# ГРИНГАУЗ 100 GRINGAUZ ПЛАЗМА В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ PLASMAS IN THE SOLAR SYSTEM

une 13

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ, ПОСВЯЩЁННАЯ 100-ЛЕТИЮ ПРОФЕССОРА КОНСТАНТИНА ИОСИФОВИЧА ГРИНГАУЗА INTERNATIONAL CONFERENCE IN HONOR OF PROFESSOR KONSTANTIN I. GRINGAUZ 100<sup>th</sup> BIRTHDAY

5, 2018, IKI R

# 







#### ISBN 978-5-00015-043-6

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИКИ РАН), 2018

# THE INTERNATIONAL CONFERENCE "GRINGAUZ 100: PLASMA IN THE SOLAR SYSTEM" SPACE RESEARCH INSTITUTE OF RAS, MOSCOW, RUSSIA June 13–15, 2018

From June 13 to June 15, 2018 Space Research Institute holds a conference dedicated to the 100<sup>th</sup> anniversary of Professor Konstantin I. Gringauz – a pioneer of in-situ plasma measurements in space, who discovered solar wind, plasmasphere and plasmapause, and cometopause. The conference provides a framework for discussing solar wind formation, its variations, interaction with planets and local interstellar medium, physical processes in different regions of magnetospheres and ionospheres. Presented reports are based on space experiments data and results of theoretical studies.

Scientific sessions of the conference:

- 1. Physical processes on the Sun and in the interplanetary space.
- 2. Physical processes in the magnetosphere of the Earth.
- 3. Plasmasphere and plasmapause.
- 4. lonosphere.
- 5. Space weather.
- 6. Solar wind interaction with planets and comets.
- 7. Memorials.

The conference web site: http://gringauz100.cosmos.ru/en Contact e-mail address: gringauz100@cosmos.ru

# МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ГРИНГАУЗ 100: ПЛАЗМА В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ» институт космических исследований российской академии наук, москва, россия 13–15 июня 2018 г.

С 13 по 15 июня в Институте космических исследований РАН проводится конференция, посвященная 100-летию со дня рождения профессора Константина Иосифовича Грингауза – основоположника прямых плазменных измерений в космосе, открывшего солнечный ветер, плазмосферу и плазмопаузу, и кометопаузу. На конференции обсуждаются вопросы образования солнечного ветра, его изменчивость и взаимодействие с планетами и локальной межзвездной средой, физические процессы в различных областях магнитосфер и ионосфер. Представленные доклады основаны на данных космических экспериментов и теоретических результатах.

Научные сессии конференции:

- 1. Физические процессы на Солнце и в межпланетном пространстве.
- 2. Физические процессы в земной магнитосфере.
- 3. Плазмосфера и плазмопауза.
- 4. Ионосфера.
- 5. Космическая погода.
- 6. Взаимодействие солнечного ветра с планетами и кометами.
- 7. Воспоминания.

Интернет-сайт конференции: http://gringauz100.cosmos.ru/en Контактный адрес электронной почты: gringauz100@cosmos.ru

Конференция проводится при финансовой поддержке Российской Академии наук и Российского фонда фундаментальных исследований, Проект № 18-02-0047\18.

# **PROGRAM COMMITTEE:**

ZELENYI L.M. (chairman) – IKI RAS VERIGIN M.I. (vice-chairman) – IKI RAS GOMBOSI T.I. – University of Michigan, USA PETRUKOVICH A.A. – IKI RAS LEMAIRE J.F. – BIRA/IASB & Université cath. Louvain, Belgium SZEGŐ K. – Wigner Research Centre for Physics, Hungary ZHEREBTSOV G.A. – ISTP SB RAS KUZNETSOV V.D. – IZMIRAN PANASYUK M.I. – SINP MSU STEPANOV A.V. – Pulkovo observatory, CAO RAS CHASHEY I.V. – Lebedev Physical Institute RAS BREUS T.K. – IKI RAS KLEIMENOVA N.G. – Institute of Physics of the Earth RAS

# LOCAL ORGANIZING COMMITTEE (IKI RAS):

KOTOVA G.A. (chairman), VLADIMIROVA G.A., VERIGIN M.I., ANTONENKO E.A., BOYARSKY M.N., ZAKHAROV A.N., YANOVSKAYA N.V., YANOVSKY M.I., CHUGUNIN D.V., VOVCHENKO V.V.

# ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ:

ЗЕЛЁНЫЙ Л.М. (председатель) – ИКИ РАН ВЕРИГИН М.И. (зам.председателя) – ИКИ РАН ГОМБОШИ Т. – Университет Мичигана, США ПЕТРУКОВИЧ А.А. – ИКИ РАН ЛЕМЭР Ж. – Институт космической аэрономии, Бельгия СЁГЕ К. – Центр физических исследований, Венгрия ЖЕРЕБЦОВ Г.А. – ИСЗФ СО РАН КУЗНЕЦОВ В.Д. – ИЗМИРАН ПАНАСЮК М.И. – SINP MSU СТЕПАНОВ А.В. – ГАО РАН ЧАШЕЙ И.В. – ФИАН БРЕУС Т.К. – ИКИ РАН КЛЕЙМЕНОВА Н.Г. – ИФЗ РАН

# ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ (ИКИ РАН):

КОТОВА Г.А. (председатель), ВЛАДИМИРОВА Г.А., ВЕРИГИН М.И., АНТОНЕНКО Е.А., БОЯРСКИЙ М.Н., ЗАХАРОВ А.Н., ЯНОВСКАЯ Н.В., ЯНОВСКИЙ М.И., ЧУГУНИН Д.В., ВОВЧЕНКО В.В.

# Martian Crater Gringauz

ГРИНГАУЗ100 GRINGAUZ

# НАУЧНАЯ ПРОГРАММА МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ «ГРИНГАУЗ 100: ПЛАЗМА В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ» SCIENTIFIC PROGRAM OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE "GRINGAUZ 100: PLASMAS IN THE SOLAR SYSTEM"

#### среда, 13 июня 2018 / wednesday, 13 june 2018

09.30

регистрация registration

конференц-зал conference-hall

#### ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ НА СОЛНЦЕ И В МЕЖПЛАНЕТНОМ ПРОСТРАНСТВЕ PHYSICAL PROCESSES ON THE SUN AND IN THE INTERPLANETARY SPACE

председатель – Л. ЗЕЛЕНЫЙ chair – L. ZELENYI

10.00–10.25	<b>Л. ЗЕЛЕНЫЙ</b> председатель программного комитета	Открытие конференции Opening of the conference	page 196
	L. ZELENYI chairman of the Program committee	Martian and Lunar studies in the Russian space program	
10.25–10.40	A. STEPANOV V. ZAITSEV	Activation of prominence as a core of CME	page 173
10.40–10.55	V. KUZNETSOV A. OSIN	MHD shock waves in collisionless solar wind plasma with heat fluxes	page 153
10.55–11.10	I. SOKOLOV V. TENISHEV T. GOMBOSI	Solar Energetic Particles: Numerical Simulation Methods for Nowcast and Forecast	page 170
11.10–11.25	А. ЕФИМОВ Л. ЛУКАНИНА И. ЧАШЕЙ М. БЕРД М. ПЕТЦОЛЬД	Турбулентность магнитного поля солнечного ветра в цикле солнечной активности по данным экспериментов коронального радиопросвечивания линейно-поляризованными сигналами зондов HELIOS	page 40
11.25–11.45		перерыв на кофе coffee break	
		зимний сад winter garden	
	председат chair -	ель – А.В. СТЕПАНОВ – А.V. STEPANOV	
11.45–12.00	K. KECSKEMÉTY M. ZELDOVICH YU. LOGACHEV	Suprathermal tail of the solar wind at 1 AU	page 135
12.00–12.15	И. ЧАШЕЙ В. ШИШОВ С. ТЮЛЬБАШЕВ И. СУБАЕВ	Крупномасштабная структура солнечного ветра по данным мониторинга межпланетных мерцаний на радиотелескопе БСА ФИАН	page 102
12.15-12.30	I. MOLOTKOV	The physical mechanism of the heating of the solar atmosphere	page 157

and its analytical explanation

12.30–12.45	И. МИРЗОЕВА С. ЧЕФРАНОВ	Нагрев солнечной короны: новые результаты	page 50
12.45–13.00	М. МОГИЛЕВСКИЙ Т. РОМАНЦОВА	Диагностика межпланетной плазмы: солнечные радиовсплески III типа	page 54
13.00–13.15	K. KAPORTSEVA A. LUKASHENKO I. VESELOVSKY	Magnetohydrodynamic types of the solar wind and their sources	page 132
13.15–13.30	R. KISLOV V. KUZNETSOV O. KHABAROVA H. MALOVA V. OBRIDKO	MHD modeling of the high-latitude conic-like current sheets in the solar wind	page 137
13 30_15 00			

lunch break

размещение постеров placing of posters

. выставочный зал ИКИ IKI exhibition hall, ground floor

# ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ НА СОЛНЦЕ И В МЕЖПЛАНЕТНОМ ПРОСТРАНСТВЕ PHYSICAL PROCESSES ON THE SUN AND IN THE INTERPLANETARY SPACE

#### председатель – В. КУЗНЕЦОВ chair - V. KUZNETSOV

15.00–15.15	V. TENISHEV I. SOKOLOV A. MICHAEL M. OPHER T. GOMBOSI	Fluid-particle model for interaction of the solar wind with local interstellar medium	page 176
15.15–15.30	В. БАРАНОВ	Пересек ли аппарат Вояджер-1 гелиопаузу на 122 а.е.?	page 22
15.30–15.45	М. РЯЗАНЦЕВА Л. РАХМАНОВА Г. ЗАСТЕНКЕР Ю. ЕРМОЛАЕВ И. ЛОДКИНА Я. ШАФРАНКОВА З. НЕМЕЧЕК Л. ПРЕХ	Влияние динамических явлений в солнечной короне на формирование турбулентности солнечного ветра	page 79
15.45–16.00	Н. БОРОДКОВА В. ЕСЕЛЕВИЧ О. САПУНОВА Г. ЗАСТЕНКЕР Ю. ЕРМОЛАЕВ	Структура фронта бесстолкновительной косой межпланетной ударной волны по измерениям параметров плазмы солнечного ветра с высоким временным разрешением	page 34
16.00–16.15	O. KHABAROVA H. CREMADES O. MALANDRAKI L. MERENDA V. OBRIDKO R. KISLOV V. KUZNETSOV H. MALOVA A. KHARSHILADZE A. BEMPORAD	Polar reconnection jets and conic-like current sheets as sources of energetic particles at high heliolatitudes	page 136
16.00–16.15	A. VOLOKITIN C. KRAFFT	Emission of Electromagnetic Waves from Inhomogeneous Plasma with Langmuir Turbulence	page 193
16.30–16.50		перерыв на кофе coffee break зимний сад winter aarden	

6-program

#### ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЗЕМНОЙ МАГНИТОСФЕРЕ PHYSICAL PROCESSES IN THE MAGNETOSPHERE OF THE EARTH

председатель – Е. ГРИГОРЕНКО chair – E. GRIGORENKO

16.50–17.05	М. ПАНАСЮК Л. НОВИКОВ О. ГРАФОДАТСКИЙ	Роль К.И. Грингауза в решении проблемы электризации космических аппаратов	page 61
17.05–17.20	J. LEMAIRE G. VOITCU M. ECHIM	Charge separation electric field inside a plasmoid penetrating through a magnetic field distribution like that observed in the magnetopause region: particle-in-cell simulations, kinetic and magnetohydrodynamic approximations	page 155
17.20–17.35	Л. РАХМАНОВА М. РЯЗАНЦЕВА Г. ЗАСТЕНКЕР	Сравнение характеристик турбулентности плазмы перед и за головной ударной волной	page 78
17.35–17.50	Е. ПАРХОМЕНКО X. МАЛОВА E. ГРИГОРЕНКО B. ПОПОВ A. ПЕТРУКОВИЧ Д. ДЕЛЬКУР E. КРОНБЕРГ П. ДАЛИ Л. ЗЕЛЕНЫЙ	Ускорение частиц в бесстолкновительной плазме в процессе электрических и магнитных флуктуаций, сопровождающих магнитную диполяризацию в хвосте магнитосферы Земли	page 63
17.50–18.05	А. МАЛЫХИН Е. ГРИГОРЕНКО Р. КОЛЕВА Е. КРОНБЕРГ Р. DALY	Динамика потоков сверхтепловых ионов и электронов во время магнитной диполизации в ближнем хвосте магнитосферы Земли	page 49

#### четверг, 14 июня 2018 / thursday, 14 june 2018

09.30

регистрация registration

конференц-зал conference-hall

#### ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЗЕМНОЙ МАГНИТОСФЕРЕ PHYSICAL PROCESSES IN THE MAGNETOSPHERE OF THE EARTH

#### председатель – А. ПОТАПОВ

#### chair - A. POTAPOV

10.00–10.15	V. ISHKOV	Geoefficiency of solar active phenomena and Interplanetary space in the 24 <sup>th</sup> solar cycle	page 128
10.15–10.30	Р. КОВРАЖКИН А. ГЛАЗУНОВ Г. ВЛАДИМИРОВА Д. БАИШЕВ	Авроральные высыпания и иррегулярные пульсации при суббуриевой активности	page 45
10.30–10.45	Β. ΠΕΤΡΟΒ	Изменения структуры магнитосферы, связанные с предстоящей инверсией магнитного поля Земли	page 64
10.45–11.00	С. САВИН Л. ЛЕЖЕН	Как солнечный ветер узнает и реагирует на наступление ударной волны от Земли?	page 80
11.00–11.15	В. ТЁМНЫЙ	Сосуществование плазмы спокойного кольцевого тока и плазмосферы	page 87

program-7

#### 11.15–11.30 В. ПРОХОРЕНКО

Об опыте выбора орбит для космических экспериментов, исходя из задач проектов и на основе динамики ограниченной задачи трёх тел page 73

11.30–11.50

перерыв на кофе coffee break зимний сад winter garden

#### ПЛАЗМОСФЕРА И ПЛАЗМОПАУЗА PLASMASPHERE AND PLASMAPAUSE

председатель – E. ANTONOVA chair – E. ANTONOVA

11.50–12.05	G. KOTOVA	Studies of the Earth's plasmasphere using the data of the INTERBALL mission	page 143
12.05–12.20	А. ТАЩИЛИН	Моделирование совместной динамики главного ионосферного провала и плазмопаузы во время магнитной бури	page 86
12.20–12.35	YU. DUMIN	Refined model of the plasmaspheric corotation field	page 114
12.35–12.45	I. IEVENKO S. PARNIKOV	Observations of the SAR arcs during the overlap detection of energetic ion fluxes with the plasmapause aboard the Van Allen Probes	page 120
12.45–12.55	S. PARNIKOV I. IEVENKO	Observation of the SAR arc with pulsating precipitation of energetic particles using the all-sky imager and photometric data	page 159
12.55–13.10	D. CHUGUNIN G. KOTOVA M. KLIMENKO V. KLIMENKO	Longitudinal Dependence of plasmasphere from INTERBALL data	page 109
13.10–14.40		перерыв на обед lunch break	
		размещение постеров placing of posters	
		выставочный зал ИКИ	

IKI exhibition hall, ground floor

#### КОСМИЧЕСКАЯ ПОГОДА SPACE WEATHER

#### председатель – С. ПУЛИНЕЦ chair – S. PULINETS

14.40–15.00	T. GOMBOSI	Simulating space weather	page 115
15.00–15.15	E. ANTONOVA V. VOROBJEV I. KIRPICHEV I. OVCHINNIKOV O. YAGODKINA V. VOVCHENKO S. ZNATKOVA M. PULINETS N. SOTNIKOV S. MIT P. KAZARIAN M. STEPANOVA	Space weather prediction problems and the role of K.I. Gringauz in their solution	page 106
15.15–15.30	S. KLIMOV	Development of methods for measuring electric fields in space plasma	page 139

15.30–15.45 О. ЦАРЕВА В. ПОПОВ Х. МАЛОВА Л. ЗЕЛЕНЫЙ Е. ПОПОВА М. ПОДЗОЛКО Радиационная опасность на Земле и в околоземном пространстве в процессе инверсии магнитного поля page 99

15.45-16.05

перерыв на кофе coffee break зимний сад winter garden

# воспоминания

MEMORIALS

# председатель – Н. КЛЕЙМЕНОВА

chair – **N. KLEIMENOVA** 

16.05–16.25	M. VERIGIN	Konstantin losifovich Gringauz: Pioneer of space plasma studies	page 179
16.25–16.45	T. GOMBOSI	Gringauz and I	page 117
16.45–17.00	В. БЕЗРУКИХ	Первые прямые измерения холодной плазмы по дороге к Луне	page 23
17.00–17.15	В. АФОНИН	Впечатления от работы с проф. К.И. Грингаузом	page 16
17.15–17.30	К. ГРИНГАУЗ	Talk at the University of Leicester on 20 Jan., 1992 (short version)	
17.30-18.00		Выступления	
<b>17.30–18.00</b> 18.00–21.00		Выступления просмотр постеров poster session	
<b>17.30–18.00</b> 18.00–21.00		Выступления просмотр постеров poster session выставочный зал ИКИ IKI exhibition hall, ground floor	
17.30–18.00 18.00–21.00		Выступления просмотр постеров poster session выставочный зал ИКИ IKI exhibition hall, ground floor товарищеский ужин dinner	

#### пятница, 15 июня 2018 / friday, 15 june 2018

конференц-зал conference-hall

#### ИОНОСФЕРА IONOSPHERE

#### председатель – А. ТАЩИЛИН

#### chair - A. TASHILIN

10.00–10.15	S. PULINETS N. IZHOVKINA Z. KŁOS	From ARAKS to APEX	page 167
10.15–10.30	А. СТЕПАНОВ В. ХАЛИПОВ И. ГОЛИКОВ Е. БОНДАРЬ	Поляризационный джет: узкие и быстрые дрейфы субавроральной ионосферной плазмы	page 83
10.30–10.45	M. DEMINOV V. SHUBIN	Simple empirical model of the main ionospheric trough position	page 112
10.45–11.00	В. ПИЛИПЕНКО В. ЗАХАРОВ В. ГРУШИН С. КЛИМОВ В. МАРТИНЕС- БЕДЕНКО	Поиски возмущений верхней ионосферы и геомагнитного поля над тайфунами по данным низкоорбитальных спутников	page 68
11.00–11.15	A. KRIVOLUTSKY	Solar plasma forcing on the atmospheres of the Earth and Mars	page 149

11.15–11.35

перерыв на кофе coffee break зимний сад winter garden

#### ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА С ПЛАНЕТАМИ И КОМЕТАМИ SOLAR WIND INTERACTION WITH PLANETS AND COMETS

председатель – Т. ГОМБОШИ

chair – T. GOMBOSI

11.35–11.50	M. TATRALLYAY Z. NEMETH A. TIMAR M. VERIGIN I. APATHY	Interplanetary effects on cometary plasma boundaries	page 174
11.50–12.05	В. БАРАНОВ	Магнитогидродинамическая модель обтекания комет солнечным ветром. Теория и эксперимент	page 21
12.05–12.20	О. ВАЙСБЕРГ	Магнитосфера Марса – открытие, исследования, новые результаты	page 35
12.20–12.35	A. FEDOROV <u>A. GRIGORIEV</u> E. KNIZHNIKOVA S. BARABASH	Ion fluxes and ion distribution function moments in the Martian and Venusian magnetospheres for 2007–2017 time interval. The data of the ASPERA instrument onboard Mars Express and Venus Express missions	page 119
12.35–12.50	M. VERIGIN G. KOTOVA	Total oxygen loss from Mars and how to evaluate it by in-situ measurements	page 190
12.50–13.05	E. GRIGORENKO S. SHUVALOV H. MALOVA L. ZELENYI	A multiscale structure of the cross-tail current sheet and its relation to the ion composition according to MAVEN observations in the Martian magnetotail	page 118
13.05–13.20	I. ALEXEEV E. BELENKAYA S. COWLEY V. KALEGAEV A. LAVRUCHIN D. PARUNAKIAN I. PENSIONEROV	Alfvenic current systems in the Jupiter's and Saturn's magnetospheres	page 105
13.20–13.35	А. ГАВРИК О. ВАЙСБЕРГ	Сравнение концентрации электронов и тяжелых ионов в комете Галлея	page 36
13.35–13.45	<b>Л. ЗЕЛЕНЫЙ</b> председатель программного комитета	Закрытие конференции	
	L. ZELENYI chairman of the Program committee	Closing remarks	
13.45–15.15		перерыв на обед lunch break	
		снятие постеров taking off posters	
		выставочный зал ИКИ IKI exhibition hall, ground floor	

#### СТЕНДОВЫЕ ДОКЛАДЫ / POSTERS

размер стенда 100×240 см / the size of the stand is 100×240 ст

#### ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ НА СОЛНЦЕ И В МЕЖПЛАНЕТНОМ ПРОСТРАНСТВЕ PHYSICAL PROCESSES ON THE SUN AND IN THE INTERPLANETARY SPACE

1	О. САПУНОВА Н. БОРОДКОВА Г. ЗАСТЕНКЕР	Исследование тонкой структуры фронта межпланетных ударных волн, зарегистрированных прибором БМСВ	page 81
2	И. НИКУЛИН	Структура корональных выбросов массы и ускорение частиц	page 57
3	В. ОЖЕРЕДОВ	Алгоритм сегментации связных областей на изображениях Солнца	page 58
4	K. KECSKEMETY E. DAIBOG YU. LOGACHEV	Variations of solar wind speed, Jovian Mev-energy electrons and galactic protons	page 134
5	А. ПОТАПОВ Б. ДОВБНЯ А. ГУЛЬЕЛЬМИ	Серпентинная эмиссия как отражение волновых процессов на Солнце и в солнечном ветре	page 72
6	D. PARUNAKIAN E. BELENKAYA I. ALEXEEV	Analysis of solar wind parameters using the SWAMP visualisation tool	page 162
7	Е. ПОПОВА	Генерация волн магнитного поля в небесных телах от пространственно разделенных источников	page 69
8	V. KOZLOV	Detection by cosmic rays of the transition regime of solar wind to the active phase of a solar cycle	page 148
9	R. KISLOV H. MALOVA O. KHABAROVA	Is the heliospheric current sheet the only one equilibrium current sheet of the Heliosphere?	page 138
10	А. АБУНИН М. АБУНИНА А. БЕЛОВ С. ГАЙДАШ Е. ЕРОШЕНКО В. ОЛЕНЕВА	Возможности базы данных Форбуш-эффектов и межпланетных возмущений	page 13

- И. ПРЯМУШКИНА
- В. ЯНКЕ

#### ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЗЕМНОЙ МАГНИТОСФЕРЕ PHYSICAL PROCESSES IN THE MAGNETOSPHERE OF THE EARTH

11	В. БЕЛАХОВСКИЙ	Остается ли межпланетная ударная волна ударной внутри магнитосферы?	page 28
12	G. STANEV N. SMIRNOVA S. ASENOVSKI L. TODORIEVA HR. LUKARSKI	Determining the photoelectron current from spacecraft surface using electric field sensors data	page 171
13	А. ПОТАПОВ Т. ПОЛЮШКИНА Р. РАХМАТУЛИН А. ПАШИНИН	Модуляция амплитуды дневных геомагнитных пульсаций альвеновской турбулентностью перед фронтом околоземной ударной волны	page 70
14	Ф. ФЕЙГИН А. НЕКРАСОВ	Влияние нелинейности геомагнитных пульсаций на модификацию фоновой плазмы в магнитосфере Земли	page 88

#### ПЛАЗМОСФЕРА И ПЛАЗМОПАУЗА PLASMASPHERE AND PLASMAPAUSE

15 V. PIERRARD What new observations and kinetic simulations page 165 F. DARROUZET of the plasmasphere reveal on the inner G. LOPEZ ROSSON magnetosphere J. LEMAIRE

	16	Н. КЛЕЙМЕНОВА Ф. ФЕЙГИН Л. МАЛЫШЕВА Ю. ХАБАЗИН	Влияние плазмопаузы на ОНЧ излучения и геомагнитные пульсации Рс1	page 43						
	17	В. ХАЛИПОВ В. БЕЗРУКИХ А. СТЕПАНОВ И. ИЕВЕНКО В. ПАНЧЕНКО В. БОГДАНОВ	Физические процессы на L-оболочках вблизи плазмопаузы	page 91						
	18	I. IEVENKO S. PARNIKOV D. BAISHEV	Observation of the SAR arc and proton aurora dynamics as a consequence of eastward propagation of the Pc1 waves excitation region along the plasmapause	page 122						
			КОСМИЧЕСКАЯ ПОГОДА SPACE WEATHER							
	19	V. TIMOFEEV	The influence of Jupiter and Mars on the parameters of space weather	page 178						
	20	T. KOGAI O. KHABAROVA O. MINGALEV	Pre-storm ULF variations in the solar wind density and interplanetary magnetic field as key parameters to build a mid-term prognosis of geomagnetic storms	page 140						
	21	Н. ЯГОВА В. ПИЛИПЕНКО О. КОЗЫРЕВА	Вероятности возникновения и возможности прогноза экстремальных возмущений космической погоды	page 104						
	22	А. ХАРИТОНОВ	Изучение влияния специфических неоднородностей солнечного ветра на сейсмические процессы на Земле по спутниковым данным	page 95						
ВОСПОМИНАНИЯ MEMORIALS										
			MEMORIALS							
	23	WING-HUEN IP	MEMORIALS Gringauz and Kokoschka	page 125						
	23	WING-HUEN IP	MEMORIALS Gringauz and Kokoschka ИОНОСФЕРА IONOSPHERE	page 125						
	23 24	WING-HUEN IP А. КУЗЬМИН	MEMORIALS Gringauz and Kokoschka ИОНОСФЕРА IONOSPHERE Перспективы развития в России авроральной оптической диагностики с орбит	page 125 page 46						
	23 24 25	WING-HUEN IP А. КУЗЬМИН А. VOLOKITIN В. ATAMANIUK	MEMORIALS Gringauz and Kokoschka ИОНОСФЕРА IONOSPHERE Перспективы развития в России авроральной оптической диагностики с орбит Wave focusing in plasma with small-scale fluctuations of density	page 125 page 46 page 195						
	23 24 25 26	WING-HUEN IP А. КУЗЬМИН А. VOLOKITIN В. ATAMANIUK N. IZHOVKINA	MEMORIALS   Gringauz and Kokoschka   ИОНОСФЕРА ІОNOSPHERE   Перспективы развития в России авроральной оптической диагностики с орбит   Wave focusing in plasma with small-scale fluctuations of density   Dynamics of inhomogeneous plasma and electrostatic turbulent fields in ARAKS experiments	page 125 page 46 page 195 page 131						
	23 24 25 26 27	WING-HUEN IP A. КУЗЬМИН A. VOLOKITIN B. ATAMANIUK N. IZHOVKINA B. БОГДАНОВ	MEMORIALS   Gringauz and Kokoschka   ИОНОСФЕРА ІОNOSPHERE   Перспективы развития в России авроральной оптической диагностики с орбит   Wave focusing in plasma with small-scale fluctuations of density   Dynamics of inhomogeneous plasma and electrostatic turbulent fields in ARAKS experiments   Изучение влияния зимних циклонов на распределение электронов в ионосфере над Камчаткой в условиях пониженной сейсмичности средствами радиотомографии	page 125 page 46 page 195 page 131 page 29						
	23 24 25 26 27	WING-HUEN IP А. КУЗЬМИН А. VOLOKITIN В. АТАМАNIUK N. IZHOVKINA В. БОГДАНОВ ВЗАИ	MEMORIALS Gringauz and Kokoschka UOHOCФЕРА IONOSPHERE Перспективы развития в России авроральной оптической диагностики с орбит Wave focusing in plasma with small-scale fluctuations of density Dynamics of inhomogeneous plasma and electrostatic turbulent fields in ARAKS experiments Изучение влияния зимних циклонов на распределение электронов в ионосфере над Камчаткой в условиях пониженной сейсмичности средствами радиотомографии MODEMCTBИE COЛНЕЧНОГО ВЕТРА С ПЛАНЕТАМИ И КОМЕТАМИ SOLAR WIND INTERACTION WITH PLANETS AND COMETS	page 125 page 46 page 195 page 131 page 29						
	23 24 25 26 27 27	WING-HUEN IP А. КУЗЬМИН А. КУЗЬМИН В. АТАМАNIUК В. АТАМАNIUК В. БОГДАНОВ В. БОГДАНОВ В. БОГДАНОВ В. ВЗАИ	МЕМОRIALSGringauz and KokoschkaИОНОСФЕРА ІОНОЅРНЕКЕПерспективы развития в России авроральной оптической диагностики с орбитWave focusing in plasma with small-scale fluctuations of densityDynamics of inhomogeneous plasma and electrostatic turbulent fields in ARAKS ехрегітемтьИзучение влияния зимних циклонов на распределение электронов в ионосфере над Камчаткой в условиях пониженной сейсмичности средствами радиотомографииМОДЕЙСТВИЕ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА С ПЛАНЕТАМИ И КОМЕТАМИ SOLAR WIND INTERACTION WITH PLANETS AND COMETSThe next big thing: the second coming of comet Halley in the space age	page 125 page 46 page 195 page 131 page 29						
	23 24 25 26 27 27 28 28 29	WING-HUEN IP A. КУЗЬМИН A. КУЗЬМИН B. ATAMANIUK D. IZHOVKINA B. БОГДАНОВ B. БОГДАНОВ B. SOГДАНОВ B. SOLUALOV O. VAISBERG	MEMORIALS   Gringauz and Kokoschka   ИОНОСФЕРА IONOSPHERE   Перспективы развития в России авроральной оптической диагностики с орбит   Wave focusing in plasma with small-scale fluctuations of density   Dynamics of inhomogeneous plasma and electrostatic turbulent fields in ARAKS experiments   Изучение влияния зимних циклонов на распределение электронов в ионосфере над Камчаткой в условиях пониженной сейсмичности средствами радиотомографии   МОДЕЙСТВИЕ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА С ПЛАНЕТАМИ И КОМЕТАМИ SOLAR WIND INTERACTION WITH PLANETS AND COMETS   The next big thing: the second coming of comet Halley in the space age   Mass loading influence on the structure of Martian bow shock	page 125 page 46 page 195 page 131 page 29 page 29						

# Martian Crater Gringauz

# ГРИНГАУ3100GRINGAUZ

# ВОЗМОЖНОСТИ БАЗЫ ДАННЫХ ФОРБУШ-ЭФФЕКТОВ И МЕЖПЛАНЕТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

### А.А. Абунин<sup>1,2</sup>, М.А. Абунина<sup>1</sup>, А.В. Белов<sup>1</sup>, С.П. Гайдаш<sup>1</sup>, Е.А. Ерошенко<sup>1</sup>, В.А. Оленева<sup>1</sup>, И.И. Прямушкина<sup>3</sup>, В.Г. Янке<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ИЗМИРАН, Москва, Россия; abunin@izmiran.ru

<sup>2</sup> КалмГУ, Элиста, Россия

<sup>3</sup> ГАПОУ БНК, г. Бугуруслан, Россия; spensor47@mail.ru

# КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

космическая погода, Форбуш-эффекты, галактические космические лучи, геомагнитные бури

# введение

Одной из актуальных фундаментальных и прикладных задач солнечно-земной физики является заблаговременное прогнозирование параметров космической погоды и оценка ее влияния на различные природные, технологические и биологические системы, находящиеся как на Земле или в околоземном пространстве, так и в любой точке солнечной системы [1]. Само состояние космической погоды определяется, прежде всего, солнечной активностью. Именно Солнце отвечает за создание рекуррентных (от высокоскоростных потоков из корональных дыр) и спорадических (от корональных выбросов масс) возмущений межпланетной среды. Влияние космической погоды на нашу повседневную жизнь нельзя недооценивать, поскольку она влияет на многие её аспекты – как на объекты земного, так и космического базирования [2,3]. Это воздействие необходимо уметь качественно прогнозировать, а затем учитывать, используя ранее полученный опыт.

