

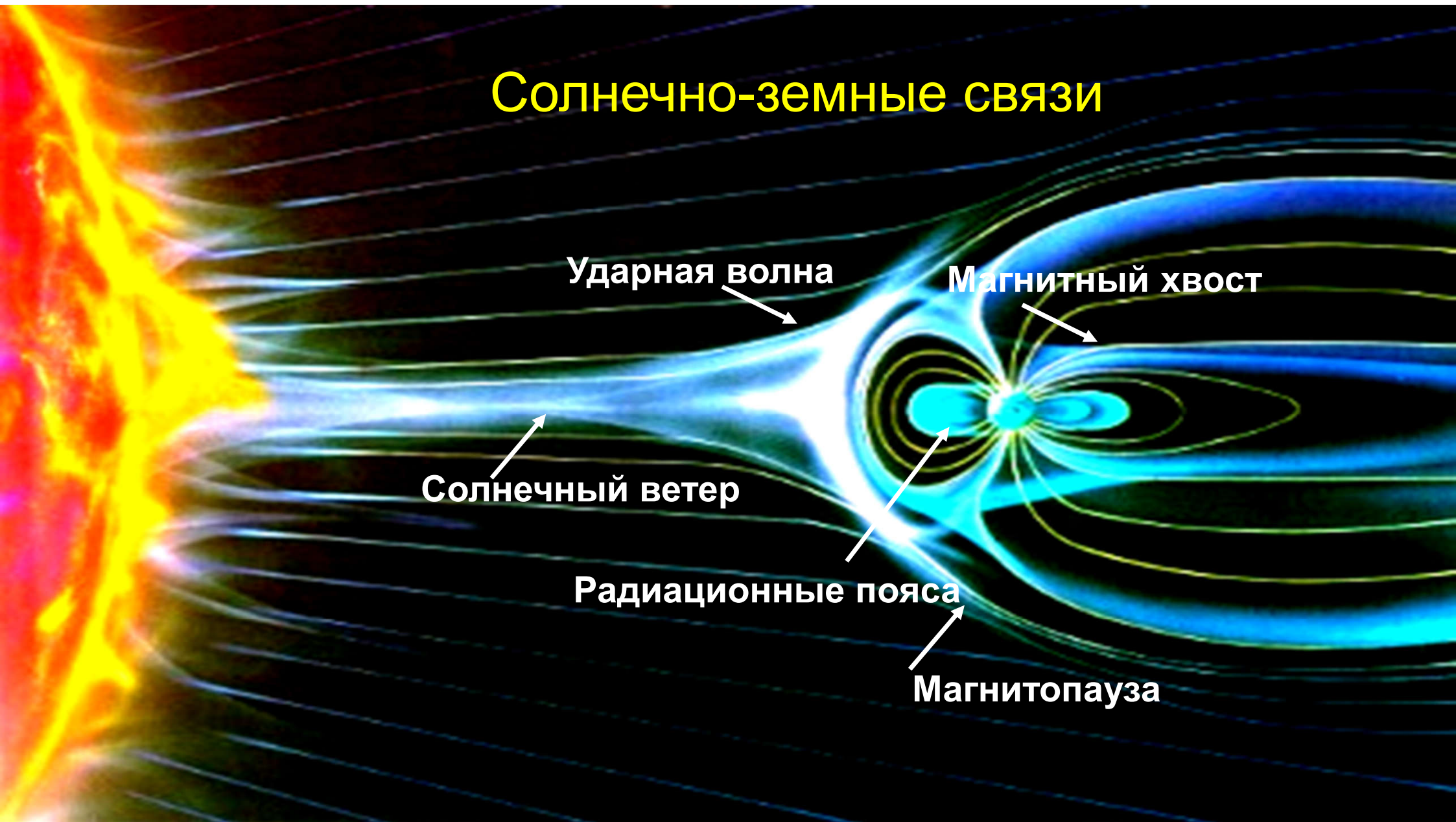


# Солнечно-земные связи и магнитосферы планет

*В.В.Калезаев*

Лаборатория космофизических исследований  
Лаборатория радиационного мониторинга  
Лаборатория магнитосфер планет  
Лаборатория космического материаловедения

# Солнечно-земные связи



Ударная волна

Магнитный хвост

Солнечный ветер

Радиационные пояса

Магнитопауза

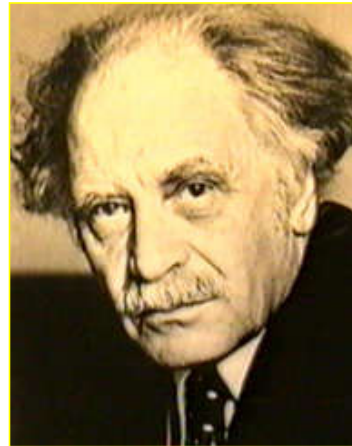
# Радиационные пояса Земли

ОТКРЫТИЕ № 23

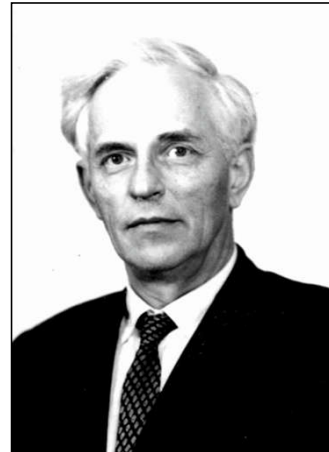
«ВНЕШНИЙ РАДИАЦИОННЫЙ ПОЯС ЗЕМЛИ»

Авторы: академик С. Н. Вернов, член-корр. АН СССР  
А. Е. Чудаков, доктор физ.-мат. наук Ю. И. Логачев,  
Е. В. Горюшков, П. В. Вакулов.

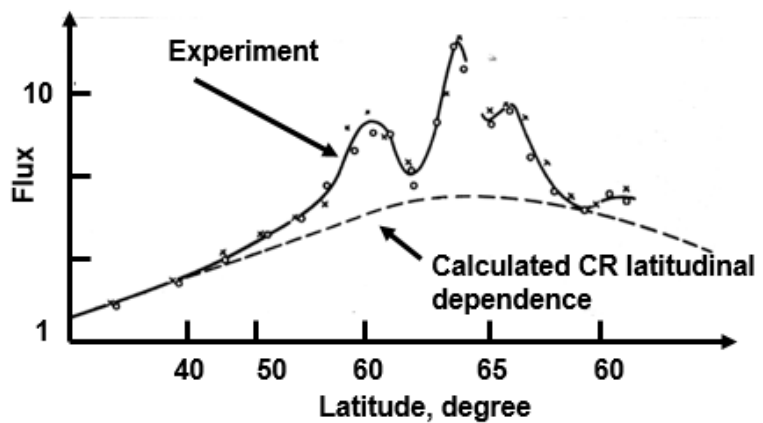
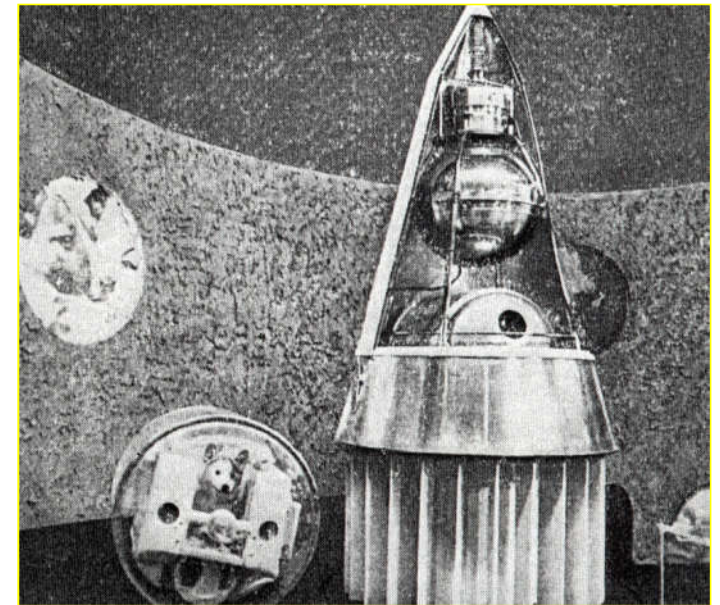
Первый космический  
эксперимент:  
7 ноября, 1957 г.



С.Н. Вернов



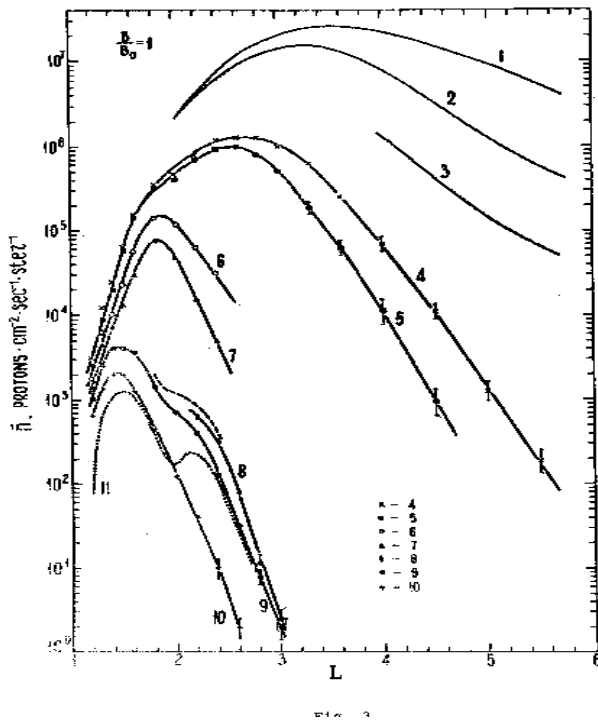
А.Е. Чудаков



Ю.И. Логачев



## Исследования структуры и динамики радиационных поясов Земли

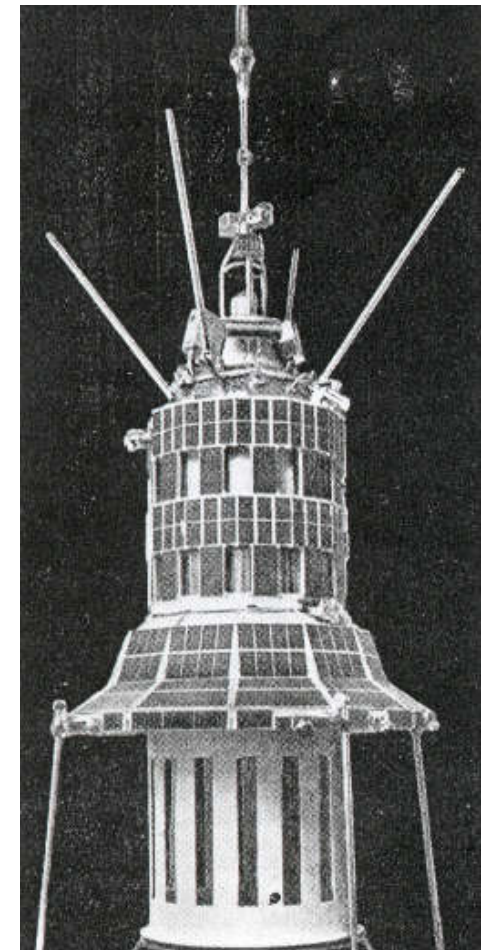


Благодаря удачно выбранным орбитам спутников серии «Электрон» (1964 г.) и составу размещённой на них аппаратуры НИИЯФ, была впервые изучена практически вся область радиационных поясов: энергетические и пространственные распределения протонов и электронов в широком диапазоне энергий, а также их временные вариации.

