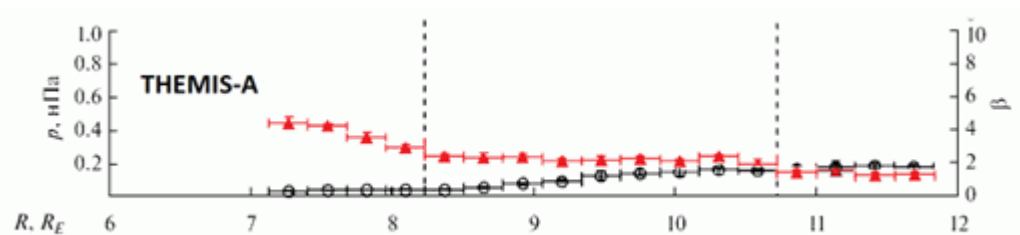
Направленные к Земле градиенты давления на всех MLT дают кольцевой ток и его высокоширотное продолжение CRC (2017, doi:10.1016/j.jastp.2017.10.013; 2018, doi:10.1002/2017RG000590).



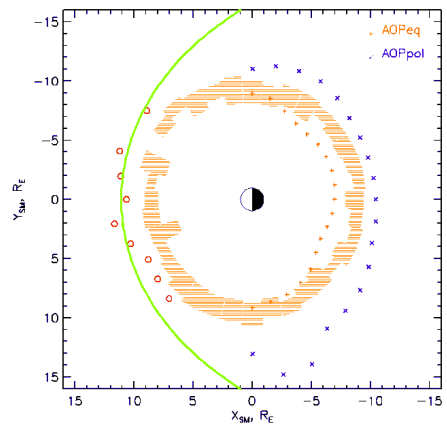
Неоднократно возникал вопрос о локализации источника RI, а следовательно и источника крупномасштабной магнитосферной конвекции.

Поле утро-вечер в полярной шапке создается токами зоны 1 (RI) Iijima and Potemra (1976)

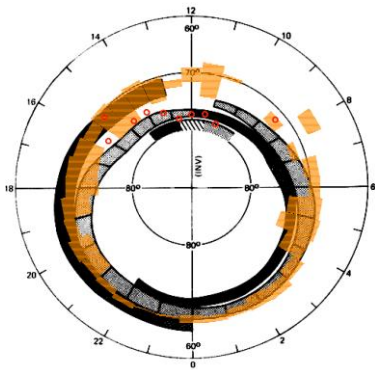
Выделение в 2024 г. областей плато в распределении давления $\nabla p \approx 0$ вблизи экваториальной плоскости и сравнение с положением границ на ионосферных высотах между токами RI и RII Iijima and Potemra (1976), где $j_{\parallel} \approx 0$, позволило показать, что источник тока RI, также как тока RII, а значит и крупномасштабной магнитосферной конвекции, локализован во внешних областях кольцевого тока, а не в турбулентном геомагнитном хвосте



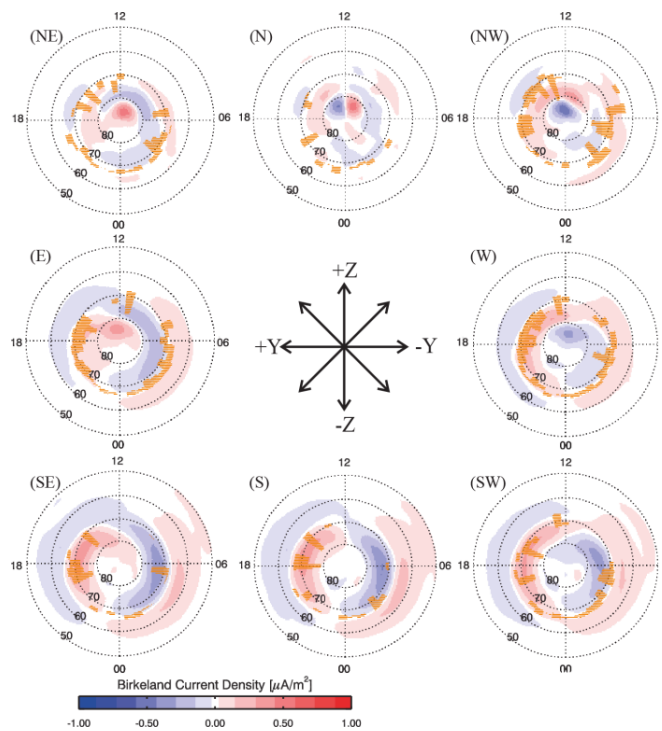
Пример события регистрации плато давления 02.02.2009 г.