По большому счету, прогнозирование состояния космической погоды сводится к прогнозированию солнечной и геомагнитной активности, а также потоков различных частиц (галактических и солнечных космических лучей, релятивистских электронов магнитосферного происхождения и т.д.). Модель прогнозирования того или иного параметра можно построить используя разный подход. Например, можно получить результат теоретически, путем решения сложных систем уравнений, описывающих солнечную активность, перенос и трансформацию соответствующего возмущения в межпланетном пространстве и взаимодействие магнитных неоднородностей с магнитосферой Земли. Но такой путь является очень трудным и, зачастую, из-за сложности общей картины взаимодействий невыполнимым даже в самых простых случаях. Другим, более простым путем является получение взаимосвязей между различными параметра-МИ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИМИ КОСМИЧЕСКУЮ ПОГОДУ НА ОСНОВЕ СТАТИСТИЧЕСКОГО, сравнительного или регрессионного анализа. Причем, чем больше событий будет рассматриваться, тем более точно можно определить эти связь. Примеры как раз таких исследований, на основе анализа большого количества событий, будут рассматриваться далее.

# ДАННЫЕ И МЕТОДЫ

Для всестороннего изучения солнечных, межпланетных и геомагнитных возмущений сотрудниками ИЗМИРАН была создана и непрерывно пополняется уникальная база данных – база данных транзиентных явлений в космических лучах и межпланетной среде (*Database of Forbush-effects and interplanetary disturbances – FEID*) [4–7]. В ней вариации плотности

и анизотропии галактических космических лучей (КЛ) объединены с солнечными, межпланетными и геомагнитными параметрами. Именно КЛ взяты за основу данного инструмента. Потоки этих ультраэнергичных частиц, принизывая межпланетное пространство, модулируются, интегрируя информацию о магнитных неоднородностях и местах, через которых пролетают. В базе данных КЛ представлены результатами глобальной съемки по данным всей мировой сети нейтронных мониторов для жесткости 10 ГВ. Информация по солнечному ветру взята из базы данных *OMNI*, а данные по геомагнитной активности из WDC Kyoto (http://wdc.kugi. kyoto-u.ac.jp) и GFZ Potsdam (ftp://ftp.gfz-potsdam.de).

На текущий момент *FEID* включает в себя более 7100 событий, охватывающих более чем полувековой период наблюдений (1957–2017), каждое из которых описывается более сотней параметров. Можно с уверенностью сказать, что это самая большая и полная база данных межпланетных возмущений в мире. На основе *FEID* был создан и выложен в сеть Интернет каталог с аналогичной информацией (http://spaceweather.izmiran.ru/rus/ dbs.html).

# ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ ИЗ FEID

Предлагаемая уникальная база данных транзиентных явлений в космических лучах и межпланетной среде является не только банком хранения информации о межпланетных возмущениях, но и удобным инструментом для ее обработки, позволяя выполнять различного рода анализ этих данных (статистический, сравнительный, регрессионный и т.д.), выдавая запрашиваемую информацию в числовой и графических формах. В научной среде можно найти множество публикаций и диссертаций, которые опираются на информацию о межпланетных возмущений, взятую именно из этой базы данных. Далее приведены несколько примеров использования *FEID*.

В работе [8] анализировались события с внезапным и постепенным началами (всего 3455 событий). В ходе анализа было выявлено, что группа событий с внезапным началом отличается от группы с постепенным началом не только количественно, но и качественно. Полученные результаты говорят в пользу того, что в выделенных группах преобладают разные механизмы модуляции космических лучей. А точнее, события в первой группе в большей мере обусловлены выбросами солнечного вещества, в то время как значительная часть событий второй группы – высокоскоростными потоками плазмы из корональных дыр.

В работе [9] изучалась связь параметров возмущений с гелиодолготой солнечного источника. Было проанализировано 334 события из базы данных *FEID*, уверенно отождествленных с соответствующим солнечным источником. Все события были поделены на пять секторов. В ходе анализа было показано, что эффективность создания Форбуш-эффектов и геомагнитных бурь у источников с различной гелиодолготой различна. Кроме того, было установлено, что, в зависимости от гелиодолготы источника возмущения межпланетной среды, поведение анизотропии галактических космических лучей существенно отличается. Таким образом, имея информацию только о галактических космических лучах и умея её правильно расшифровывать, можно определить множество параметров межпланетного возмущения.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ большого количества событий, позволяет получать статистические зависимости между различными параметрами, характеризующими состояние космической погоды. Это, в свою очередь, позволяет с определенной долей вероятности оценивать влияние космической погоды на объекты космического и наземного базирования. Созданная сотрудниками ИЗМИРАН база за данных транзиентных явлений в космических лучах и межпланетной среде не является единственной разработкой данной группы ученых. Существует еще ряд баз данных, которые охватывают большой временной интервал и содержат множество параметров: геомагнитных возмущений (1868–2018), солнечной активности (1975–2018), вариаций космических лучей (1957–2018), корональных выбросов масс (1996–2018), корональных дыр и т.д.

Используя эти базы данных, получены статистические закономерности, которые входят в основу разработанных моделей для реализации краткосрочных, среднесрочных и долгосрочных прогнозов по каждому из направлений космической погоды. Непрерывное пополнение свежей информацией и своевременный перерасчет зависимостей между параметрами позволяет всегда держать базы и модели в актуальном состоянии. А сам результат такого анализа используется в ежедневной работе Центра прогнозов космической погоды ИЗМИРАН для обеспечения своих потребителей необходимой информацией уже 20 лет, начиная с 1998 года.

# БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена с использованием оборудования УНУ «Сеть СКЛ». Работа частично поддержана в рамках грантов РФФИ № 17-02-00508 и РНФ № 15-12-20001. Мы также признательны всем сотрудникам сети станций КЛ http://cr0.izmiran.ru/ThankYou.

# ЛИТЕРАТУРА

- Gaidash S.P., Belov A.V., Abunina M.A., Abunin A.A. Space Weather Forecasting at IZMIRAN // Geomagnetism and Aeronomy. 2017. V.57. № 7. P. 869-876.
- [2] Белов А.В., Вилорези Дж., Дорман Л.И., Ерошенко Е.А., Левитин А.Е., Паризи М., Птицына Н.Г., Тясто М.И., Чиженков В.А., Ючии Н., Янке В.Г. Влияние космической среды на функционирование искусственных спутников Земли // Геомагнетизм и аэрономия. 2004. Т.44. № 4. С. 502-510.
- [3] Eroshenko E., Belov A., Boteler D., Gaidash S., Lobkov S., Pirjola R., Trichtchenko L. Effects of strong geomagnetic storms on Northern railways in Russia // Advances in Space Research. 2010. V.46. № 9. P. 1102-1110.
- [4] Belov A.V., Eroshenko E.A., Yanke V.G. Modulation Effects in 1991-1992 Years // Proc. 25th Int. Cosmic Ray Conf., Durban. 1997. V.1. P. 437-440.
- [5] Belov A.V., Eroshenko E.A., Yanke V.G. Global and local indices of cosmic ray activity // Proc. 26th Int. Cosmic Ray Conf. Salt Lake City. 1999. V. 6. P. 472-475.
- [6] Абунин А.А. Характеристики Форбуш-эффектов и их связь с солнечными, межпланетными и геомагнитными возмущениями: диссертация на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук: 01.03.03 // Абунин Артем Анатольевич. Москва. 2014. 155 с.
- [7] Belov A., Abunin A., Eroshenko E., Abunina M., Oleneva V., Yanke V. Database on the Forbush-effects and interplanetary disturbances to study Earth-affecting solar transients // VarSITI Newsletter. 2017. V.14. P. 8-10.
- [8] Абунин А.А., Абунина М.А., Белов А.В., Ерошенко Е.А., Оленева В.А., Янке В.Г. Форбуш-эффекты с внезапным и постепенным началом // Геомагнетизм и Аэрономия. 2012. Т.52. № 3. С. 313-320.
- [9] Абунина М.А., Абунин А.А., Белов А.В., Ерошенко Е.А., Асипенка А.С., Оленева В.А., Янке В.Г. Связь параметров форбуш-эффектов с гелиодолготой солнечных источников // Геомагнетизм и Аэрономия. 2013. Т.53. № 1. С. 13-22.

# ВПЕЧАТЛЕНИЯ ОТ РАБОТЫ С ПРОФ. К.И. ГРИНГАУЗОМ

### В.В. Афонин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва, Россия

# КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Грингауз – экспериментатор «от Бога», о человеческих качествах КИ, КИ не был формалистом, КИ думал об окружающих, КИ доверял людям, стратегия проведения космических экспериментов

# введение

Я окончил Московский физико-технический институт в 1963 году и начал работать в Радиотехническом институте АН СССР (РТИ АН). При этом, еще будучи студентом 3-го курса, проходил практику в РТИ АН.

Когда в 1963 году я начал работать в РТИ АН, в отделе Грингауза были получены первые данные со спутника «Космос-2» запущенного 6.IV.1962. Задачей этого спутника было получение данных в областях выше 1000 км в ночных и сумеречных условиях, а также получение данных об ионной температуре впервые применёнными сотовыми ловушками с особо узкой диаграммой направленности. С помощью таких ловушек было впервые показано, что значения ионной температуры были более чем в два раза ниже электронной температуры, что свидетельствовало об отсутствии диффузионного равновесия на этих высотах.

# КОНСТАНТИН ИОСИФОВИЧ ГРИНГАУЗ – ЭКСПЕРИМЕНТАТОР «ОТ БОГА»

О Константине Иосифовиче Грингаузе, авторе и исполнителе знаменитого «Бип-Бип» (единственный научный прибор на первом в мире искусственном спутнике Земли; заслуга К.И. Грингауза состояла в том, что он не только в кратчайшие сроки изготовил передатчик, но и правильно выбрал частоты его работы так, что он был слышен на Земле даже радиолюбителям), о его экспериментальной и научной деятельности, о его пионерских результатах и их значении в исследовании околоземного и межпланетного пространства написано много в отечественной и зарубежной литературе как его российскими, так и зарубежными коллегами. Я хочу рассказать о некоторых чертах К.И. Грингауза, которые не видны были «снаружи».

После того, когда эксперимент проведен, результат получен, начинается его дальнейшая жизнь, не всегда прямая и безмятежная. Именно такова судьба почти всех новых результатов К.И. Грингауза, поскольку он практически всегда был "первым". Не все полученные им результаты воспринимались научной общественностью сразу же после их опубликования, но практически всегда они в конце концов получали должное признание.

Я впервые увидел Константина Иосифовича весной 1960 г., будучи студентом 2-го курса МФТИ, когда наша группа (12 человек) знакомилась с «базовым» институтом – Радиотехническим институтом АН СССР, в котором нам предстояло проводить большую часть учебного времени (от 3 дней на третьем курсе и практически все время на 6-м). В это время он заведовал отделом, состоящим из 3 лабораторий, одна из которых занималась радиометодами исследования ионосферы (зав. В.А. Рудаков), а две другие – прямыми (зондовыми) методами исследования ионосферной (зав. Б.Н. Горожанкин) и межпланетной плазмы (зав. К.И. Грингауз). В его коллективе мы все называли его кратко «КИ». Такое сокращение имени-отчества свидетельствовало об уважении и непререкаемом авторитете в коллективе.

В подходе КИ к экспериментальной работе (разработка и изготовление аппаратуры и проведение экспериментов) четко прослеживались два принципа. Первый из них: методика. Аппаратура должны быть как можно более простой, как по принципу работы, так и в интерпретации результатов. Именно поэтому в экспериментах коллектива КИ в большинстве случаев использовались в качестве датчиков (чувствительных элементов) ионные ловушки (анализаторы с тормозящим потенциалом). Второй принцип состоял в том, что наш отдел всегда был «производственно-независимым», то есть для производства научных приборов ему не требовалась помощь других институтов или предприятий и дополнительное финансирование (помимо имеюшегося у его коллектива и, в минимальной степени, инфраструктуры института, в котором мы работали). Именно поэтому в его сравнительно небольшом отделе в РТИ АН помимо 3-х научных лабораторий имелось «свое» КБ (в которое в разное время входило до 4 конструкторов и которым бессменно, вплоть до перехода в 1970 г. в ИКИ РАН и несколько лет далее руководил А.В. Воробьев) и «своя» мастерская (2 токаря, 1 фрезеровщик и 3-4 механика). Мастерская была оборудована так, что отдел КИ мог полностью изготавливать бортовые приборы – за исключением некоторых специальных технологических операций – окраска, пропитка, нанесение специальных покрытий и т.д. - и изготовления датчиков. Почти все приборы для ранних экспериментов КИ, включая межпланетные, изготавливались «самостоятельно». К началу 1970-х годов сложилась устойчивая кооперация с Одесским политехническим институтом, одна из кафедр которого фактически являлась «приборостроительным филиалом» отдела. После перехода в ИКИ эта «самостоятельность» постепенно сходила на нет, и к началу 80-х годов коллектив К.И. Грингауза практически перестал самостоятельно изготавливать бортовые приборы, что было вызвано и тем, что к этому времени производство приборов значительно усложнилось, появились новые технологии, сменилась элементная база. Все датчики для космических экспериментов К.И. Грингауза, начиная со знаменитой сферической ионной ловушки на 3-м ИСЗ, изготавливались в другом «филиале» отдела – в отделе, потом лаборатории, Вакуумного института (Институт им. С.А. Векшинского), которыми руководили, начиная с 50-х годов последовательно Р.Е. Рыбчинский, Г.И. Волков и Л.И. Денщикова. Последний «датчик», весьма сложный прибор МАРИПРОБ (проект Марс-96) продолжал разрабатываться в НИИ Векшинского и после смерти К.И. Грингауза вплоть до 1995 г. Однако к этому времени, в связи с общим упадком промышленности в России, эффективная разработка оказалась невозможной, и эта работа фактически выполнялась в ИКИ на базе остатков от созданной КИ мастерской и части оборудования, взятого во временное пользование в НИИ им. С.А. Векшинского. Хорошим примером эффективности «производственной независимости» является проведение полного цикла работ по подготовке космического эксперимента для орбитальной космической станции Салют-1 в очень сжатые сроки. В 1970 г. в течение 3 месяцев в отделе К.И. Грингауза был разработан, изготовлен, испытан и поставлен сложный интерактивный эксперимент по измерению параметров ионосферы. Предполагалось, что космонавт будет наблюдать, контролировать и управлять процессом измерений плазмы, наблюдая на экране процесс измерений.

Несмотря на то, что как по образованию, так и по опыту работы КИ занимался распространением радиоволн, он обладал удивительным физическим «чутьем» во многих областях физики и техники. Меня удивляло, что очень часто при обсуждении чисто технических вопросов, связанных с разработкой аппаратуры, он высказывал мнения, оказывавшиеся впоследствии правильными. Просматривая многочисленные копии статей и препринтов, с которыми он работал, легко видеть по его заметкам, что его интересовали вопросы, достаточно далеко лежащие от круга его основных интересов.

Если речь шла об успехе эксперимента, для КИ не существовало «авторитетов» или «политических» соображений. Имеется в виду, что все космические эксперименты проводятся по определенным планам, утвержденным на высоком уровне, нарушать которые было крайне нежелательно, особенно на последних этапах, когда приборы уже находятся на полигоне в руках военных, проводящих запуск. Во время запуска ракеты «Вертикаль-10» произошел такой случай. На полигоне Капустин Яр проходили предстартовые работы и присутствовали не только российские, но и зарубежные ученые. Как всегда, а особенно из-за присутствия иностранцев, работы проводились в сжатые сроки. Это происходило параллельно – сама ракета, аппаратура, отделяемый контейнер, наземные службы. Особенностью этого запуска было то, что для достижения чистоты экспериментов, вся аппаратура устанавливалась на отделяемом герметичном контейнере, причем как к приборам, так и к контейнеру предъявлялись высокие требования по химической чистоте. Когда прошли заключительные комплексные испытания контейнера с научной аппаратурой, и была проведена окончательная сборка герметичного отделяемого контейнера, выяснилось, что при сборке обслуживающий персонал от военных в соответствии с инструкцией использовал новые болты для сборки корпуса. Как всегда, болты были в промышленной промасленной упаковке, и, так как в их инструкции не было других специальных требований, болты не были очишены от масла (обычно это делается многократной промывкой в спирте и других очищающих жидкостях). Возникла ситуация – продолжать работу и вывозить ракету на старт и тогда все работы будут выполнены по плану, или разбирать контейнер, очищать болты, повторять достаточно длительный цикл испытаний и т.д. Никто не брал на себя ответственности за возможный срыв работ. Возможные последствия заключались в том, что могли быть искажены результаты масс-спектрометрических измерений. Это практически не затрагивало «нашу» (т.е., КИ) аппаратуру, и могло лишь повлиять на интерпретацию данных комплекса экспериментов в целом. В этой ситуации наиболее ярко проявилась нетерпимость КИ к любым отклонениям от высоких требований, предъявляемых к космическому эксперименту, – именно КИ настоял на задержке забот и устранении выявленного дефекта в подготовке. В той ситуации это смог сделать только он.

КИ сам был убежден, что любое затруднение в практической работе, даже такое, которое на первый взгляд выглядит как непреодолимое, можно преодолеть, приложив достаточное количество усилий. В этом я убеждался неоднократно. Для меня лично его «разгоны», которые каждый руководитель время от времени устраивает своим подчиненным, всегда были, к моему удивлению, весьма полезными. Когда я, «закопавшись» в деталях, долго не выполнял какую-нибудь работу и, соответственно, получал разгон, то уходил из его кабинета всегда с приливом сил и желанием немедленно разрешить проблему, свергнуть горы. Дело, конечно, не в простой боязни подчиненного быть «наказанным», а в том, что КИ умел убедить ругаемого не только в важности дела, но и показать оптимальный путь решения (в чем проявлялось его физическое чутье и интуиция). Он был хорошим организатором, и, если того требовал эксперимент, преодолевал обычно непреодолимые препятствия. Однажды, за полтора месяца до отправки прибора на полигон, в собранном приборе обнаружилось, что в каналах измерения зондовых токов имеются повышенные помехи (начало 60-х, спутник «Космос-2»). В принципе, прибор можно было запускать в таком виде, но качество результатов пострадало бы. КИ привлек к этой работе всех сотрудников достаточно большого отдела и сумел убедить всех так, что в течение полутора месяцев около 15 человек практически не выходили из лаборатории. В конце концов, задача была решена.

Такой подход, в сочетании принципом простоты приборов, всегда давал ему уверенность в полученных результатах и позволял жестко их отстаивать. Именно тщательность в подготовке экспериментов придавала ему уверенность в полученных результатах и позволяла говорить: «Прибор не врет». КИ был, как говорят, ЭКСПЕРИМЕНТАТОРОМ от бога. К сожалению, в последние годы уровень подготовки космических экспериментов по сравнению с первыми десятилетиями космической эры снизился.

# О ЧЕЛОВЕЧЕСКИХ КАЧЕСТВАХ КИ

О том, что это был высокообразованный и высококультурный человек, отличающийся широчайшим кругозором, от литературы и искусства до бардов и политики, отмечалось многими его коллегами. Мне хочется просто привести некоторые примеры из жизни, которые характеризуют его как человека.

#### КИ не был формалистом.

Несмотря на то, что о нем сложилось мнение как о жестком и непримиримом оппоненте в научных спорах, в обыденной жизни он был весьма терпимым, чутким и отзывчивым. Я никогда не слышал от него в свой адрес или в адрес других сотрудников замечаний об опозданиях или каких-либо других нарушениях дисциплины (обычных в трудовых коллективах). Когда на работе он обнаруживал, что мы используем очищающие жидкости не в соответствии с инструкциями по эксплуатации приборов, он не реагировал.

#### КИ думал об окружающих.

Существует такое деление людей: одни в первую очередь думают о себе, о своих удобствах, а другие – об окружающих. КИ относился, по моим наблюдениям, ко второй категории. Однажды во время очередного приема у него дома, я, наливая кому-то чай, три раза подряд забывал придерживать крышку заварного чайника (застолье было долгим до чая, а сервиз был дорогой и дело происходило в эпоху всеобщих дефицитов) и крышка каждый раз падала на посуду, ни он, ни его жена Ирина Николаевна, не сказали мне ни слова.

### КИ доверял людям.

Когда я был еще студентом, мы на почве любви к бардам, обменивались записями. У него был роскошный по тем временам ленточный магнитофон Grundig. Он, фактически не зная меня, оставлял мне ключи от своей квартиры, чтобы я мог делать перезаписи. Это меня поразило. Хотя он был известным ученым мирового класса и был полностью поглощен наукой, к нему можно применить известную фразу: ничто человеческое ему не было чуждо. Когда в 1968 г. мы с ним оказались в Берлине (ГДР) и гуляли по городу, мы поспорили на бутылку коньяка – кто первый увидит симпатичную женщину.

# СТРАТЕГИЯ ПРОВЕДЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

И последнее, что следует отметить. В результате работы течение нескольких десятилетий по подготовке и проведению космических экспериментов у меня сложилось абсолютно неоспоримое, на мой взгляд, убеждение: малейшая мелочь, пропущенная или сделанная не должным образом в процессе многолетней подготовки космического эксперимента (считается, что весь цикл подготовки и проведения таких экспериментов составляет обычно 5–7 лет) обязательно проявится в полете и приведет к ухудшению качества эксперимента. Я не могу утверждать, что это его формулировка, но совершенно определенно, что она сложилась под его влиянием и полностью отражает подход К.И.Грингауза к проведению космических экспериментов.

В определенном смысле, К.И. Грингауз до сих пор является нашим руководителем, и мы часто вспоминаем его в текущей работе.

# МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОБТЕКАНИЯ КОМЕТ СОЛНЕЧНЫМ ВЕТРОМ. ТЕОРИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТ

## В.Б. Баранов

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН; Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Пионерская работа [1], в которой изложены основные физические предпосылки для использования гидродинамического приближения для создания моделей взаимодействия солнечного ветра с кометными атмосферами, инициировала большое количество работ для интерпретации экспериментальных данных по этой проблеме, полученных при помощи космических аппаратов. Впервые в работе [2] в рамках качественной модели [1] был проведен полный численный расчет обтекания кометы Галлея солнечным ветром. Однако в гидродинамических моделях не учитывалось влияние межпланетного поля, которое может оказывать достаточно сильное влияние на положение и форму кометной ионопаузы, которую часто неправильно называют «контактным разрывом» (при наличии магнитного поля такой разрыв является тангенциальным).

В предлагаемом докладе приводятся результаты магнитогидро-динамических (МГД) моделей для случаев взаимодействия солнечного ветра с кометами Галлея, Григга – Шеллерупа и Чурюмова – Герасименко в момент прохождения этих комет перигелия. Результаты сравниваются с экспериментальными данными, полученными при помощи космических аппаратов Вега-1, Вега-2, Джотто, Суиссеи (в марте 1986 года), Джотто (в июле 1992 года) и Розетта (в 2015 году), соответственно. Некоторые из этих результатов опубликованы в [3].

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Biermann L., Brosowski B., Schmidt H. // Sol. Phys. 1967, V. 1, P. 254.

- [2] Baranov V.B., Lebedev M.G. // Sov. Astron. Lett. 1986. V.12. P. 232.
- [3] Baranov V.B., Alexashov D. B, Lebedev M.G. // MNRAS. 2015. V. 449. P. 2268.

# ПЕРЕСЕК ЛИ АППАРАТ ВОЯДЖЕР-1 ГЕЛИОПАУЗУ НА 122 а.е.?

### В.Б. Баранов

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН; Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

Интерпретация измерений солнечного магнитного поля и энергичных частиц на аппарате Voyager-1 привела многих авторов различных публикаций к выводу о том, что аппарат пересек границу солнечного ветра (гелиопаузу) на 122 а.е. в середине 2012 года и вышел в межзвездную среду. Разработанная в [1] гидродинамическая модель взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвездной средой, которая уже предсказала положение ударной волны торможения солнечного ветра с точностью до 2% (по данным Voyager-1 и Voyager-2) и наличие водородной стенки (по данным HST), предсказывает эту границу на расстоянии ~140 а.е.

В предлагаемом докладе приводятся аргументы, согласно которым данные экспериментов на аппарате Voyager-1 не являются доказательством пересечения гелиопаузы в середине 2012 года. Сомнения в таком пересечении изложены также и в ряде публикаций американских ученых (см., например, [2]). Следует заметить, что на аппарате Voyager-1 не работали приборы, измеряющие скорость, плотность и температуру солнечного ветра, которые могли бы дать однозначный ответ на рассматриваемую проблему.

# ЛИТЕРАТУРА

- [1] Baranov V.B., Malama Yu.G. // J. Geophys. Res. 1993, V. 98(A9), P. 15,157-15,163.
- [2] Fisk L.A., Gloeckler G. // Aph. J. 2014. V. 789. P. 41.

# ПЕРВЫЕ ПРЯМЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЫ ПО ДОРОГЕ К ЛУНЕ

## В.В. Безруких

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН); vbez@iki.rssi.ru

# КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

солнечный ветер, Луна-2, плазмосфера Земли, плазмопауза, магнитосфера, Спутник-3, ловушки заряженных частиц

# введение

Майским утром 1958 г. после заявления ТАСС о запуске Спутника-3 я прилетел в Москву. Там я узнал шокирующую новость: пока мы готовили запуск спутника на полигоне С.П. Королеву удалось добиться выхода Постановления ЦК и Совмина о начале штурма Луны. Научная программа лунного проекта рассматривалась на заседаниях комиссии М.В. Келдыша по запуску объекта «Е». После успешного проведения эксперимента на Спутнике-3 включение нашей группы в число участников лунной научной программы было принято, практически, без обсуждения. Целью нашего эксперимента было обнаружение существования (или отсутствия) газовой оболочки вокруг Луны, иными словами, лунной атмосферы.

# СПЕЦИФИКА НОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

От перспективы впервые прикоснуться к тайнам совсем другого небесного тела – Луны захватывало дух. Но уж очень тяжелы были проблемы, которые надо было решить для реализации этих перспектив. Помимо трудностей, которые возникали из необходимости измерения ничтожных по величине потоков заряженных частиц окололунной плазмы на фоне превышающих их на несколько порядков потоков солнечной плазмы и потоков паразитных фотоэлектронов (последние, как мы надеялись, можно будет преодолеть инструментальным путем), существовали жесточайшие информационные ограничения, казавшиеся, временами, непреодолимыми. Для ионосферного эксперимента было выделено 4 шестибитовых канала, опрашиваемых с интервалом 1 мин, т.е. в терминах сегодняшнего дня всего 0.4 бита/с – более чем скромная величина даже по сравнению с объемом информации, которым мы располагали на спутнике Земли (~800 бит/с). Дополнительные трудности в проведении эксперимента возникали в связи с отсутствием принудительной ориентации космического аппарата в пространстве. Сочетание этих и других менее значимых факторов не позволяло ориентироваться на зондовые измерения в классическом исполнении, как на метод, пригодный для измерений весьма малых концентраций ионосферной плазмы и в окрестности Луны, и во время полета по трассе Земля-Луна. Что делать? Ясно было только, что предстоит радикальное изменение схемы и конструкции ловушки, и что никакие модификации зондовых измерений, требующих больших объемов информации, использованы быть не могут.

# УНИКАЛЬНЫЙ ПОДХОД К ИЗМЕРЕНИЯМ ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЫ

Приступая к разработке методики эксперимента, мы исходили из того, что на ближайшем к Земле участке и вблизи Луны (если у Луны существует ионосфера в общепринятом смысле слова) космический аппарат может пересечь области, содержащие холодную плазму, что где-то траектория пройдет

в межпланетном пространстве. и прибор сможет зарегистрировать корпускулярное излучение Солнца. Было решено в состав прибора включить 4 ловушки с фиксированными потенциалами на внешних сетках: -10 В, –5 В, 0 В, +15 В. В случае удачи такая конфигурация чувствительных элементов прибора позволила бы не только измерить величины потоков заряженных частиц, но и осуществить селекцию заряженных частиц по знаку и энергии, что, в свою очередь, способствовало бы определению природы регистрируемых потоков частиц. На всякий случай, просто для расширения возможностей прибора, были предусмотрены измерения потоков мягких электронов с энергией Е>200 эВ. Общий вид аппарата Луна-2 с расположенными на ней ловушками (показаны стрелками) представлен на рис. 1.



**рис. 1.** Общий вид космического аппарата Луна-2. Положение ловушек на аппарате показано стрелками

Разработка и изготовление ловушек происходили во ВНИИ Вакуумной техники, где была специально организована лаборатория, для создания приборов, способных регистрировать и определять характеристики малоэнергичной космической плазмы. Возглавил лабораторию Р.Е. Рыбчинский. Для этих экспериментов была разработана полусферическая система электродов с впервые в мире примененной антифотоэлектронной сеткой, которая позволила на несколько порядков уменьшить паразитный фототок.

# ПЕРВЫЕ НЕУДАЧИ И УСПЕХ

Примерно через 1,5–2 месяца после запуска Спутника-3, в июле 1958 г., состоялся первый запуск ракеты на Луну. Неудача. Для участников работ по объекту «Е» вся вторая половина 1958 г. превратилась в непрерывную, повторяющуюся цепь: изготовление аппаратуры, испытания в ОКБ в Подлипках, выезд на полигон, испытания, запуск, неудача... И так 5 раз вплоть до 2 января 1959 г., когда ракета, наконец, ушла к Луне. Правда, она не попала на Луну в результате не во время поданной команды на отсечку двигателей и пролетела на расстоянии 5000 км от ее поверхности. В коммюнике о запуске ракеты к Луне, специально сообщалось, что пролетная траектория была выбрана для увеличения времени пребывания ракеты в окрестности Луны.

В ознаменование успешного запуска по команде начальника экспедиции (от ОКБ-1) М.В. Сухопалько на плацу 2-й (жилой) площадки полигона, ограниченной с четырех сторон жилыми бараками, один из которых, ничем не отличаясь от остальных, скромно назывался Люксом и предназначался для приезжего начальства, был собран личный состав испытателей. Передав стандартные поздравления испытателям от имени ЦК и Совмина, лично от Н.С. Хрущева, он закончил свою краткую, но энергичную речь словами: «Увижу трезвого – наложу взыскание». В ответ – всеобщий восторг и ликование собравшихся. В эту ночь и следующий за ней день наказанных не оказалось.

# ОТКРЫТИЕ ПЛАЗМОСФЕРЫ, ПЛАЗМЕННОГО СЛОЯ И СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

Повторный запуск на Луну состоялся 12 сентября 1959 г. На этот раз ракета вышла на расчетную траекторию с первой же попытки и космический аппарат попал в Луну. Это случилось 14 сентября. Телеметрическая информация, зарегистрированная во время полета лунной ракеты на наблюдательных пунктах на электрохимических бумажных лентах и фотопленке, сосредотачивалась в Отделении прикладной математики на Миусской площади и обрабатывалась в расчетном бюро, которым руководил ветеран ракетной техники Г.Н. Злотин. Результаты обработки информации экспериментаторы получали в виде таблиц «время-параметр». Визуализацию результатов измерения (т.е. превращение ТМ-отсчетов в величины измеренных токов) и нанесение их на бесконечную миллиметровку выполняли Володя Озеров и я там же, этажом (или двумя) ниже. Вопросы, вопросы... Откуда взялись эти нежданные, громадные, мало меняющиеся токи, и упадут ли они? Ну, вот, наконец-то, упали, но почему изменился знак токов, откуда взялись эти электроны? Увидим ли мы признаки наличия холодной плазмы вблизи Луны? На рис. 2 представлены вариации токов, измеренных ловушками во время всего полета космического аппарата Луна-2, в зависимости от удаления от Земли начиная с высоты 2000 км от поверхности Земли и вплоть до падения на Луну.