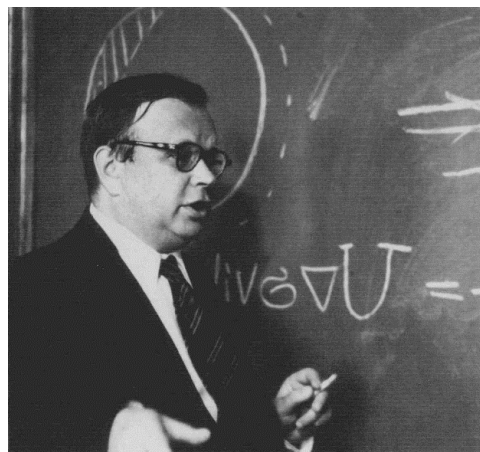
Первая теория образования частиц радиационных поясов: распад нейтронов альbedo, возникающих при взаимодействии первичных космических лучей с атмосферой (С.Н. Вернов и А.И. Лебединский, 1958 г.).



Александр Игнатьевич  
Лебединский 1913-1967

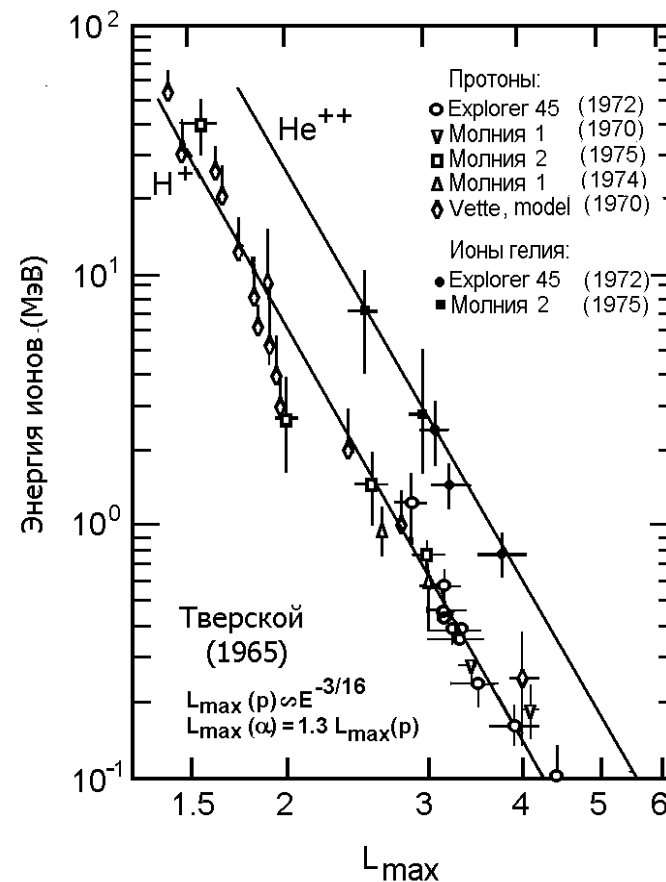


## Исследования структуры и динамики радиационных поясов Земли: теория радиальной диффузии



*Борис Аркадьевич Тверской*  
1936-1997

В 1964-65гг. Б.А. Тверским была разработана теория радиационных поясов Земли. Существенные отличительные черты модели Б.А. Тверского состояли в утверждении о преимущественной роли механизма радиальной диффузии под действием возмущений магнитного поля.

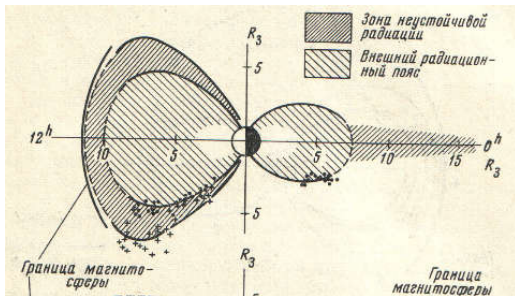


# Исследования структуры и динамики радиационных поясов Земли



Сергей Николаевич Кузнецов  
1940-2007

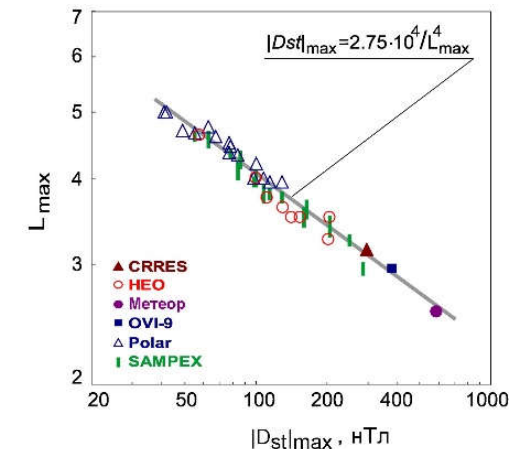
Зависимость изменения пространственного положения максимума профиля электронов ( $L_{max}$ ) от максимального значения индекса геомагнитной активности (Тверская, 1986)



Временные вариации максимальной интенсивности электронов в зоне неустойчивой радиации и в максимуме внешнего пояса с дневной стороны Земли (С.Н.Кузнецов и др. 1961)



Людмила Васильевна Тверская

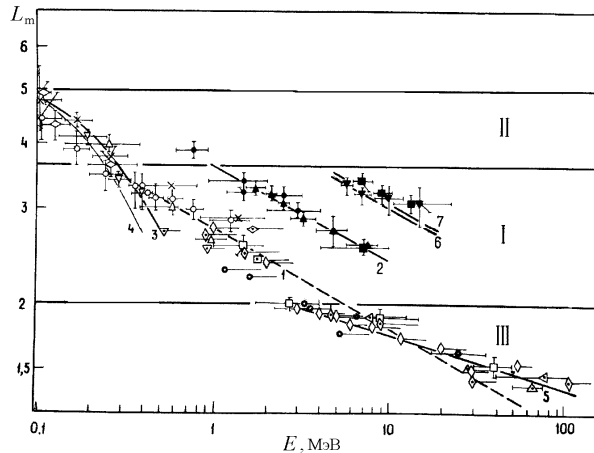


Евгений Васильевич Горчаков  
1932-2003

Обнаруженное на спутнике «Космос-900» Е.В. Горчаковым (1977 г.) появление ускоренных электронов с энергией  $\sim 15$  МэВ в сердцевине ( $L \sim 3,5$ ) радиационных поясов на фазе восстановления геомагнитных бурь.

# Протонные радиационные пояса Земли

- 1970 - Эксперименты по исследованию ионов гелия в радиационных поясах Земли на спутниках «Молния-1 и -2» (Э.Н.Сосновец, М.И.Панасюк).
- 1977 – Подтверждение теории радиальной диффузии: сравнение данных Молния-2 и Эксплорер-45



Эльмар Николаевич Сосновец  
(1935-2004)



Михаил Игоревич Панасюк  
(1945 – 2020)

- Оценка зарядового состояния основных компонентов ионов радиационных поясов: для ионов He ( $E=0.7-7$  МэВ)  $Q=2$ , а для ионов C и O ( $E=4-20$  МэВ) равновесное значение уменьшается с  $Q=5$  на  $L=5-6$ , до  $Q=3-4$  на  $L=3.5$  (М.И. Панасюк, 1980)
- Модель пространственно-энергетического распределения потоков захваченных частиц (протонов и электронов) в радиационных поясах Земли (SINP-1991) (Сосновец, Панасюк, Гецелев и др., 1991).



И.В.Гецелев





**Велиор Петрович  
Шабанский  
(1928-1985)**

## Явления в околоземном пространстве

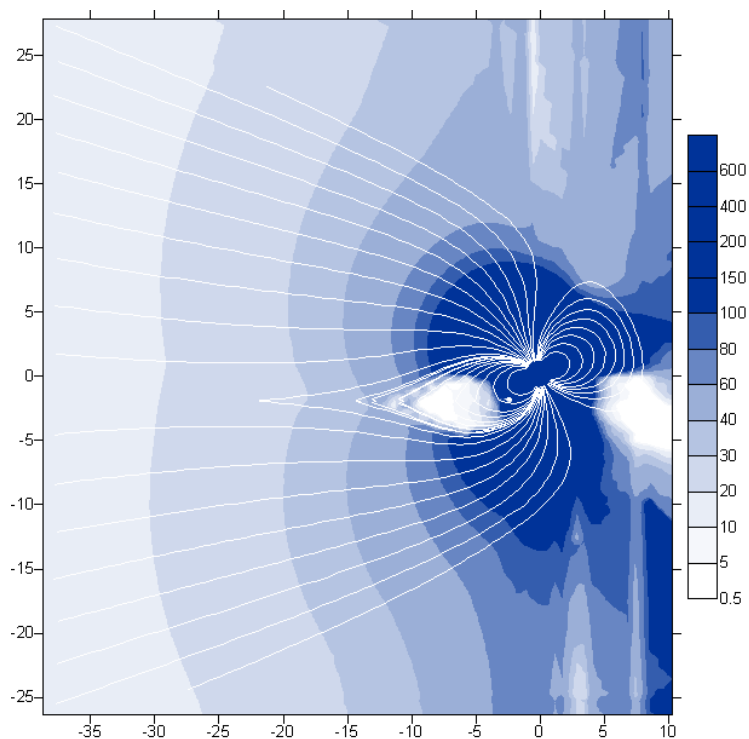
- Обнаружен эффект ветвления дрейфовых оболочек (Шабанский 1972)
- Разработана теория крупномасштабных электромагнитных неоднородностей в нестационарном потоке солнечного ветра (Алексеев, Веселовский, Кропоткин, 1982).
- Выяснены особенности движения энергичных частиц, попадающих в высокоширотные магнитные ловушки на дневной стороне магнитосферы (А.Антонова, Губарь, Кропоткин, 1995).

- Была разработана одна из первых моделей асимметричного магнитного поля Земли: двухдипольная модель, позволяющая описать форму магнитосферы ( Шабанский и А.Антонова, 1965-1967)
- Построена теоретическая модель формирования магнитосферных неоднородностей в зоне полярных сияний и ускорения авроральных электронов в зонах пониженной ионосферной плотности (Кропоткин, Мартьянов, 1983 - 1989).





## Явления в околоземном пространстве



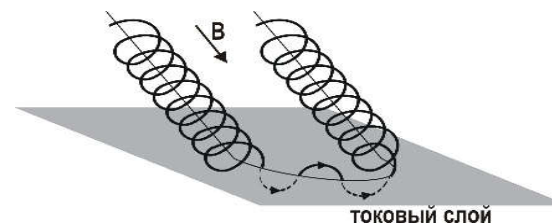
Создана динамическая («параболоидная») модель магнитосферы, позволяющая исследовать развитие магнитосферных токовых систем и их вклад в вариации геомагнитного поля как в спокойные периоды, так и во время сильных магнитных бурь (Алексеев).

***И.И.Алексеев, Е.С.Беленькая, В.В.Калегав***  
***Ломоносовская премия МГУ, 2011 г***

Созданы основы теории ионного движения в тонких плазменных слоях (Алексеев, Кропоткин,).