Экваториальная плоскость



Проекция плато и картина крупномасштабных продольных токов 1978 г.

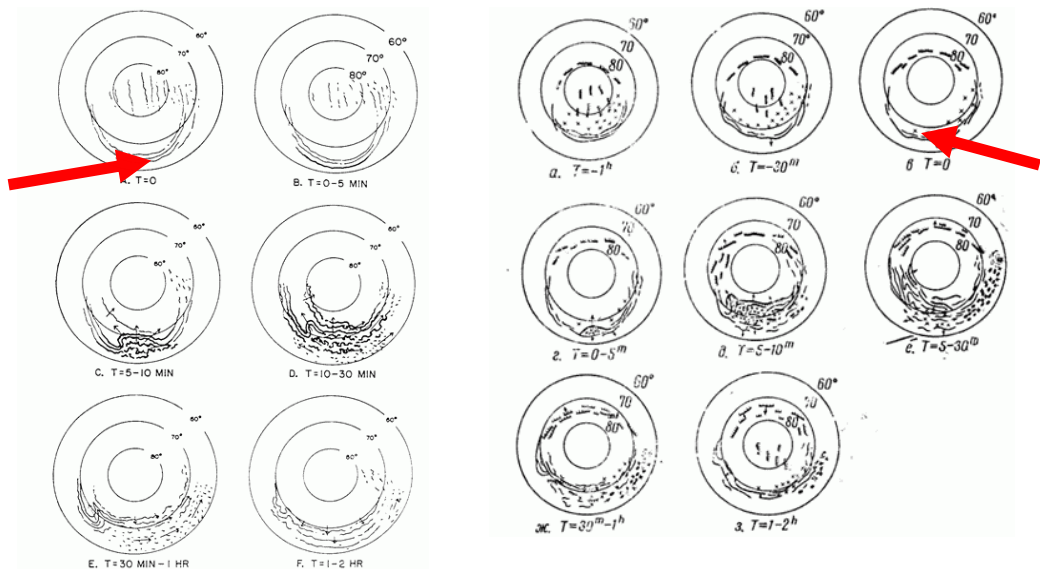


Проекция плато и картина крупномасштабных продольных токов по модели (Anderson et al., 2008 г.)

Кирпичев И.П., Антонова Е.Е. Плато плазменного давления в ночном секторе магнитосферы Земли и его устойчивость, *Геомагнетизм и аэронавигация*, 2023, том 63, № 1, с. 31–42, doi:10.31857/S001679402260034X