рис. 2. Вариации токов, измеренных на КА Луна-2 в плазмосфере Земли (1-й участок, левая панель), в плазменном слое геомагнитного хвоста (2-й участок, средняя панель) и в солнечном ветре (3-й участок, правая панель)

На этом рисунке четко различаются три участка:

- 1-й участок, от момента включения аппаратуры до удаления от Земли 20 000 км. Ловушки с неположительными потенциалами на внешних сетках зарегистрировали потоки холодных ионов атмосферного происхождения. Позднее за этой областью закрепилось название «плазмосфера», а за областью резкого спада токов – «Плазмопауза»;
- 2-й участок от 20 000 до 110 000 км. Все ловушки на участке ~45 000– 80 000 км зарегистрировали отрицательные токи, что позволило сделать заключение об обнаружении области, заполненной мягкими электронами. Впоследствии эта область получила название «плазменный слой»;
- З-й участок от 330 000 до падения космического аппарата на Луну. На этом участке ловушки регистрировали потоки солнечного корпускулярного излучения – «солнечного ветра», характер которого не изменился вплоть до падения контейнера с научной аппаратурой на Луну. Признаков существования лунной атмосферы обнаружено не было.

Обсуждение научных результатов, полученных на Луне-2, происходило в Отделении прикладной математики на Миусской площади в кабинете М.В. Келдыша. На заседание были приглашены участники экспериментов на Лунных ракетах и некоторые известные ученые в качестве научных экспертов. Докладывали результаты научные руководители экспериментов.

Доклад по результатам измерения потоков заряженных частиц высоких энергий делал С.Н. Вернов. Как мне помнится, основное внимание он уделил измеренным потокам высокоэнергичных частиц, величины которых достигали, как сообщил докладчик, ~10<sup>11</sup> прот см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>стер<sup>-1</sup>, зарегистрированных на высотах ~15 000 км, т.е. там, где наши приборы, обнаружили потоки ионов атмосферного происхождения, но не обнаружили потоков высокоэнергичных частиц. В докладе и в ответах на вопросы участников обсуждения С.Н. Вернов неоднократно подчеркивал, что докладываемые им результаты удовлетворительно согласуются с результатами, полученными его соперником в борьбе за приоритет в открытии радиационных поясов Земли профессором Ван-Алленом из Университета штата Айова, США.

Доклад С.Н. Вернова также как и доклады по результатам других экспериментов были одобрены участниками совещания и рекомендованы М.В. Келдышем для публикации.

Доклад по нашему эксперименту, который сделал К.И. Грингауз, вызвал острую и небеспристрастную критику со стороны многих участников совещания.

С.Н. Вернов отметил противоречия в показаниях наших и его приборов и на 1-м и на 2-м участках траектории. В самом деле, противоречия в показаниях приборов были серьезные: на 1-м участке траектории, там, где приборами Вернова были зарегистрированы потоки электронов высоких энергий, наш прибор этих потоков не «заметил», а на 2-м участке траектории, где мы зарегистрировали потоки электронов с энергиями E>200 эВ, «молчали» приборы Вернова. Не сомневаясь в своих приборах, Сергей Николаевич выразил сомнение в показаниях наших, что по существу означало признание нашего эксперимента в целом ошибочным.

Впрочем, впоследствии и С.Н. Вернов и Ван Аллен признали, что величины потоков энергичных электронов в радиационных поясах, измеренные их группами были на 4 порядка (т.е. в 10 000 раз) завышены вследствие не учета при обработке паразитных эффектов тормозного излучения. Понижение измеренных С.Н. Верновым и Ван Алленом величин потоков в радиационных поясах до 10<sup>7</sup> прот см<sup>-2</sup>с<sup>-1</sup>стер<sup>-1</sup> автоматически сняла противоречия между нашими результатами с одной стороны и результатами С.Н. Вернова и Ван Аллена с другой. К сожалению, эта переоценка была сделана только спустя около 2-х лет после обсуждения результатов измерения, полученных на лунных ракетах.

Проф. А.И. Лебединский (Физфак МГУ) без сколько-нибудь серьезной аргументации отнес измерения отрицательных токов на 2-м участке траектории к инструментальным ошибкам. На самом деле, зарегистрированные нашими приборами на 2-м участке траектории отрицательные токи были образованы потоками мягких электронов плазменного слоя, которые не могли быть измерены приборами С.Н. Вернова.

Специалист по распространению радиоволн в верхней ионосфере Я.Л. Альперт в своем выступлении, выдержанном в философском стиле, долго рассуждал о том, что в природе все процессы развиваются и завершаются экспоненциально, что резких пространственных границ у различных физических образований не может быть (?), и потому обнаруженное нашим прибором резкое падение токов на высоте ~20 000 км, которое интерпретировалось нами, как резкая граница газовой оболочки Земли, – просто ошибка или в показаниях прибора, или в их интерпретации.

Временами дискуссия принимала и вовсе абсурдный характер. Так, в пылу дискуссии было высказано возмутительное подозрение, в духе 37-го года, о том, что первичная обработка нашей ТМ-информации в Расчетном бюро была выполнена с искажениями, похоже, не случайными, т.к. она, обработка происходила при участии соавторов эксперимента (Володи Озерова и моем), которые могли оказывать давление на юных сотрудниц РБ и искажать ТМ-данные в желательном для нас направлении. К моему удивлению, подобное подозрение не вызвало ни у председателя, ни у присутствующих приличных случаю возражений. Напротив, немедленно была организована повторная обработка спорных участков в условиях строгой изоляции сотрудниц РБ от внешних влияний, которая, к разочарованию инициаторов повторной обработки данных, новых результатов не принесла.

Из участников совещаний нас поддержали И.С. Шкловский с его тогда еще молодыми сотрудниками В.И. Морозом и В.Г. Куртом, которые в дальнейшем приняли активное участие в интерпретации результатов.

Результаты нашего эксперимента обсуждались на двух заседаниях комиссии Келдыша. Однако вместо разрешения на публикацию было решено передать описание методики эксперимента и результаты, полученные в полете, на рассмотрение специально созданной экспертной группе, состоящей из ЛИПАНовских физиков под председательством академика М.Л. Леонтовича. Результатом работы этой группы явилось резюме, которое, практически, не содержало критической оценки ни методики эксперимента, ни его результатов. Тогда у меня сложилось впечатление, что липановцы просто не пожелали вмешиваться в конфликтную ситуацию.

К тому времени наша группа уже работала в Радиотехническом институте АН СССР, и его директору академику А.Л. Минцу после обстоятельного разговора с М.В. Келдышем удалось убедить его в необходимости скорейшей публикации результатов нашего эксперимента.

Статья с описанием методики и результатов эксперимента с ловушками на первых космических ракетах Луна-1 и Луна-2 была опубликована только через 1 год после первого обсуждения результатов у Келдыша (К.И. Грингауз, В.В. Безруких, В.Д. Озеров, Р.Е. Рыбчинский, ДАН СССР, 131, 1302-1304, 1960).

Соавторам описываемого эксперимента – К.И. Грингаузу, В.В. Безруких, В.Д. Озерову и Р.Е. Рыбчинскому были выданы дипломы на открытие, зарегистрированные в Госреестре СССР: № 27 за обнаружение плазменной оболочки Земли, плазмосферы и ее резкой границы плазмопаузы, и № 32 за обнаружение за пределами радиационных поясов зоны существования мягких электронов.

Более подробно перипетии борьбы за признание наших результатов корректными изложены в кн. J.F. Lemaire, K.I. Gringauz, The Earth's Plasmasphere, Cambridge University Press, 1998, ISBN 0 52143091 7.

# ОСТАЕТСЯ ЛИ МЕЖПЛАНЕТНАЯ УДАРНАЯ ВОЛНА УДАРНОЙ ВНУТРИ МАГНИТОСФЕРЫ?

#### В.Б. Белаховский

Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Россия

В данной работе с использованием данных спутников THEMIS исследовано поведение SC (SI) импульса внутри магнитосферы, вызванного взаимодействием межпланетной ударной волны с магнитосферной Земли. Выбирались случаи, когда спутники THEMIS в момент SC импульса располагались на дневной стороне магнитосферы, ближе к магнитопаузе. Определялась нормаль к плоскости SC возмущения, далее определялась скорость SC возмущения в магнитосфере. Оценки показывают, что для всех рассмотренных случаев магнитозвуковое число Маха было меньше единицы. Таким образом, вопреки ряду теоретических работ показано, что межпланетная ударная волна не является ударной внутри магнитосферы.

# ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ЗИМНИХ ЦИКЛОНОВ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ В ИОНОСФЕРЕ НАД КАМЧАТКОЙ В УСЛОВИЯХ ПОНИЖЕННОЙ СЕЙСМИЧНОСТИ СРЕДСТВАМИ РАДИОТОМОГРАФИИ

## В.В. Богданов

ФГБУН институт космических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН (ИКИР ДВО РАН); vbogd@ikir.ru

# КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

ионосфера, циклоны, радиотомографическое зондирование, электронная концентрация, литосфера, синоптические карты

Данная работа продолжает цикл исследований по поиску влияния тропосферных возмущений (зимних и весенних циклонов) на поведение параметров ионосферы для лучшего понимания тропосферно-ионосферного взмодействия [1,2,3,4,5,6]. Для эксперимента использовались данные, полученные методом томографического зондирования на цепи томографических станций, расположенных на п-ве Камчатка при прохождении зимних циклонов. Отличием настоящего исследования от вышеуказанных работ является расположение станций непосредственно в районе действия циклонов.

Задачи лучевой радиотомографии ионосферы, проводимой над территорией п-ова Камчатка, решаются на практике с помощью ИСЗ и нескольких приемников, располагающихся на поверхности Земли под углом, соответствующим углу наклонения плоскости орбиты спутников. В случае использования космических систем с наклонением орбиты 83°/90° градусов, необходимо расположить наземные приемники навигационных сигналов в меридиональном направлении.

На земле по приведенным фазам сигналов с частотами 150 и 400 МГц можно рассчитать электронное содержание на пути распространения навигационного сигнала. За время пролета спутника над развернутой системой наземных станций проводится серия измерений и для каждой станции приема навигационного сигнала на элементе пути распространения *ds* определяется *TEC*=∫*N<sub>e</sub>ds*, где *TEC* – полное электронное содержание

вдоль пути распространения сигнала между источником и приемником *p*, *N*<sub>e</sub> – электронное содержание. После этого проводится реконструкцию томографического разреза ионосферы, путем решения обратной задачи [7,8]. В качестве источников когерентного сигнала используются низкоорбитальные навигационные спутники типа «Космос», что позволяет восстановить вертикальное распределение электронной концентрации вдоль трассы пролета спутника с хорошим разрешением (25 км по высоте и 50 км по широте). Наземные приемники сигналов расположены в селах Паратунка (*Par*), Мильково (*MI*), Эссо (*Ess*) в субмеридиональном направлении (158° 31' в.д.). Приемные станции работают в автоматическом режиме.

Для исследования отклика ионосферы были отобраны циклоны, прошедшие над Камчаткой за период с января по февраль 2013 г. (см. таблицу) в условиях спокойной и умеренно спокойной магнитной обстановки (К≤17). В период их прохождения в камчатском регионе отсутствовали сильные землетрясения. Это дает возможность надеяться, что если существуют эффекты влияния циклонов на ионосферу, то это влияние не будет за-

маскировано процессами, происходящими в литосфере Земли. В левой части таблицы приведены дата прохождения циклона, время пролета спутника (UT), суммарный на эту дату трехчасовой индекс магнитной активности (Кр) по магнитной станции «Паратунка». Во второй части таблицы представлена информация ближайшего к циклону дня (опорный день), по отношению к которому для сравнения определялось меридиональное распределение электронов. Время пролета спутника в опорный день выбиралось максимально близким ко времени пролета в день циклона.

#### Таблица

Д	ень с циклоном		день без циклона		
дата	время пролета спутника, UT	ΣКр	дата	время пролета спутника, UT	ΣКр
18.01.2013	16:00	16	12.01.2013	16:20	2
03.02.2013	18:09	7	31.01.2013	18:32	1
17.02.2013	12:33	17	12.02.2013	13:07	9



рис. 1. Циклон 18.01.2013 год.

а) ветер восточного направления достигал 30 м/с на высоте 5 км. Эпицентр циклона располагался в южной части полуострова на ~48°с.ш.

b) 18.01.2013 г. в 16:00 UT наблюдается турбулезация ионосферной плазмы с ярко выраженным плазменным образованием в интервале широт 48°–49° с.ш. и высот 29–350 км



рис. 2. Разрез распределения плотности электронов в ионосфере для циклона за 18.01.2013 г. в 16:00 UT (04:00 LT) (сплошная линия) для двух широт в сравнении с опорным днем 12.01.2013 г. (пунктирная линия)

30-proceedings of the conference





а) ветер юго-восточного направления достигал 30 м/с на высоте 5 км. Эпицентр циклона располагался в южной части полуострова на ~48° с.ш.

b) 03.02.2013 г. в 18:09 UT наблюдается турбулезация плазмы и протяженная область с повышенной концентрацией электронов на широтах 49°–52° с.ш. и высотах 290–320 км, по сравнению с 31.01.2013 г.



**рис. 4.** Разрез распределения плотности электронов в ионосфере для циклона 03.02.2013 г. в 18:09 UT (06:09 LT) (сплошная) для двух широт в сравнении с 31.01.2013 г. (пунктирная)

Для каждого циклона на рисунках 1, 3, 5 представлены синоптические карты и цветовые томограммы субмеридионального распределения электронов по высоте для дня с циклоном и без него. На томограммах по оси абсцисс отложена широта в градусах и обозначены станции приема спутниковой информации *Par, MI, Ess,* по оси ординат – высота в км. Справа приведены распределения концентрации электронов. Томограммы снимаются в интервале широт 48.01°–61.52° с.ш.

# выводы

Проведенный анализ развития циклонов показал, что:

 Наибольшая турбулизация ионосферы происходит непосредственно над областью расположения центра циклона, что характеризуется резкими градиентами в распределении электронов.





a) ветер юго-восточного, потом восточного направления, достигал 30 м/с на высоте 5 км. Эпицентр циклона – в Тихом океане, ~48° с.ш., ~162° в.д.

b) В ионосфере 17.02.2013 г. в 12:33 UT наблюдается турбулизация плазмы и протяженное ярко выраженное плазменное образование на широтах 49°–52° с.ш. и высоте 280–320 км



рис. 6. Разрез распределения плотности электронов в ионосфере для циклона за 17.02.2013 г. в 12:33 UT (00:33 LT) (сплошная линия) для двух широт в сравнении с опорным днем 12.02.2013 г. (пунктирная)

- Изменение концентрации электронов ионосферы может быть объяснено за счет переноса механического импульса нижележащих слоев ионосферы и нейтральной атмосферы [5] на высоты F-слоя и влиянием АГВ, генерируемых циклоном.
- Из трёх рассмотренных примеров увеличение концентрации электронов отмечено в двух 18.01. и 17.02.2018 г. Авторы работ считают, что увеличение [3] или уменьшение [4] концентрации (foF2) может быть связано с задержкой момента измерения относительно времени зарождения циклона.
- Необходимо проводить дальнейшие исследования влияния циклона на ионосферу для набора статистики и построения соответствующих физических моделей, с целью выяснения механизма передачи импульса вихревого движения циклона на ионосферные высоты.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Xiao Z., Xiao S., Hao Y., Zhang D. Morphological features of ionospheric response to typhoon // J. Geophys. Res. 2007. V. 112.
- [2] Ванина-Дарт Л.Б., Романов А.А., Шарков Е.А. Влияние тропического циклона на верхнюю ионосферу по данным томографического зондирования над о-вом Сахалин в ноябре 2007г // Геомагнетизм и аэрономия. 2011. Т.51. № 6. С.790-798.
- [3] Rice D.D., Sojka J.J., Eccles J.V., Schunk R.W. Typhoon Melor and ionospheric weather in the Asian sector: A case study // Radio Sci. 2012. V. 47.
- [4] Liu Y.-M., Wang J.-S., Suo Y.-C. Effects of typhoon on the ionosphere // Adv. Geosci. 2006. V. 29. P. 351-360.
- [5] Михайлов Ю.М., Михайлова Г.А., Капустина О.В., Дружин Г.И., Чернева Н.В. Возможные атмосферные эффекты в нижней ионосфере по наблюдениям атмосферных радиошумов на Камчатке во время тропических циклонов //Геомагнетизм и аэрономия. 2005. Т.45. № 6. С.824-839.
- [6] Черниговская М.А., Куркин В.И., Орлов И.И. и др. Исследование связи короткопериодных временных вариаций параметров ионосферы в Северо-Восточном регионе России с проявлениями тропических циклонов // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 5. С. 32-41.
- [7] Андреева Е.С., Куницын В.Е., Терещенко Е.Д. Фазоразностная томография ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. 1992. Т. 32. № 1. С. 104-110.
- [8] Романов А.А., Романов А.А., Трусов С.В., Урличич Ю.М. Современные подходы к созданию автоматизированной системы регистрации ионосферных предвестников землетрясений по спутниковым данным //Космонавтика и ракетостроение. 2006. № 1. С. 167-172.
# СТРУКТУРА ФРОНТА БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ КОСОЙ МЕЖПЛАНЕТНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА С ВЫСОКИМ ВРЕМЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

Н.Л. Бородкова<sup>1</sup>, В.Г. Еселевич<sup>2</sup>, О.В. Сапунова<sup>1</sup>, Г.Н. Застенкер<sup>1</sup>, Ю.И. Ермолаев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия

В работе по данным прибора БМСВ, установленного на спутнике СПЕКТР-Р, а также по данным приборов космического аппарата WIND, представлены результаты статистического исследования структуры фронта косых межпланетных ударных волн в зависимости от угла θ<sub>Bn</sub>, а также условий выполнения соотношений Рэнкина – Гюгонио на фронтах бесстолкновительных ударных волн. На основании сравнения экспериментально определенной длины волны опережающих рамп колебаний с теоретической оценкой длины волны было получено, что в формировании фронтов квазиперпендикулярных (45°≤θ<sub>Bn</sub><90°) бесстолкновительных межпланетных ударных волн с небольшими числами Маха M<sub>A</sub><3, и параметром β<sub>1</sub><1 определяющую роль играет дисперсии косых магнитозвуковых волн.

Сравнение соотношений Рэнкина – Гюгонио  $M_A(\rho_2/\rho_1)$ , измеренных на фронтах 47 межпланетных ударных волн, имеющих параметр бета  $\beta_1 < 5$  и альвеновские числа Маха  $1 < M_A < 10$ , с расчетами, сделанными в рамках идеальной МГД, выявило, что эффективный показатель адиабаты  $\gamma$ , характеризующий процессы внутри фронта, находится, в основном, в пределах от 2 до 5/3.

# МАГНИТОСФЕРА МАРСА – ОТКРЫТИЕ, ИССЛЕДОВАНИЯ, НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

#### О.Л. Вайсберг

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва, Россия

Взаимодействие солнечного ветра с Марсом было впервые исследовано на советских спутниках Марса «Марс-2», «Марс-3» и «Марс-5» в начале 1970-х годов. Несмотря на неблагоприятные орбиты для проведения исследований в данной области, сравнительно простую научную аппаратуру и малую скорость передачи информации, три группы советских исследователей получили важные результаты. Были обнаружены и картированы ударная волна и магнитосфера Марса. Было установлено, что в результате взаимодействия солнечного ветра с Марсом происходит значительная потеря атмосферных ионов, которая имела большие последствия для эволюции марсианской атмосферы. Исследования были продолжены на спутнике Марса «Фобос-2» в 1980-х годах и позволили исследовать состав убегающих ионов и получить более четкую картину хвоста Марса.

Спутник «Марс Глобал Сервейор», ведущий исследования Марса с 1999 г., обнаружил магнитные аномалии в южном полушарии Марса. Дальнейшее развитие исследований Марса и его взаимодействия с солнечным ветром связано с Европейским спутником «Марс-Экспресс», запущенным в 2003 г. и работающим на орбите Марса по настоящее время. Наиболее важным результатом работы этого спутника было обнаружение ионосферных потерь, также связанных с взаимодействием с солнечным ветром. Новый этап в исследовании внешней оболочки Марса начался в 2014 г. с выводом на орбиту спутника МАВЕН. оснашенного комплексом современной научной аппаратуры, ведущей измерения с высоким временным разрешением. Анализ этих данных ведет большой коллектив американских и международных исследователей. Получено много новых результатов в исследовании ионосферы, взаимодействия с солнечным ветром и атмосферных потерь. В этой работе участвует и Российский коллектив, сделавший акцент на исследовании магнитосферы Марса. В докладе будут представлены новые результаты исследования магнитосферы Марса, в частности, влияние направления межпланетного магнитного поля на структуру магнитосферы.

# СРАВНЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ И ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ В КОМЕТЕ ГАЛЛЕЯ

#### А.Л. Гаврик<sup>1</sup>, О.Л. Вайсберг<sup>2</sup>

- <sup>1</sup> ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино, Россия; alg248@hotmail.com
- <sup>2</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва, Россия; olegv@iki.rssi.ru

### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

комета Галлея, радиозондирование, тяжелые ионы, концентрация электронов

## ВВЕДЕНИЕ

Пролет космических аппаратов (КА) ВЕГА-1 и ВЕГА-2 вблизи кометы Галлея со стороны, освещенной Солнцем, с перицентрами 8890 и 8030 км, соответственно, позволил впервые осуществить двухчастотное радиозондирование плазменной оболочки и выполнить прямые измерения приборами заряженных частиц. В докладе проведено сравнение данных радиозондирования с результатами измерений датчика БД-3.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ

На КА ВЕГА-1 и ВЕГА-2 в составе прибора АПВ-Н [1] был датчик БД-3 типа цилиндра Фарадея для измерения колебаний потока ионов в КНЧ диапазоне [2]. В коллекторе датчика был установлен простой ионный анализатор с 4 коллекторами и усилителями токов с этих коллекторов. Группа из трех коллекторов была предназначена для определения потока кометных ионов и компонентов скорости, перпендикулярных вектору относительной скорости космического аппарата и кометы, еще один



**рис. 1.** Экспериментальные зависимости концентрации тяжелых ионов n<sub>j</sub>(R) для сеансов 06.03.1986 (точки) и 09.03.1986 (крестики) [3]

коллектор с отклоняющей пластиной использовался для определения энергии кометных ионов в системе координат космического аппарата, что позволило определить концентрацию тяжелых кометных ионов. Вычисленные значения концентрации кометных ионов с энергией встречного движения КА и ионов ~600 эВ./Q (где Q – заряд) показаны на рис. 1. Эта энергия соответствует ионам водной группы, имеющим малую конвективную скорость. Направление попадания ионов в прибор примерно соответствует вектору скорости встречи КА с кометой.

На профилях концентрации тяжелых ионов присутствует четкая граница кометной плазмы вблизи 1.5·10<sup>5</sup> км. На расстояниях от ~11 700 км до 10<sup>5</sup> км концентрация изменяется приблизительно обратно пропорционально квадрату расстояния (прямые линии, рис. 1), но при подходе к ядру кометы зарегистрировано падение концентрации, что образует максимум профилей n<sub>j</sub>(R) на расстоянии 11 700 км с падением концентрации при сближении с ядром [3]. Длительность второго сеанса измерений была короткой из-за повреждения прибора, по-видимому, при ударе крупной пылинки. Концентрация ионов при втором пролете на сравнимых расстояниях от ядра была меньше в ~1.7 раза.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ

В экспериментах радиозондирования кометы передатчики КА излучали когерентные монохроматические радиоволны, а наземный приемник зарегистрировал вариации фазы, частоты, мощности радиоволн диапазонов 32 и 5 см [4]. Путем сопоставления калибровочных измерений, выполненных в период с 14 февраля по 17 марта 1986 г., с результатами зондирования кометы 6 и 9 марта 1986 г. выявлены радиофизические эффекты, обусловленные распространением радиоволн сквозь плазменную оболочку кометы. Метод двухчастотного радиопросвечивания обеспечил возможность анализа радиоэффектов, которые не зависят от плотности плазмы, а также анализа разностной фазы двух сигналов, которая пропорциональна вариациям плотности плазмы на трассе связи [5]. Зависимость интегральной электронной концентрации ΔΝ<sub>к</sub>(R) в оболочке кометы представлена на рис. 2.



рис. 2. Интегральная электронная концентрация ΔΝ<sub>κ</sub>(R) в оболочке кометы (после устранения тренда, обусловленного плазмой за пределами кометы) для сеансов 06.03.1986 (кривая 1) и 09.03.1986 (кривая 2). Кривые 3 и 4 – расчеты ΔΝ<sub>κ</sub>(R) по профилям N(h), полученным при отлете КА

#### 38 GRINGAUZ 100: PLASMAS IN THE SOLAR SYSTEM, 2018

В обоих сеансах зарегистрировано увеличение интегральной электронной концентрации ΔN<sub>к</sub>(R) на радиотрассе не только до момента сближения КА с ядром, но и еще ~90 с после прохождения перицентра. Обнаруженное запаздывание максимума интегральной электронной концентрации относительно прохождения перицентра – это неожиданное явление, объяснение которого потребовало детального анализа. Была разработана методика решения обратной задачи радиопросвечивания для определения высотного профиля электронной концентрации N(h), выполнен анализ ограничений методики и получены оценки погрешности определения концентрации [6]. На рис. 3 представлены профили электронной концентрации N(h).



рис. 3. Распределение концентрации электронов N(h) в плазменной оболочке кометы Галлея по данным двухчастотного радиопросвечивания 06.03.1986 (кривые 1 и 3) и 09.03.1986 (кривые 2 и 4)

Рассчитанные профили N(h) имеют общие закономерности: четкая граница кометной плазмы отсутствует, т.к. погрешность определения N(h) превышает 100 см<sup>-3</sup>. На расстояниях от 11 700 км до 8 10<sup>4</sup> км концентрация изменяется обратно пропорционально квадрату расстояния, максимум профилей N(h) расположен на расстоянии 11 700 км, а затем концентрация убывает при сближении с перицентром. Вблизи перицентра и на участке сближения КА с кометой в обоих сеансах погрешности определения N(h) могут достигать ~800 см-3. При удалении от перицентра погрешность определения N(h) уменьшается до ~200 см<sup>-3</sup>, достигнутая точность позволяет исследовать крупномасштабные слоистые структуры плазменной оболочки. Установлено, что концентрация электронов N(h) зависит от активности кометы, в одном эксперименте в максимуме ионизации она составляла ~3600 см-3, в другом была в 1.7 раза меньше, но местоположение максимума не изменилось. В целом значения концентрации электронов по радиоданным и локальной концентрации ионов весьма близки, что, во-первых, свидетельствует о том, что тяжелые кометные ионы являются основной составляющей плазменной оболочки, и, во-вторых, свидетельствует о надежности измерений этими двумя методами.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, характеристики профилей электронной концентрации не противоречат основным результатам прямых измерений концентрации тяжелых ионов, а некоторые различия могут быть обусловлены тем, что данные радиозондирования характеризуют среднюю плотность плазмы в области размером более тысячи км вдоль трассы радиосвязи, т.е. сглаживают локальные неоднородности. Другой причиной расхождения значений концентрации заряженных частиц, полученных двумя методами, может быть то, что трасса прохождения радиосигналов не тождественна трассе пролета КА. вдоль которой измерялась концентрация ионов. Совпадение данных радиозондирования с измерениями плазменного датчика БД-3 на участке удаления КА ВЕГА-1 от перицентра указывает на достоверность полученных результатов. Одинаковые характеристики профилей электронной концентрации и тяжелых ионов свидетельствуют о квазинейтральности запыленной кометной оболочки и о правомерности использования сферически-симметричного приближения для определения высотного профиля электронной концентрации в комете по радиоданным.

- [1] Климов С.И., Савин С.П., Алексевич Ж. и др. Крайне низкочастотные (КНЧ) плазменные волны в окрестности кометы Галлея // Письма в астрономический журнал. 1986. Т. 12. № 9. С. 688-694.
- [2] Захаров Д.С., Вайсберг О.Л., Денин А.Б. и др. Прибор для определения концентрации и конвекции кометной плазмы // Вопросы атомной науки и техники. Серия Ядерное приборостроение. Научно-технический сборник. 1987. Т. 3. С. 119-123.
- [3] Vaisberg O., Zastenker G., Smirnov V. et al. // Spatial Distribution of Heavy Ions in Comet P/Halley's Coma. 1987. V. 187. P. 183-190.
- [4] Савич Н.А., Алтунин В.И., Андреев В.Е. и др. Двухчастотное радиозондирование кометы Галлея при пролете космических аппаратов ВЕГА-1 и ВЕГА-2 // Письма в астрономический журнал. 1986. Т. 12. № 9. С. 675-682.
- [5] Андреев В.Е., Гаврик А.Л. Распределение электронной концентрации в комете Галлея по данным радиозондирования // Космические исследования. 1990. Т. 28. № 2. С. 293-303.
- [6] Андреев В.Е., Гаврик А.Л. Распределение электронной концентрации в комете Галлея: решение обратной задачи поданным радиозондирования // Космические исследования. 1991. Т. 29. № 3. С. 458-467.

# ТУРБУЛЕНТНОСТЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В ЦИКЛЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТОВ КОРОНАЛЬНОГО РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЯ ЛИНЕЙНО-ПОЛЯРИЗОВАННЫМИ СИГНАЛАМИ ЗОНДОВ *HELIOS*

#### А.И. Ефимов<sup>1</sup>, Л.А. Луканина<sup>1</sup>, И.В. Чашей<sup>2</sup>, М.К. Берд<sup>3,4</sup>, М. Петцольд<sup>4</sup>

- <sup>1</sup> Институт Радиотехники и Электроники им. В.А.Котельникова РАН, Москва, Россия; efimov@ms.ire.rssi.ru
- <sup>2</sup> Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия
- <sup>3</sup> Институт Астрономии им. Аргеландера Боннского университета, Бонн, Германия
- <sup>4</sup> Институт исследования окружающей среды Кёльнского университета, Кельн, Германия

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

солнечный ветер, радиопросвечивание, магнитное поле, турбулентность, фарадеевское вращение

# введение

Солнечный ветер был открыт проф. К.И. Грингаузом и его сотрудниками в 1959 г., когда советская автоматическая межпланетная станция Луна-2 в пространстве между Землей и Луной зарегистрировала потоки заряженных частиц, движущихся с большой скоростью в направлении от Солнца. С этого момента на всех космических аппаратах устанавливались плазменные приборы, которые обеспечивали возможность детального изучения этого явления. На наш взгляд, открытие солнечного ветра можно считать вторым по значимости событием в истории изучения космического пространства после запуска в СССР в 1957 г. первого искусственного спутника Земли.

В 70-е годы ФРГ и США подготовили к запуску специальные солнечные зонды, которые должны были обеспечить всесторонние исследования солнечного ветра локальными и дистанционными методами. Первый зонд *Helios-1* был запущен в декабре 1974 г., второй – *Helios-2* – в январе 1976 г. Установленные на борту приборы обеспечили измерения физических характеристик межпланетной плазмы на гелиоцентрических расстояниях между 0.3 а.е. (максимальное приближение аппаратов к Солнцу) и орбитой Земли. Однако информация о солнечном ветре была получена и для более близких расстояний, вплоть до 0.01 а.е., благодаря применению метода радиозондирования околосолнечной плазмы линейно-поляризованными сигналами этих аппаратов.

Эксперименты радиозондирования с использованием аппарата *Helios-1* были выполнены в течение 1975–1984 гг. Зонд *Helios-2* обеспечил радиозондирование в период с 1976 по 1980 г. Результаты обработки полученных экспериментальных данных о солнечном ветре были представлены в десятках публикаций.

# РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ УРОВНЯ ФЛУКТУАЦИЙ ФАРАДЕЕВСКОГО ВРАЩЕНИЯ

Целью настоящего сообщения является анализ влияния солнечной активности на флуктуации фарадеевского вращения (ФФВ) плоскости поляризации. Уникальные эксперименты поляризационного радиопросвечивания

дали информацию о турбулентности магнитного поля солнечного ветра для всех фаз солнечной активности. Цикл измерений охватывает периоды глубоких минимумов (1975–1976; среднее число солнечных пятен не превышало 20), высокого максимума (1979; среднее число солнечных пятен достигало 180), восходящую ветвь (1977–1978) и нисходящую ветвь (1981–1983).