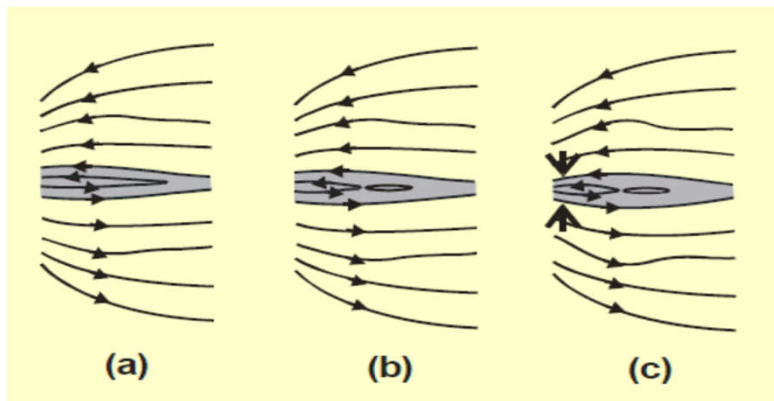
Алексей Петрович Кропоткин  
и Игорь Иванович Алексеев



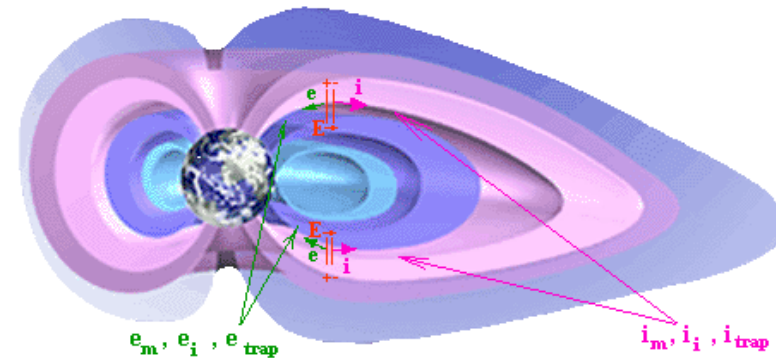
# Явления в околоземном пространстве

## Теоретические модели суббуревого срыва равновесия в магнитоплазменной системе магнитосферы

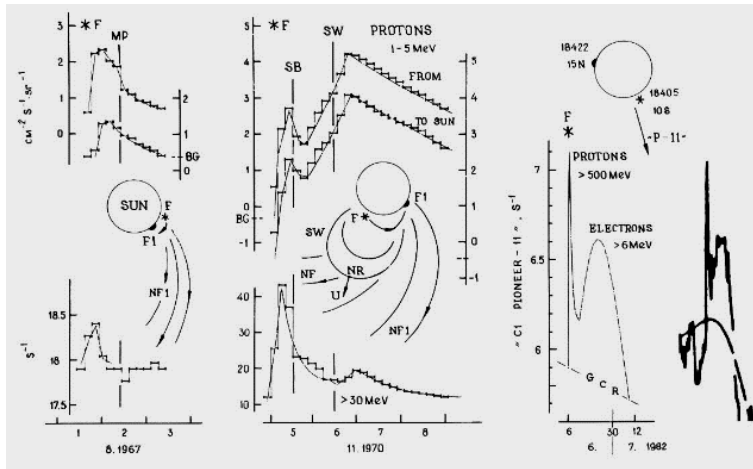
Выяснен характер эволюции магнитосферной конфигурации в разных фазах магнитосферной суббури - цикла активности открытой нелинейной магнитосферно-ионосферной системы (Кропоткин, Ситнов, Трубочев, Lui, Schindler, 1972 - 2002).



## Ускорение авроральных частиц



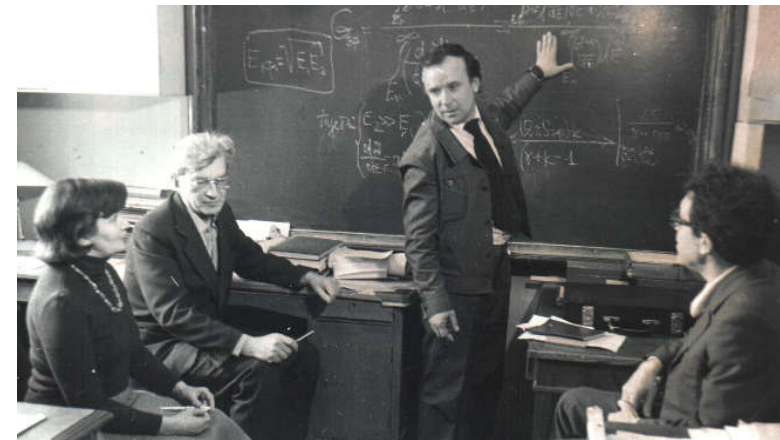
Разработана теория продольного ускорения авроральных электронов, позволившая предсказать локализацию продольного падения потенциала на авроральной силовой линии, концентрацию плазмы в области ускорения (авроральную полость), возникновение ионных пучков с энергией  $\sim 10$  кэВ и линейной зависимости продольного тока от продольного падения потенциала. Предсказания теории получили подтверждение по результатам измерений на спутниках S3-3, ISIS-1, Fast и др., в ракетных экспериментах. (Е.Е. Антонова и Б.А. Тверской, 1975-79)



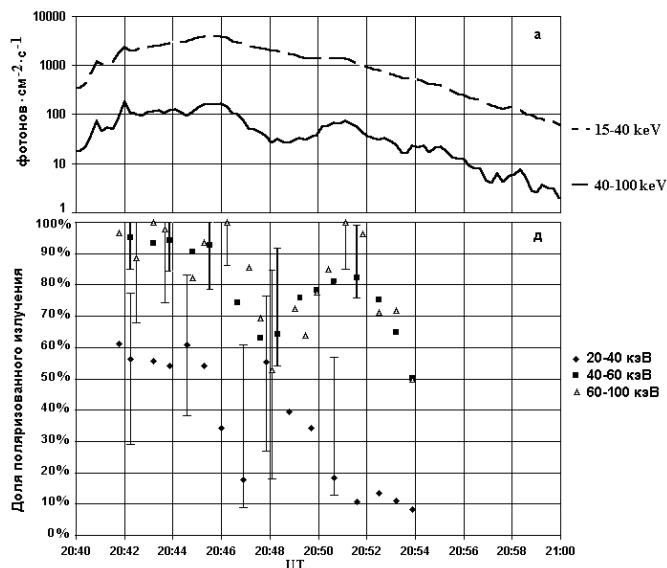
## Космические лучи в гелиосфере

- Сформулирована физическая и эмпирическая модель движения, переноса и накопления солнечных космических лучей в петлевых ловушках межпланетного магнитного поля, на основании целого ряда экспериментальных данных. («Отражательная модель», Любимов, 1988)

- Первые измерения частиц солнечного происхождения за пределами атмосферы были проведены на 3-м советском спутнике в 1958 г. сотрудниками НИИЯФ МГУ и ФИАН.
- 4-7 августа 1972 года, измеренная спутниками Земли «Прогноз-1,-2» были зарегистрированы мощные потоки 100-МэВных протонов, обусловившие интегральную дозу радиации в 100 рад. За всю историю космических исследований наблюдалось всего несколько таких событий на Солнце (Логачев).



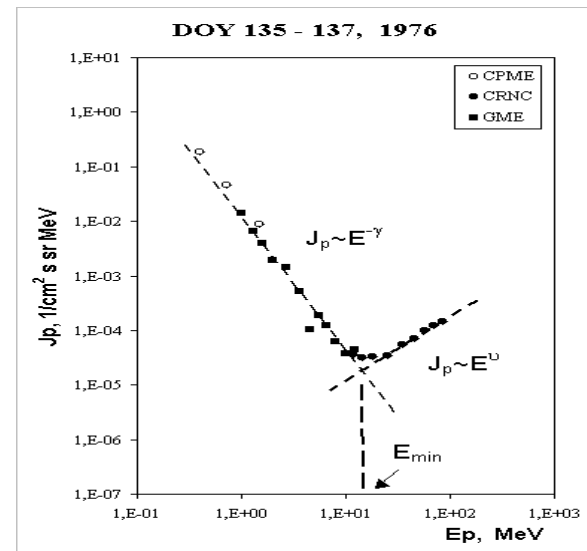
## Космические лучи в гелиосфере



- По данным спутника **КОРОНАС-Ф** обнаружена **поляризация жесткого рентгеновского излучения** во время экстремальных событий в октябре-ноябре 2003 г. (Логачев и др., 2006)

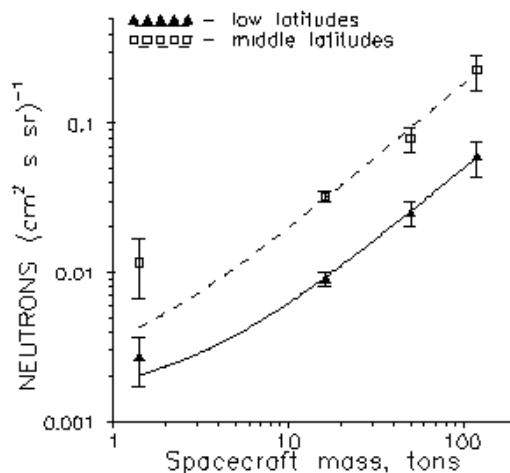
- «Прогноз 1-3»: солнечные электроны с энергиями 20-100 кэВ взаимодействуют с плазмой солнечного ветра, возбуждая при этом плазменные колебания («**Когерентное распространение**» электронов, Логачев, Курт и др., 1972)
- Показано, что выполаживание энергетического спектра протонов и тяжелых частиц в области энергий < 20 МэВ обусловлено адиабатическим замедлением частиц при их движении от Солнца до Земли (Дайбог, Курт, Логачев, Столповский)
- Луна-4 – Луна-16** – оценка потоков КЛ на поверхности Луны
- АМС Венера, Марс** – распространение СКЛ в гелиосфере.

**Прогноз 3 и 4:** определен энергетический спектр протонов в области энергий 0.3-15 МэВ. Показано, что спектр можно представить в виде двух степеней с изломом в области энергий 1-2 МэВ к более крутому спектру. (Логачев, Зельдович, Столповский, 1978)





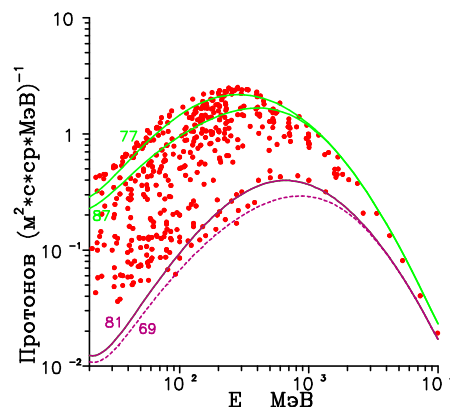
## Радиационная обстановка в околоземном космическом пространстве



Получено, что фоновый поток нейтронов с энергиями >20 МэВ, представляющий собой, главным образом, локальные нейтроны, образовавшиеся в веществе КА под действием ГКЛ линейно зависит от массы аппарата (Панасюк и др., 2000)



Модель потоков частиц галактических космических лучей – международный стандарт ISO-15390, ( Р.А. Ныммик и А.А. Сулов, 1988 г.)

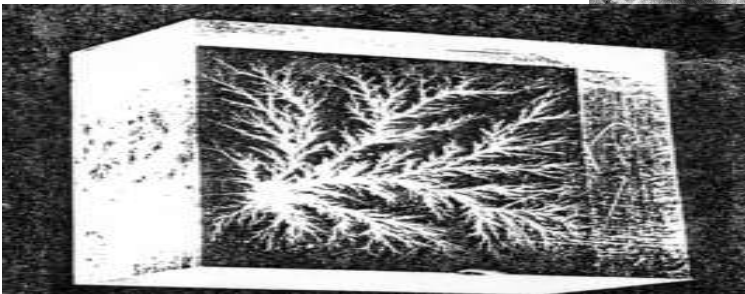
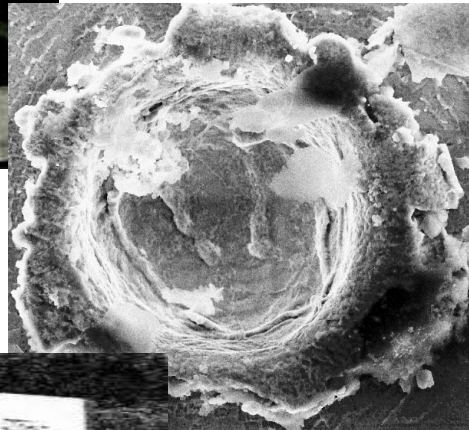


Для оценки радиационных условий и прогнозирования работоспособности электронных компонентов непосредственно на борту космических аппаратов в НИИЯФ МГУ создан интегрированный программный комплекс, который позволяет для долговременных полетов (1-20 лет) орбитальных космических аппаратов рассчитать

1. энергетические спектры потоков
  - электронов и протонов РПЗ,
  - протонов и ядер ГКЛ,
  - протонов и ионов СКЛ
2. спектров ЛПЭ в кремнии;
3. поглощенной и эквивалентной дозы;
4. частоты одиночных сбоев.