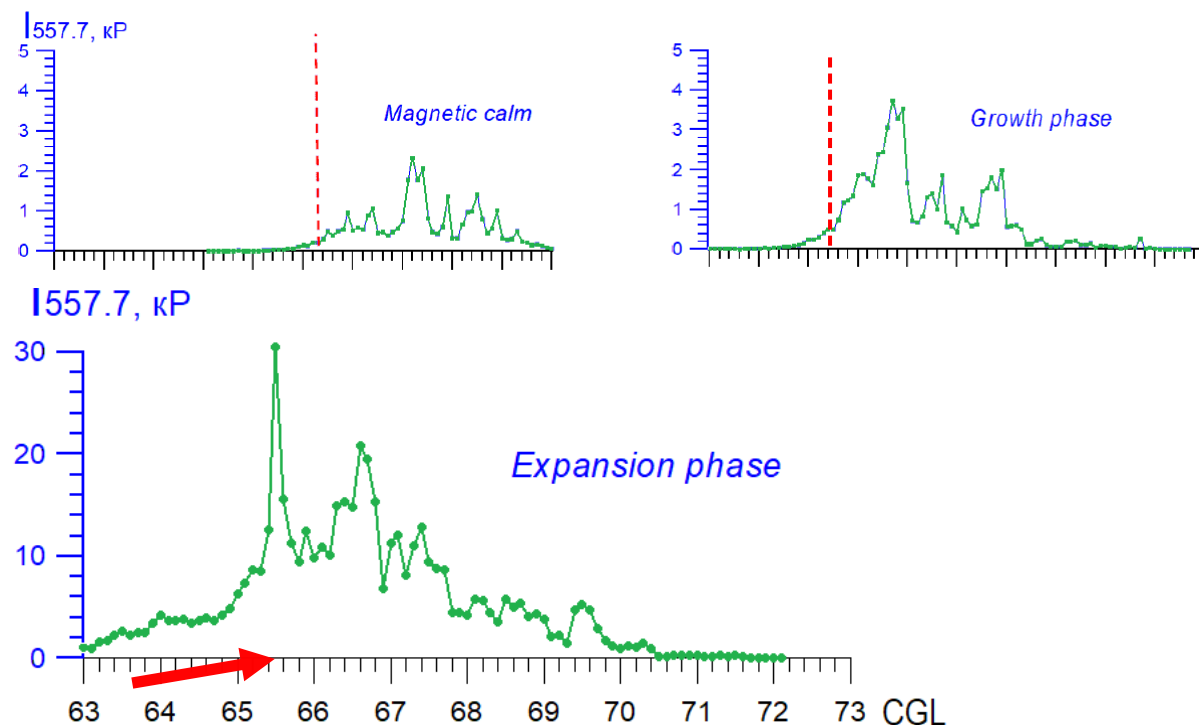
Kirpichev, I. P., Antonova, E. E., & Stepanova, M. V. (2023). On the relationship between regions of large-scale field-aligned currents and regions of plateau in plasma pressure observed in the equatorial plane of the Earth's magnetosphere. *GRL*, 50, e2023GL105190. <https://doi.org/10.1029/2023GL105190>

Удалось также дополнительно доказать локализацию начала взрывной фазы изолированной суббури глубоко внутри магнитосферы на геоцентрическом расстоянии $\sim 5 R_e$

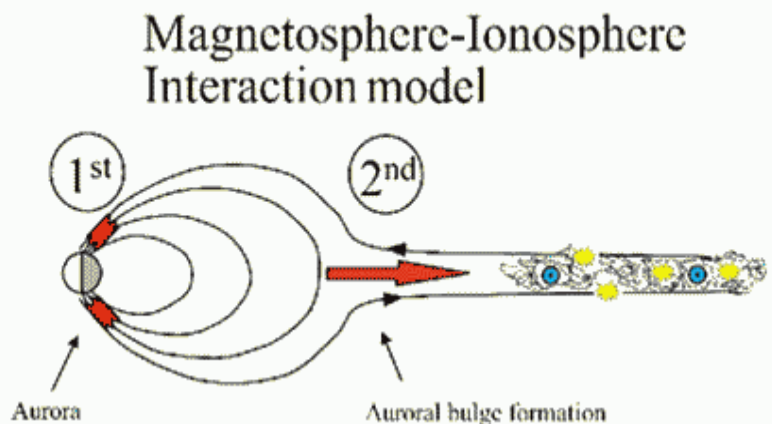


Akasofu (PSS, 1964)

Starkov and Feldstein (1970)