Связь флуктуаций фарадеевского вращения плоскости поляризации с солнечной активностью анализировалась ранее [1], и был сделан предварительный вывод о слабом влиянии солнечной активности на интенсивность ФФВ плоскости поляризации. Однако для анализа использовалась только часть экспериментальных данных, полученных в течение 1979–1984 гг.

В настоящем анализе кроме этих данных используются важные дополнительные материалы, полученные при низкой солнечной активности (1975–1976) и умеренной активности (1977). Для оценки уровня флуктуаций радиоволн использовалась величина спектральной плотности ФФВ на флуктуационной частоте 2 мГц для трех прицельных расстояний радиолуча 3.5, 4.5 и 5.5 солнечных радиусов *R*<sub>s</sub>. Полученные данные вместе с уровнем солнечной активности, определяемым средними числами Вольфа, представлены в таблице.

Таблица. Результаты спектрального анализа флуктуаций фарадеевского вращения линейно-поляризованных сигналов в экспериментах радиозондирования околосолнечной плазмы сигналами КА *Helios-1*, *-2* 

год	даты наблюдений, дни года	среднее число Вольфа	спектральная плотность флуктуаций фарадеевского вращения (град.² / Гц) на частоте 2 мГц для прицельных расстояний		
			3.5 R <sub>s</sub>	4.5 <i>R</i> s	5.5 <b>R</b> s
1975	097–176 231–250	17.1	0.69×10 <sup>4</sup>	1.7×10 <sup>3</sup>	0.45×10 <sup>3</sup>
1976	128–212	10.7	1.1×10 <sup>4</sup>	3.6×10 <sup>3</sup>	1.15×10 <sup>3</sup>
1977	148–151 179–194 274–275	32.7	0.78×10 <sup>4</sup>	2.1×10 <sup>3</sup>	0.42×10 <sup>3</sup>
1979	292–302	184.8	2.94×10 <sup>4</sup>	14.5×10 <sup>3</sup>	1.5×10 <sup>3</sup>
1980	334–345	144.2	0.74×10 <sup>4</sup>	2.9×10 <sup>3</sup>	1.3×10 <sup>3</sup>
1981	338–359	130.6	1.79×10 <sup>4</sup>	3.9×10 <sup>3</sup>	1.14×10 <sup>3</sup>
1983	002–011	84.3	2.9×10 <sup>4</sup>	5.7×10 <sup>3</sup>	1.41×10 <sup>3</sup>
1984	023–029	85.4	2.3×10 <sup>4</sup>	7.4×10 <sup>3</sup>	1.75×10 <sup>3</sup>

Из этих материалов однозначно следует, что солнечная активность слабо влияет на флуктуационные эффекты, наблюдавшиеся при радиозондировании солнечного ветра. Результаты подтверждают выводы, полученные при радиозондировании околосолнечной плазмы сигналами спутника Юпитера *Galileo* в 1994–2002 гг. [2]: средняя интенсивность флуктуаций частоты зондировавших околосолнечную плазму сигналов не изменялась при переходе от минимума солнечной активности (1996, <*W*>=8) к максимуму (2000, <*W*>=120).

Заметим, что в обоих циклах экспериментов (1975–1984 и 1994–2002) зондировались низкоширотные области солнечной короны.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Глобальная структура солнечного ветра изменяется с циклом солнечной активности таким образом, что в минимуме активности на низких широтах наблюдается медленный солнечный ветер, на высоких широтах – быстрый солнечный ветер. В максимуме солнечной активности на всех широтах преобладает медленный солнечный ветер. Объяснение неизменности флуктуационных эффектов заключается в том, что магнитогидродинамическая турбулентность низкоширотного медленного солнечного ветра в среднем не зависит от фазы цикла солнечной активности.

- [1] Andreev V.E., Efimov A.I., Samoznaev L.N., Chashei I.V., Bird M.K. Characteristics of coronal Alfven waves deduced from Helios Faraday rotation measurements // Solar Physics. 1997. V. 176. No. 3. P. 387-402.
- [2] Efimov A.I., Samoznaev L.N., Bird M.K., Chashei I.V., Plettemeier D. Solar wind turbulence during the solar cycle deduced from GALILEO coronal radio sounding experiments // Advances in Space Research. 2008. No. 1. V. 42. P. 117-123.

# ВЛИЯНИЕ ПЛАЗМОПАУЗЫ НА ОНЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ И ГЕОМАГНИТНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ Рс1

#### Н.Г Клейменова<sup>1,2</sup>, Ф.З. Фейгин<sup>1</sup>, Л.М. Малышева<sup>1</sup>, Ю.Г. Хабазин<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики Земли РАН, Москва, Россия

<sup>2</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва, Россия; kleimen@ifz.ru, feygin@ifz.ru

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

плазмопауза, плазмосфера, холодная плазма, циклотронная неустойчивость, ОНЧ-хоры, ОНЧ-шипения, геомагнитные пульсации Pc1, сопряженные точки

# введение

Известно, что градиент холодной плазмы (плазмопауза) играет большую роль в генерации и распространении электронно-циклотронных (ОНЧ-излучения) и ионно-циклотронных (геомагнитные пульсации диапазона Pc1) волн. При этом область пересечения траекторий захваченных в радиационном поясе энергичных электронов и протонов с плазмопаузой является наиболее перспективной областью для генерации циклотронных волн [1].

### ОНЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ

Следует отметить, что плазмопауза является постоянно действующим волноводным дактом, канализирующим ОНЧ излучения, возбуждающиеся в экваториальной плоскости магнитосферы Земли, к земной поверхности [2]. Согласно спутниковым наблюдениям ОНЧ-хоры обычно наблюдаются за внешней границей плазмопаузы. а ОНЧ-шипения за её внутренней границей, т.е. в плазмосфере. Такой же вывод был получен при анализе данных наземных ОНЧ наблюдений в Скандинавии: хоры возбуждаются за плазмопаузой, а ОНЧ-шипения и квазипериодические излучения – внутри плазмосферы [3]. Результаты наземных ОНЧ наблюдений в магнито-сопряженных субавроральных областях Согра – Кергелен показали [4], что, как правило, на этих станциях ОНЧ-хоры регистрировались в те периоды времени, когда станции находились вблизи проекции наиболее вероятного положения плазмопаузы. При большой геомагнитной активности, когда плазмопауза перемещается на более низкие L-оболочки, а также в магнитоспокойных условиях, когда плазмопауза располагается на более высоких L-оболочках, ОНЧ хоров в субавроральных широтах не наблюдалось.

## ГЕОМАГНИТНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ

На плазмопаузе происходит резкое увеличение альвеновской скорости – от 400–800 км/с внутри плазмосферы до 2000–3000 км/с за плазмопаузой. Это приводит к резкому изменению периодов фундаментальных резонансных колебаний (геомагнитные пульсации Рс3–4) в этой области [5]. Плазмопауза играет большую роль в генерации геомагнитных пульсаций Рс1, которые представляют собой электромагнитные ионноциклотронные (ЭМИЦ) волны. Такое заключение можно сделать, анализируя зависимость инкремента циклотронной неустойчивости протонов от плотности фоновой плазмы [6]. Максимальное усиление этих волн происходит при определенной концентрации фоновой плазмы [7]. Наиболее благоприятной областью пересечения траекторий захваченных

#### 44 GRINGAUZ 100: PLASMAS IN THE SOLAR SYSTEM, 2018

в радиационном поясе энергичных анизотропных протонов и фоновой плазмы с необходимой концентрацией для генерации ЭМИЦ волн, является плазмопауза [6]. Именно на плазмопаузе существует градиент концентрации фоновой плазмы, который может обеспечить максимальное усиление ЭМИЦ волн. Кроме того, распространение ЭМИЦ волн вдоль геомагнитных силовых линий требует выполнения определенных условий. Дело в том, что кривизна силовых линий геомагнитного поля вызывает рефракцию волн, которая приводит к тому, что по мере распространения от области генерации условие  $k_{\epsilon}$ =0 ( $k_{\epsilon}$  – поперечное волновое число), необходимое для продольного распространения, нарушается. Влияние кривизны может быть скомпенсировано неоднородностью распределения фоновой плазмы [8]. Условие компенсации может, по-видимому, выполняться в окрестности плазмопаузы, где имеется существенный градиент плотности фоновой плазмы.

Большой вклад в экспериментальное исследование плазмопаузы внес выдающийся ученый Константин Иосифович Грингауз [9]. Выявленная К.И. Грингаузом [10] день-ночь асимметрия положения плазмопаузы позволила объяснить различный суточный ход появления геомагнитных пульсаций Рс1 в средних и авроральных широтах. Так, в обсерватории Борок максимум появления Рс1 приходится на утренние часы, а в обс. Ловозеро – на околополуденные, что может быть результатом суточной асимметрии перемещения плазмопаузы.

- Trakhtengerts V.Y., Rycroft M.J. Whistler and Alfven Mode Cyclotron Masers in Space. Cambridge Univ. Press. Cambridge. U.K. 2008. 354 p.
- [2] Inan U.S., Bell T.F. The plasmapause as a VLF guide // J. Geophys. Res. 1977. V. 82. P. 2819-2827.
- [3] Маннинен Ю., Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Беспалов П.А., Раита Т. Квазипериодические ОНЧ излучения, ОНЧ хоры и геомагнитные пульсации Рс4 // Геомагнетизм и Аэрономия. 2012. Т. 52. № 1. С. 82-92.
- [4] Клейменова Н.Г., Троицкая В.А., Жандрен Р., Виньерон Ж., Понсо К. Наблюдения ультранизкочастотного излучения в двух сопряженных точках // Докл. АН СССР. 1966. Т.170. № 4. С. 835-836.
- [5] Kleimenova N.G., Raspopov O.M. Wave phenomena near the plasmapause // Acta Geod. Geoph. Mont. Hungary. 1991. V. 26 (1-4) P. 99-109.
- [6] Фейгин Ф.З., Якименко В.Л. Механизм генерации и развитие «жемчужин» при циклотронной неустойчивости внешней протонной зоны // Геомагнетизм и Аэрономия. 1969. Т. 9. № 7. С. 701-705.
- [7] Мальцева Н.Ф., Троицкая В.А., Селиванов В.П., Фейгин Ф.З. // Тонкая структура пульсаций типа КУП на силовых линях зоны сияний // Геомагнетизм и Аэрономия. 1979. Т.19. № 3. С. 519-524.
- [8] Гульельми А.В. МГД-волны в околоземной плазме. Наука. Москва. С. 139.
- [9] Грингауз К.И., Безруких В.В. Плазмосфера Земли (Обзор) // Геомагнетизм и Аэрономия. 1977. Т.17. № 5. С. 784-803.
- [10] Gringauz K.I., Bezrukikh V.V. Asymmetry of the Earth's plasmasphere in the direction noon-midnight from PROGNOZ and PROGNOZ-2 data // J. Atmos. Terr. Phys. 1976. V. 38. P. 1071-1076.

# АВРОРАЛЬНЫЕ ВЫСЫПАНИЯ И ИРРЕГУЛЯРНЫЕ ПУЛЬСАЦИИ ПРИ СУББУРИЕВОЙ АКТИВНОСТИ

#### Р.А. Ковражкин<sup>1</sup>, А.Л. Глазунов<sup>1</sup>, Г.А. Владимирова<sup>1</sup>, Д.Г. Баишев<sup>2</sup>

- <sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва, Россия
- <sup>2</sup> Институт космофизических исследований и аэрономии СО РАН, Якутск, Россия

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

магнитосфера, суббуря, авроральные высыпания, фронт диполизации, пересоединение магнитного поля, вспышечные потоки электронов, инжекция ускоренных ионов, Pi2-Pi3 пульсации

Проведен анализ популяций электронов и протонов 0.1-20 кэВ и магнитного поля в авроральной магнитосфере на высотах ~2.7-3.0 R<sub>E</sub>. где R<sub>F</sub> – радиус Земли, (спутник ИНТЕРБОЛ-2), параметров межпланетной среды (космический аппарат WIND), планетарной картины полярных сияний (спутник POLAR) и Pi2-Pi3 пульсаций (цепь канадских магнитных станций). Рассмотрено развитие фазы экспансии суббури на примере изолированной суббури 09.01.1997. Фаза экспансии этой суббури включала в себя два этапа. На первом этапе образуется фронт диполизации в ближнем хвосте магнитосферы на R~6-8 R<sub>E</sub>. Второй – ассоциируется с импульсным пересоединением магнитного поля в плазменном слое на R~11-15 R<sub>F</sub>. Установлена взаимосвязь возникновения мелкомасштабных вспышечных потоков электронов 1-2 кэВ с квазипериодом 60-100 с внутри высокоскоростных потоков BBF с генерацией Pi2 пульсаций, что подтверждает ранее полученный вывод о едином механизме возбуждения и частиц, и Pi2 пульсаций. На втором этапе суббури обнаружено явление резонансного отклика иррегулярных Pi3 пульсаций на инжекции ускоренных протонов 2-10 кэВ с периодом ~180 с. Инжекции наблюдаются в авроральной магнитосфере в форме дисперсионных структур TDIS, проецирующихся в источник, расположенный в геомагнитном хвосте. Эти инжекции стимулируют увеличение амплитуды РіЗ пульсаций (Н-компонент возрастает до +/- 65 нТл) с периодом равным периоду генерации инжекций ионов.

# ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ В РОССИИ АВРОРАЛЬНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ С ОРБИТ

#### А.К. Кузьмин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва, Россия, alkkuzmin@mail.ru

### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

диагностика состояния полярной ионосферы, орбитальная имаджелогия эмиссий полярных сияний

Диагностика состояния характеристик полярной ионосферы с орбит один из важных инструментов в космической физике. Благодаря увеличению чувствительности изображающих детекторов и пропускной способности информационных систем, наблюдения распределений интенсивности основных авроральных эмиссий сверху (всепогодная имаджелогия полярных сияний) стали вносить все более существенный вклад в исследования процессов в ближней магнитосфере и ионосфере. Глобальные изображения аврорального овала в эмиссиях вакуумного ультрафиолета с орбит типа Молния обеспечивают информацию о мгновенном состоянии и крупномасштабных размерах и границах аврорального овала как по электронам, так и по протонам даже в освещенных условиях, а изображения «видимых» авроральных эмиссий с низкоорбитальных КА позволяют дистанционно контролировать локальные мелкомасштабные 1–2 км (в поле диаметром в несколько сотен км) процессы, энергетику высыпающихся заряженных частиц в наблюдаемом ночном секторе. и особенности мгновенной конфигурации авроральных структур [1,2]. Существенным преимуществом такой диагностики является синхронность прямых измерений распределений энергетических характеристик потоков электронов и ионов, градиентов магнитного и электрического полей в окрестности КА с дистанционными изображениями эмиссий в локальных объемах магнитных силовых трубок (рис. 1). Карты локальной электронной концентрации в Е-области и распределений поперечных проводимостей, интегрированных по высоте, карты распределений потока энергии и средней энергии высыпающихся частиц - сопутствующий продукт дистанционных измерений. Рассматриваются методические и инструментальные детали перспективных российских орбитальных изображающих экспериментов Авровизор-ВУФ, Авровизор-ВИС/МП и Летиция. Геометрия одновременных глобальных и локальных наблюдений авроральных эмиссий с орбит показаны (условно) на рис. 1 [3,4]. Информационный вклад изображающих ВУФ-камер 1 и 2 и спектрографического имаджера, входящих в состав аппаратуры Авровизор-ВУФ, в определение энергетических характеристик высыпающихся электронов и протонов показан на рис. 2 [5]. Геометрия и физические условия локальных мелкомасштабных наблюдений авроральных эмиссий в видимой области спектра с орбиты КА Метеор-МП показаны (условно) на рис. 3. На этом же рисунке показаны условные проекции орбит спутников FAST и Freya, пересекавших области процессов энергизации авроральных частиц в ближней магнитосфере. Информационный вклад изображающих камер авроральных эмиссий в видимой области спектра в определение энергетических характеристик высыпающихся электронов и протонов рассматривается в [1,5] и докладе. Возможные ситуации одновременных наблюдений одних и тех же авроральных фрагментов с разных высот и ракурсов имаджерами Авровизор-ВИС/МП и Летиция (рис. 1) создадут предпосылки для реконструкций 3D-структур.

С самыми добрыми мыслями и благодарностью вспоминаю общение с К.И. Грингаузом в конце 80-х – начале 90х годов. Он обладал удивительным видением будущих экспериментов в ионосфере Земли, и делился им с коллегами из лабораторий ИКИ.



**рис. 1** (адаптирован из [3,4]). Геометрия измерений заряженных частиц и дистанционных наблюдений авроральных эмиссий с орбит перспективных КА: глобальных (ВУФ-эмиссии) с орбиты КА «Арктика», и локальных (эмиссии видимой области спектра) с орбит КА Метеор-МП и Зонд (проект Ионозонд)



локация, размеры и границы аврорального овала (электроны)



локация, размеры и границы аврорального овала (протоны)



рис. 2 (адаптирован из [5]).

48 GRINGAUZ 100: PLASMAS IN THE SOLAR SYSTEM, 2018



рис. 3 (адаптирован из рис. 4 в [2]). Условия наблюдений авроральных эмиссий для имаджера Авровизор-ВИС/МП с орбиты перспективного КА Метеор-МП и проекции орбит (условно) КА FAST и Freya в ближней магнитосфере

- [1] Кузьмин А.К., Мерзлый А.М., Баньщикова М.А., Чувашов И.Н., Крученицкий Г.М., Потанин Ю.Н., Моисеев П.П. Прикладные аспекты измерений авроральных эмиссий и характеристик полярной ионосферы имаджером «Авровизор-ВИС/ МП» на перспективном КА Метеор-МП // Вопросы электромеханики, труды ВНИИЭМ. Приложение за 2016 год. Материалы четвертой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли», – М.: АО «Корпорация ВНИИЭМ», 2016. С. 325-341. http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/201702.pdf.
- [2] Кузьмин А.К., Баньщикова М.А., Доброленский Ю.С., Крученицкий Г.М., Мерзлый А.М., Маслов И.А., Мерзлый А.М., Моисеев П.П., Потанин Ю.Н., Чувашов И.Н. Характеристики создаваемого орбитального имаджера Авровизор-ВИС/МП и перспектива использования авроральных изображений для исследований процессов в полярной ионосфере и оптического контроля неоднородности условий, влияющих на распространение сигналов // Сб. ИКИ РАН «Практические аспекты гелиогеофизики», стр.114-133, 2016. http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/201601.pdf.
- [3] Kuzmin A.K., Merzlyi A.M., Shadrin D.G., Borisov Yu.A., Potanin Yu.N., Banshchikova M.A., Chuvashov I.N. Methodological particularities of creating of remote mapping diagnostical system of ionospheric characteristics from the orbits of three perspective Russian satellites // Preprint of Moscow Institute of Physics and Technology (State University), 2014, 24 pages, 7 Figures and 1 Table, on materials of the report COSPAR 40, Moscow, 3-9 August 2014 SCC section (Space Studies of the Upper Atmosphere of the Earth and Planets including Reference Atmospheres) C.02 Advances in Remote Sensing of the Middle and Upper Atmospheres and Ionosphere from the Ground and from Space, including Sounding Rockets and Multi-instrument Studies (poster presentation C.02 TFS-S-009). http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/201401.pdf.
- [4] Кузьмин А.К., Мерзлый А.М. Перспективный эксперимент по контролю состояния ионосферы Земли с помощью оптического комплекса «Авровизор-ВУФ» в составе группировок высокоапогейных и низкоорбитальных космических аппаратов // Вопросы электромеханики, т. 143, № 6, с. 19-28, 2014. http://www.cosmic-rays.ru/articles/13/201402.pdf.
- [5] Кузьмин А.К., Мерзлый А.М., Шадрин Д.Г. Распределение поперечных проводимостей в полярной ионосфере Земли и специфика их дистанционных измерений в перспективных орбитальных российских экспериментах // Презентация на 9-й ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе», 10–14 февраля 2014, ИКИ РАН.

# ДИНАМИКА ПОТОКОВ СВЕРХТЕПЛОВЫХ ИОНОВ И ЭЛЕКТРОНОВ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ ДИПОЛИЗАЦИИ В БЛИЖНЕМ ХВОСТЕ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

А.Ю. Малыхин<sup>1</sup>, Е.Е. Григоренко<sup>1,2</sup>, Р. Колева<sup>3</sup>, Е.А. Кронберг <sup>4,5</sup>, P.W. Daly<sup>4</sup>

- <sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва, Россия
- <sup>2</sup> Московский Физико-Технический Институт (ГУ), Москва, Россия
- <sup>3</sup> Space Research and Technologies Institute of BAS, Sofia, Bulgaria
- <sup>4</sup> Max Planck Institute for Solar System Research, Göttingen, Germany
- <sup>5</sup> Ludwig Maximilian University of Munich, Munich, Germany

#### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

диполизации в ближнем геомагнитном хвосте; сверхтепловые частицы; бетатронное ускорение; резонансное ускорение

В данной работе выполнен анализ динамики потоков энергичных электронов и протонов по данным наблюдений Cluster и THEMIS P3 в плазменном слое ближнего геомагнитного хвоста (X ~ -7-9 R<sub>E</sub>) во время магнитных диполизаций. Диполизация в ближнем хвосте была связана с торможением быстрых плазменных потоков и сопровождалась формированием суббуревого токового клина. Мы идентифицировали два характерных временных масштаба в развитии диполизации: 1) продолжительный (~13 минут) рост Вz компоненты магнитного поля; 2) кратковременные (~1 минуты) импульсы Вz компоненты (диполизационные фронты) во время фазы роста диполизации. Многоспутниковые наблюдения показали, что начало возрастания потока сверхтепловых электронов (>50 кэВ), наблюдается одновременно с началом диполизации и распространяется в том же направлении, что и диполизационное возмущение. Последующая динамика потоков электронов также аналогична динамике магнитной диполизации, т.е. постепенный рост потока электронов происходит на том же временном масштабе, что и рост диполизации. Исходя из положений адиабатической теории, было показано, что бетатронный механизм вносит значительный вклад в увеличение потоков сверхтепловых электронов. Показано, что бетатронный механизм эффективнее для более низких энергий (до 90 кэВ), чем для высоких. На фоне общего роста потока наблюдаются несколько кратковременных (~ несколько минут) электронных инжекций, связанных с импульсами Bz. Такое поведение может быть обусловлено совокупным действием локального бетатронного ускорения электронов на импульсах Bz и их последующим градиентным дрейфом в существенно неоднородном магнитном поле зоны торможения потока. Напротив, протонные инжекции наблюдались только вблизи самых сильных импульсов Bz, совместно с которыми наблюдались и сильные импульсы электрического поля. Особенности энергетических спектров этих инжекций указывают на вклад неадиабатического резонансного ускорения протонов до ~70-90 кэВ импульсами электрического поля утро-вечер, связанного с диполизационными фронтами.

# НАГРЕВ СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЫ: НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

#### И.К. Мирзоева<sup>1</sup>, С.Г. Чефранов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва, Россия

<sup>2</sup> Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

солнечная корона, нагрев, тепловой фон, рентгеновское излучение, диапазон энергий, фотоны, фотонные пары

## введение

Явление падение интенсивности рентгеновского излучения Солнца в узких диапазонах рентгеновского спектра от 2 до 15 кэВ было обнаружено в 2005 году [1] на основе анализа данных проекта «Интербол – Хвостовой зонд». В дальнейших исследованиях это явление нашло подтверждение по данным проекта RHESSI. В работах [2] и [3] общий диапазон мягкого рентгеновского излучения от 3 до 11 кэВ был разделен на узкие поддиапазоны с шагом 1 кэВ, т.е. рассматривались данные в следующих поддиапазонах рентгеновского спектра: 3-4 кэВ, 4-5 кэВ, 5-6 кэВ, 6-7 кэВ, 7-8 кэВ, 8-9 кэВ, 9-10 кэВ, 10-11 кэВ. Такое спектральное разбиение позволило наблюдать падение, а в некоторых случаях, и увеличение интенсивности рентгеновского излучения микровспышек и теплового фона солнечной короны. В отдельных случаях наблюдалось смещения максимума падения интенсивности рентгеновского излучения в сторону более жестких энергий. Более детальный анализ данных позволил установить компоненты излучения, которые чаще других ответственны за падение интенсивности: это компонента 3-4 кэВ и 4-5 кэВ, а в ряде случаев 7-8 кэВ и 8-9 кэВ. Наряду с явлением падения интенсивности, зафиксировано и повышение интенсивности в поддиапазоне 10–11 кэВ относительно всех остальных компонент диапазона 3-16 кэВ. На рис.1 - пример, иллюстрирующий, нетипичное поведение энергетического спектра теплового рентгеновского фона солнечной короны [3]. На этом примере видно, уже зафиксированное ранее, падение интенсивности компоненты 3-4 кэВ, и, одновременно, повышение интенсивности компоненты 10-11 кэВ. Данное явление хорошо иллюстрирует рис. 2, где показан энергетический спектр теплового фона солнечной короны за 10 марта 2003 г. с 13:44 UT по 13:51 UT. Обычный, падающий спектр потока рентгеновских фотонов диапазона от 4 до 10 кэВ нарушается резким провалом в поддиапазоне 3-4 кэВ и повышением в поддиапазоне 10–11 кэВ. В работах [2] и [3] был установлен факт независимости наблюдаемых явлений от вспышек и всех явлений в активных вспышечных областях солнечной короны. А также было сделано предположение о том, что физический механизм найденных явлений, скорее всего, лежит в области квантовых процессов, и, в свою очередь, этот механизм может являться причиной аномального нагрева плазмы солнечной короны.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

В 2014 году на международной космической обсерватории XMM-Newton, обнаруживают косвенные данные, свидетельствующие в пользу существования аксионов – одного из кандидатов на роль темной материи. Основная идея эксперимента на XMM-Newton заключалась в том, чтобы попытаться зарегистрировать солнечные аксионы, которые, при их наличии, должны конвертироваться в фотоны в магнитном поле Земли, GRINGAUZ 100: PLASMAS IN THE SOLAR SYSTEM, 2018 51



рис. 1. Данные, зарегистрированные на RHESSI, 10.03.2003 г. в период с 13:44 UT по 13:51 UT с разбиением на поддиапазоны с шаг ом в 1 КэВ



рис. 2. Энергетический спектр теплового фона солнечной короны за 10.03.2003 г.

#### 52 GRINGAUZ 100: PLASMAS IN THE SOLAR SYSTEM, 2018

согласно эффекту Примакова, Зарегистрировать, разумеется, возможно только эти самые результирующие фотоны рентгеновского диапазона, своеобразный автограф, говорящий о наличии аксионов. Обсерватория XMM-Newton зафиксировала искомое сезонное изменение рентгеновского фона в магнитосфере Земли в диапазоне 2-6 кэВ [4]. В работах [2], [3] речь шла о том же диапазоне 2-6 кэВ, что и в эксперименте ХММ-Newton. Совпадение диапазона энергий и эффекта вариации интенсивности рентгеновского фона в обоих случаях не может носить случайный характер. Скорее всего, можно считать экспериментально доказанным факт существования некой единой причины, которая дает в обоих случаях одинаковые рентгеновские «подписи». Мы предположили, что «виновником» таких рентгеновских «подписей» является не аксион, а некая частица – сверхлегкий скалярный бозон, который представляет собой фотонную пару. Именно фотонная пара может являться наиболее вероятным кандидатом на роль искомой темной материи. Существует теория, согласно которой Вселенная в прошлом существовала неограниченное время без какой-либо сингулярности, связанной с Большим взрывом и какими-либо его инфляционными модификациями [5]. При этом фотонные пары рождаются непрерывно во всем пространстве и наблюдаемое фоновое микроволновое излучение (ФМИ) тоже должно быть следствием такого процесса рождения фотонных пар из вакуума в процессе расширения Вселенной (которое по оценке [5] должно продолжаться еще 38 миллиардов лет, а затем смениться на режим сжатия). Эти фотонные пары могут расщепляться в магнитосфере Земли и в магнитном поле солнечной короны. На рис. 3 приводится фотонная пара в привычных обозначениях колеблющихся векторов электрического поля E<sub>1</sub> и E<sub>2</sub> и магнитного поля H<sub>1</sub> и H<sub>2</sub>. Пара должна иметь нулевую суммарную спиральность. Поэтому пары компонуются из фотонов противоположной спиральности. Именно благодаря такой структуре происходит эффект расщепления фотонной пары в магнитном поле. Выявить свойства фотонной пары можно по косвенным признакам в результате взаимодействия с окружающими частицами, либо при эффекте расшепления. В силу вышесказанного становится понятен и механизм нагрева солнечной короны. Поскольку фотонные пары должны расщепляются повсюду в магнитных полях, то и в солнечной короне идет этот процесс расщепления. На рис. 4 схематично представлен механизм нагрева солнечной короны с участием эффекта расщепления фотонных пар. Рождающееся в ядре Солнца излучение при прохождении зоны переноса лучистой энергии из-за высоких плотностей внутреннего вещества Солнца находится в состоянии диффузии.



**рис. 3.** Фотонная пара 52-proceedings of the conference

### GRINGAUZ 100: PLASMAS IN THE SOLAR SYSTEM, 2018 53

Именно по этой причине процессы расщепления фотонных пар внутри Солнца практически отсутствуют и не дают вклада в распределение температуры, которая, как известно, падает от ядра до фотосферы. На выходе из фотосферы плотность вещества падает до отрицательных порядков и вырывающееся с поверхности Солнца излучение, переходит в состоянии относительно свободного движения. В хромосфере и далее, в короне, поток фотонных пар попадает в сильное магнитное поле, где и расщепляется с выделением энергии, которая нагревает корону до 1,5×10<sup>6</sup> К.



рис. 4. Нагрев солнечной короны при расщеплении фотонных пар

- [1] Мирзоева И.К. // Письма в Астрономический журнал. 2005. Т.31. № 1. С. 57.
- [2] Мирзоева И.К. // Физика плазмы. 2013. Т.39. № 4. С. 355-366.
- [3] Мирзоева И.К. // Физика плазмы. 2018. Т.44. № 1 . С. 102-111.
- [4] Fraser .G.W. , Read A.M., Sembay S., Carter J.A., Schyns E. Potential solar axion signatures in X-ray observations with the XMM-Newton observatory // 2014. arXiv: 1403.2436.
- [5] Chefranov S.G, Novikov. E.A. Hydrodynamic vacuum sources of dark matter self-generation in accelerated universe without Big Bang // Journal of Experimental and Theoretical Physics. 2010. Vol. 111. № 5. PP. 731-743; arXiv: 1012.0241v1 [gr-qc].

# ДИАГНОСТИКА МЕЖПЛАНЕТНОЙ ПЛАЗМЫ: СОЛНЕЧНЫЕ РАДИОВСПЛЕСКИ III ТИПА

#### М.М. Могилевский, Т.В. Романцова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва, Россия; mogilevsky2012@gmail.com

1. Всплески III типа изучаются уже более 70 лет. Им посвящено огромное количество работ как наблюдательных, так и теоретических, основные результаты суммируются в большом числе обзоров [1–4] (см. рис. 1). Эти всплески наблюдаются в широком диапазоне частот от 1 ГГц до десятков килогерц [2]. Считается, что они генерируются потоками быстрых электронов, которые распространяются с почти постоянной скоростью, равной 0.3с (с – скорость света), вдоль открытых магнитных силовых линий в короне Солнца.