(Н.В.Кузнецов, Р.А.Ныммик, М.И.Панасюк, 2001)

## КОСМИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ



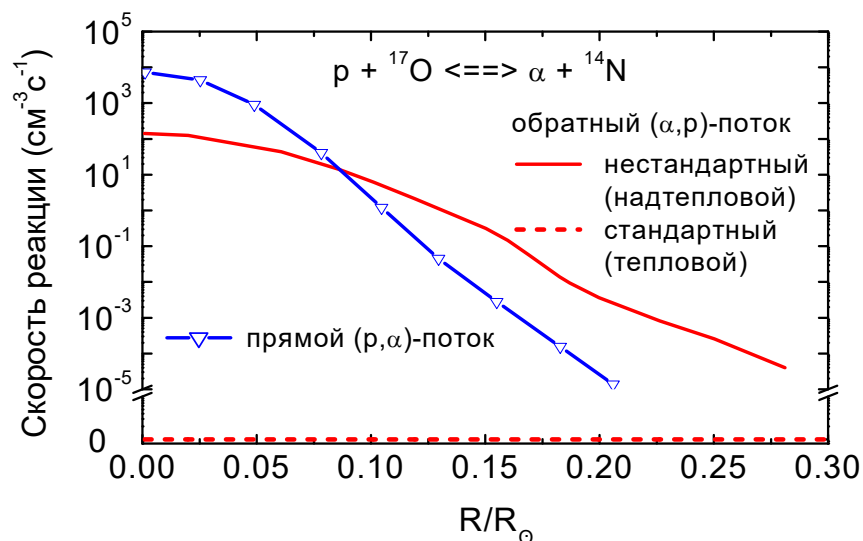
- Электризация космических аппаратов
- Исследования собственной внешней атмосферы
- Электризация диэлектриков
- Воздействие атомарного кислорода
- Воздействие микрочастиц

# Влияние надтепловых процессов на синтез элементов в солнечном ядре

Разработана модель для самосогласованного описания надтепловых ядерных процессов в центральной части Солнца с учетом основных особенностей протекания реакций в плотной плазменной среде.

Установлено, что МэВные  $\alpha$ -частицы, продуцируемые в реакциях солнечной рр-цепочки, способны запускать **надтепловые процессы в CNO-цикле** и формировать специфический ядерный  $(\alpha, p)$ -поток, отсутствующий в стандартных солнечных моделях.

Обнаружено, что этот поток может заметно влиять на кинетику CNO-процессов, увеличивая усредненное по объему солнечного ядра содержание изотопов  $^{17}\text{O}$  и  $^{18}\text{O}$  приблизительно в 30 раз по сравнению со стандартными оценками.



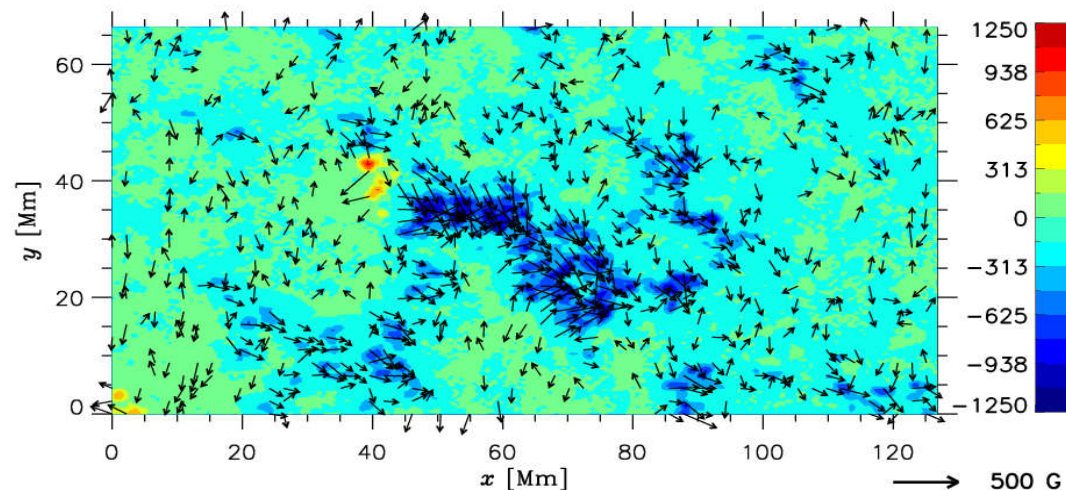
Сравнение скоростей прямой  ${}^{17}\text{O}(p, \alpha){}^{14}\text{N}$  и обратной  ${}^{14}\text{N}(\alpha, p){}^{17}\text{O}$  реакций, отражающих, соответственно, стандартный  $(p, \alpha)$ - и нестандартный  $(\alpha, p)$ -потоки в солнечном CNO-цикле.

[1] V.T. Voronchev, *Suprathermal nuclear effects in the solar core: overall view*, Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics **46**, 065201 (2019), DOI: 10.1088/1361-6471/ab1435

# Формирование солнечных активных областей

Проведен цикл исследований сценариев возникновения солнечных активных областей (АО). Цель работы – выяснение вопроса, играет ли в этом процессе первичную роль сильное магнитное поле, управляющее движениями солнечной плазмы, или же такая роль принадлежит движениям, которые усиливают и структурируют магнитное поле. В результате анализа данных SDO/HMI найдено, что во многих случаях картина развития АО резко контрастирует с ожидаемыми проявлениями всплывания трубки сильного поля.

Наиболее общей чертой таких АО является **несбалансированность положительного и отрицательного магнитного потока**. Наблюдается также асимметрия временных вариаций экстремальных значений полей двух полярностей.

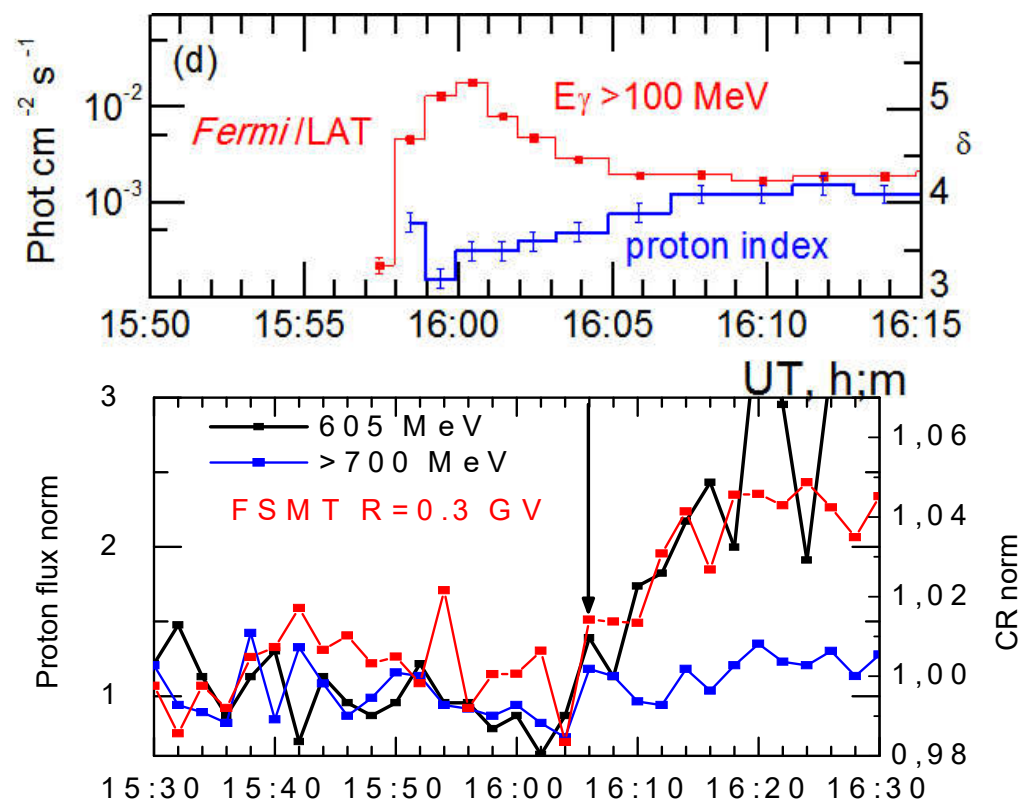


A.V. Getling, A.A. Buchnev, The origin and early evolution of a bipolar magnetic region in the solar photosphere, *Astrophys. J.*, v. 871, no. 2, article id. 224, 2019, DOI: 10.3847/1538-4357/aafad9.



# Нейтральные излучения солнечных эруптивных событий

Рассмотрены основные характеристики наземного возрастания солнечных космических лучей (GLE72), ассоциированного с мощной (X8.2) лимбовой эруптивной солнечной вспышкой 10 сентября 2017 г. По данным нейтронных мониторов и прибора NEPAD (ИСЗ GOES 13) было найдено время прихода первых частиц с энергиями  $\approx 1$  ГэВ на 1 а.е., равное 16:06–16:08 UT. Исследована совокупность измерений нейтральных излучений в широком диапазоне длин волн вплоть до энергий фотонов 100 МэВ. Наблюдения подтверждают **ускорение частиц до субрелятивистских энергий в токовом слое пересоединения**. Получена длина пробега первых пришедших к Земле частиц, равная  $1.5 \pm 0.3$  а.е.



[1] V. Kurt, A. Belov, K. Kudela, H. Mavromichalaki, L. Kashapova, B. Yushakov, C. Sgouropoulos, *Onset time of the GLE 72 observed at neutron monitors and its relation to electromagnetic emissions*, Solar Physics, vol. 294:22 (2019). doi: 10.1007/s11207-019-1407-9.



## О роли структуры межпланетного магнитного поля в формировании особенностей временных профилей потоков солнечных энергичных протонов