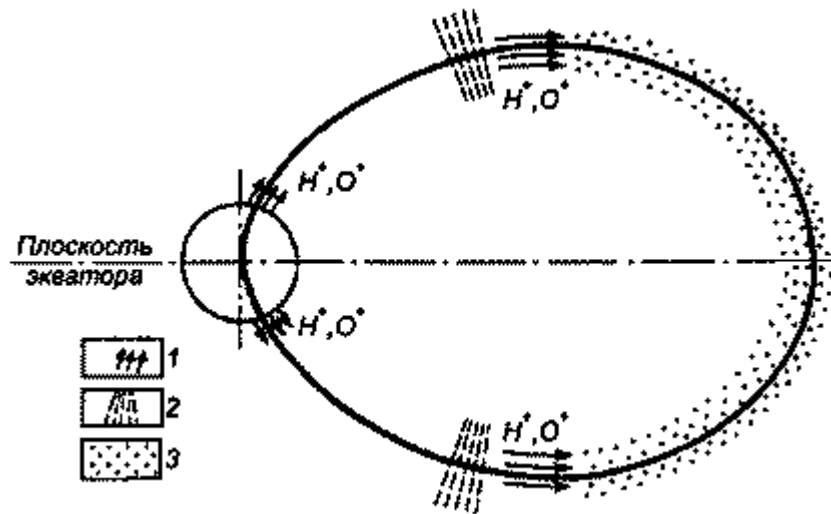


(Vorobjev et al. et al., GA, 2025, doi:10.31857/S0016794025020012).



Приоритет модели суббури 2002 г. (Antonova. 2002. doi:10.1016/S0273-1177(02)00434-9; Stepanova et al., 2002, doi:10.1029/2001JA003503)

Для улучшения предсказаний геомагнитной активности необходимо учесть заполнение магнитосферы ускоренными ионами ионосферного происхождения и доминирование однозарядного кислорода во время бурь.

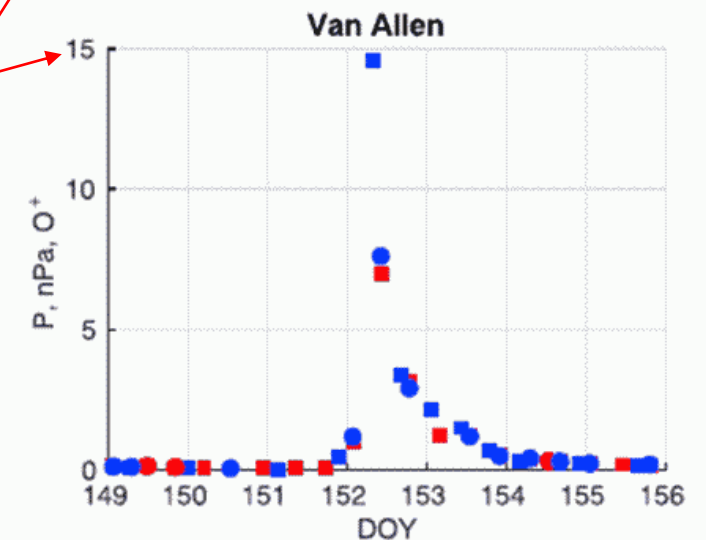
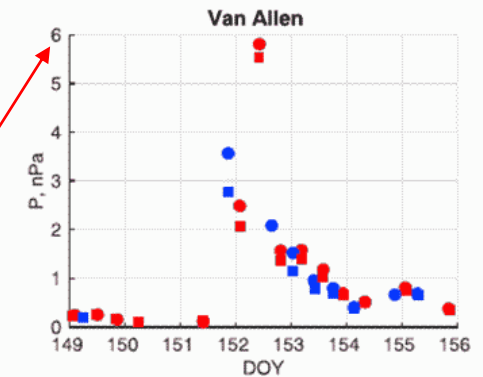
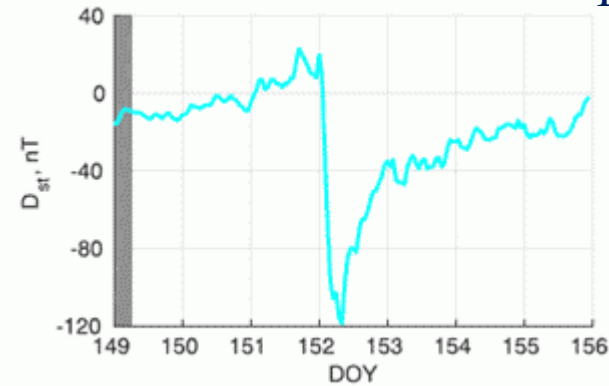


Антонова и Тверской, О роли полярной ионосферы как источника ионов в магнитосфере, Геом. Аэрон., 20(1)б 179-181, 1982.