рис. 1. Пример динамического спектра III типа по результатам наземных измерений («Плазменная гелиогеофизика», М. Физматлит, 2008)



рис. 2. Схематическая конфигурация магнитного поля, в котором происходит ускорением электронов (стрелка) над активной областью (заштрихована) (рисунок из работы [1])

Для объяснения основных свойств всплесков III типа обычно привлекается плазменный механизм излучения [5]. Он заключается в том, что быстрые электроны возбуждают ленгмюровские волны в каждой точке короны, через которую проходят быстрые частицы (см. рис. 2). При трансформации этих волн в поперечные, в процессах рассеяния на ионах плазмы и слияния этих волн друг с другом, формируется излучение на первой и второй гармониках местной плазменной частоты. С удалением от Солнца плотность корональной плазмы убывает, а поэтому частота, на которой происходит излучение, уменьшается. При этом на динамическом спектре наблюдается дрейф всплеска от высоких частот к низким частотам (отрицательный частотный дрейф). Скорость частотного дрейфа, как оказалось при анализе в широком диапазоне частот, изменяется с частотой по степенному закону

#### df/dt=0,01.f1,84

где скорость дрейфа df/dt измеряется в мегагерцах в секунду, а частота f – в мегагерцах [6].

Из (1) можно получить зависимость плотности плазмы от расстояния в предположении постоянства линейной скорости источника излучения.

На любой выбранной частоте всплеск III типа имеет характерный временной профиль – быстрый подъем и более медленный спад. Как показали наблюдения, длительность Т всплесков III типа увеличивается с уменьшением частоты по закону близкому к T = 220/f (2). Длительность всплеска обычно определяется либо частотой столкновений частиц в плазме, либо пространственными размерами потоков быстрых частиц.

2. Первые наблюдения радиовсплесков III типа на борту космических аппаратов были проведены на спутниках Алуэт, Электрон и Зонд. Эти и последующие измерения на спутниках позволили наблюдать низкочастотную часть спектра всплесков, вплоть до десятков килогерц, что недоступно наземному наблюдателю из-за экранирования радиоволн ионосферой. Следует отметить, что зависимости (1) и (2) для низкочастотной части спектра в некоторых случаях нарушаются за счет модификации параметров пучка. По анализу частотной дисперсии радиовсплесков было установлено, что скорость источника (пучка электронов) остается постоянной от внешних областей Солнца до орбиты Земли.



рис. 3. Пример радиовсплеска III типа с двумя «ветвями» – с частотной дисперсией и без дисперсии, зарегистрированного на спутнике ИНТЕРБОЛ-2 в эксперименте ПОЛЬРАД

Как правило, второй след, без дисперсии, наблюдается у сильных радиовсплесков, но большая амплитуда не является достаточным условием его появления. Характерная длительность такого следа – от нескольких секунд, до нескольких десятков секунд. С учетом временного разрешения бортовых приборов – несколько секунд в зависимости от режима измерений, частотная дисперсия у дополнительного отсутствует.

Результаты экспериментальных исследований можно сформулировать следующим образом:

- По наблюдениям на КА солнечные радиовсплески III типа могут иметь две ветви: (а) диффузную с частотной дисперсией, (б) узкую без частотной дисперсии (ДРВ).
- Характерная длительность ветви (б) составляет от нескольких секунд до нескольких десятков секунд.
- Радиовсплески ДРВ составляют ≤ 1% от общего количества наблюдаемых радиовсплесков.

#### 56 GRINGAUZ 100: PLASMAS IN THE SOLAR SYSTEM, 2018

- Радиовсплески ДРВ наблюдаются одновременно на нескольких спутниках, находящихся при различных окружающих условиях (величина магнитного поля, плотность окружающей плазмы).
- 5. Радиовсплески ДРВ сопровождаются всплесками солнечного рентгеновского излучения.

В работе обсуждается возможный механизм возбуждения второго следа без частотной дисперсии связанный воздействием рентгеновского излучения. В результате этого вокруг спутника образуется дополнительная ионизация, в которой возбуждается переходное излучение.

- [1] Уайлд Дж., Смерд С. Радиовсплески в солнечной короне. УФН, 1974, т. 113, с. 503-533.
- [2] Benz A.O., Su H., Magun A., Stehling W. Millisecond Microwave Spikes at 8 GHz during Solar Flares. 1992, Astron. Astrophys., v. 93, p. 539.
- [3] В.Н. Мельник, А.А. Коноваленко, Х.О. Рукер и др. Свойства мощных солнечных всплесков III типа в декаметровом диапазоне длин волн, Радиофизика и радиоастрономия, 2010, т. 15, № 2, с. 129-139.
- [4] Smith D.F., Davis W.D. Type III Radio Bursts and Their Interpretation, Space Sci. Rev., 1975, Vol. 16, No. 1-2, P. 91-144.
- [5] Гинзбург В.Ј., Железняков В.В. О возможных механизмах спорадического радиоизлучения Солнца. 1958, Астрон. ж., т. 35, с. 694-708.
- [6] Alvarez H., Haddock F.T. Solar wind density model from km–wave Type III bursts, Sol. Phys., 1973., Vol. 29., P. 197-209.

# СТРУКТУРА КОРОНАЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ МАССЫ И УСКОРЕНИЕ ЧАСТИЦ

#### И.Ф. Никулин

Государственный Астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ, Москва, Россия; ifn@sai.msu.ru

### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

корональные выбросы массы, ускорение частиц, рентгеновские вспышки, магнитные и электрические поля

Рассмотрены различия структур изображений выбросов в хромосферных линиях и корональном континууме. Предложена гипотеза о том, что наружная, более диффузная рассеивающая оболочка выброса создается избытком свободных электронов благодаря Комптон-эффекту. Появившееся при этом электрическое поле ускоряет частицы за время действия жесткого излучения. При этом направленное движение ускоренных частиц создает магнитные поля.

# АЛГОРИТМ СЕГМЕНТАЦИИ СВЯЗНЫХ ОБЛАСТЕЙ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ СОЛНЦА

#### В.А. Ожередов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва, Россия

# КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

сегментация изображений, односвязная область, изображение в рентгеновском диапазоне, информативные параметры пространственной динамики корональных дыр, солнечный ветер

## введение

Визуальная экспертная оценка рентгеновского изображения Солнца играет одну из ключевых ролей при прогнозировании его активности. Для полного ухода от экспертных оценок в прогнозе и передаче последнего на сторону автоматики необходима система информативных признаков изображения, т.е. некоторого количества параметров картинки, которые включаются в регрессионную модель прогноза.

В данной работе мы рассматриваем один из таких параметров – это взвешенная площадь корональных дыр, размеры которых превышают заданное пороговое значение. Как известно, именно в этих областях происходят процессы, определяющие параметры солнечного ветра.

Подход в данной работе позволяет рассматривать весь солнечный диск в качестве области интереса, выделять крупные корональные дыры в любом количестве и следить за их пространственной динамикой. Показано, что эта динамика сильно коррелирует с вариациями скорости солнечного ветра.

Для анализа был разработан программный бот, позволяющий в автоматическом режиме загружать пакет изображений корональных дыр в рентгеновском диапазоне за заданный пользователем временной диапазон с сайта, на котором эти изображения доступны только по одному (https://solarmonitor.org/full\_disk.php).

Данные по солнечному ветру получены с сайта http://www.srl.caltech.edu/ ACE/ASC/level2/lvl2DATA\_SWEPAM.html.



рис. 1. Слева – исходная битовая маска (серые пиксели – 0, розовые пиксели – 1), справа – результат сегментации (разные цвета соответствуют разным кластерам)

# СЕГМЕНТАЦИЯ БИТОВЫХ МАСОК

Корональная дыра (Coronal Hole, CH) на рентгеновском изображении – это чёрные пиксели внутри солнечного диска. Таким образом, всё изображение можно представить в виде двуцветной битовой маски, где чёрные пиксели соответствуют логической единице (активные пиксели), а остальные пиксели – нулю. Задачей сегментации является распределение активных пикселей по группам, каждая из которых соответствует односвязной области. Односвязная область состоит из пикселей, между каждой парой из которых можно построить маршрут, где последовательные пиксели соприкасаются друг с другом стороной или углами [1]. Разработан достаточно быстрый параллельный алгоритм сегментации, дающий точный результат кластеризации пикселей по односвязным областям (рис. 1).

# ПОЛУЧЕНИЕ ВЗВЕШЕННОЙ ПЛОЩАДИ КОРОНАЛЬНЫХ ДЫР

Результат сегментации исходного изображения позволяет выделить область интереса (рис. 2а), которой в нашем случае является весь солнечный диск, и найти центр и радиус последнего (рис. 2б). После отсечения пренебрежимо малых кластеров (порог определяется в результате оптимизационной процедуры [2] и составляет 594 пикселя) получается результат как на рис. 2б.



рис. 2.

а) область интереса (солнечный диск) и корональные дыры (черные);
б) значимые кластеры, соответствующие корональным дырам на (а).

Желтая точка – центр солнечного диска

Мы обработали 30 ежедневных изображений Солнца за апрель 2017 года, и ввели информативный параметр пространственной динамики СН – взвешенная площадь СН (красных кластеров) с учётом их расстояния до центра солнечного диска. Расстояние учитывалось при помощи сигмоидальной весовой функции (рис. 3) таким образом, чтобы исключить влияние СН на границе диска. При этом параметры весовой функции – размер диффузной области и координаты точки перегиба – подбирались в результате оптимизационной процедуры [2]. Мы наложили динамику взвешенных площадей корональных дыр, условно обозначаемых как Area, на кривую вариации скорости солнечного ветра за весь анализируемый период (рис. 4).

Как видно из рис. 4, динамики взвешенных площадей СН и солнечного ветра чрезвычайно схожи между собой. Оценка корреляции со сдвигом 3 дня для красной кривой даёт коэффициент 0.7. Из этого следует, что данный параметр является информативным.



рис. 3. Оптимальная весовая функция для учёта расстояния пикселей СН до центра солнечного диска (красная линия обозначает его радиус)



рис. 4. Динамика взвешенных площадей кластеров СН (красная кривая) и скорости солнечного ветра (зеленая кривая)

### БЛАГОДАРНОСТИ

Автор благодарит В.Н. Ишкова за предоставленные источники данных, Т.К. Бреус за обсуждение результатов и А.А. Петруковича за постановку задачи и обсуждение результатов.

- [1] Гонзалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. Москва: Техносфера, 2012, 1104 с.
- Репозитарий кода алгоритма дифференциальной эволюции https://github.com/ tmeits/DiffEvol/tree/master/devec3.

# РОЛЬ К.И. ГРИНГАУЗА В РЕШЕНИИ ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

#### М.И. Панасюк<sup>1</sup>, Л.С. Новиков<sup>1</sup>, О.С. Графодатский<sup>2</sup>

- <sup>1</sup> Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ, Москва, Россия; panasyuk@sinp.msu.ru
- <sup>2</sup> Научно-производственное объединение имени С.А. Лавочкина, г. Химки, Московская обл., Россия

### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

магнитосферная плазма, радиационные пояса Земли, космический аппарат, электризация, математическое моделирование, экспериментальное исследование

Выполненные К.И. Грингаузом исследования магнитосферной и межпланетной плазмы сыграли огромную роль не только в формировании современных представлений о строении космического пространства и происходящих в нем физических процессах, но имели также огромное значение для решения многих прикладных проблем, связанных с созданием и эксплуатацией космических аппаратов (КА), в частности для решения проблемы электризации КА. При электризации аппаратов, обусловленной взаимодействием с окружающей космической плазмой, на их поверхности. покрытой в значительной степени диэлектрическими материалами, могут возникать потенциалы ~ 10-20 кВ, что ведет к развитию электрических разрядов, создающих интенсивные электромагнитные помехи работе бортового электронного оборудования, а в ряде случаев повреждающих и разрушающих материалы и элементы конструкции КА. Данная проблема встала перед специалистами особенно остро в 1970-х – 1980-х гг. в связи с началом освоения геостационарной орбиты для создания космических систем радиосвязи и телевизионного вещания. В тот период сведения о характеристиках магнитосферной плазмы в области геостационарной орбиты были весьма ограничены, равно как и экспериментальные данные об электризации геостационарных спутников, не была в должной мере развита теория процессов электризации, не были разработаны методы защиты КА от влияния электризации. Все эти вопросы приходилось решать параллельно, чему в значительной степени способствовали пионерские работы К.И. Грингауза по изучению электризации спутников в ионосферной плазме [1] и последующие работы по исследованию плазмосферы Земли, солнечного ветра и т.д.

В докладе приведены сведения об исследованиях параметров магнитосферной плазмы и процессов электризации, выполненных на российских геостационарных спутниках с помощью созданных в НИИЯФ МГУ электростатических спектрометров электронов и протонов магнитосферной плазмы с энергиями ~ 0.1–12 кэВ [2], включая данные аналогичных исследований на борту функционирующего в настоящее время геостационарного спутника Электро-Л2, который был разработан НПО им. С.А. Лавочкина. Интерпретация поучаемых со спутников экспериментальных данных производится на основании созданной в НИИЯФ МГУ компьютерной модели электризации реальных КА сложной конфигурации с неоднородной поверхностью, позволяющей рассчитывать трехмерные распределения потенциала на поверхности и в окрестности КА для случаев электризации на геостационарной орбите и на низких полярных орбитах при одновременном воздействии на аппарат холодной ионосферной плазмы и авроральной радиации. Созданная в НИИЯФ МГУ модель электризации КА

#### 62 GRINGAUZ 100: PLASMAS IN THE SOLAR SYSTEM, 2018

соответствует по своим возможностям лучшим зарубежным разработкам и включена в качестве справочной модели в ряд международных стандартов [3]. Несколько позднее исследований электризации поверхности КА под действием космической плазмы было начато изучение объемной электризации диэлектрических материалов КА. обусловленной электронами радиационных поясов Земли (РПЗ) с энергиями ~ 1–10 МэВ. Такие электроны способны создавать в диэлектриках заряд на глубинах 1-2 см и приводить в конечном итоге к возникновению пробоев в объеме материалов, следствием чего являются те же негативные воздействия на КА. Современные исследования показывают, что значительная часть отказов и сбоев в работе оборудования КА обусловлена эффектами объемной электризации. В этой связи в докладе обсуждаются результаты исследований потоков частиц РПЗ в сопоставлении с результатами исследований магнитосферной плазмы, а также приводятся данные некоторых лабораторных экспериментов НИИЯФ МГУ по изучению процессов поверхностной и объемной электризации материалов.

- [1] Грингауз К.И., Зеликман М.Х. Измерение концентрации положительных ионов вдоль орбиты искусственного спутника Земли // УФН. 1957. т. 63. вып. 16. с. 239-252.
- [2] Novikov L.S., Mileev V.N., Krupnikov K.K., Makletsov A.A., Marjin B.V., Ryazantseva M.O., Sinolits V.V., and Vlasova N.A. Simultaneous investigation of magnetospheric plasma and spacecraft charging // Advances in Space Research, 2008. V. 42. No 7. P. 1307-1312.
- [3] Novikov L.S., Makletsov A.A., and Sinolits V.V. Comparison of COULOMB-2, NASCAP-2k, MUSCAT and SPIS codes for geosynchronous spacecraft charging // Advances in Space Research. 2016. V. 57. No 2. P. 671-680.

# УСКОРЕНИЕ ЧАСТИЦ В БЕССТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАЗМЕ В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ФЛУКТУАЦИЙ, СОПРОВОЖДАЮЩИХ МАГНИТНУЮ ДИПОЛЯРИЗАЦИЮ В ХВОСТЕ МАГНИТОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

Е.И. Пархоменко<sup>1</sup>, Х.В. Малова<sup>1,2</sup>, Е.Е. Григоренко<sup>1</sup>, В.Ю. Попов<sup>1,3,4</sup>, А.А. Петрукович<sup>1</sup>, Д. Делькур<sup>5</sup>, Е.А. Кронберг<sup>6,7</sup>, П. Дали<sup>6</sup>, Л.М. Зеленый<sup>1</sup>

- <sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва, Россия; jookove@mail.ru
- <sup>2</sup> Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
- <sup>3</sup> Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
- <sup>4</sup> Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия
- <sup>5</sup> Лаборатория физики плазмы, Ecole Polytechnique, CNRS, Франция
- <sup>6</sup> Институт исследований солнечной системы им. Макса Планка, Гёттинген, Германия
- 7 Мюнхенский университет Людвига-Максимилиана, Германия

Работа посвящена исследованию процессов ускорения частиц плазмы в тонких токовых слоях, которые образуются во время магнитосферных суббурь в хвосте магнитосферы Земли. Построена и исследована численная модель магнитной диполизации, которая включает три временных шкалы: (1) фактическую диполяризацию, когда нормальное магнитное поле изменяется в течение нескольких минут от минимального до максимального уровня; (2) резкие всплески (импульсы), интерпретируемые как прохождение нескольких фронтов диполяризации с характерными временными масштабами <1 мин и (3) всплески электрических и магнитных флуктуаций с частотами вплоть до электронной гирочастоты, возникающие на временных масштабах (≤1 с). Модель позволяет изучать вклады в ускорение частиц в результате действия указанных выше процессов (1)-(3). Показано, что данные процессы носят резонансный характер на разных временных масштабах. Для заданных начальных каппа-распределений по скоростям получены энергетические спектры ускоренных частиц трех сортов: протонов р+, ионов кислорода О+ и электронов е-. Показано, что ионы О+ наиболее эффективно ускоряются в результате действия механизма (1), ионы H+ (и в некоторой степени электроны) эффективно ускоряются в результате второго механизма. Также обнаружено, что высокочастотные электрические и магнитные флуктуации, сопровождающие магнитную диполяризацию, как и в (3), эффективно ускоряют электроны.

# ИЗМЕНЕНИЯ СТРУКТУРЫ МАГНИТОСФЕРЫ, СВЯЗАННЫЕ С ПРЕДСТОЯЩЕЙ ИНВЕРСИЕЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ

### В.Г. Петров

ФГБУ Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), Москва, г. Троицк, Россия

# КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

главное магнитное поле, магнитосфера, переполюсовка

# введение

По данным модели IGRF-12 [1] проанализировано изменение **глобальной структуры внутренних источников магнитного поля Земли**. Наряду с уменьшением дипольного магнитного момента, происходит еще более быстрый рост мультипольных моментов. Это подтверждает теоретическую модель инверсии магнитного поля, как постепенное уменьшение дипольного поля при сохранении, в общем, его направления и усиление мультипольных моментов. Палео- и археомагнитные данные показывают, что этот процесс происходит уже около 2.5 тыс. лет и многократно повторялся в прошлом. Уменьшение дипольного магнитного момента приводит к приближению магнитопаузы к Земле и полному исчезновению магнитосферы через примерно 1.5 тыс. лет.

# СОВРЕМЕННЫЕ ПРИЗНАКИ ПЕРЕПОЛЮСОВКИ

Достоверные измерения магнитного момента Земли имеются с 1900 г., когда начали регулярно создавать модели магнитного поля Земли. На рис. 1 представлено изменение магнитного момента, вычисленное по данным коэффициентов h<sub>0</sub>, h<sub>1</sub>, g<sub>1</sub> модели IGRF-12, и его линейная интерполяция. Менее достоверные данные показывают, что такое же линейное уменьшение наблюдается, по крайней мере, с 1850 г. (модель GUFM - [2]), а косвенные данные показывают, что уменьшение длится уже около 2.5 тысячи лет [3]. Возможны три механизма переполюсовки -1) диполь сохраняет своё направление, но уменьшается до нуля, а затем появляется вновь, но уже другого, противоположного направления, 2) постепенный поворот диполя через экватор без существенного изменения его величины [4] и 3) переход энергии магнитного поля из дипольного члена без значительного изменения его направления в мультипольные и обратный переход из мультипольных в дипольный член противоположного направления. Анализ палеомагнитных данных так и не позволил сделать однозначный выбор в пользу какого-то механизма. Первые анализы поддерживали второй вариант, но более поздние работы свидетельствуют скорее в пользу третьего варианта [5 и ссылки в ней].

Для оценки энергетического вклада различных пространственных составляющих магнитного поля в общую энергию используется понятие энергетического спектра магнитного поля, где вклад каждой пространственной гармоники вычисляется по формуле [6],

$$R_n = (n+1) \sum_{m=0}^{n} |(g_n^m)^2 + (h_n^m)^2|,$$

где  $R_n$  описывает энергетический вклад гармоники n в полную энергию поля. Для оценки относительного вклада дипольной и мультипольных составляющих в полную энергию поля нами было рассчитано отношение суммарной мощности всех мульпипольных гармоник (*n*=2–13) к дипольной (*n*=1). Под дипольным членом здесь понимается наклонный диполь, описываемый тремя первыми членами разложения. Результат представлен на рис. 2. Из рисунка видно, что за последние 120 лет это отношение увеличилось более чем в два раза, причем увеличение происходит не только за счет уменьшения мощности дипольного члена (в этом случае отношение изменилось бы только в 1.16 раза), но и за счет существенного увеличения мощности мультипольных членов. Таким образом, имеющиеся на настоящее время данные показывают, что процесс изменения полярности магнитного поля начался по 3 варианту. Однако в настоящее время убывание энергии дипольной составляющей происходит быстрее, чем рост мультипольной, т.е. общая энергия магнитного поля уменьшается.



рис. 1. Изменение магнитного момента Земли по модели IGRF-12.



рис. 2. Отношение суммарной мощности мультипольных членов модели IGRF к дипольному члену

# ДИНАМИКА МАГНИТОСФЕРЫ В ПРОЦЕССЕ ПЕРЕПОЛЮСОВКИ

Процесс взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли в значительной степени зависит от свойств самой магнитосферы, в частности, от величины магнитного поля Земли, которое определяется магнитным моментом земного диполя. Наиболее характерной величиной, описывающей структуру магнитосферы, является расстояние до подсолнечной

#### 66 GRINGAUZ 100: PLASMAS IN THE SOLAR SYSTEM, 2018

точки магнитосферы. Существует несколько методик и формул для определения этого расстояния и наиболее распространенный подход изложен в [7]. Считая, что в лобовой точке всё динамическое давление солнечного ветра перешло в тепловую энергию и пренебрегая магнитным полем в солнечном ветре и тепловым давлением плазмы в магнитосфере, а также считая магнитное поле дипольным, получается следующая зависимость

$$r_0 = \left(\frac{f^2 M_E^2}{8k\pi nm_p v^2}\right)^{1/6}$$

расстояния до подсолнечной точки  $r_{0:}[8]$ , где  $M_E$  – магнитный момент земного диполя,  $m_\rho$  – масса протона, n – плотность протонов, v – скорость солнечного ветра. Коэффициент f определяет степень усиления дипольного поля токами на магнитопаузе, для 3-х мерной модели f=2.44, параметр k=0.88 [9].

Если считать, что магнитный момент будет уменьшаться с той же скоростью, что и сейчас, то можно прогнозировать уменьшение среднего расстояния до подсолнечной точки магнитосферы (рис. 3). Здесь характерным временем является 3000–3100 г., когда лобовая точка приблизится к геостационарной орбите. До этого времени уменьшение расстояния со временем будет происходить примерно линейно, затем скорость уменьшения увеличится и примерно к 3600 г. магнитосфера Земли исчезнет. Изменение размеров магнитосферы изменит и внутреннюю структуру, однако модели внутренней магнитосферы содержат ряд экспериментальных параметров, которые определены для современной структуры магнитосферы, поэтому спрогнозировать эти изменения очень сложно.



рис. 3. Среднее расстояние до подсолнечной точки магнитосферы.

Конечно, экстраполяция 200-летнего интервала на 1500 лет вперёд процедура не очень надёжная, однако имеется много палеомагнитных данных, которые, хотя и не позволяют выяснить детали процесса уменьшения, доказывают факт наличия такого процесса. Исследование намагниченности археологических остатков позволяет оценить и величину магнитного поля. Конечно, по достоверности и точности они не сопоставимы с современными моделями МПЗ, но они указывают, что уменьшение магнитного момента наблюдается в течение уже 2500 лет [5].

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Имеющиеся в настоящее время данные о динамике главного магнитного поля Земли показывают явные признаки начавшегося процесса переполюсовки (или, по крайней мере, экскурса) магнитного поля Земли. Уменьшение дипольного момента при общем сохранении его направления и ещё более быстрый рост мультипольных моментов свидетельствуют в поддержку одного из трех возможных механизмов переполюсовки. При сохранении темпа уменьшения магнитного момента лобовая точка окажется внутри магнитосферы после 3000 г. и магнитосфера исчезнет к 3600 г.

- [1] Thébault E, Finlay C.C, Beggan C.D. at al. International Geomagnetic Reference Field: the 12<sup>th</sup> generation // Earth, Planets and Space. 2015. V. 67. P. 79.
- [2] Jackson A., Jonkers A.R.T., Walker M.R. Four centuries of geomagnetic secular variation from historical records // Philos. Trans. R. Soc. Lond. 2000. A358. P. 957-990.
- [3] Yang S., Odah H., Shaw J. Variations in the geomagnetic dipole moment over the last 12000 years // Geophys. J. Int. 2000. V. 140. P. 158-162.
- [4] Constable CG. Geomagnetic Reversals: Rates, Timescales, Preferred Paths, Statistical Models, and Simulations. Earth's core and lower mantle. // Fluid mechanics of astrophysics and geophysics. (Jones CA, Soward AM, Zhang K, Eds.).: 77-99, London; New York: Taylor & Francis, 2003.
- [5] Valet J.-P., and Fournier A. Deciphering records of geomagnetic reversals // Rev. Geophys., V. 54, P. 410-446, 2016, doi: 10.1002/2015RG000506.
- [6] Backus G., Parker R.L., and Constable C. Foundations of geomagnetism. Cambridge University Press, 1996.
- [7] Paschmann G. The Earth's Magnetopause // Geomagnetism vol. 4, 295-331, 1991.
- [8] Mead C.D. Deformation of the geomagnetic field by the solar wind // J. Geophys. Res. V. 69, P. 1181-1195, 1964.
- [9] Spreiter J.R., Alksne A.Y., and Summers A.L. External aerodynamics of the magnetosphere // Physics of the magnetosphere, Eds. R.L. Corovillano, J.F. McClay, and H.R. Radoski, D. Reidel, Dordrecht, P. 301-364, 1968.

# ПОИСКИ ВОЗМУЩЕНИЙ ВЕРХНЕЙ ИОНОСФЕРЫ И ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ НАД ТАЙФУНАМИ ПО ДАННЫМ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ СПУТНИКОВ

В.А. Пилипенко<sup>1</sup>, В.И. Захаров<sup>2</sup>, В.А. Грушин<sup>1</sup>, С.И. Климов<sup>1</sup>, В.А. Мартинес-Беденко<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва, Россия

<sup>2</sup> МГУ им. Ломоносова, Москва, Россия

<sup>3</sup> Институт физики Земли РАН, Москва, Россия

Сильные метеорологические возмущения в атмосфере, сопровождающиеся генерацией волн и турбулентности, могут оказывать влияние на плазму ионосферы и геомагнитное поле. Для поиска этих эффектов мы проанализировали данные электромагнитных и плазменных измерений на низкоорбитальных спутниках SWARM и Международной Космической Станции (МКС). По данным SWARM обнаружены крупномасштабные (порядка сотен км) возмущения плазмы с амплитудами до первых десятков %, которые предположительно вызваны ВГВ, возбуждаемыми тайфуном. При пролете МКС вблизи тайфуна Hagupit 2014 г. зарегистрировано резкое усиление интенсивности флуктуаций электрического поля и потоков плазмы в диапазоне до 400 Гц. Во время пролетов SWARM над интенсивной фазой тайфуна VongFong 2014 г. зарегистрировано наличие в верхней ионосфере «магнитной ряби» – флуктуаций малой амплитуды (0.5–1.5 нТл) с преобладающим периодом около нескольких десятков секунд, вызванной мелкомасштабными продольными токами.

# ГЕНЕРАЦИЯ ВОЛН МАГНИТНОГО ПОЛЯ В НЕБЕСНЫХ ТЕЛАХ ОТ ПРОСТРАНСТВЕННО РАЗДЕЛЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ

#### Е.П. Попова

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия; popovaep@ifz.ru

## КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

магнитное поле, динамо-волна, Солнце, солнечная активность

Наблюдательные данные показывают, что солнечная циклическая активность имеет сложную структуру, например, 22-летний, квазидвухлетний, 7-летний, вековой циклы (цикл Гляйсберга), периодически возникающие раз в несколько сотен лет глобальные минимумы [1–3]. В [4] были проанализированы фотометрические данные звезды HR 1099 за годы 1975–2006, и удалось выявить два цикла активности с периодом 15–16 лет и 5.3±0.1 года. Такие данные могут указывать на то, что в этих небесных телах возможна генерация нескольких различных волн магнитной активности.

В работе [5] была предпринята попытка связать одновременное существование нескольких циклов магнитной активности Солнца с генерацией нескольких независимых динамо-волн Паркера. В качестве примера была численно решена задача динамо со слоистой структурой конвективной зоны (два слоя) солнцеподобного объекта. Каждый слой характеризовался определенным значением коэффициента турбулентной диффузии магнитного поля. Авторы показали, что при достаточном различии между коэффициентами турбулентной диффузии в слоях, в каждом из них может генерироваться своя динамо-волна.

Однако, вопрос о строгом аналитическом исследовании задачи о существовании нескольких волн до сих пор оставался открытым. Целью данной работы было показать, что существует класс точных аналитических решений в задаче о генерации нескольких независимых динамо-волн на примере плоской задачи с двумя источниками генерации. В данной работе для плоского слоя аналитически показано, что в случае пространственно разделенных источников генерации магнитного поля в небесном теле возникают волны с разными частотами, зависящими от физических параметров источников («динамо-чисел»). Каждая из волн при этом в основном взаимодействует со своим источником, а степень взаимного перекрытия волн уменьшается с увеличением расстояния между источниками [6].

Работа выполнена при поддержке РНФ: грант N 16-17-10097.

- Gleissberg W. The eighty-year solar cycle in auroral frequency numbers // J. Brit. Actron. 1965. V. 75. P. 227.
- [2] Schove D.J. Sunspot cycles. Stroudsburg, PA, Hutchinson Ross Publishing Co. (Benchmark Papers in Geology), 1983.
- [3] Obridko V.N., Sokoloff D.D., Kuzanyan K.M. et al. Solar cycle according to mean magnetic field data // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2006. V. 365. P. 827.
- [4] Berdyugina S.V., Henry G.W. Butterfly diagram and activity cycles in HR 1099// Astrophys. J. 2007. V. 659. L157.
- [5] Boyer D.W., Levy E.H. Multiple periodicities in the solar magnetic field: possible origin in a multiple-mode solar dynamo // Astrophys. J. 1992. V. 396. P. 340.
- [6] Попова Е.П. Генерация волн магнитного поля в небесных телах от пространственно разделенных источников // Доклады Академии наук. Т. 475. № 5. С. 511-513.
# МОДУЛЯЦИЯ АМПЛИТУДЫ ДНЕВНЫХ ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ АЛЬВЕНОВСКОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТЬЮ ПЕРЕД ФРОНТОМ ОКОЛОЗЕМНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

#### А.С. Потапов, Т.Н. Полюшкина, Р.А. Рахматулин, А.Ю. Пашинин

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия; potapov@iszf.irk.ru

### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

межпланетная плазма; альвеновская турбулентность; околоземная ударная волна; ориентация вектора ММП; геомагнитные пульсации

В межпланетной плазме существуют неоднородности, турбулентность, волны различной частоты, которые могут приводить к значительным вариациям направления вектора межпланетного магнитного поля (ММП), в том числе и к его развороту перпендикулярно потоку солнечного ветра (СВ).

В данной работе мы пытаемся найти прямые свидетельства связи вариаций амплитуды Pc3 с МГД-волнами в CB, в первую очередь с альвеновскими волнами, которые вызывают изменения ориентации вектора ММП. На примере двух десятков 6-часовых интервалов наблюдения геомагнитных пульсаций типа Pc3 продемонстрировано воздействие изменений направления ММП на амплитуду пульсаций (эффект Троицкой–Большаковой [1]. Позднее найденный эффект был интерпретирован [2] в рамках гипотезы о возбуждении пульсаций Pc3 перед фронтом околоземной ударной волны за счет неустойчивости потока отраженных от фронта ионов [3]). Показано, что источником изменений конусного угла ММП часто являются альвеновские волны, распространяющиеся в CB. Для анализа привлекались измерения геомагнитных пульсаций на среднеширотной обсерватории Узур и на трех космических аппаратах за пределами околоземной ударной волны.