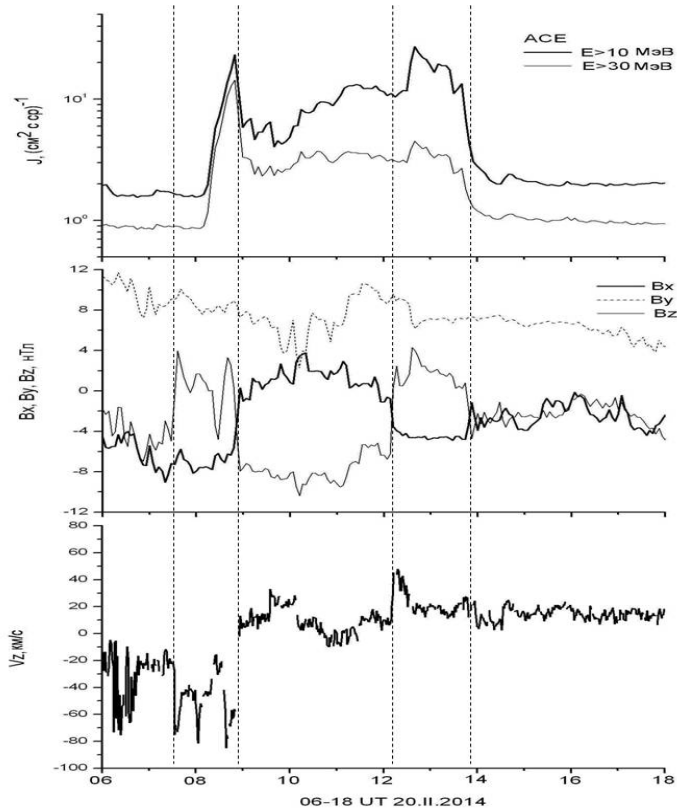


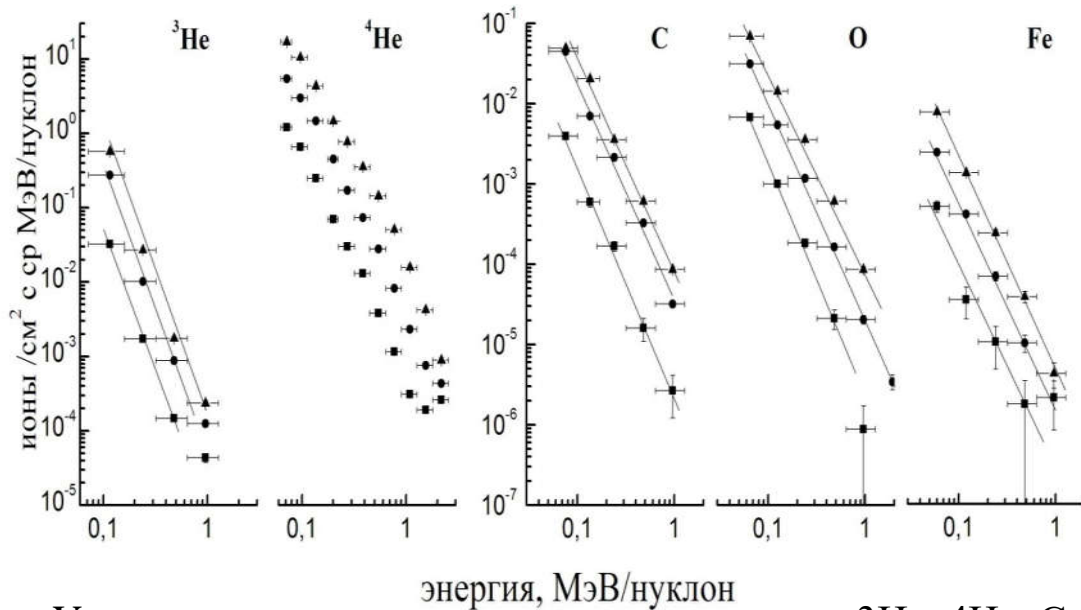
Рис. Временные профили потоков солнечных протонов по данным КА ACE (а),  $B_x$ ,  $B_y$  и  $B_z$  компонент ММП (б) и  $V_z$ -компоненты скорости солнечного ветра (г) в 06÷18 UT 20.И.2014.

Результаты сравнительного анализа особенностей временных профилей потоков энергичных протонов двух солнечных протонных событий (07.И.2011 и 20.И.2014) и вариаций параметров межпланетной среды (скорости и плотности солнечного ветра и величины и направления межпланетного магнитного поля) подтверждают ранее высказанные предположения о том, что фундаментальной структурой в гелиосфере является магнитоплазменная трубка и что **распространение солнечных космических лучей в межпланетной среде преимущественно происходит в квазистационарных структурах межпланетного магнитного поля**, а в процессе распространения солнечные протоны могут частично захватываться новыми структурами межпланетного магнитного поля.

*Власова Н.А., Тулунов В.И., Калегаев В.В.* Некоторые особенности солнечных протонных событий 07.И.2011 и 20.И.2014 (**Памяти Германа Павловича Любимова**) // *Космические исследования*, принята к печати 2021.



## Сверхтепловые ионы из корональных дыр на 1 а.е. в 23 и 24 солнечных циклах



Усредненные спектры сверхтепловых ионов  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$ , C, O и Fe в потоках частиц из КД в трех интервалах скорости солнечного ветра

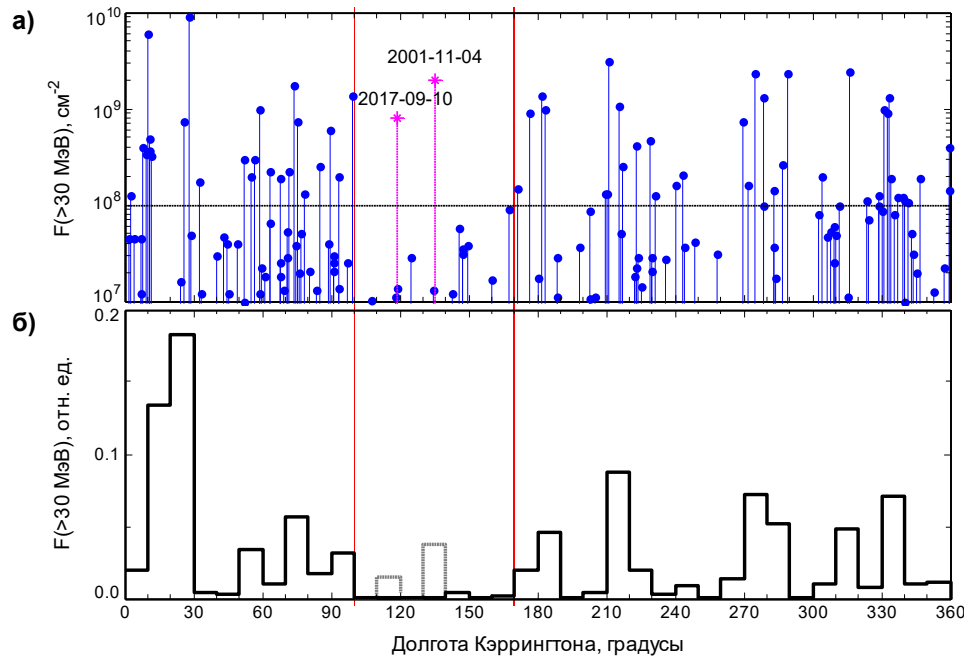
M. A. Zeldovich, K. Kecskeméty, and Yu. I. Logachev, Solar Physics 293, 3 (2018) / DOI: 10.1007/s11207-017-1170-8

Проведено изучение химсостава, временных вариаций потоков и энергетических спектров сверхтепловых ( $\sim 0.04\text{--}2$  МэВ/нуклон) ионов  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$ , C, O и Fe и их относительного содержания в спокойные периоды солнечной активности в 23 и 24 солнечных циклах (СЦ) по данным КА ACE. Обнаружено превышение средней величины Fe/O на спаде активности 24 цикла, а также в потоках сверхтепловых ионов из корональных дыр (КД).

Полученная положительная корреляция с параметрами СА указывает на происхождение сверхтепловых ионов преимущественно в активных процессах на Солнце.



## Пассивные долготы Кэррингтона источников солнечных космических лучей в 19–24 солнечных циклах



Распределение флюенсов протонов с энергиями  $>30$  МэВ в солнечных событиях в 19–24 циклах по долготе Кэррингтона их источников: а) для индивидуальных событий, б) суммарные для 10-градусных интервалов.

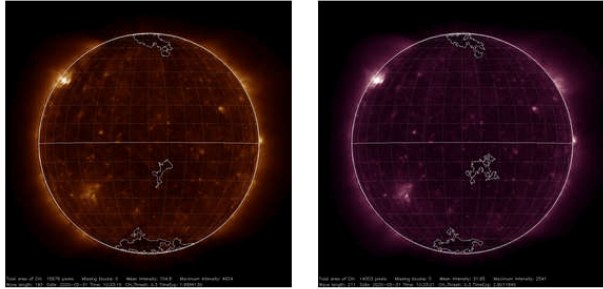
Рассмотрены солнечные протонные события с 1956 по 2017 г., флюенсы протонов разных энергий в этих событиях и их распределение по долоте Кэррингтона их источников на Солнце. Обнаружена существенная неравномерность этого распределения. В частности, **выявлен интервал «пассивных» долгот, протяжённый по долоте ( $\approx 100$ – $170^\circ$ ) и времени жизни** (весь период наблюдений). Его существование было ранее выявлено в 19–23 солнечных циклах и сейчас подтверждено также для 24-го цикла.

Podzolkо M. V., Passive Carrington longitudes of solar cosmic ray sources in solar cycles 19–24, Journal of Physics: Conference Series, v. 1181, No. 1, p. 012016, 2019. doi:10.1088/1742-6596/1181/1/012016



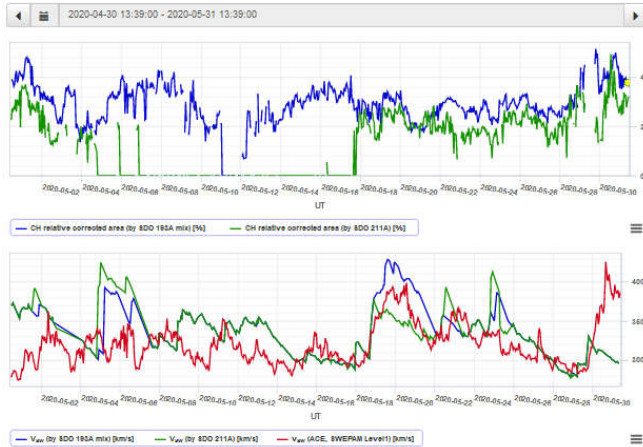


# Модель прогноза квазистационарных потоков СВ



Создана эмпирическая модель прогноза скорости высокоскоростных потоков солнечного ветра (ВСП СВ) на околоземной орбите на основе изображений солнечной короны с SDO/AIA на длинах волн 19.3 и 21.1 нм, которая в 2020 году была дополнена моделью скорости медленных потоков СВ ([http://swx.sinp.msu.ru/models/solar\\_wind.php?gcm=1](http://swx.sinp.msu.ru/models/solar_wind.php?gcm=1)).

Была выбрана и реализована эмпирическая модель прогноза медленного СВ, основанная на повторяемости потоков СВ (Owens et al., 2013). Добавление к прогнозу ВСП СВ прогноза медленных потоков СВ привело к уменьшению среднеквадратичного отклонения на 10% для 2010-2020 гг.



Модели	ВСП СВ		ВСП+МСВ		ESWF		WSA	
	КК	СКО	КК	СКО	КК	СКО	КК	СКО
2011-2014	0.34	97.8	0.36	93.3	0.31	108.2	0.35	99.5

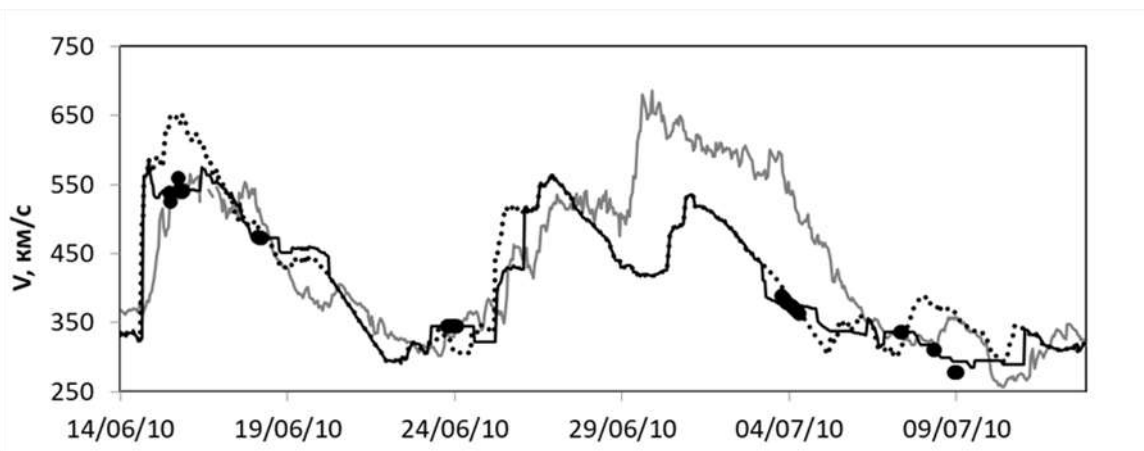
1. Vladimir Kalegaev, Mikhail Panasyuk, Irina Myagkova, Yulia Shugay et al. Monitoring analysis and post-casting of the Earth's particle radiation environment during February 14–March 5, 2014 // *J. Space Weather Space Clim.*, 9 (2019) A29 DOI: <https://doi.org/10.1051/swsc/2019029>
2. Slemzin V.A., Goryaev F.F., Rodkin D.G., Shugay Yu S., Kuzin S.V. Mass Ejections in the Solar Corona and Propagation of the Resulting Plasma Streams in the Heliosphere // *Plasma Phys. Rep.* (2019) 45: 889. DOI: <https://doi.org/10.1134/>



# Моделирование корональных выбросов масс

Проведено моделирование скорости и времени прихода на околоземную орбиту межпланетных корональных выбросов масс (МКВМ) численной Drag-Based моделью [DBM: Vršnak et al., 2013]. В приближении DBM модели считается, что, начиная с некоторого удаления от Солнца, динамика распространения КВМ определяется только взаимодействием КВМ с окружающим солнечным ветром, скорость которого на 20 солнечных радиусах мы рассчитываем по эмпирической модели ИИЯФ МГУ на основе изображений Солнца, получаемых с SDO/AIA.