Давление ионов O^+ значительно превышает давление ионов H^+ во время бури (2019, doi:10.1029/2018JA025965)

Заполнение магнитосферы ускоренными ионосферными ионами внутри магнитосферы на широтах аврорального овала объясняет, например, отличие термодинамических свойств плазмы хвоста и турбулентного магнитослоя.

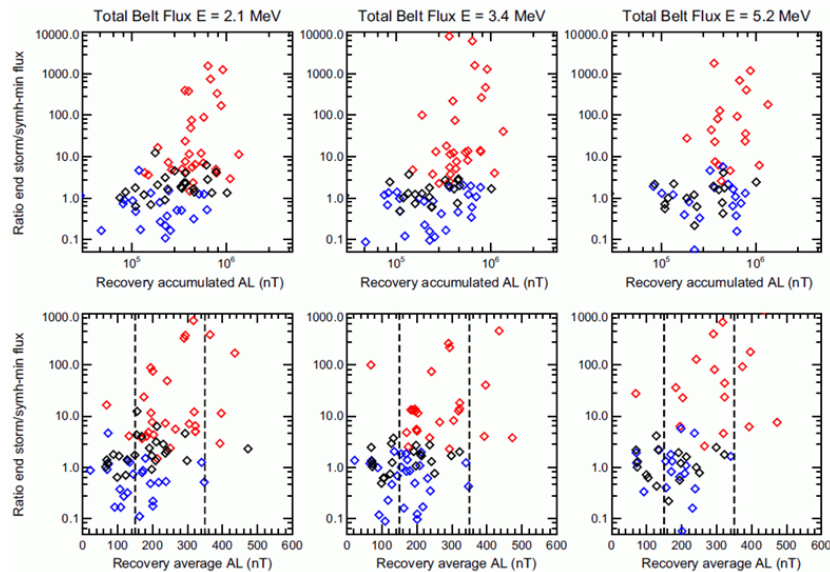
Буря 23 мая 2013 г.



Релятивистские электроны «киллеры спутников». Изменения подходов к теоретическому описанию и предсказание (обзор 2024 г. Doi:10.1007/s41614-024-00165-4)

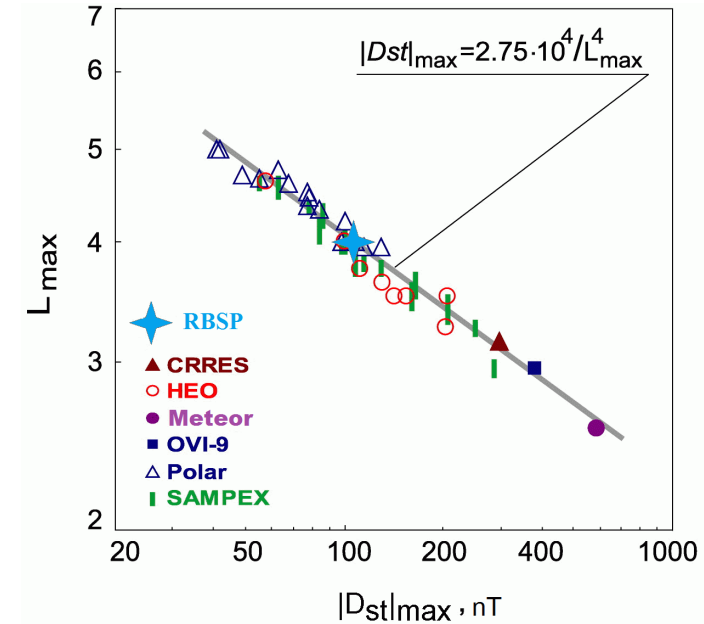
Главные моменты

- В работах Kim et al. (2021, 2023) исследованы бездисперсионные инъекции внутри магнитосферы при развитии суббурь во время бури (they infer «injections and infer temporally stable fluxes between injections, despite strong and continuous chorus emission»). $\Rightarrow$ Ускорение происходит в моменты суббуревых диполизаций индукционными электрическими полями, а не при взаимодействии частиц с волнами с амплитудами в пико тесла.
- Показано, что необходимым условием для появления больших потоков релятивистских электронов после бури, превышающих потоки до бури, является **развитие суббурь во время фазы восстановления бури**.