Результаты свидетельствуют, что влияние оказывают лишь волны с периодом более 40–60 мин в неподвижной относительно Земли системе координат. Альвеновская турбулентность более высокой частоты некогерентна, колебания носят хаотический характер, не согласованный по амплитуде и фазе ни между спутниками, ни с вариациями амплитуды Рс3. В отдельных случаях модуляция амплитуды пульсаций оказывается связанной с прохождением границы сектора ММП. Оценка направления распространения альвеновских волн показала, что преимущественно они распространяются от Солнца, но нормали волновых фронтов могут отклоняться от линии Солнце–Земля. Приведена статистика основных свойств колебательных структур в межпланетной среде, обнаруженных нами в период наблюдений.

Обнаружение связи волновой активности в CB с модуляцией амплитуды наблюдаемых на земле геомагнитных пульсаций типа Pc3 высвечивает дополнительный элемент общей картины солнечно-магнитосферного взаимодействия: воздействие альвеновских волн CB на режим геомагнитных УНЧ колебаний в диапазоне 10–100 мГц. Если иметь в виду что, по всей видимости, эти альвеновские волны имеют своим источником колебания солнечной фотосферы [4–7], можно считать, что обнаружена еще одна нить, связывающая нашу планету с Солнцем.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №№ 16-05-00056 и 16-05-00631.

- [1] Большакова О.В., Троицкая В.А. Связь направления межпланетного магнитного поля с режимом устойчивых колебаний // Доклады АН СССР. 1968. Т. 180. № 2. С. 343-346.
- [2] Большакова О.В., Троицкая В.А., Русакова Т.Б. Контроль межпланетным магнитным полем пульсаций РсЗ в солнечном ветре и на земле // Геомагнетизм и аэрономия. 1987. Т. 27. № 2. С. 345-346.
- [3] Гульельми А.В., Троицкая В.А. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы. М.: Наука, 1973. 208 с.
- [4] Erdélyi R., Pintér B., Malins C. Leakage of photospheric motions into the magnetic solar atmosphere: New prospects of magneto-seismology // Astron. Nachr. 2007, V. 328(3). P. 305-308.
- [5] Tomczyk S., McIntosh S.W., Keil S.L., Judge P.G., Schad T., Seeley D.H., Edmondson J. Alfvén waves in the solar corona // Science. 2007. V. 317. P. 1192-1196.
- [6] Потапов А.С., Полюшкина Т.Н., Пуляев В.А. Наблюдения УНЧ-волн на Солнце и в солнечном ветре на орбите Земли // Солнечно-земная физика. 2012. Вып. 20. С. 45-49.
- [7] Potapov A.S., Polyushkina T.N., Pulyaev V.A. Observations of ULF waves in the solar corona and in the solar wind at the Earth's orbit // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2013. V. 102 P. 235-242.

# СЕРПЕНТИННАЯ ЭМИССИЯ КАК ОТРАЖЕНИЕ ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ НА СОЛНЦЕ И В СОЛНЕЧНОМ ВЕТРЕ

#### А.С. Потапов<sup>1</sup>, Б.В. Довбня<sup>2</sup>, А.В. Гульельми<sup>3</sup>

- <sup>1</sup> Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия; potapov@iszf.irk.ru
- <sup>2</sup> Геофизическая обсерватория Борок ИФЗ РАН, Ярославская область, Россия
- <sup>3</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта, Москва, Россия

# КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

колебания солнечной фотосферы, солнечный ветер, серпентинная эмиссия, частотная модуляция, спектр мощности

Рассмотрено возможное влияние фотосферных пятиминутных колебаний на ионно-циклотронные волны в солнечном ветре. Мы исходим из предположения, что эти волны испытывают модуляцию с характерным периодом пять минут под влиянием волн Альвена, вызванных движениями фотосферы. Теория предсказывает глубокую частотную модуляцию. Ожидается такая модуляция главным образом из-за изменения ориентации линий межпланетного магнитного поля, которые, в свою очередь, вызваны альвеновскими волнами, распространяющимися с Солнца. Чтобы проверить теоретические предсказания, мы проанализировали записи ультранизкочастотных (УНЧ) геоэлектромагнитных волн в поисках перманентных квазимонохроматических колебаний естественного происхождения в диапазоне Рс1–2 (0.1–5 Гц), несущая частота которых изменяется со временем в широком интервале значений. В результате мы обнаружили так называемую серпентиновую эмиссию (SE), которая наблюдалась в Антарктиде на станции Восток вблизи Южного геомагнитного полюса. Постоянство, диапазон частот, и глубокая частотная модуляция SE соответствует качественным свойствам ионно-циклотронных волн в солнечном ветре. В контексте этой работы одной из важных особенностей SE является четко выраженная пятиминутная модуляция частоты. Показано, что 5-минутная модуляция несущей частоты SE является наиболее характерной и устойчивой в спектре эмиссии. Колебания частоты с таким периодом присутствуют при умеренно-спокойной геомагнитной возмущенности (Кр=0-2) примерно в 70% от общего времени наблюдения SE. В спектре мощности модуляции SE, полученном после попиксельной оцифровки исходной сонограммы сигнала, отчетливо выделяется пик на периодах, близких к 5 минутам. При детальном изучении найдено соответствие спектра эмиссии спектру короткопериодных колебаний Солнца. На основе результатов проведенного анализа делается вывод, что модуляцию несущей частоты серпентинной эмиссии с периодом 5 минут можно рассматривать как отражение колебаний в фотосфере с тем же периодом. характерным для собственных колебаний Солнца.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ №№ 16-05-00056 и 16-05-00631.

# ОБ ОПЫТЕ ВЫБОРА ОРБИТ ДЛЯ КОСМИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ, ИСХОДЯ ИЗ ЗАДАЧ ПРОЕКТОВ И НА ОСНОВЕ ДИНАМИКИ ОГРАНИЧЕННОЙ ЗАДАЧИ ТРЁХ ТЕЛ

#### В.И. Прохоренко

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва, Россия; vprokhorenko@mail.ru

#### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

модели магнитосферы, возмущающие функции обусловленные влиянием сжатия планеты и влиянием третьего тела

#### введение

Начало моей трудовой деятельности (после окончания мехмата МГУ) совпало с началом Космической эры. В сентябре 1957 года я получила распределение в п/я 2427, ныне НПЦ Автоматики и Приборостроения им. акад. Н.А. Пилюгина. Моя первая работа в отделе Найшуля была связана с управлением движением ракеты-носителя при запуске космических аппаратов, а запуск первого искусственного спутника Земли (ИСЗ) 4 октября 1957 года был «боевым крещением» для всех, кто имел отношение к этой области деятельности.

В 1961 году я перешла на работу в ЦНИИмаш (тогда это был НИИ 88, возглавляемый Г.А. Тюлиным, а затем Ю.А. Мозжориным), а в конце 1968 года перешла в ИКИ АН СССР, в только что созданный отдел П.Е. Эльясберга. Опираясь на опыт работы, накопленный в предыдущих организациях, я предложила разработать универсальную программу на языке Фортран для расчёта движения ИСЗ с учётом различных возмущающих факторов и для навигационного сопровождения космических экспериментов. Описание программного комплекса ОРБИТА появилось в 1976 году, а функционировать этот комплекс начал раньше.

В начале 1981 года П.Е. передал мне рисунок, сделанный в Чешском Астрономическом Институте, на котором на шкале времени 1972–1985 гг. было представлено время существования спутников серии «ПРОГНОЗ»



(от № 1 до № 7). На рис. 1 показана аналогичная картинка для всех спутников серии ПРОГНОЗ (от № 1 до № 12) и прогноз времени существования спутника СПЕКТР-Р (запущенного в 2011 году). Все спутники ПРОГНОЗ рано или поздно заканчивали свое баллистическое существование соударением с Землей. Заметив мой интерес, П.Е. сказал: «Хотите заняться проблемой баллистического существования спутников? Учтите, это очень трудная задача».

Действительно, задача выбора долгоживущих орбит ИСЗ меня очень заинтересовала, но всерьез заняться ею мне пришлось только спустя двадцать лет, когда П.Е. уже не было в живых.

#### СИТУАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ

В то время меня поглощала область исследований, которая называлась «ситуационный анализ». В качестве объектов ситуационного анализа рассматривались модели исследуемых областей космического пространства и модели движения ИСЗ. Задачей ситуационного анализа являлось исследование взаимного положения эволюционирующих орбит ИСЗ и изучаемых областей. Интересным объектом ситуационного анализа стала модель магнитосферы Земли, а областью приложения – эксперименты на борту ИСЗ ПРОГНОЗ-7,-8, проекты ИНТЕРШОК, ИНТЕРБОЛ. Некоторые результаты ситуационных исследований были описаны в препринте [1], а изложенные в этой работе принципы были использованы при выборе орбит и планировании экспериментов в многоспутниковом проекте ИНТЕРБОЛ. Участвуя в различных проектах, я, между делом, в 1989 году защитила кандидатскую диссертацию на тему: «Применение ситуационного анализа орбит ИСЗ при планировании экспериментов космической физики». а в 1996 году мне была присвоена должность старшего научного сотрудника.

Незадолго до запуска на орбиту первого из спутников проекта ИНТЕРБОЛ (ПРОГНОЗ-12), благодаря усилиям Равиля Равильевича Назирова, в ИКИ стал функционировать интернет. На сервере ИКИ сразу был открыт сайт проекта ИНТЕРБОЛ, мы были готовы к этому событию и очень скоро начали помещать на этот сайт орбитальную информацию. Когда работа по навигационному обеспечению проекта ИНТЕРБОЛ была, в основном, налажена, поддержку и эксплуатацию этих программ взяла на себя Надежда Павловна Беляева, и делала это четко, со свойственным ей педантизмом.

В процессе полётной стадии проекта Интербол по инициативе международного комитета IACG (Inter Agency Consulting Group) /ISTP (International Solar-Terrestrial Physics Science Initiative) была организована первая Международная Кампания Tail campaign 1, в которой принимали участие Интербол-1 и Geotail ISAS (Institute of Space and Astronautical Sciences, Japan)/NASA. Вторая международная кампания была организована IACG в середине 1997 года. Необходимая для координированных измерений навигационная информация помещалась на сайте NASA GSFC SSC (Satellite Situation Center of the NASA Goddard Space Flight Center), а также на сайтах других участников кампании, в том числе, на сайте IKI SSC.

После завершения миссии ИНТЕРБОЛ, на основании опыта, приобретенного в процессе планирования многоспутниковых кампаний, появилась насущная потребность пересмотреть принцип построения базы навигационной информации, применявшийся в программном комплексе ОРБИТА, и перестроить эту базу на новый лад. Для этого в 2000 году было создано дополнительное программное обеспечение Multi-missions Situation Analysis Tool (MMSAT). Это математическое обеспечение успешно используется для навигационного обеспечения проекта PLAZMA-F на KA SPECTR-R (http://ftp2.plasma-f.cosmos.ru/orbit/campaign/p\_pf\_flg/camp1.htm) и может быть легко адаптировано для навигационного сопровождения новых миссий в области солнечно-магнитосферной физики. Только после этого у меня появилась возможность практически заняться проблемой времени баллистического существования ИСЗ. Мое возвращение к этой проблеме совпало с завершением к 2000 году времени баллистического существования спутника «Хвостовой зонд» проекта ИНТЕРБОЛ, и руководству проекта очень хотелось найти способ спасти этот спутник от его неизбежного соударения с Землей, используя двигатели ориентации и остатки топлива. Но из этой затеи ничего не вышло, и тогда всем стало понятно, что для пассивной орбиты время баллистического существования определяется начальными значениями орбитальных элементов, соответствующими моменту выхода спутника на его орбиту.

# ТЕОРИЯ ЛИДОВА-КОЗАИ (ТЛК)

Наконец, появилась возможность сосредоточиться на задаче о времени баллистического существования спутника, которая сводится к изучению многообразий начальных условий, приводящих (или не приводящих) к соударению спутника с планетой в спутниковом варианте двукратно-осредненной ограниченной задачи трёх тел.

В результате удалось уделить внимание качественным методам теории Лидова-Козаи на основании опыта применения этой теории в Солнечной планетной системе. Как известно, при разработке этих методов в работах Лидова и Козаи было выполнено разложение возмущающей функции ограниченной задачи трёх тел (задачи Хилла) в ряд по полиномам Лежандра. Далее, путём осреднения возмущающей функции, соответствующей первым трём членам этого разложения, по периодам возмущающего и возмущаемого тела относительно центрального тела, была получена вполне интегрируемая система уравнений, которая описывает вековую составляющую эволюции орбиты малого тела под влиянием внешних гравитационных возмущений. При этом, следует отметить, что теория Лидова-Козаи носит качественный (приближенный) характер, поэтому эту теорию следует применять для исследования динамики, а также для выбора орбит, исходя из задач проектов, но не для численных расчётов.

В 2001–2002 году в журнале Космические Исследования были опубликованы 4 статьи, содержащие некоторые результаты, а итоговой стала публикация [2]. Естественным продолжением стало исследование баллистического существования спутников в смешанной задаче, с учетом возмущений, обусловленных сжатием планеты и влиянием третьего тела. Эти исследования привели к введению понятия планетоцентрической гравитационной сферы доминирующего влияния возмущений от сжатия планеты над возмущениями от внешних тел. В настоящее время по этой тематике опубликованы работы: [3], [4].

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При этом не следует забывать и о необходимости передачи новому поколению опыта, связанного с ситуационными исследованиями. Для этого задумана серия публикаций, первая из которых вышла в 2016 году [5]. Иллюстрацией к этой работе являются рис. 2 и 3.

В последние годы исследования динамики Теория Лидова-Козаи (ТЛК) получили новый поворот. Стало понятно, что теория ТЛК может быть востребована в качестве инструмента в более широких областях науки: в экзопланетных системах в межзвездном пространстве внутри галактики Млечный путь, а также в межгалактическом пространстве. Это заставило ещё раз переосмыслить динамику и особенности качественных методов теории возмущений. Результаты опубликованы в статье [6].



**рис. 2.** Положение в эклиптической системе координат ОХҮΖ **орбитального тора, образуемого семейством орбит** с указанными на рисунке значениями четырёх орбитальных элементов в экваториальной системе координат Охуг и свободным значением Ω<sub>ед</sub>

a) показано сечение орбитального тора плоскостью OYZ эклиптической системы координат (совпадающей с плоскостью Oyz).

б) показаны проекции орбит рассматриваемого семейства на плоскость эклиптики. Для каждой орбиты значение свободного параметра Ω<sub>eq</sub> (с шагом 60°) указанно в точке апогея. Линиями красного цвета здесь и далее показана нисходящая ветвь орбиты, пресекающая плоскость Оху с севера на юг, а линиями зелёного цвета – восходящая ветвь, пересекающая плоскость Оху с юга на север





Каждая из орбит рассматриваемого семейства определяется начальным значением параметра Ω<sub>eq</sub> и занимает своё индивидуальное положение в невращающейся эклиптической системе координат ОХҮZ. Во вращающейся солнечно-эклиптической системе координат, ось ОZ которой перпендикулярна плоскости эклиптики, а ось ОХ ве направлена на Солнце. Каждая орбита образует свой индивидуальный годовой орбитальный тор. Для некоторых значений параметра Ω<sub>eq</sub> (с шагом 60°) на рисунках показаны сечения годовых орбитальных торов полуденно-полуночной плоскостью, а также сечения той же плоскостью модельных поверхностей ударной волны и магнитопаузы

- Прохоренко В.И. Ситуационный анализ Хвостового и Аврорального зондов в проекте ИНТЕРБОЛ // Пр-1037, 1985 г.
- [2] Прохоренко В.И. Об условиях пересечения орбиты спутника с поверхностью центрального тела конечного радиуса в двукратно осредненной ограниченной задаче трех тел // Труды Математического Института им. В.А. Стеклова. М.: Наука. 2007. Т. 259 С. 156-173.
- [3] Прохоренко В.И. Планетоцентрическая гравитационная сфера доминирующего влияния возмущений от сжатия планеты над возмущениями от внешних тел // Космические Исследования, 2010, Т. 48. No 2. C. 178-191.

- [4] Prokhorenko Victoria I. On manifolds of initial conditions leading to intersection of orbits of satellites with planet under weak gravitational perturbations // Functional Analysis and Other Mathematics, DOI 10.1007.s11853-011-0046-y, Phasis, Springer, 2011. V. 3 No 2. P. 135-167.
- [5] Прохоренко В.И. О выборе высокоапогейных орбит ИСЗ, на основе качественных методов теории возмущений и ситуационного анализа. Часть I Ситуационные исследования, основанные на орбитальных торах // Космические Исследования, 2016, Т. 54. No 2. С. 143-163.
- [6] Прохоренко В.И. О динамических основах теории Лидова-Козаи // ПАЖ 2018. Т 44. № 1. С. 52-70.

# СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПЛАЗМЫ ПЕРЕД И ЗА ГОЛОВНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

#### Л.С. Рахманова, М.О. Рязанцева, Г.Н. Застенкер

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва, Россия

#### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

космическая плазма, солнечный ветер, магнитослой, магнитосфера, турбулентность

Взаимодействие солнечного ветра с магнитосферой Земли приводит к формированию отошедшей ударной волны перед магнитопаузой. Область между ударной волной и магнитопаузой - магнитослой - заполнена сильно турбулизованной плазмой. Любое возмущение плазмы и магнитного поля солнечного ветра, перед тем как воздействовать на магнитосферу, пересекает головную ударную волну и может претерпевать изменения при распространении в турбулентном магнитослое. Работа посвящена исследованию характеристик турбулентности плазмы в магнитослое на основе данных прибора БМСВ на борту космического аппарата Спектр-Р. Прибор измеряет величину и направление прихода потока ионов с временным разрешением 31 мс, что позволяет исследовать диапазон частот, на котором происходит переход от классической МГД турбулентности к кинетической турбулентности. На этих масштабах, как правило, наблюдается излом частотного спектра: спектр описывается двумя степенными законами, при этом на более низких частотах показатель степени составляет -5/3, что соответствует колмогоровской модели турбулентности; на определенной частоте происходит излом спектра и переход к более высокому по модулю показателю степени. В работе анализируется, какое влияние на характеристики турбулентности оказывает прохождение плазмы через головную ударную волну. Рассматривается эволюция таких параметров, как мощность спектра флуктуаций потока ионов, форма спектра, а также наклоны спектра как на МГД, так и на кинетических масштабах. Помимо этого анализируется, как изменяется вид функции распределения флуктуаций величины потока ионов при прохождение через головную ударную волну.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 16-12-10062.

# ВЛИЯНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ В СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЕ НА ФОРМИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА

М.О Рязанцева<sup>1</sup>, Л.С. Рахманова<sup>1</sup>, Г.Н. Застенкер<sup>1</sup>, Ю.И. Ермолаев<sup>1</sup>, И.Г. Лодкина<sup>1</sup>, Я. Шафранкова<sup>2,3</sup>, Немечек<sup>2</sup>, Л. Прех<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва, Россия; orearm@gmail.com

<sup>2</sup> Charles University in Prague, Czech Republic

# КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

космическая плазма, солнечный ветер, корональный выброс массы, магнитное облако, турбулентность

Считается, что турбулентность в солнечном ветре свободно развивается в процессе распространения потока плазмы от Солнца, и на орбите Земли наблюдается спектр флуктуаций, соответствующий Колмогоровской модели однородной, изотропной, развитой турбулентности с характерным наклоном -5/3 на инерционных масштабах. На масштабах порядка ионного гирорадиуса происходит укручение спектра вследствие диссипации энергии частиц (т.н. диссипативный масштаб спектра). Однако, присутствие в солнечном ветре естественных границ, создаваемых крупномасштабными структурами солнечного ветра – проявлениями динамических явлений короны солнца, указывает на невозможность свободного развития турбулентности. В частности, эффекты сдвига скорости вблизи границ потока при переходе между разными типами солнечного ветра могут оказывать значительное влияние на формирование турбулентного каскада. В работе представлен анализ свойств спектров турбулентных флуктуаций потока ионов солнечного ветра внутри различных крупномасштабных динамических структур в сравнении с аналогичными свойствами в невозмущенном медленном солнечном ветре. Исследование базируется на измерениях плазменного спектрометра БМСВ на борту КА СПЕКТР-Р с частотой опроса вплоть до 32 Гц. что позволяет исследовать спектры флуктуаций в широком диапазоне масштабов в том числе на кинетических масштабах. Рассмотрено более 3000 спектров флуктуаций, наблюдающихся, как в медленном невозмущенном солнечном ветре, так и внутри крупномасштабных динамических явлений (согласно каталогу Ермолаева ftp://ftp.iki.rssi.ru/pub/omni/catalog/) таких как: EJECTA (межпланетное проявление коронального выброса массы), МС (магнитное облако), SHEATH (области сжатия плазмы перед EJECTA и MC), CIR (области сжатия на границе высоко- и низкоскоростных потоков), а также области высокоскоростных потоков из корональных дыр). Показано, что наклоны спектров турбулентности могут существенно зависеть от крупномасштабного типа солнечного ветра и эта зависимость наиболее четко проявляется на кинетических масштабах. Так наименьшие по модулю показатели наклонов спектра наблюдаются в спокойном солнечном ветре, тогда как максимальные по модулю показатели наклонов типичны для областей MC, SHEATH и CIR, что может указывать на более интенсивные процессы диссипации, идущие внутри этих структур. Также отмечено, что для МС и SHEATH перед MC характерно сильное нелинейное укручение спектра флуктуаций, тогда как в остальных случаях чаще наблюдается линейный спад. Обсуждается возможное влияние крупномасштабных структур солнечного ветра на возникновение в ряде случаев особенностей спектров флуктуаций, наблюдающихся в области перехода от инерционных к диссипативным масштабам.

# КАК СОЛНЕЧНЫЙ ВЕТЕР УЗНАЕТ И РЕАГИРУЕТ НА НАСТУПЛЕНИЕ УДАРНОЙ ВОЛНЫ ОТ ЗЕМЛИ?

#### С.П. Савин, Л.А. Лежен

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва, Россия; ssavin@iki.rssi.ru

Мы представляем данные Проектов «Интербол-1» и «Кластер», показывающие как солнечный ветер расступается перед идущей к Солнцу головной ударной волной. Вектор Пойнтинга показывает первоначальное движение возмущения к Солнцу. Временное разрешение не позволяет определить волновую моду возмущения непосредственно, но теоретически это могут быть быстрые магнитозвуковые и даже нелинейные альвеновские колебания. Сразу за движущимся к Солнцу фронтом возникают поперечные (по отношению к линии Земля–Солнце) потоки плазмы, уносящие с пути надвигающейся ударной волны плазму солнечного ветра.

Однако, баланс потоков (поперечного и параллельного относительно направления на Солнце) не всегда соблюдается. Тогда после первоначального возмущения, предшествующего ударной волне, образуется плазменный пузырь. Его повышение плотности согласуется с дефицитом поперечного потока.

Мы сравниваем наши данные с данными, полученными при движении магнитопаузы наружу. Они демонстрируют аналогичное поведение, хотя в случае меньших скоростей вблизи магнитопаузы можно различить гораздо больше деталей.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ ФРОНТА МЕЖПЛАНЕТНЫХ УДАРНЫХ ВОЛН, ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ ПРИБОРОМ БМСВ

#### О.В. Сапунова, Н.Л. Бородкова, Г.Н. Застенкер

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва, Россия; sapunova\_olga@mail.ru, nlbor@mail.ru, gzastenk@iki.rssi.ru

#### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

солнечный ветер, ударная волна, рамп, колебания

По данным плазменного спектрометра БМСВ [1], установленного на спутнике СПЕКТР-Р исследовалась тонкая структура фронтов Межпланетных Ударных Волн (МУВ). Спектрометр позволяет непрерывно измерять параметры плазмы солнечного ветра с высоким временным разрешением: 0.031 с – для потока и направления и 1.5 с – для скорости, температуры и концентрации [2]. Это позволило изучить внутреннюю структуру фронта МУВ – рамп, подножие, овершут, а также колебания как перед, так и за фронтом. Значения магнитного поля были взяты со спутников WIND, THEMIS-B/-C, CLUSTER C1-4. По этим данным были посчитаны основные параметры МУВ (их статистика приведена на рис. 1) [3,4].



рис. 1. Статистика основных параметров межпланетной ударной волны: β (отношение теплового давления к магнитному до фронта), θ<sub>вп</sub> (угол между нормалью к фронту ударной волны и невозмущенным магнитным полем), M<sub>ms</sub> (отношение скорости распространения ударной волны к магнитозвуковой скорости в невозмущенной области), скорость фронта ударной волны относительно Земли



рис. 2. Сравнение параметров, измеренных по данным плазмы и магнитного поля: а) толщины рампа межпланетной ударной волны б) длительности опережающих фронт колебаний

#### 82 GRINGAUZ 100: PLASMAS IN THE SOLAR SYSTEM, 2018

Длительность рампа измерялась как по параметрам плазмы, так и по модулю магнитного поля. Исходя из длительности и скорости распространения фронтов, была вычислена толщина рампа, лежащая в пределах от 40 км до 600 км (рис. 2а). Длина опережающих колебаний, также измеренная двумя способами, составила от 70 до 400 км (рис. 2б). Сравнение значений, вычисленных по параметрам плазмы и по данным магнитного поля, показало хорошее соответствие.

Работа была выполнена при частичной поддержке грантов РФФИ № 16-02-00669 и № 16-02-00125.

- Zastenker G.N., Safrankova J., Nemecek Z. et al. Fast measurements of parameters of the Solar Wind using the BMSW instrument // Cosmic Res. 2013. 51:78. doi:10.1134/S0010952513020081.
- [2] Eselevich V.G., Borodkova N.L., Eselevich M.V. et al. Fine structure of the interplanetary shock front according to measurements of the ion flux of the solar wind with high time resolution // Cosmic Res. 2017. 55:30 doi:10.1134/S0010952517010038.
- [3] Farris M.H., Russell C.T., Thomsen M.F. Magnetic Structure of the Low Beta, Quasi-Perpendicular Shock // J. Geophys. Res. 1993. V. 98. N. A9. P. 15285.
- [4] Krasnoselskikh V., Balikhin M., Walker S.N. et al. The Dynamic Quasiperpendicular Shock: Cluster Discoveries // Space Sci. Rev. 2013. V. 178. PP. 535-598. doi:10.1007/s11214-013-9972.

# ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЙ ДЖЕТ: УЗКИЕ И БЫСТРЫЕ ДРЕЙФЫ СУБАВРОРАЛЬНОЙ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ

#### А.Е. Степанов<sup>1</sup>, В.Л. Халипов<sup>2</sup>, И.А. Голиков<sup>1</sup>, Е.Д. Бондарь<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН, 677980, Якутск, Россия; a\_e\_stepanov@ikfia.ysn.ru

<sup>2</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва, Россия; khalipov@iki.rssi.ru

#### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

субавроральная ионосфера, поляризационный джет, горизонтальные и вертикальные скорости дрейфа, меридиональная цепочка станций, статистические исследования

Физические явления, происходящие в субавроральной зоне, давно являются предметом интереса многих исследователей. Здесь наблюдаются явления, отсутствующие или менее выраженные на других широтах, такие, как формирование главного ионосферного провала (ГИП) в широтном распределении электронной концентрации, формирование полярной стенки ГИП за счет высыпания низко-энергичных электронов на экваториальной границе диффузных вторжений (ГДВ), образование провала лёгких ионов в верхней ионосфере, появление «оторванных» дуг и пятен в фоновом свечении верхней атмосферы в вечернем секторе и др. Отдельно отметим еще одно явление, которое наблюдается только в этой зоне и является предметом рассмотрения в настоящей работе. Это – узкие струи (потоки) быстрых субавроральных ионных дрейфов к западу вблизи проекции плазмопаузы на высотах области F ионосферы, которые наиболее заметно проявляются во время суббурь на фоне крупномасштабной конвекции плазмы. Это явление впервые было обнаружено группой профессора Ю.И. Гальперина по данным спутника «Космос-184» и было названо «поляризационным джетом» (ПД, см. рис. 1) [1]. Следом вышла работа, где по данным спутника «Atmosphere Explorer C» также наблюдались узкие и быстрые движения плазмы на субавроральных широтах [2]. Авторы это явление назвали «субавроральным ионным дрейфом» – SAID (SubAuroral Ion Drifts). Термины «поляризационный джет» и «SAID» до сих пор являются самыми распространенными для обозначений узких и быстрых потоков ионосферной плазмы. направленных к западу, и встречающихся на субавроральных широтах.

В настоящей работе на основе анализа многолетних ионосферных измерений делается попытка систематизации наблюдений, выяснения природы формирования и развития поляризационных потоков плазмы на субавроральных широтах. Основное содержание работы составляют результаты



рис. 1. Результаты измерений горизонтальной скорости дрейфа в северном и южном полушариях по данным спутника «Космос-184» на высоте ~630 км. Случай регистрации поляризационного джета выделен голубым цветом

#### 84 GRINGAUZ 100: PLASMAS IN THE SOLAR SYSTEM, 2018

измерения поляризационного джета, полученные наземными и спутниковыми методами, за четыре цикла солнечной активности. Наземные измерения основываются на ионосферных данных Якутской цепочки меридиональных станций, куда в разное время входили такие пункты наблюдений как Якутск, Жиганск, Тикси, Батагай, Зырянка, Омолон и о. Котельный. Использовались также данные ионосферных станций Мурманска, Архангельска, Салехарда, Подкаменной Тунгуски, Норильска и Магадана.

Изучению поляризационного джета и SAID посвящено достаточно много работ. Он исследовался по спутниковым измерениям электрических полей в ионосфере и магнитосфере, измерениям дрейфа ионов в ионосфере, по наземным радарным измерениям, ионограммам вертикального и возвратно-наклонного зондирования ионосферы (рис. 2).

Статистические исследования ПД показывают, что обычно он имеет широтную протяженность 100–200 км или 1÷2 градуса по широте, наблюдается преимущественно в предполуночном секторе (18.00–24.00) МLТ и на инвариантных широтах 55–65° (рис. 3); максимальная скорость дрейфа плазмы в полосе поляризационного джета может достигать 405 км/с.



рис. 2. Дополнительный характерный след отражения (F3s), зарегистрированный на ст. Якутск 21 ноября 2002 г. в 16.45 местного времени – ионосферный признак развития поляризационного джета над зенитом станции наблюдения



рис. 3. Сопоставление наземных (красные точки) и спутниковых (черные линии) измерений быстрых потоков плазмы [3,4]

Поляризационный джет всегда наблюдается экваториальнее границы высыпания авроральных электронов и с увеличением геомагнитной активности смещается на более низкие широты.

По данным вертикального зондирования и доплеровских измерений на ст. Якутск за 2006–2012 гг. было рассмотрено 44 события ПД [5]. Статистические выкладки по этим событиям, с применением метода наложения эпох и нормализации горизонтальных и вертикальных скоростей, приведены на рис. 4. Рассматривался 4-часовой интервал измерений скоростей ионосферной плазмы: по 2 часа до и после реперного времени. За реперное время (0 на оси абсцисс) принималось время максимума горизонтальных скоростей во время наблюдения ПД (а). Кривые на рисунках – аппроксимирующие линии, точки – значения нормализованных скоростей. Видно, что вертикальные скорости в полосе ПД, полученные по всем событиям, имеют два горба, примерно, за 1 час до максимума горизонтальных скоростей и 1 час после (б).

Природу такого поведения вертикальных скоростей можно объяснить следующим образом: первый горб возникает за счет фрикционного нагрева, далее, при максимуме горизонтальной скорости (в 0 часов) нейтралы уже вовлечены в движение и разность скоростей меньше и нагрев меньше, после максимума ионы притормаживают, а нейтралы движутся по старой, приданной им ионами скорости и разность скоростей снова нарастает и, в результате, снова растет нагрев и продольный отток ионосферной плазмы.