Использование Drag-Based модели МКВМ совместно с моделью квазистационарных потоков СВ позволило уменьшить среднеквадратичное отклонение между измеренными и спрогнозированными потоками СВ на 1 а.е. с 85 до 82 км/с и увеличить коэффициент корреляции с 0.55 до 0.6 за 2010 год.

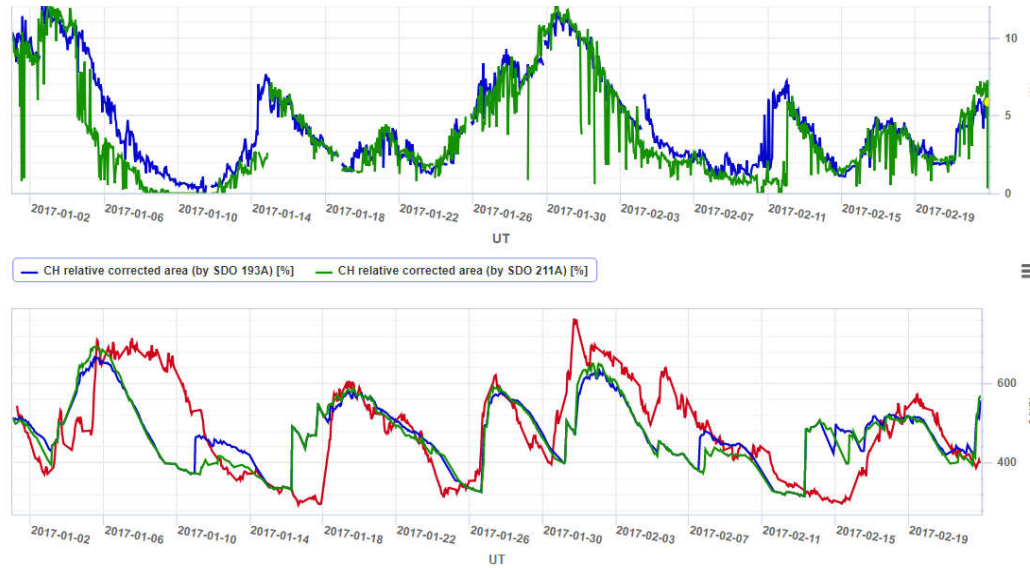


Серая кривая - наблюдаемая скорость СВ по данным КА ACE, черная пунктирная кривая – смоделированная скорость квазистационарных потоков СВ (ВСП и медленных потоков СВ), черная кривая – смоделированная скорость, которая кроме квазистационарных потоков учитывает прогноз МКВМ. Черными кружками отмечены времена прихода и скорости МКВМ.

Шугай Ю.С., Капорцева К.Б., Прогноз квазистационарных и транзиентных потоков солнечного ветра по данным наблюдений Солнца в 2010 году, Геомагнетизм и Аэронавигация, принята к печати.



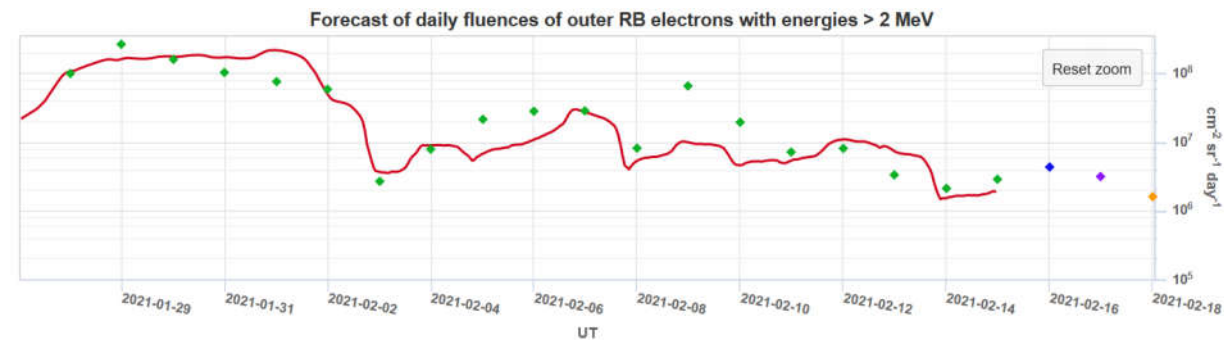
## СИСТЕМА СРЕДНЕСРОЧНОГО (ДО 4 СУТОК) ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СУТОЧНОГО ФЛЮЕНСА РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ ВНЕШНЕГО РПЗ



Разработана операционная модель прогноза суточного флюенса релятивистских электронов на геостационарной орбите на основе ИНС. Для **увеличения горизонта прогноза до 4 суток** в набор входных данных были включены прогнозируемые значения скорости высокоскоростных потоков солнечного ветра, полученные в результате обработки изображений Солнца (SDO/AIA), дополнительно к данным об измеряемых в точке L1 параметрах ММП и СВ.

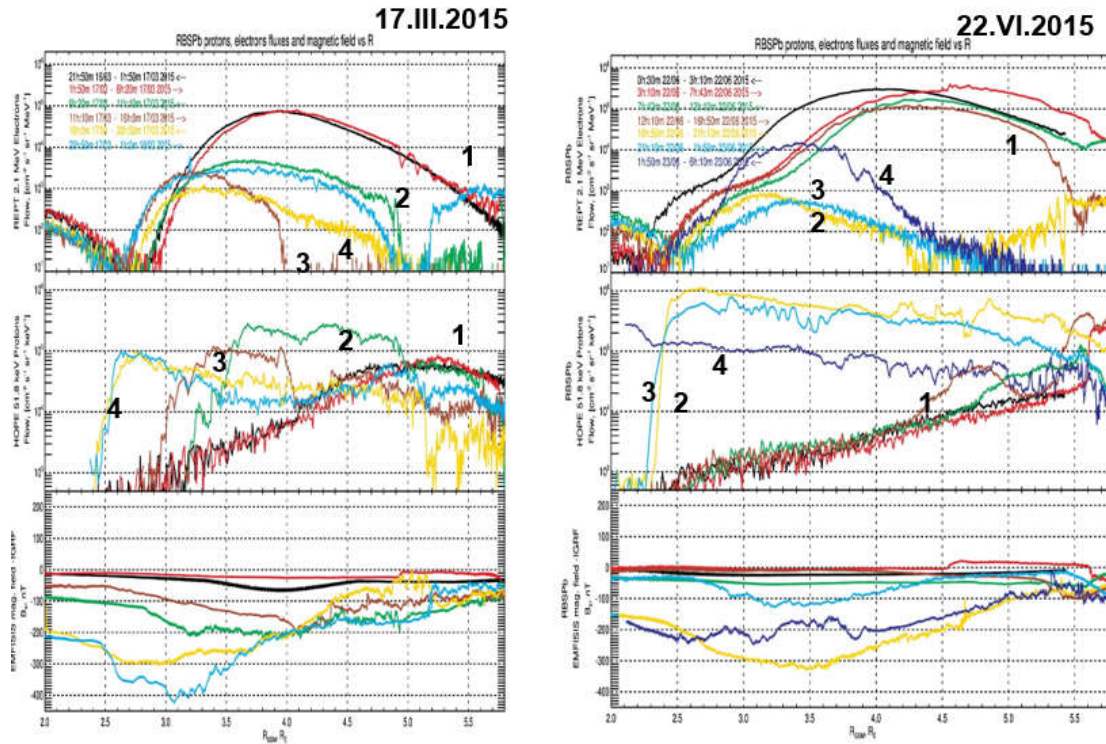
[http://swx.sinp.msu.ru/models/rb\\_electrons/index.php](http://swx.sinp.msu.ru/models/rb_electrons/index.php)

И. Н. Мягкова, Ю. С. Шугай, В. В. Калегаяев, В. А. Колмогорова, С. А. Доленко. Среднесрочное прогнозирование потоков релятивистских электронов на геостационарной орбите при помощи машинного обучения с использованием данных наблюдений корональных дыр. *Геомагнетизм и аэрономия*, 60(3):293–304, 2020.





## Относительная динамика потоков релятивистских электронов внешнего радиационного пояса и буревых вариаций магнитного поля Земли



Результаты сопоставления динамики потоков электронов на разных орбитах и вариаций геомагнитного поля позволяют сделать вывод о том, что основными механизмами эволюции внешнего электронного радиационного пояса являются глобальные процессы: перемещение популяции захваченных электронов наружу и внутрь магнитосферы Земли вследствие крупномасштабных вариаций магнитосферного магнитного поля во время геомагнитных возмущений и дрейф электронов из хвоста магнитосферы под воздействием электрического и магнитного полей.

*Власова Н.А., Калегаев В.В., Назарков И.С., Прост А.* Вариации магнитного поля и динамика внешнего электронного радиационного пояса магнитосферы Земли в феврале 2014 г. // Геомагнетизм и аэрономия, том 60, № 1, с. 9-22. 2020. DOI: 10.31857/S0016794020010149.

*H. Wu, T. Chen, V.V. Kalegaev, M. I. Panasyuk, N.A. Vlasova, S. Duan, X. Zhang, Z. He, J. Luo and C. Wang* Long-term dropout of relativistic electrons in the outer radiation belt during two sequent geomagnetic storms // JGR. V. 12. N 10. 2020 .DOI: 10.1029/2020JA028098 .

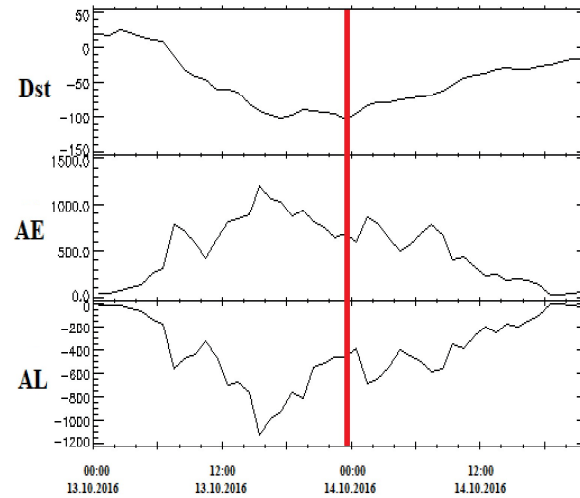




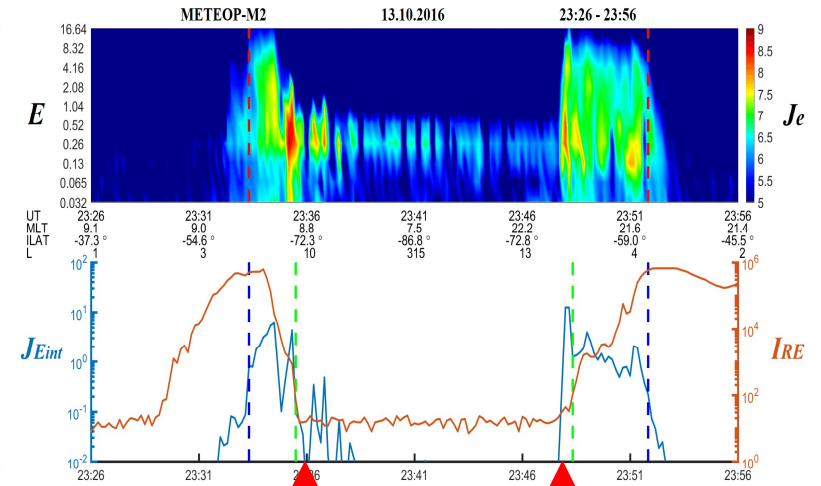
# Определено положение границы захвата электронов внешнего радиационного пояса относительно области авроральных высыпаний (аврорального овала) во время магнитных бурь в ходе анализа результатов наблюдений отечественного спутника МЕТЕОР-М № 2.