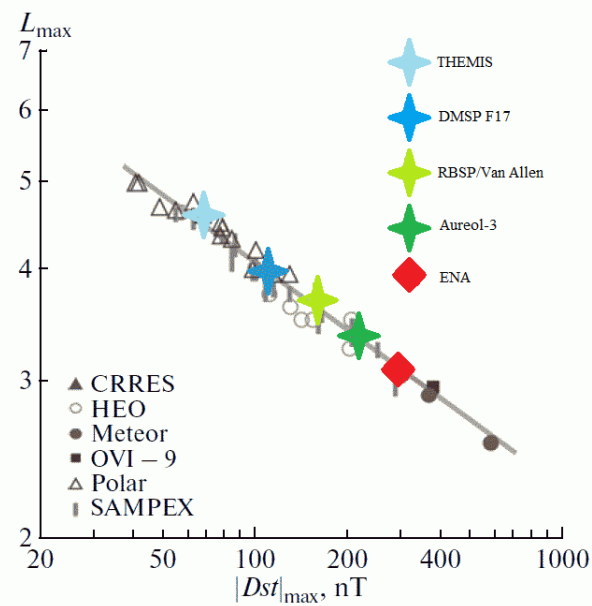


Соотношение между интегральным $|AL|$ индексом (верхняя панель) и средним $|AL|$ индексом (нижняя панель) во время фазы восстановления каждой из 78 бурь и максимальным интегральным потоком после бури, проинтегрированным между $L = 3$ и $L = 6$, для $E = 2.1$ МэВ (слева), $E = 3.4$ МэВ (центр) и $E = 5.2$ МэВ (справа). Красные, голубые и черные квадраты соответствуют бурям с увеличением, уменьшением и сохранением потоков. Вертикальные пунктирные линии разделяют распределение на три группы в соответствии со средним $|AL|$ индексом (EPS, 2018, doi:10.1186/s40623-018-0898-1).

- Предсказана, теоретически объяснена и проверена на большой статистике локализация по L области наиболее эффективного ускорения.



Соотношение Тверской подтверждено в работах (Moya et al., 2017; Boyd et al., 2018; Antonova et al., 2015, 2018; Zhao et al., 2019; Sotnikov et al., 2019; Stepanova et al., 2020; etc.)



Максимум пояса релятивистских электронов после бури образуется в области максимума кольцевого тока во время бури (Antonova et al. https://doi.org/10.1007/978-3-031-40728-4_23)

Последовательность действий для on line предсказания увеличения потоков релятивистских электронов

Предсказание динамики Dst по данным спутников в солнечном ветре.

Выделение минимума Dst и, соответственно, предсказание положения области максимального потока.

Отслеживание суббурь во время фазы восстановления бури по наземным магнитным данным.

ВЫВОДЫ

- Изменения физических основ предсказания Космической погоды основаны на самосогласованном описании влияния внешних факторов на геомагнитную активность без привлечения идеальных МГД модели с нарушением вмороженности (процессов «пересоединения») на выделенных линиях или в выделенных точках.
- Ключевым направлением исследований становится образование и стабильность существования магнитосферных плазменных структур в условиях высокого уровня турбулентных флуктуаций и магнитосферно-ионосферных взаимодействий.
- Учет реальной структуры магнитосферных доменов, поперечных и продольных токов, проникновения ММП внутрь магнитосферы процессов, заполнение магнитосферы изнутри горячей плазмой ионосферного происхождения ускорения и др. процессов необходим для улучшения предсказаний в рамках программ по Космической погоде.

Благодарю за внимание