- [1] Гальперин Ю.И., Пономарев В.Н., Зосимова А.Г. Прямые измерения скорости дрейфа ионов в верхней ионосфере во время магнитной бури II. Результаты измерений во время магнитной бури 3 ноября 1967 г. // Космические исследования. 1973. Т.1. № 2. С. 284-296.
- [2] Spiro R.W., Heelis R.A., Hanson W.B. Rapid subauroral ion drifts observed by Atmospheric Explorer C // Geophys. Res. Lett. 1979. V.6. N8. P.657-660.
- [3] Решетников Д.Д., Филиппов В.М., Баишев Д.Г., Степанов А.Е., Андреев Р.П. Эверстов А.И., Гальперин Ю.И., Халипов В.Л., Сивцева Л.Д., Шестакова Л.В., Афонин В.В., Алексеев В.Н., Соловьёв В.С. Морфология и динамика узких провалов ионизации в субавроральной области F // Якутск: ЯНЦ СО АН СССР. 1987. 39 с.
- [4] He F., Zhang X.-X., Chen B. Solar Cycle, Seasonal, and Diurnal Variations of Subauroral Ion Drifts: Statistical Results // J. Geophys. Res. 2014. V.119. NA6. P. 5076-5086.
- [5] Степанов А.Е., Халипов В.Л., Котова Г.А., Кобякова С.Е., Богданов В.В., Кайсин А.В. Восходящие потоки ионосферной плазмы в полосе поляризационного джета // Proceedings of the 11<sup>th</sup> International School and Conference "Problems of Geocosmos". St. Petersburg. Russia. 2016. P. 321-327.

# МОДЕЛИРОВАНИЕ СОВМЕСТНОЙ ДИНАМИКИ ГЛАВНОГО ИОНОСФЕРНОГО ПРОВАЛА И ПЛАЗМОПАУЗЫ ВО ВРЕМЯ МАГНИТНОЙ БУРИ

#### А.В. Тащилин

Институт солнечно-земной физики СО РАН, 664033, Иркутск, Россия; avt@iszf.irk.ru

# КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

главный ионосферный провал, плазмопауза, магнитная буря, численное моделирование

В глобальной динамике ионосферы одну из ключевых ролей играют процессы обмена заряженными частицами и энергией с вышележащими областями околоземного пространства – плазмосферой и внутренней магнитосферой. Несмотря на то, что достигнут значительный прогресс в исследованиях ионосферно-плазмосферного взаимодействия, в настоящее время до конца не ясна роль плазмосферы в процессе формирования главного ионосферного провала (ГИП) в периоды геомагнитных возмущений. Целью данной работы является исследование взаимных вариаций характеристик главного ионосферного провала и плазмопаузы (ПП) во время магнитной бури методом численного моделирования. Для этого была использована разработанная в ИСЗФ СО РАН численная модель ионосферно-плазмосферного взаимодействия, в которой учтен трехмерный перенос ионосферной плазмы в дипольном геомагнитном поле и ионизация высыпающимися энергичными электронами. На основе модели рассчитаны глобальные распределения электронной концентрации *N*₂ на высотах h≥150 км для зимних условий при умеренной солнечной активности в ходе синтетической магнитной бури. Интервал моделирования составил 96 часов, включая предшествующий спокойный день (24 ч.), возмущенный день (24 ч.) и восстановительный период (48 ч.). На каждом временном шаге (Δt=6 минут) глобальное распределение N<sub>e</sub> состояло из набора 792 дипольных плазменных трубок распределенных по MLT через 1 час и по параметру L от 2 до 10 с шагом 0.25. В расчетах использовались модель электрического поля конвекции Weimer-01 и модель электронных высыпаний Hardy-85. Результаты расчетов позволили исследовать динамику формы и размеров главного ионосферного провала и плазмопаузы, их взаимное расположение в спокойных условиях, на лавной фазе и фазе восстановления магнитной бури. Результаты расчетов показали следующее:

- При спокойных геомагнитных условиях ионосферная проекция плазмопаузы смещена относительно минимума главного ионосферного провала к высоким широтам на величину ΔL~0,5.
- На главной фазе магнитной бури экваториальная стенка ГИП практически не меняет свою форму и положение, тогда как полярная стенка быстро смещается к низким широтам. При этом ПП может достигать оболочек *L*≈3.5 и оставаться в этом положении в течение главной фазы бури.
- 3. На фазе восстановления магнитной бури экваториальная стенка ГИП продвигается на более высокие геомагнитные широты. При этом внутри ГИП формируется интенсивный отток ионосферной плазмы вдоль геомагнитных силовых линий из ионосферы в плазмосферу. В результате ГИП становится шире и глубже, а его экваториальная стенка приобретает более крутую форму.

# СОСУЩЕСТВОВАНИЕ ПЛАЗМЫ СПОКОЙНОГО КОЛЬЦЕВОГО ТОКА И ПЛАЗМОСФЕРЫ

#### В.В. Тёмный

ИИЕТ РАН, Москва, Россия; vtemnyi@mail.ru

#### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

спокойный кольцевой ток (СКТ), функции распределения плазмы, плазмосфера, плотности энергии плазмы (nkT): высокотемпературная и низкотемпературная

Плотность энергии плазмы (nkT) спокойного кольцевого тока (CKT) максимальна на экваториальной оболочке L~4, где она достигает 2<sup>10-7</sup> эрг см<sup>-3</sup>. Её резкий спад к L~3 может ограничивать внешнюю границу плазмосферы со столь же резким спадом плотности ей тепловой плазмы. Как показал анализ результатов эксперимента АМРТЕ 1984 года, функции распределения плазмы СКТ являются двухкомпонентными – высокотемпературной (T<sub>H</sub>~40-90 кэВ) и низкотемпературной (T<sub>H</sub>~3-5 кэВ). Максимальные nkT<sub>H</sub> содержит ионы H<sup>+</sup> с незначительной примесью ионов He<sup>++</sup>, O<sup>+</sup> и O<sup>++</sup>. Их nkT<sub>H</sub> не превышает 1% nkT<sub>H</sub> протонов [1]. Низкотемпературные nkT<sub>I</sub>~1% nkT<sub>H</sub> могут быть продуктами нагрева тепловых ионов плазмосферы, проникающими в СКТ. Во время магнитных бурь кардинально меняется состав возмущённого кольцевого тока (ВКТ). Он заполняется преимущественно ионами О<sup>+</sup> ионосферного происхождения. Их nkT<sub>O+</sub> может даже превышать nkT<sub>H</sub>. Однако при этом плотность nkT<sub>H</sub> не претерпевает существенных изменений. Это позволяет постулировать постоянное существование кольцевого тока вокруг Земли, заполненного плазмой с необычно высокой температурой её ионов [1].

#### ЛИТЕРАТУРА

[1] Тёмный В.В. Плазма кольцевых токов магнитосферы Земли. Модель в сопоставлении с результатами эксперимента AMPTE/CCE. Космические исследования. Т. XXV. Вып.3. 1987. С. 426-438.

# ВЛИЯНИЕ НЕЛИНЕЙНОСТИ ГЕОМАГНИТНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ НА МОДИФИКАЦИЮ ФОНОВОЙ ПЛАЗМЫ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

#### Ф.З. Фейгин, А.К. Некрасов

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия; feygin@ifz.ru, anekrasov@ifz.ru

#### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

пондеромоторная сила, фоновая плазма, нелинейность, магнитное поле, магнитосфера

Уравнения движения для ионов и электронов во втором приближении по амплитуде волны, усредненные по быстрым осцилляциям, дают выражение для баланса сил в стационарном состоянии вдоль магнитной силовой линии

$$\nabla_{\Pi} p_2 - g_{\Pi} \rho_2 = F_{\rho\Pi},$$

где  $F_{\rho\Pi}$  – пондеромоторная сила вдоль силовой линии,  $p_2 = \rho_2 c_s^2 u \rho_2$  – нелинейные стационарные возмущения давления и плотности плазмы, соответственно  $c_s = (2T/m_i)^{1/2}$  –скорость звука,  $T(T_i \approx T_e = T)$  – температура,  $\theta$  – полярный угол, отсчитываемый от вертикальной оси,  $\lambda$  – геомагнитная долгота, r – геоцентрическое радиальное расстояние в единицах радиуса Земли.

Используя аналитическую модель геомагнитного поля на дневной стороне магнитосферы Земли [Антонова и Шабанский, 1968; Антонова и др. 1983] (рис. 1), выведено выражение для *F*<sub>pп</sub> (2)



**рис. 1.** Зависимость геомагнитного поля *В* в Гс от геомагнитной широты для разных *L* в меридиональной плоскости дневной магнитосферы по модели Антоновой и Шабанского (1968)

88-proceedings of the conference

$$F_{\rho \Pi} = -\frac{B_{10}^{2}}{16\pi} \left(\frac{\rho}{\rho_{0}}\right)^{1/2} \frac{B_{0}}{B} \frac{(1-v_{0})^{1/2}}{\left(1-v_{0}\frac{B_{0}}{B}\right)^{1/2}} \times \left\{ \nabla_{\Pi} \ln \rho + \frac{1}{\left(1-v_{0}\frac{B_{0}}{B}\right)} \left[ v_{0}\frac{B_{0}}{B} + \frac{2}{N_{0}^{2}} \frac{\left(1-v_{0}\frac{B_{0}}{B}\right)}{(1-v_{0})} \frac{\rho}{\rho_{0}} \left(\frac{B}{B_{0}}\right)^{2} \right] \nabla_{\Pi} \ln B \right\}.$$
(2)

Все величины с индексом «0» обозначают их значения в плоскости экватора. Таким образом,  $B_{10}$  – амплитуда магнитного поля волны на экваторе,  $N_0$  – показатель преломления на экваторе,  $v_0 = \sigma \omega / \omega_{ci0}$ ,  $\omega_{ci}$  – ионная циклотронная частота.

В выражении (2) следует обратить внимание, что пондеромоторная сила пропорциональна квадрату магнитного поля волны и членам  $1/\left(1-v_0\frac{B_0}{B}\right)$ ,

т.е. в областях магнитных ям возможно существенное увеличение пондеромоторной силы. Подставив выражение для *F*<sub>р⊓</sub>(2) в уравнение баланса сил (1), мы получим компактное выражение для анализа поведения нелинейной плотности плазмы вдоль силовой линии

$$\frac{d\delta}{dx} = A_1 \delta + A_2 (A_3 + A_4 + A_5). \tag{3}$$

Коэффициенты А<sub>i</sub>, *i*=1–5 равны:

$$A_{1} = \frac{2g_{eff}R_{E}\cos\theta\alpha}{3rc_{s}^{2}\beta\sin^{2}\theta}, A_{2} = -\frac{B_{10}^{2}}{16\pi\rho_{0}c_{s}^{2}} \frac{B_{0}}{B} \frac{(1-v_{0})^{1/2}}{\left(1-v_{0}\frac{B_{0}}{B}\right)^{1/2}}, A_{3} = \frac{2x}{(1-x^{2})^{3/2}},$$
$$A_{4} = \frac{1}{(1-x^{2})^{1/2}} \frac{v_{0}}{\left(1-v_{0}\frac{B_{0}}{B}\right)} \frac{B_{0}}{B^{2}} \frac{dB}{dx}, A_{5} = \frac{(1-x^{2})^{1/2}}{2\pi\rho_{0}c^{2}} B\frac{dB}{dx}.$$

Численные вычисления уравнения (3) дали результаты, представленные на следующих рисунках



рис. 2

#### 90 GRINGAUZ 100: PLASMAS IN THE SOLAR SYSTEM, 2018

На представленном рисунке (рис. 2)  $\delta$  – отношение величины нелинейной плотности фоновой плазмы к заданной плотности фоновой плазмы в вершине силовой линии на *L*=10, *x*=соs $\theta$ ,  $\theta$  – широта,  $\lambda$  – долгота при *B*<sub>10</sub>=10<sup>-5</sup> Гс. Наибольшее увеличение нелинейной плотности фоновой плазмы соответствует геомагнитным долготам  $\lambda$  ~0°–30°.



#### рис. 3

На рис. З показано распределение нелинейного возмущения плотности плазмы  $\delta = \rho_{i2}/\rho_{i0}$ ,  $\rho_{i2}=m_i n_{i2}$  вдоль магнитной силовой линии (как функция широты *x*=cosθ) при  $\lambda$ =0°,  $\delta$  – отношение величины нелинейной плотности фоновой плазмы к заданной плотности фоновой плазмы в вершине силовой линии *x*=cosθ,  $\theta$  – широта при  $\lambda$ =0°,  $v_{i0}$ =  $\omega/\omega_{ci0}$ =0.5,  $B_{10}$ =10<sup>-5</sup> Гс, в экваториальной области и разных *L* от 5 до 10.

# ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ НА L-ОБОЛОЧКАХ ВБЛИЗИ ПЛАЗМОПАУЗЫ

# В.Л. Халипов<sup>1</sup>, В.В. Безруких<sup>1</sup>, А.Е. Степанов<sup>2</sup>, И.Б. Иевенко<sup>2</sup>, В.А. Панченко<sup>3</sup>, В.В. Богданов<sup>4</sup>

- <sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва, Россия; khalipov@iki.rssi.ru
- <sup>2</sup> Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера, Якутск, Россия
- <sup>3</sup> Институт земного магнетизма и распространения радиоволн РАН, Троицк, Москва, Россия
- <sup>4</sup> Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, Камчатский край, Елизовский район, пос. Паратунка, Россия

# КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

поляризационный джет, плазмосфера, ионосфера, геомагнитные индексы, красные дуги

Анализируются комплексные оптические, ионосферные и спутниковые измерения в области слабых красных дуг, сопутствующих развитию поляризационного джета. Наземные измерения проведены на субавроральной ионосферной станции Якутск (L = 3,0) и пункте оптических наблюдений Маймага (L =3.2). Пространственное положение и интенсивность красной дуги определялась меридиональным сканирующим фотометром. По ионосферным данным и данным спутника DMSP F-13 за 10.01.1997 г. возникновение SAR-дуги сопровождалось развитием поляризационного джета, то есть образовалась полоса быстрого дрейфа ионосферной плазмы к западу под воздействием электрического поля северного направления. Величина этого поля в среднем составляет 50–80 мВ/м.







рис. 2. Вариации геомагнитных индексов AU, AL, SYM-H



рис. 3. Положение красной дуги 10.01.97

Синхронные измерения распределения тепловой плазмы в плазмосфере прибором Альфа-3 на спутнике ИНТЕРБОЛ-2 показывают, что положение плазмопаузы изменилось с L=4.2 до L=2.4 во время развития геомагнитного возмущения (рис. 1, 2). Красная дуга стала наблюдаться с 10.15 UT. С 11.30 UT до 12.15 UT регистрируется мультиплетная структура красной дуги. Экваториальная граница красной дуги примыкает с внешней стороны к плазмопаузе (рис. 1, 3). При пролете спутника DMSP F13 вблизи геофизического полигона наземных измерений в 11.09 UT наблюдается полоса интенсивного западного дрейфа, экваториальная граница которого расположена на L=3.0 (рис. 4). В полосе поляризационного джета наблюдаются восходящие и нисходящие потоки плазмы со скоростями, достигающими 1 км/сек.

Ионосферные данные станции Якутск показывают развитие поляризационного джета, при этом полярная кромка главного ионосферного провала располагалась несколько севернее станции. Критическая частота спорадического слоя f<sub>0</sub>Esr = 2.5МГц.



рис. 4. Измерения на спутнике DMSP F13 ионной концентрации и скоростей вертикального (Vz) и горизонтального (Vy) дрейфа плазмы 10 января 1997 г. Поляризационный джет наблюдается в 11.009 UT в северном полушарии и в 12.17 UT в южном полушарии



рис. 5. Проявление поляризационного джета над Москвой. Три компоненты скорости дрейфа (а); индекс авроральной активности АЕ (б); последовательность ионограмм (в-е); последовательность карт неба (ж-к)

На рис. 5 дана развернутая картина регистрации поляризационного джета на станции Москва (L=2.7) современной ионосферной станцией DPS 4 во время развития сильного геомагнитного возмущения (Dst = -90 nT, AE=1800 nT).

Последовательность ионограмм станции DPS-4 (рис. 5 в,г,д,е) иллюстрирует развитие структуры поляризационного джета на среднеширотной станции Москва. Вертикальная компонента дрейфа плазмы достигает значений порядка 50 м/сек. Горизонтальная скорость дрейфа к западу около 400 м/сек (рис. 5а).

Карты всего неба показывают, что импульсные отражения видны сначала вблизи зенита ионосферной станции (рис .5ж) и затем, по мере развития геомагнитного возмущения происходит размытие области отражения относительно зенита и уход точек отражения к югу от станции зондирования.

Красные стрелки на картах всего неба показывают направление и величину западного дрейфа, который наблюдается в структуре SAPS, регистрируемой ионозондом DPS-4.

Мы провели анализ ионосферных измерений на станции Петропавловск Камчатский во время интенсивных возмущений, подобным событию 20 января 2016 года, описанному выше, и не обнаружили развития PJ. Наблюдается только заметное понижение Ne.

# выводы

- Измерения со спутника DMSP-13 и наземные ионозондовые и оптические измерения показывают, что в полосе поляризационного джета формируется красная дуга и обе эти структуры в условиях геомагнитной возмущенности примыкают к плазмопаузе.
- 2. Во время геомагнитных возмущений вдоль внешней границы плазмосферы возникает полоса быстрого дрейфа ионосферной плазмы западного направления. В этой полосе резко уменьшается электронная концентрация и развивается красная дуга, имеющая интенсивность несколько сот Рэлей. В Е-области возникает спорадичееский слой Е<sub>sa</sub>, возникающий под воздействием высыпаний энергичных ионов кольцевого тока.

#### ЛИТЕРАТУРА

Алексеев В.Н., Халипов В.Л., Иевенко И.Б., Игнатьев В.М. Оптические и ионосферные наблюдения в области субавроральных красных дуг // Исслед. по геомагн., аэрон. и физ. Солнца. М.: Наука. Вып. 93. С. 143-152. 1991а.

Gombosi T.I., Killeen T.L. Effects of thermospheric motion on the polar wind: A time dependent numerical study // J. Geophys. Res. V.92. N5. P.4725-4729. 1987.

Foster, J.C. et.al. Coordinated stable auroral red arc observtions: Relationship to plasma convection // J. Geophys. Res. V. 99(A6), P.11429-11439.

# ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ СПЕЦИФИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА НА СЕЙСМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ НА ЗЕМЛЕ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

#### А.Л. Харитонов

ФГБУН Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН); ahariton@izmiran.ru

# КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

солнечная плазма, неоднородности солнечного ветра, КА «ACE», солнечноземные связи, сейсмические процессы

# введение

Рассматриваются вопросы исследования устойчивых плазменных неоднородностей межпланетного магнитного поля аномальной плотности, скорости, температуры плазмы, знака и конфигурации электромагнитного поля (названных Пиддингтоном Д.Х. «магнитными облаками») по данным космического аппарата «ACE». Для подтверждения аномальных физических параметров рассматриваемого межпланетного магнитоплазменного облака анализируются независимые геофизические данные других космических аппаратов («WIND», «GOES» и др.) за исследуемый период работы на орбите KA «ACE». Такие устойчивые магнитоплазменные неоднородности при столкновении с магнитосферой Земли способны вызывать магнитные возмущения, коррелирующие с периодами возникновения сильных землетрясений. Рассматривается схема возможного механизма передачи энергии межпланетных «магнитных облаков» через цепочку физических процессов, приводящих в конечном счете к землетрясениям.

# РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Основная цель данной работы состояла в том, чтобы наглядным графическим способом представить результаты решения обратной задачи магнитного потенциала, по экспериментальным спутниковым измерениям, в виде пространственных и временных электромагнитных разрезов межпланетного магнитного поля (ММП) и проанализировать устойчивую аномальную пространственную структуру и размеры магнитоплазменных неоднородностей ММП – так называемых «магнитных облаков», наблюдаемых в точке либрации системы Солнце-Земля по данным космического аппарата (KA) «ACE» (Advanced Composition Explorer) [1]. Постановка данной цели статьи связана с тем. что в научной литературе до сих пор идет дискуссия о том, модель какой конфигурации «магнитных облаков» с бессиловым магнитным полем, полученная решением уравнения Гельмгольца (цилиндрическая [2–3], сферическая [4], тороидальная [5], циклиды Дюпена [6], магнитных жгутов [7], токовой петли [8]) наиболее обоснована и может использоваться при моделировании магнитогидродинамических (МГД) процессов внутри этих «облаков». Другая цель данной статьи экспериментально подтвердить вихревой характер внутренней структуры «магнитных облаков». Третья цель статьи – подтвердить по независимым экспериментальным геофизическим данным аномальные физические параметры космической плазмы внутри анализируемого «магнитного облака».

#### 96 GRINGAUZ 100: PLASMAS IN THE SOLAR SYSTEM, 2018

Исходя из последних публикаций на эту тему [1–10], межпланетные «магнитные облака» являются следствием проявлений солнечной активности. Вероятно, «магнитное облако», обнаруженное автором, является следствием резкого увеличения солнечной активности, произошедшей 3-4 января 2007 года.

Были проанализированы данные изменений амплитуды **B**<sub>x</sub>, **B**<sub>y</sub>, **B**<sub>z</sub> – компонент межпланетного электромагнитного поля за период 1–11 января 2007 года, измеренного с космического аппарата «ACE», с 16-ти секундным временным интервалом дискретизации. Космический аппарат «ACE» расположен в одной (L1) из пяти точек либрации между Землей и Солнцем [11], на расстоянии примерно 1.5 млн. км от Земли. КА «ACE» позволяет дать, как минимум, один час для возможности заблаговременного предупреждения о надвигающихся от Солнца на Землю потоков энергичных частиц, приводящих при столкновении их с магнитосферой Земли к повышенной геомагнитной активности.



рис. 1. 2D – пространственный электромагнитный разрез ММП по долготе (GSE-координаты), по данным КА «ACE» на период с 8 по 9 янв. 2007 г.

96-proceedings of the conference

В анализируемый временной период работы космического аппарата «ACE» (1–11 января 2007 года) также были проанализированы наземные данные о космических лучах (КЛ), данные об изменении некоторых обобщенных параметров плазмы солнечного ветра (Sw temp – температуры, Nw – плотности) солнечного ветра, а также его скорости и знака **B**<sub>x</sub>, **B**<sub>y</sub>, **B**<sub>z</sub> – компонент вектора и модуля | B| индукции магнитного поля – (IMF). Кроме того, за рассматриваемый период времени были проанализированы данные о количестве землетрясений на Земле с разной магнитудой.

Анализ решения обратной задачи магнитного потенциала [12] по непрерывной записи длиной 45 000 секунд части данных **B**<sub>z</sub> – компоненты вектора межпланетного магнитного поля, измеренного 8–9 января 2007 года на космическом аппарате «ACE» показал, что в рассматриваемый период времени (8–9 января) на построенных авторами электромагнитных разрезах параметров измеренного межпланетного магнитного поля, наблюдаются 2D – временной и два 2D – пространственных фрагмента электромагнитных неоднородностей ММП в зависимости от долготы (рис. 1) и от широты координат направления вектора ММП, измеренного на космическом аппарате «ACE».

2D электромагнитные разрезы построены в относительных единицах расстояния (L) от КА до Солнца. Кроме того, на этих детальных пространственных электромагнитных разрезах видно, что между орбитой КА «ACE» и Солнцем наблюдается не совсем правильной формы спиралевидная электромагнитная неоднородность ММП, по-видимому, связанная с так называемыми магнитными облаками – турбулентными неоднородностями солнечного ветра, имеющими знак электромагнитного поля, противоположный знаку секторной структуры Bz – компоненты ММП, наблюдаемого в данный временной период, в данном секторе космического пространства.

В то же время, температура и плотность солнечного ветра, с 8 по 9 января, в день на который построены пространственные электромагнитные разрезы ММП наблюдается резкое понижение температуры на порядок (с 400 до 40 тыс. град.) и резкое возрастание плотности (Nw) солнечного ветра почти на порядок (с 2 до 12-20 см<sup>-3</sup>), что по нашему предположению связано с воздействием на измерительные приборы КА «ACE» и др., ионизированнного облака повышенной плотности плазмы и пониженной температуры, отличающегося также по знаку (+/-) **B**<sub>v</sub>, **B**<sub>x</sub> - компонент и величины модуля – (В) вектора индукции электромагнитного поля (IMF) и в особенности, по падению скорости солнечного ветра – Sw (и даже изменение ее на обратную, в связи с турбуленцией внутри облака) от остальной плазмы солнечного ветра. Это подтверждают данные за 9-10 января, когда это плотное ионизированное вихревое плазменное облако ММП оказало непосредственное воздействие на магнитосферу Земли. Также были сделаны предварительные выводы о возможной связи момента возникновения специфической пространственной структуры плазменных неоднородностей ММП повышенной плотности и усиления сейсмических процессов на Земле.

- Zhoo L., Zurbuchen T.H., Fisk L.A. Global distribution of the solar wind during solar cycle 23: ACE observations // Geophysical Research Letters. 2008. V. 36. Issue 14. CiteID L14104.
- [2] Иванов К.Г., Стяжкин В.А., Харшиладзе А.Ф. Межпланетное магнитное облако от солнечной вспышки 22 ноября 1977 г. // Геомагнетизм и аэрономия. 1989. Т. 19. № 2. С. 304-310.
- [3] Burlaga L.F. Magnetic clouds and force-free fields with constant alpha // J. Geophys. Res. 1988. V. 93. № 7. P. 7217-7227.

#### 98 GRINGAUZ 100: PLASMAS IN THE SOLAR SYSTEM, 2018

- [4] Vandas M., Fisher S., Pelant P. et al. Spheroidal models of magnetic clouds and their comparison with spacecraft measurements // J. Geophys. Res. 1993. V. 98. N 7. P. 11467-11474.
- [5] Иванов К.Г., Харшиладзе А.Ф., Ерошенко Е.Г., Стяжкин В.А. Вспышечные облака как компактные бессиловые тороидальные конфигурации (по магнитным измерениям на КА «Вега-1 и -2» // Космические исследования. 1988. Т. 26. № 2. С. 252-260.
- [6] Lepping R.P., Burlaga L.F., Szabo A. et al. The wind magnetic clouds and events of October 18-20, 1995 // J. Geophys. Res. 1997. V. 102. № A7. P. 14049-14057.
- [7] Gosling J.T. Magnetic topologies of coronal mass ejections events: Effects of three-dimensional reconnection // Proc. Eight. Inter. Solar Wind. Dana Point (USA). 1995. P. 438-445.
- [8] Иванов К.Г. Мелкомасштабная петля гелиосферного токового слоя как альтернатива модели магнитного облака в волоконно-стримерном потоке межпланетной магнитоплазмы 27-28 августа 1978 г. // Геомагнетизм и аэрономия. 2000. Т. 40. № 4. С. 3-8.
- [9] Mulligan T., Russell C.T., Anderson B.J.et al. Intercomparison of near and wind inter planetary coronal mass ejection observations // J. Geophys. Res. 1999. V. 104. N. 12. P. 28217-28225.
- [10] Дода Л.Н. Геосейсмическое эхо солнечных бурь или землетрясения рождаются на Солнце // Новости космонавтики. 2003. Т. 13. № 6. С. 56-59.
- [11] Высикайло Ф.И. Архитектура кумуляции в диссипативных структурах. М.: МФТИ-ФГУТИСНУМ. Научно-образовательный центр «Физика и химия наноструктур», 2009. 192 с.
- [12] Харитонов А.Л. Применение элементов корреляционной теории для анализа и интерпретации аномального магнитного поля. Диссертационная работа на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук.. М.: ИЗМИРАН, 1984. 255 с.

# РАДИАЦИОННАЯ ОПАСНОСТЬ НА ЗЕМЛЕ И ОКОЛОЗЕМНОМ ПРОСТРАНСТВЕ В ПРОЦЕССЕ ИНВЕРСИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

О.О. Царева<sup>1</sup>, В.Ю. Попов<sup>2,1,3</sup>, Х.В. Малова<sup>4,1</sup>, Л.М. Зеленый<sup>1</sup>, Е.П. Попова<sup>4,5</sup>, М.В. Подзолко<sup>4</sup>

- Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва, Россия; olga8.92@mail.ru
- <sup>2</sup> Физический факультет МГУ, Москва, Россия
- <sup>3</sup> Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия
- <sup>4</sup> НИИЯФ МГУ, Москва, Россия
- 5 ИФЗ РАН, Москва, Россия

# КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

инверсия магнитного поля, радиационная обстановка, теория Штермера, диполь, квадруполь

Геомагнитное поле Земли **B**<sub>Earth</sub> нестабильно: длительные эволюционные изменения сменяются быстрыми инверсиями, о чем свидетельствуют палеомагнитные данные. По последним наблюдениям современное магнитное поле ослабевает, а его магнитные полюса смещаются, что позволят говорить о начале инверсии. Определим **B**<sub>Earth</sub> аналитически с использованием модели IGRF-12 [1], ограничившись рассмотрением 2-х первых мультиполей:

$$\mathbf{B}_{Earth} = \mathbf{B}_{dip} + \mathbf{B}_{quad} \tag{1}$$

Компоненты магнитного диполя **В**<sub>*dip*</sub>в геоцентрической системе координат (r, θ, φ) имеют вид:

$$B_{r}^{dip} = 2\left(\frac{R_{E}}{r}\right)^{3} \left(g_{1}^{0}\cos\theta + \left(g_{1}^{1}\cos\phi + h_{1}^{1}\sin\phi\right) \cdot \sin\theta\right),$$

$$B_{\theta}^{dip} = -\left(\frac{R_{E}}{r}\right)^{3} \left(-g_{1}^{0}\sin\theta + \left(g_{1}^{1}\cos\phi + h_{1}^{1}\sin\phi\right) \cdot \cos\theta\right),$$

$$B_{\phi}^{dip} = -\left(\frac{R_{E}}{r}\right)^{3} \left(-g_{1}^{1}\sin\phi + h_{1}^{1}\cos\phi\right).$$
(2)

А компоненты магнитного квадруполя **В**<sub>quad</sub> выглядят следующим образом:

$$B_{r}^{q} = 3 \frac{\sqrt{3}}{2} \left( \frac{R_{E}}{r} \right)^{4} \left( g_{2}^{0} \frac{(3\cos^{2}\theta - 1)}{\sqrt{3}} + (g_{2}^{1}\cos\phi + h_{2}^{1}\sin\phi) \cdot \sin2\theta + (g_{2}^{2}\cos2\phi + h_{2}^{2}\sin2\phi) \cdot \sin^{2}\theta \right),$$

$$B_{\theta}^{q} = -\frac{\sqrt{3}}{2} \left( \frac{R_{E}}{r} \right)^{4} \left( -g_{2}^{0} \sqrt{3}\sin2\theta + (g_{2}^{1}\cos\phi + h_{2}^{1}\sin\phi) \cdot 2\cos2\theta + (g_{2}^{2}\cos2\phi + h_{2}^{2}\sin2\phi) \cdot \sin2\theta \right),$$

$$(3)$$

$$H_{\phi}^{q} = -\frac{\sqrt{3}}{2} \left( \frac{R_{E}}{r} \right)^{4} \frac{1}{\sin\theta} \left( (-g_{2}^{1}\sin\phi + h_{2}^{1}\cos\phi) \cdot \sin2\theta + (g_{2}^{1}\cos\phi) \cdot \sin2\theta +$$

#### 100 GRINGAUZ 100: PLASMAS IN THE SOLAR SYSTEM, 2018

где  $g_n^m(t)$  и  $h_n^m(t)$  – коэффициенты Гаусса, медленно меняющиеся со временем t. Значения коэффициентов с 1900 года по 2015 известны, их экстраполяция до 4500 года [2] показала, что при неизменной скорости убывания дипольных коэффициентов ( $g_1^0, g_1^1, h_1^1$ ) старший из них  $g_1^0(t)$  обратится в нуль к 3580-му году, т.е. произойдет инверсия магнитного поля. Таким образом, квадрупольная составляющая магнитного поля Земли в момент инверсии станет доминирующей.