#	Название спектрометрического модуля	Направление измерения	Тип детектора	Тип частиц и диапазон энергий	Количество диапазонов измеряемой энергии
1 (MSGI)	SGMTD-30 / 138E	Ось Z	ВЭУ-7 анализатор и детектор	Электроны 0,05-20,0 кэВ	10 (режим 1) 40 (режим 2)
2 (MSGI)	MP-1	Ось Z	Газоразрядная трубка СБТ-9	Электроны > 30,0 кэВ	1
3 (MSGI)	DAS-4	Ось X	Спектрометрический модуль на основе полупроводниковых детекторов и сцинтилляционных детекторов	Электроны 0,1-13 МэВ Протоны 1,0-260,0 МэВ	6
4 (SKL)	DAS-4	Ось Z	Спектрометрический модуль на основе полупроводниковых детекторов и сцинтилляционных детекторов	Электроны 0,1-13 МэВ Протоны 1,0-260,0 МэВ	6
5 (SKL)	DAS-1	Ось X	Спектрометрический модуль на основе полупроводниковых детекторов и сцинтилляционных детекторов	Электроны 0,1-2 МэВ Протоны 1,0-45 МэВ	3
6 (SKL)	DAS-1	Ось Z	Спектрометрический модуль на основе полупроводниковых детекторов и сцинтилляционных детекторов	Электроны 0,1-2 МэВ Протоны 1,0-160 МэВ	3



а



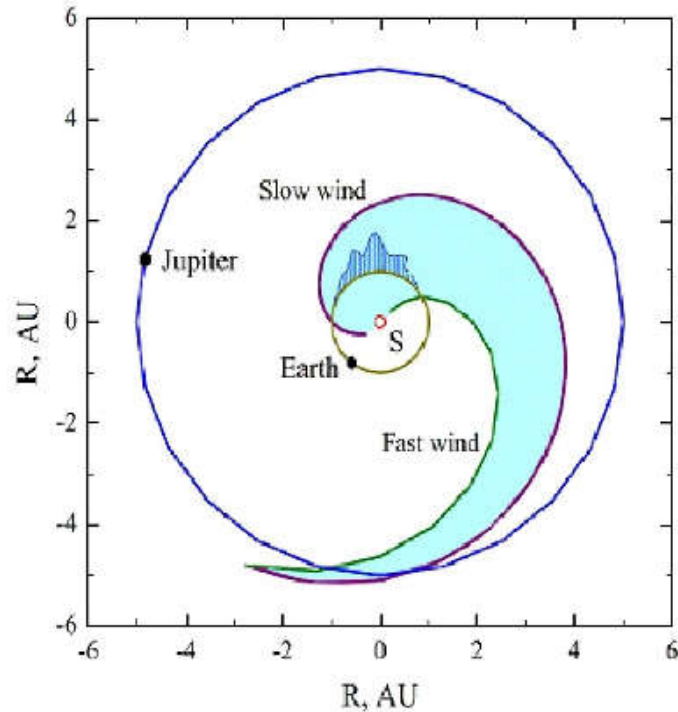
б

Показано, что во время магнитных бурь внешняя граница внешнего электронного радиационного пояса наблюдается внутри аврорального овала и может совпадать с полярной границей овала, что свидетельствует об изменении общепринятой картины, в соответствии с которой радиационный пояс формируется к экватору от овала, а овал проецируется на плазменный слой. (Е.Е. Антонова и др., 2019)

Прибора GGAК-М измерял электроны внешнего радиационного пояса с энергиями от 100 кэВ до 13 МэВ и авроральные электроны с энергиями от 0,032 до 16,64 кэВ ([http://smdc.sinp.msu.ru/index.py?nav=meteor\\_m2](http://smdc.sinp.msu.ru/index.py?nav=meteor_m2)).



## Исследование юпитерианских электронов



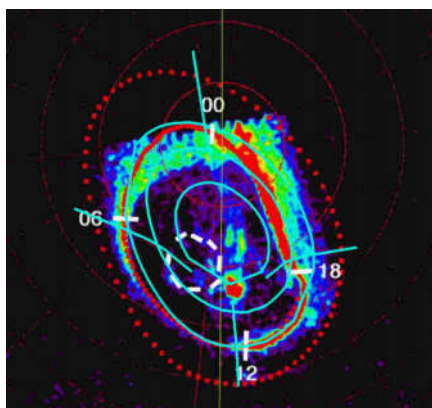
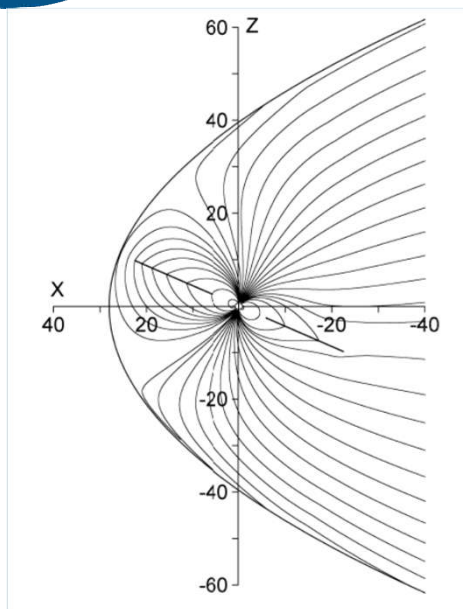
Проведено исследование замкнутых структур солнечного магнитного поля, образующих магнитные ловушки заряженных частиц, вращающиеся вместе с Солнцем и переносящие электроны МэВ-ных энергий от Юпитера к Земле. Возрастания потоков Ю-электронов вблизи Земли при этом ожидаются с периодичностью вращения Солнца, 27,3 суток. В минимумах солнечной активности 1974-75 и 2007-08 гг. средняя периодичность составила 26,7 и 26,1.

Объяснение – в учете изменения во времени структуры скоростей солнечного ветра (ССВ) и связанных с ней магнитных ловушек, взаимного расположение в пространстве Земли и Юпитера и времени пребывания Земли в магнитной ловушке.

- [Дайбог Е.И., Кечкемети К., Лазутин Л.Л., Логачев Ю.И., Сурова Г.М.](#) 27-дневная периодичность потоков юпитерианских электронов на орбите Земли *Астрономический журнал*, 2017, том 94, № 12, с. 1062-1070
- [Дайбог Е.И., Лазутин Л.Л., Логачев Ю.И., Сурова Г.М.](#) Энергичные электроны в хвосте и переходной области магнитосферы *Космические исследования*, 2016, том 54, № 6, с. 456-462
- [Logachev Yu I., Daibog E.I., Kecskeméty K.](#) Jovian electrons at the Earth orbit and stationary structures in the solar wind *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2021



# Магнитосферы планет



- **Магнитосфера Меркурия**

Найдены условия существования радиационных поясов в магнитосфере Меркурия с помощью теории Штермера и анализа траекторий.

Применен новый подход, включающий комбинацию гибридной и параболоидной моделей магнитосферы Меркурия, что позволило преодолеть недостатки каждой из этих моделей по отдельности.

- **Магнитосфера Сатурна**

Показано, что магнитосфера Сатурна – открытая, т.е. контролируется межпланетным магнитным полем.

- **Магнитосферы экзопланет**

Обращается внимание на особые места в магнитосферах планет и экзопланет, связанные со скачком плотности, пересоединением и действием механизма динамо. Это скользящие слои. Процессы, происходящие на них, носят нелокальный характер и сказываются на глобальных масштабах.



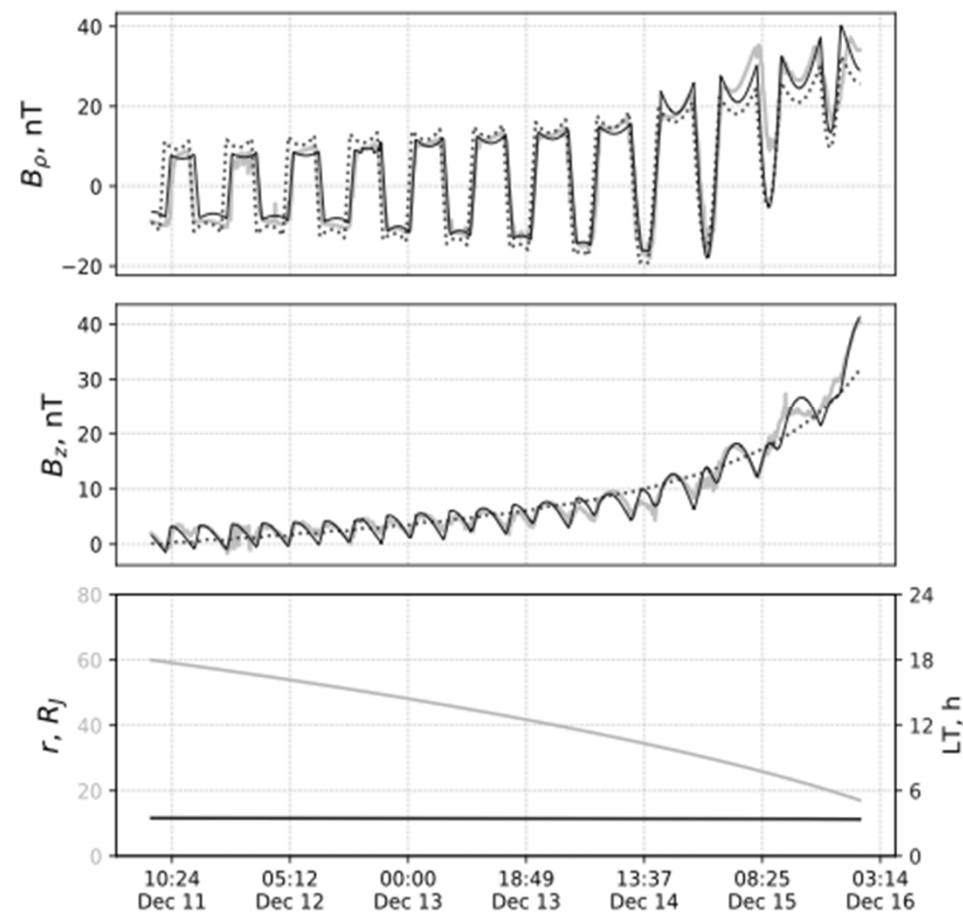
## Модель токового диска Юпитера с параметрами, оптимизированными по измерениям магнитного поля во время миссий Juno и Galileo

Отличительной особенностью магнитосферы Юпитера является наличие в ней мощной дискообразной токовой системы — токового диска. Разработана PCD (или Piecewise Current Disc) модель токового диска, построенная авторами ранее. Модель адаптирована для аналитических вычислений. Была модифицирована форма поверхности токового слоя, что привело к уменьшению среднеквадратичного отклонения модели от данных магнитометров. Параметры модели были оптимизированы для уменьшения расхождений с данными космических аппаратов *Juno* и *Galileo*.

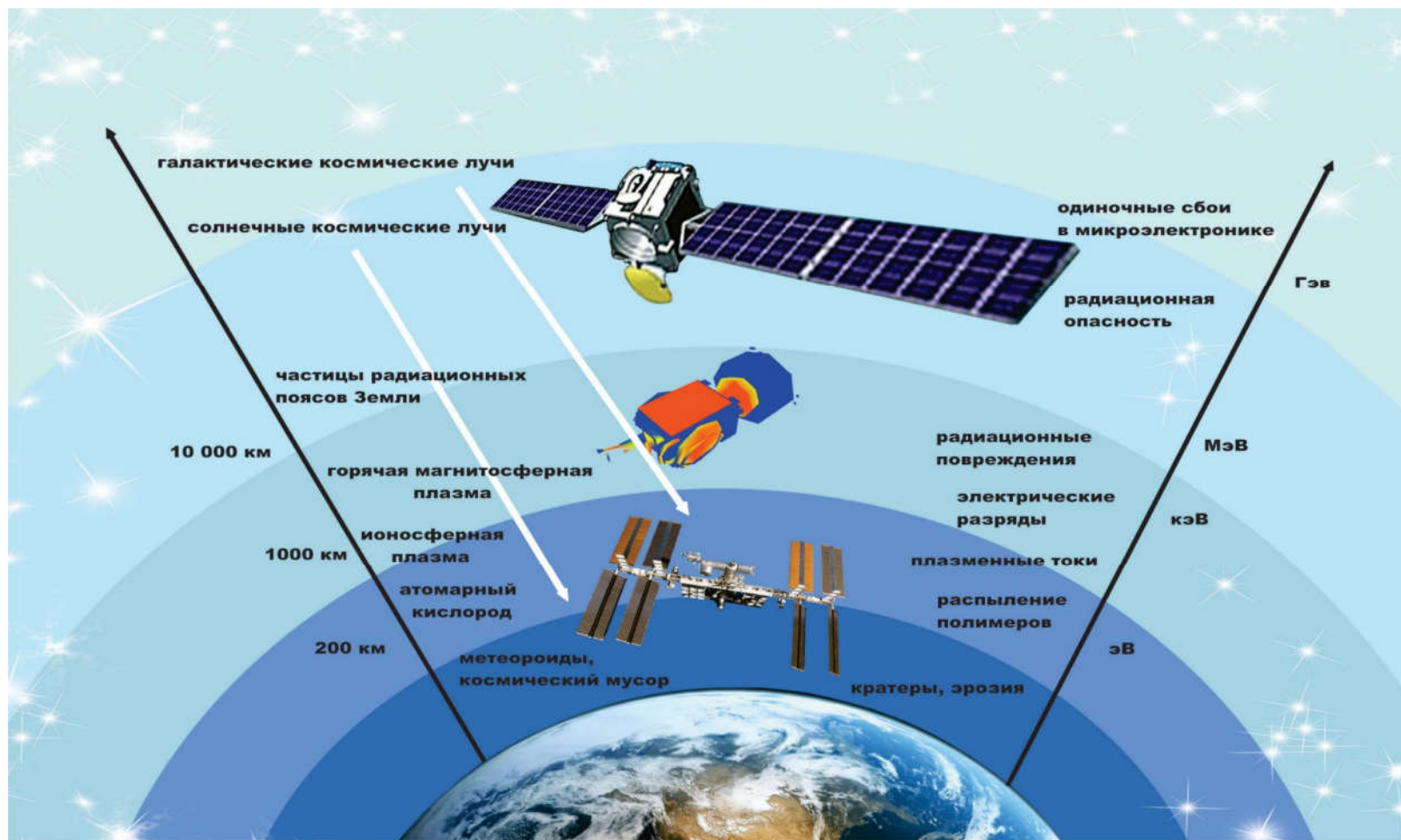
PCD модель дала в среднем на 30% меньшее среднеквадратичное отклонение от наблюдений на данных *Juno* и на 10% на данных *Galileo* по сравнению с наиболее популярной на данный момент моделью токового диска Юпитера *Connerney et al., 1981*, параметры которой также были оптимизированы для каждого оборота *Juno*.

Juno PJ-10

— observed - internal    — PCD rms = 4.5 nT    ..... CAN rms = 7.0 nT

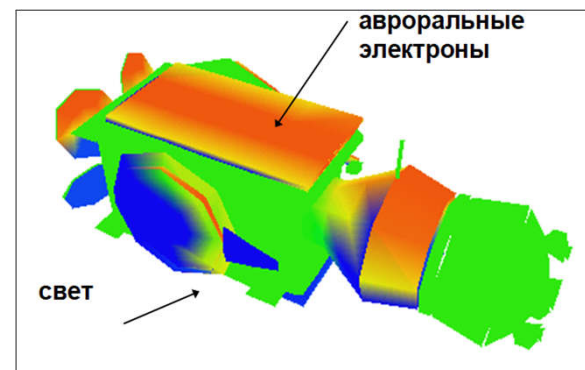
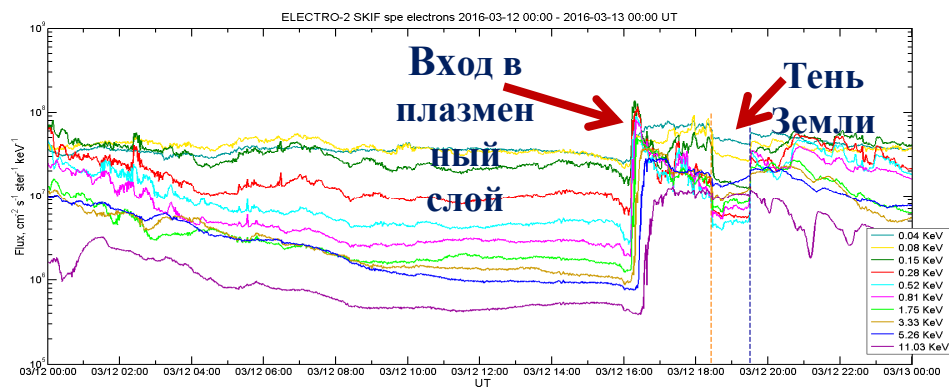


# Факторы космического пространства и вызываемые ими эффекты

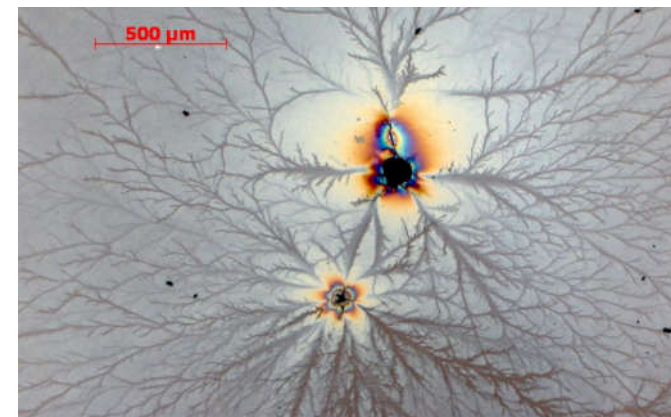




## Физико-математическая модель электризации КА (НИИЯФ МГУ)



Лабораторные исследования электризации диэлектрических материалов и разрядных процессов



Panel #2  
on ISS  
surface.

Panel #10  
on ISS  
surface.

Изучение комплексного воздействия факторов космического пространства на образцы материалов на поверхности Международной космической станции



# Радиационная обстановка в околоземном космическом пространстве и проблема безопасности космических полетов



- Модели космической радиации
- Поддержка программного комплекса КОСРАД
- Отраслевые стандарты ОСТ-134
- Международные стандарты

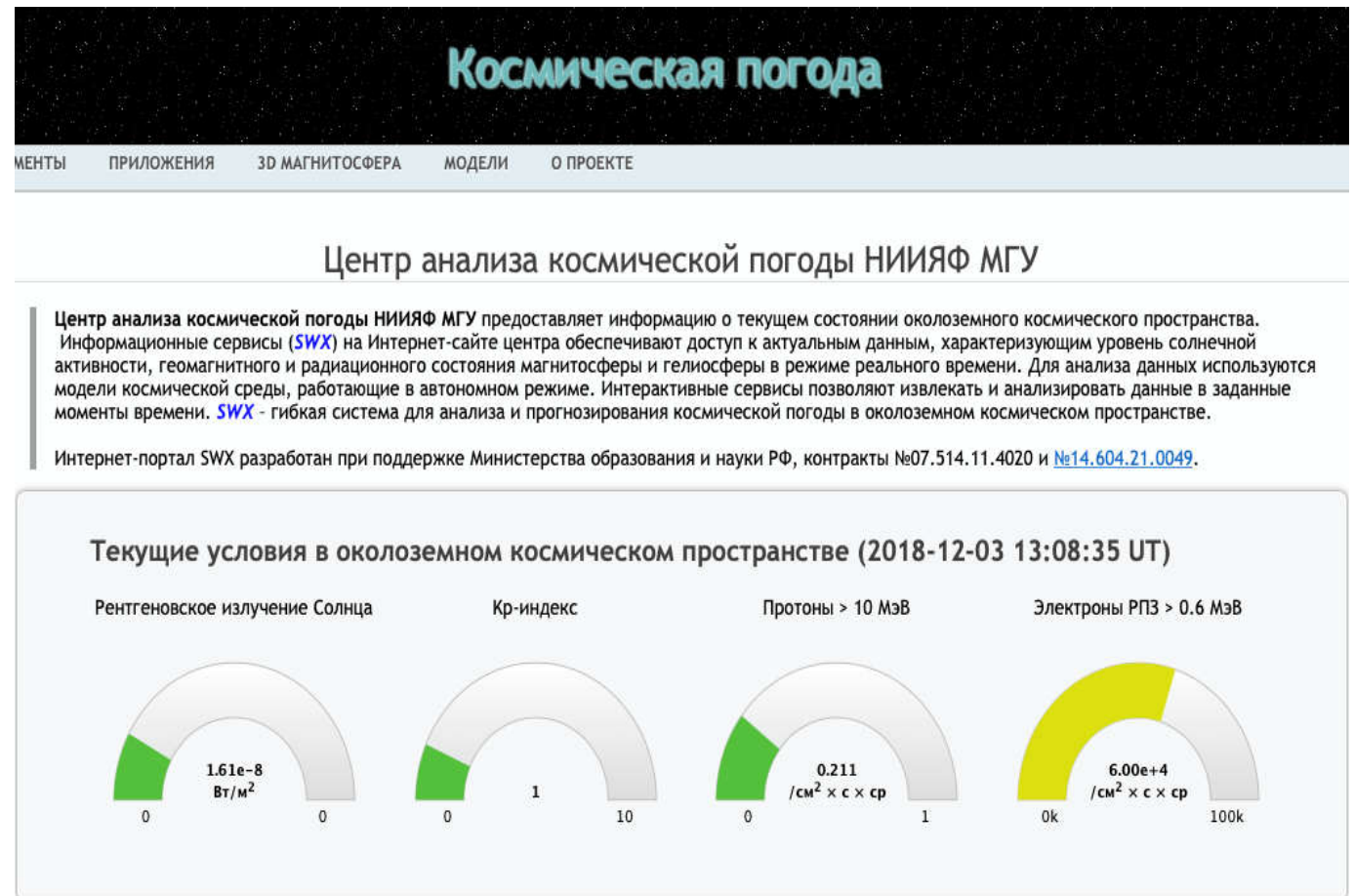


# Центр данных оперативного космического мониторинга НИИЯФ МГУ

<http://swx.sinp.msu.ru/>

## Главные цели

- Поддержка космических экспериментов (с 2005)
- Сбор и хранение данных (с 2005)
- Мониторинг и прогнозирование радиационных условий в околоземном пространстве (с 2012)



Михаил Игоревич  
Панасюк  
(1945-2020)



- 1967 - закончил физический факультет МГУ
- 1972 - защита кандидатской диссертации
- 1988 - защита докторской диссертации в ФИАН
- 1993 - присвоено академическое звание «профессор»
- 1984 – 1992 - заместитель директора НИИЯФ МГУ
- 1992 – директор НИИ Ядерной физики им. Д.В. Скобельцына Московского государственного университета
- 2005 – зав. кафедрой космической физики физического факультета МГУ
- 2016 – член-корреспондент Международной академии астронавтики, IAA
- 2018 – вице-президент COSPAR

### Научные интересы

- Космические и наземные эксперименты
- Физика магнитосферы
- Радиационные пояса Земли
- Космические лучи
- Транзиентные электромагнитные явления в атмосфере