Для нахождения увеличения радиационной опасности на поверхности Земли и околоземном пространстве в момент инверсии магнитного поля разработана численная модель, позволившая сравнить потоки ГКЛ и СКЛ (в минимумы и максимумы солнечной активности), проникающие на Землю (с учетом атмосферы) и МКС в периоды доминирования дипольного и квадрупольного полей. Показано, что средняя по планете доза радиации не превысит сегодняшнюю дозу более чем в 4 раза, что допустимо для человека. При этом вследствие изменения конфигурации поля образуется 4 новых каспа (сегодня это серный и южный полюса) – области более повышенной радиации (рис.1). На орбите МКС мощность доз увеличится в 14 раз в связи с широтным перераспределением радиации. Мощность эффективной дозы радиации [3] вычислялась по формуле:

$$H_{R} = \frac{1}{\rho} \int \Phi(E) \cdot Q(E) \frac{dE}{dx} dE, \qquad (4)$$

где Q(E) – коэффициент качества ионизирующих излучений (ГОСТ 8.496-83 ГСИ); р – плотность вещества среды; *dE/dx* – ионизационные потери, описывающиеся известной формулой [4]; Ф(E) – дифференциальный энергетический спектр, посчитанный использованием нашей численной модели.



рис. 1. Процентное отношение протонов на поверхности Земли к общему числу протонов, долетевших до границы атмосферы Земли (100 км) и соответствующие силовые линии полей в 2015 г. (вверху), в квадруполе (внизу)

В продолжении исследования радиационной обстановки в околоземном пространстве во время инверсии уделено также внимание частицам, образующим радиационные пояса. Среди всех возможных топологий квадруполя области устойчивого захвата заряженных частиц существуют только в осесимметричной конфигурации поля [5]. Для их нахождения мы развили теорию Штермера на осесимметричный квадруполь [6,7,8], а также на суперпозицию диполя с квадруполем. На рис. 2 изображены магнитные силовые линии этих полей [**B**×**dr**]=0. В связи с разностью скоростей затухания напряженностей диполя и квадруполя устойчивые круговые орбиты для их суперпозиции расположены на широтах  $\lambda^{(\pm)}$ , зависящих от расстояния *r*. Что усложняет вычисление радиуса Штермера из равенства центробежной и магнитной сил



рис. 2. Магнитные силовые линии осесимметричных диполя (a), 2.5% диполя с квадруполем (b) и квадруполя (c)

$$\frac{mv^2}{r\cos\lambda^{(\pm)}} = evB(r, \lambda^{(\pm)}).$$
(5)

В соответствии с инверсионным сценарием исследовано постепенное сокращение радиационных поясов при уменьшении дипольной составляющей современного геомагнитного поля. Полученные распределения плотности потоков протонов и электронов различных энергий на основе полуэмпирических моделей АР-8min и АЕ-8min [9], которые успешно применяются для электронов и протонов с энергиями в диапазоне 0.1–7 МэВ и 0.1–400 МэВ, позволили определить мощность доз радиации на различных магнитных оболочках в осесимметричном квадруполе по формуле (4). Если предполагать, что оси квадруполя сохранят свою современную несимметричную ориентацию, то радиационные пояса практически исчезнут, а присутствующие в них низкоэнергичные квазизахваченные частицы не внесут существенный вклад в околоземную радиацию.

- [1] Thébault E., Finlay C.C., Toh H. Earth, Planets and Space 67 158 (2015).
- [2] Царева О.О., Зелёный Л.М., Малова Х.В. и др. Инверсия магнитного поля Земли и что ожидает человечество: угрозы мнимые и подлинные. // УФН 188 207 (2018) (https://doi.org/10.3367/UFNr.2017.07.038190).
- [3] Dietze G. Dosimetric Concepts and Calibration of Instruments. // in IRPA 10 (Hiroshima, 2001) (http://www.irpa.net/irpa10/pdf/E03.pdf).
- [4] Антонов Р.А. В сб. Модель космоса Т. 1 (под ред. Панасюка М.И., Новикова Л.С.) (М.: КДУ, 2007).
- [5] Vogt J., Glassmeier K.H. On the location of trapped particle populations in quadrupole magnetospheres. // J. Geophys. Res., 105, 13.063-13.071, (2000).
- [6] Веселовский И.С., Кропоткин А.П. Физика межпланетного и околоземного пространства, 116 (2010).
- [7] Лонгейр М. Астрофизика высоких энергий М.: Мир, 400 (1983).
- [8] Urban E.W. Critical Stormer Conditions in Quadrupole and Double Ring-Current Fields. // J Math. Physics, 6 (1965) (https://doi.org/10.1063/1.1704749).
- [9] Кузнецов С.Н. Избранные труды по солнечно-земной физике (Под ред. Панасюка М.И.), 256 (2010).

# КРУПНОМАСШТАБНАЯ СТРУКТУРА СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА ПО ДАННЫМ МОНИТОРИНГА МЕЖПЛАНЕТНЫХ МЕРЦАНИЙ НА РАДИОТЕЛЕСКОПЕ БСА ФИАН

И.В. Чашей, В.И. Шишов, С.А. Тюльбашев, И.А. Субаев Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Москва, Россия; chashey@prao.ru

#### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

солнечный ветер, межпланетные мерцания, глобальная структура

# введение

Открытый в 1959 г. К.И. Грингаузом с соавторами солнечный ветер исследуется как локальными методами, так и по данным радиопросвечивания. Межпланетные мерцания (флуктуации интенсивности компактных естественных радиоисточников) широко используются для исследования глобальной структуры солнечного ветра, ее циклической динамики и крупномасштабных возмущений. Уровень межпланетных мерцаний определяется дисперсией флуктуаций плотности плазмы солнечного ветра на масштабах порядка френелевского; характерный пространственный масштаб мерцаний несколько сотен км для метрового диапазона радиоволн, соответствующий временной масштаб порядка секунд. Результаты наблюдений межпланетных мерцаний индивидуальных радиоисточников неоднократно докладывались на возглавлявшейся К.И. Грингаузом секции «Солнечный ветер» Междуведомственного Геофизического комитета. К.И. Грингауз всегда с интересом воспринимал эти результаты и принимал активное участие в их обсуждении. Наблюдения межпланетных мерцаний ведутся на радиотелескопе БСА ФИАН в режиме мониторинга с 2006 г., сначала на 16-лучевой диаграмме, а начиная с 2013 г. на 96-лучевой диаграмме. В настоящей работе суммированы результаты мониторинга межпланетных мерцаний, охватывающие полный цикл солнечной активности.

#### ДИНАМИКА ГЛОБАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ СОЛНЕЧНОГО ВЕТРА В ЦИКЛЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Минимум 23/24 цикла солнечной активности, наблюдения 2007—2011 гг., 16 лучей, 300 мерцающих источников [1,2].

Связанная с гелиосферным токовым слоем концентрация турбулентной плазмы к плоскости солнечного экватора приводит к заметному подавлению радиальной зависимости уровня межпланетных мерцаний.

Средний по наблюдаемой области элонгаций уровень мелкомасштабной турбулентности плазмы солнечного ветра изменяется синхронно с уровнем солнечной активности.

Межпланетные мерцания в низкочастотном диапазоне волн чувствительны к распределению плазмы на луче зрения, что особенно сильно проявляется в период минимума солнечной активности, когда эффективно модулирующий слой при любых элонгациях находится вблизи Земли, то есть на низких гелиоширотах.

Сильное отличие от сферической симметрии в минимуме солнечной активности характерно не только для средних параметров плазмы солнечного ветра, но и для уровня мелкомасштабной турбулентности. Максимум 24 цикла солнечной активности, наблюдения с апреля 2013 г. по апрель 2014 г., 96 лучей, 5 000 мерцающих источников <sup>[3,4]</sup>.

Глобальная структура турбулентного солнечного ветра в максимуме солнечной активности близка к сферически симметричной.

На фоне квазистационарной глобальной структуры в солнечном ветре постоянно присутствуют крупномасштабные (0,2–0,3 а.е.) неоднородности с повышенным уровнем турбулентности. Крупномасштабные неоднородности переменны на всех временных масштабах, превосходящих десятки часов.

Фаза спада 24 цикла, наблюдения 2015–2017 г., 96 лучей, 5 000 источников.

В начальной стадии спада активности, 2015–2016 гг., глобальная мало отличается от максимума и в среднем близка к сферически симметричной.

По мере приближения к минимуму, 2017 г., наблюдается заметное ослабление радиальной зависимости уровня мерцаний, что может быть объяснено влиянием гелиосферного токового слоя.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мониторинг ансамбля слабых мерцающих источников является эффективным методом исследования глобальной структуры турбулентного солнечного ветра и ее динамики в цикле солнечной активности. Наблюдения позволяют исследовать солнечный ветер на всех гелиоширотах, от экваториальных до полярных, в области гелиоцентрических расстояний от 0.4 до 1 а.е.

- [1] I.V.Chashei I.V., Shishov V.I., Tyul'bashev S.A., Subaev I.A., Oreshko V.V. Results of IPS Observations in the Period Near Solar Activity Minimum *II* Solar Phys. 2013. V.285. No.1 P.142-149.
- [2] Чашей И.В., Шишов В.И., Тюльбашев С.А., Глянцев А.В., Субаев И.А. Межпланетные мерцания ансамбля радиоисточников в период минимума 23/24 цикла солнечной активности // Космич. Исслед. 2013. Т.51. № 1. С.28-34.
- [3] Chashei I.V., Shishov V.I., Tyul'bashev S.A., Subaev I.A., Oreshko V.V., Logvinenko S.V. Global structure of the turbulent solar wind during 24 solar activity maximum from IPS observations with the multi-beam radio telescope BSA LPI at 111 MHz // Solar Phys. 2015. V.290. No.9. P.2577-2587.
- [4] Чашей И.В., Шишов В.И., Тюльбашев С.А., Субаев И.А. Межпланетные мерцания ансамбля радиоисточников в максимуме 24 цикла солнечной активности // Космич. Исслед.2016. Т.54. № 3. С.188-194.

# ВЕРОЯТНОСТИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И ВОЗМОЖНОСТИ ПРОГНОЗА ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

#### Н.В. Ягова, В.А. Пилипенко, О.В. Козырева

ИФЗ РАН, Москва, Россия

Анализируются вероятности появления экстремальных возмущений геомагнитного поля разных пространственных масштабов. Показано, что амплитуда возмущения возрастает при наложении волновых и переходных процессов разного происхождения, и для такие события не могут быть предсказаны на основе анализа внемагнитосферных факторов. Оцениваются вероятности экстремальных возмущений для разных геомагнитных широт.

Показано, что амплитуды и спектральный состав геомагнитных пульсаций диапазона 1–5 мГц (Pc5/Pi3) оказываются фактором, влияющим на вероятность появления экстремальных возмущений геомагнитного поля и в качестве самостоятельного фактора и в сочетании с бухтообразными возмущениями.

# ALFVENIC CURRENT SYSTEMS IN THE JUPITER'S AND SATURN'S MAGNETOSPHERES

# I.I. Alexeev<sup>1</sup>, E.S. Belenkaya<sup>1</sup>, S.W.H. Cowley<sup>2</sup>, V.V. Kalegaev<sup>1</sup>, A.S. Lavruchin<sup>1</sup>, D.A. Parunakian<sup>1</sup>, I.A. Pensionerov<sup>1</sup>

- <sup>1</sup> Federal State Budget Educational Institution of Higher Education M.V. Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics (SINP MSU), Moscow, Russia; iialexeev@mail.ru
- <sup>2</sup> Department of Physics & Astronomy, University of Leicester, Leicester LE1 7RH, UK

# **KEYWORDS**

planetary magnetospheres, Jupiter, Saturn, magnetodisk

#### INTRODUCTION

As pointed out in particularly by Cowley et al. [1], the magnetosphere-ionosphere interactions in the case of rapidly rotated planets with additional source of inter-magnetospheric plasma (Jupiter and Saturn), results that the magnetospheric plasma can not state in the rigid corotation together with the planet. Slipping of the magnetospheric plasma results in the generation of the equatorial plasma magnetodisk with emended strong azimuthal currents. In the case of Jupiter this mechanism results in increasing of the effective planetary dipole about 2–3 times [2]. The same process results in the generation of potential drop along the magnetic field lines, as well as the electrons beams acceleration and powerful aurora emitting by the upper atmosphere. The very high field-aligned conductivity requires that magnetic field lines be equipotential (parallel electric field must be zero) and angular velocity must be the same at the ionosphere and in the equatorial plane, but beyond the Alfvenic radius magnetic field can not control of the plasma flow in the magnetosphere, and specific 3D current system will be generated.

We describe all toroidal and poloidal currents connected by each to other through the ratio of the Pedersen and Hall ionospheric conductivities as parts of the total current system. We added the azimuthal field B\_phi created by the field-aligned currents to the global paraboloid model of the magnetic field in the Jovian and Kronian magnetospheres [2].

#### REFERENCES

- [1] Cowley, S.W.H., Alexeev I.I., Belenkaya E.S., Bunce E.J., Cottis C.E., Kalegaev V.V., Nichols J.D., Prangé R, and Wilson F.J. A simple axisymmetric model of magnetosphere-ionosphere coupling currents in Jupiter's polar ionosphere // J. Geophys. Res., 2005. V. 110(A11209). doi:10.1029/2005JA011237.
- [2] Alexeev I.I., Belenkaya E.S. Modeling of the Jovian Magnetosphere // Annales Geophysicae. 2005. V. 23. No. 3. P. 809-826.
# SPACE WEATHER PREDICTION PROBLEMS AND THE ROLE OF K.I. GRINGAUZ IN THEIR SOLUTION

E.E. Antonova<sup>1,2</sup>, V.G. Vorobjev<sup>3</sup>, I.P. Kirpichev<sup>2</sup>, I.L. Ovchinnikov<sup>1</sup>, O.I. Yagodkina<sup>3</sup>, V.V. Vovchenko<sup>2</sup>, S.S. Znatkova<sup>1</sup>, M.S. Pulinets<sup>1</sup>, N.V. Sotnikov<sup>1</sup>, S.K. Mit<sup>1</sup>, P.S Kazarian<sup>1</sup>, M.V. Stepanova<sup>1</sup>

- <sup>1</sup> Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics Lomonosov Moscow State Univetsity, Moscow, Russia; elizaveta.antonova@gmail.com
- <sup>2</sup> Space Research Institute of RAS, Moscow, Russia
- <sup>3</sup> Polar Geophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Russia
- <sup>4</sup> Universidad de Santiago de Chile (USACH), Santiago, Chile

#### **KEYWORDS**

solar wind, geomagnetic activity, auroral oval, transverse and field-aligned currents

Since the first observations of the solar wind made by the interplanetary missions Luna-1, -2, and -3 in 1959 [1,2], the pioneering works of K.I. Gringauz made fundamental contribution to our understanding of the influence of the solar wind to the magnetospheric dynamics, now known as the space weather. At the first stages of space weather research, the solar wind velocity was considered as the main factor controlling the geomagnetic activity. K.I. Gringauz studied the correlation between the yearly averaged parameter of geomagnetic activity aa and the solar wind velocity for the 20 solar cycle, and showed that they are highly correlated [3]. However, he also noticed that such good correlation might not persist for other solar cycles. This prediction was confirmed later, when it was found that the high correlation breaks down for the cycles 21 and 22 [4]. Even these early works revealed the principal limitations of the most popular models of the creation of magnetospheric convection; the reconnection model developed by Dungey [5] and the viscous interaction model developed by Axford and Hines [6]. The first model postulated the validity of the frozen-in condition, which could be destroyed only in definite points and lines. The second model is based on the alternative physical principles and suggests the development of strong turbulence and appearance of great viscosity due to development of instabilities at the magnetospheric flanks. The model of Boris Tverskoy [7] developed later had no such limitations. It considered the formation of large-scale magnetospheric convection as a result of the inner magnetospheric instability development (see the review [8]). It was able to predict the configuration, location and value of later discovered field-aligned current system. Unfortunately, the influence of the solar wind parameters on the magnetospheric convection was not considered in this model.

On the other side, the Dungey model suggested the explanation of the dependence of geomagnetic activity on the orientation of the interplanetary magnetic field (IMF), obtained by many researches, including [4], that made it very popular for a very long time. However, its predictions are incompatible with the observed pressure balance at the magnetopause [9]. They also are in a strict conflict with the observed high level of turbulence in the magnetosheath and plasma sheet. In the turbulent regions, where the amplitude of magnetic field fluctuations is comparable with the averaged field, the magnetic field line often changes its topology, which might be interpreted as "reconnection phenomena" at the magnetopause or in the tail. This reconnection is widely considered as the main cause of magnetospheric activity (substorm development), but the constant change in the field line topology makes this statement rather questionable. Another difficulty is related to a low correlation between the solar wind-magnetosphere coupling functions and geomagnetc indexes. Newell et al. [10] analyzed more than 20 coupling functions and suggested a new one. Despite all this efforts, the correlation coefficients of such functions and geomagnetic indices are still not very high. The attempts to explain the reason of low correlations was not successful. This means that not all factors determining the geomagnetic activity were taken into account. Low values of correlation coefficients between coupling functions and geomagnetic indices show from one side the absence of the adequate information about parameters of plasma and magnetic field at the magnetospheric boundary, and from the other side the absence of the adequate information about magnetospheric dynamics and interconnections of different magnetospheric processes.

The difficulties of conventional theories of geomagnetic activity require the development of new approaches, which do not request the validity of the frozen-in conditions. They should take into account the fact that the plasmas in the magnetosphere are in magnetostatic equilibrium when plasma velocity is much lower than sound and Alfven speeds. We summarize the latest achievements in this direction, including the results of the studies of turbulent transport in the magnetospheric tail, determining the localization of the auroral oval mapping to the equatorial plane, structure of transverse currents in the magnetosphere and nature and location of field-aligned currents [11]. We study the properties of isolated substorms, their dependence on solar wind and IMF parameters and connections to ring current dynamics [12]. We try to show that obtained results permit to reanalyze the main properties of magnetospheric dynamics and its connection to the solar wind and IMF parameters.

Acknowledgments. The work was supported by RFBR grant 18-05-00362.

- [1] Gringauz K.I., Bezrukikh V.V., Ozerov V.D., Rybchinskii R.E. A study of the interplanetary ionized gas, high-energy electrons, and corpuscular radiation from the Sun by means of the three-electrode trap for charged particles on the second Soviet cosmic rocket // Dokl. Akad. SSSR. 1959. V. 131. No. 6. p. 1301.
- [2] Gringauz K.I., Bezrukikh V.V., Ozerov V.D., Rybchinskii R.E. A study of the interplanetary ionized gas, high-energy electrons, and corpuscular radiation from the Sun by means of the three-electrode trap for charged particles on the second Soviet cosmic rocket // Sov. Phys. Dokl. 1960. V. 5. P. 361–364.
- [3] Gringauz K.I. Average characteristics of the solar wind and its variation during the solar cycle, in Solar Wind Four, Rep. MPAE-W-100-81-31, edited by H. Rosenbauer, Max-Planck-Institut, Katlenburg-Lindau, Germany. 1981. P. 84-95.
- [4] Crooker N.U., Gringauz K.I. On the low correlation between long-term averages of solar wind speed and geomagnetic activity after 1976 // J. Geophys. Res. 1993.
   V. 98. No. A1. P. 59-62. doi:10.1029/92JA01978.
- [5] Dungey J.W. Interplanetary magnetic field and auroral zone // Phys. Rev. Lett. 1961.
  V. 6. No. 1. P. 47-49.
- [6] Axford W.C., Hines C.O. A unifying theory of high latitude geophysical phenomena and geomagnetic storms // Can. J. Phys. 1961. V. 39. No. 10. P. 1433-1464.
- [7] Tverskoy B.A. Electric fields in the magnetosphere and the origin of trapped radiation // Solar-Terrestrial Physics, edited by E.R. Dyer, Dordrecht, Holland. 1972. P. 297-317.
- [8] Antonova E.E., Tverskoy B.A. On the nature of electric fields in the Earth's inner magnetosphere (a review) // Geomagnetism and Aeronomy International. 1998. V. 1. No 1. P. 9-21.
- [9] Sibeck D.G., Lopez, R.E., Roelof, E.C. (1991) Solar wind control of the magnetopause shape, location and motion // J. Geophys. Res. V. 96. P. 5489–5495. doi:10.1029/90JA02464.

## 108 GRINGAUZ 100: PLASMAS IN THE SOLAR SYSTEM, 2018

- [10] Newell P.T., Sotirelis T., Liou K., Meng C.-I., Rich F.J. A nearly universal solar wind-magnetosphere coupling function inferred from 10 magnetospheric state variables // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. doi:10.1029/2006JA012015.
- [11] Antonova E.E., Stepanova M., Kirpichev I.P. et al. Structure of magnetospheric current systems and mapping of high latitude magnetospheric regions to the ionosphere // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2017. doi:10.1016/j. jastp.2017.10.013.
- [12] Vorobjev V.G., Yagodkina O.I., Antonova E.E., Zverev V.L. Influence of solar wind plasma parameters on the intensity of Isolated magnetospheric substorms // Geomag. Aeron. 2018. V. 58. No. 3. P. 295–306. doi:10.1134/S0016793218030155.

# LONGITUDINAL DEPENDENCE OF PLASMASPHERE FROM INTERBALL DATA

#### D.V. Chugunin<sup>1</sup>, G.A. Kotova<sup>1</sup>, M.V. Klimenko<sup>2,3</sup>, V.V. Klimenko<sup>3</sup>

- <sup>1</sup> Space Research Institute of RAS, Moscow, Russia; dimokch@iki.rssi.ru
- <sup>2</sup> Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

<sup>3</sup> Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, West Department, Russian Academy of Sciences, Kaliningrad, Russia

## **KEYWORDS**

plasmasphere

## INTRODUCTION

Several previous studies have considered the annual variations in the equatorial density of electrons in the plasmasphere. The first results were obtained based on an analysis of observations of the natural signals of whistlers [1]. These publications have shown that the maximum and minimum of the cold plasma decrease in December to June, respectively, at the ratio of the maximum and minimum values equal to 1.5-3 for L=1.5-2.5. depending on the longitude. An analysis of artificial signals in the whistler mode has been performed in [2] and it has been shown that the ratio of the calculated density in December to the density in June reaches a factors of 3 and 2 for the solar minimum and maximum, respectively, at L=2.5 in the American longitudinal sector. It has been shown that seasonal variations are pronounced most clearly at a longitude of 60°W because the stronger shift of the geomagnetic pole relative to the geographic pole falls at that longitude. In the model [3], an approach based on the dynamical diffusion equilibrium was used and seasonal variations in the plasma density in the solar activity maximum have been obtained. A couple of magnetometers located at L=1.4 in the American longitudinal sector has been used to determine the mass density of the plasma [4]. It was found that the mass density is higher in December than in June by a factor of 2–3. In [5], the authors used the electron density measurements on board the CRESS satellite, which determines the plasma frequency from the wave measurements. As in the previous papers, the authors found a strong winter-summer seasonal dependence in the American longitudinal sector at L<4, whereas in the opposite longitudinal sector in the Eastern Hemisphere, no such dependence was distinctly seen. No such dependence was detected for high values of L. The latter fact is most likely related to the choice of measurement moments. At high L shells, the prehistory of magnetic activity for several preceding days substantially influences the filling of magnetic flux tubes. In [6], the authors continued and developed their research annual and longitudinal variation in the electron and ion density at L=2.5 in the equatorial plane during the solar activity maximum using measurements of magnetometers, CRESS and IMAGE satellites. It was found that, near a geographic longitude of 60°W, the mass density of electrons and ions in December is 1.5 and 2.2 times higher, respectively, than in June. In the Eastern Hemisphere, the seasonal variations were insignificant.

## RESULTS

In order to analyze the dependence of the cold plasma density in the Earth's plasmasphere, we used the data obtained on board the INTERBALL-1 satellite (Tail probe) by the Alpha-3 experiment [7]. This satellite has been launched on August 2, 1995 to an orbit with an apogee of ~200000 km and a period of rotation around the Earth of approximately 4 days. The analyzer was measuring the energy spectrum of the charged particles within the energy range of 0–25.5

#### 110 GRINGAUZ 100: PLASMAS IN THE SOLAR SYSTEM, 2018

eV with 24 energy intervals. The spectrum was measured for 2 s with a period of 18 s to 5 min. The method of data processing and obtaining the proton concentration and temperature was described in [8]. In the present work, we tried to use these measurements database to analyze the dependence of the plasma density in the plasmasphere on geographic longitude in the filled-in plasma tubes in the coordinate system L-MLT. At the same time, a comparison of the plasma density was performed in the plasma tubes located in approximately the same MLT interval and has the same value of the McIlvain parameter L but located at different geographic (or geomagnetic) longitudes. We only used measurements at time moments when, for a few days prior to the measurements, the situation in the magnetosphere was guiet. The condition that, during 5 days prior to the moment of measurements, the magnetic activity index Kp did not exceed a value of 4 was chosen as a selection criterion. The measurements conducted at the L shells located between L=2 and L=4 were used for the study. May, June, July, and August were taken as summer months and November, December, January, and February considered as winter months. Due to the peculiarities of the Tail probe orbit and its evolution over time, the satellite crossed the inner magnetosphere in summer and winter months in predominantly the 22.00-02.00 MLT sector and the 09.00-12.00 MLT sector, respectively. Because of that, it was found to be impossible to compare the cold plasma density at points with similar geographic and geomagnetic coordinates in the summer and winter seasons.

In the present work the values of plasma density measured at different geomagnetic latitudes were reduced to L=2.5 using the N~L–4 law as in [5,6]. A longitudinal distribution of the proton density in the plasmasphere with splitting into sectors of 45° was shown on the upper part of figure 1. Figures show the proton density distributions for summer and winter seasons. The ratio of the maximum to minimum density became equal to 3 and 2.3 for the summer and winter seasons, respectively. The density minimum is located within the 270°–315° longitudinal sector in summer. It coincides completely with the re-















110-proceedings of the conference

sults of previous studies where it has been shown that the minimum of the plasma density is located at a geographic longitude of  $60^{\circ}$  W. However, unlike these studies, our results distinctly indicate the existence of maximum in winter located within the  $180^{\circ}$ -225° longitudinal sector.

In this study, we used the modified Global Self-Consistent Model of the Thermosphere, lonosphere, and Protonosphere (GSM TIP) [9]. Using the GSM TIP model, we obtained solutions for quiet conditions of the summer and winter seasons. Lower part of Figure 1 shows the obtained results of calculating the longitudinal variations in the electron density at various geomagnetic latitudes at a height of 10000 km for winter and summer period and for local time 24 and 12 UT. The results of the model calculations also provide a strong dependence of the electron density on the geographic longitude. In summer, at 24.00 LT, the longitudinal dependence is stronger than in winter at 12.00 LT, although in winter this dependence is more complicated. This agrees with the statistical results shown in upper parts of fig.1. If we compare the longitudinal dependences obtained according to the INTERBALL-1 data with the results of the model calculation, good agreement can be observed between them.

Our study showed that, without allowance for the dependence of the cold plasma density in the plasmasphere on geographic longitude, it is impossible to create an adequate statistical plasmaspheric model.

- Park C.G., Carpenter D.L., Wiggin D.B. Electron density in the plasmasphere: Whistler data on solar cycle, annual and diurnal variations // J. Geophys. Res. 1978. V. 83. P. 3137-3144.
- [2] Clilverd M.A., Smith A.J. Thomson N.R. The annual variation in quiet time plasmaspheric electron density determined from whistler mode group delays // Planet. Space Sci. 1991. V. 39. P. 1059-1067.
- [3] Webb P.A., Essex E.A. A dynamic diffusive equilibrium model of the ion densities along plasmaspheric magnetic flux tubes // J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 2001. V. 63. P. 1249-1260.
- [4] Berube D., Moldwin M.B., Weygand J.M. An automated method for the detection of field line resonance frequencies using ground magnetometer techniques // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. P. 1348. Doi 10.1029/2002JA009737.
- [5] Clilverd M.A., Meredith N.P., Horne R.B. et al. Longitudinal and seasonal variations in plasmaspheric electron density: Implications for electron precipitation // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. A11210. Doi 10.1029/2007JA012416.
- [6] Menk F.W., Ables S.T., Grew, R.S. et al. The annual and longitudinal variations in plasmaspheric ion density // J. Geophys. Res. 2012. V. 117. A03215. doi 10.1029/2011JA017071.
- [7] Bezrukikh V.V., Barabanov N.A., Venediktov Y.I. et al. Investigation of low-energy plasma in the Earth's magnetosphere on board the tail and auroral probes: Instrumentation and preliminary results // Cosmic Res. 1998. V. 36. N.1. P. 30-38.
- [8] Kotova G., Verigin M., Bezrukikh V. The effect of the Earth's optical shadow on thermal plasma measurements in the plasmasphere // J. Atmos. Sol.-Terr. Phys. 2014. V. 120. P. 9-14.
- [9] Namgaladze A.A., Korenkov Yu.N., Klimenko V.V. et al. Global numerical model of the Earth's thermosphere, ionosphere, and protonosphere // Geomagn. Aeron. 1990. V. 30. N. 4. P. 612-619.

# SIMPLE EMPIRICAL MODEL OF THE MAIN IONOSPHERIC TROUGH POSITION

#### M.G. Deminov, V.N. Shubin

IZMIRAN, Troitsk, Moscow, Russia; deminov@izmiran.ru; shubin@izmiran.ru

## **KEYWORDS**

ionosphere, main ionospheric trough, empirical model, analytical form

## ABSTRACT

Based on the analysis of probe measurements on the CHAMP satellite at altitudes of ~350–450 km for 2000–2007, an empirical model of the position of the main jonospheric trough (MIT) was developed. The model is presented in the analytical form of the invariant latitude of the trough minimum, Fm, as a function of the magnetic local time (MLT), geomagnetic activity, and geographical longitude. The model is applicable for the northern and southern hemispheres. As an indicator of geomagnetic activity, we used the time-weighted average index Kp( $\tau$ ), whose coefficient  $\tau$ =0.6 was determined by the condition of the minimum deviation of the model from the experimental data. The model has no limit neither on the local time nor on the magnitude of the geomagnetic activity index. However, the initial array of MIT minima contained mainly data in the interval 16-08 MLT for Kp( $\tau$ )<6, so outside this interval the model is more qualitative. It is also established that: a) the use of solar local time (SLT) instead of MLT leads to an increase in model errors by only 5–10%; b) the amplitude of the longitudinal effect in the latitude of the MIT minimum in geomagnetic (invariant) coordinates is an order of magnitude smaller than in geographic coordinates.

## MODEL

The model is based on probe measurements of the electron density onboard the CHAMP satellite from July 2000 to December 2007 at altitudes of 350 to 450 km. With hand processing of these data, the geographical coordinates of the main ionospheric trough, MIT, were determined, as well as the time and date of crossing their minimums by the satellite. The number of such MIT minimums amounted to 8739 for the Northern hemisphere and 7927 for the Southern one.

Using the International Geomagnetic Field Model IGRF-2010, the geographical coordinates of every MIT minimum, and the universal time of the crossing of this minimum by the satellite, we determined the corrected geomagnetic latitude,  $\Phi_m^*$ , at the altitude of 400 km and the local magnetic time, MLT, for this minimum according to the model given in Internet (https://omniweb.gsfc. nasa.gov/vitmo). In what follows, the term "invariant latitude",  $\Phi$  is used for the absolute value of the corrected geomagnetic latitude,  $\Phi^*$ , i.e.  $\Phi_m = |\Phi_m^*|$  is the invariant latitude of the MIT minimum. Using  $\Phi_m$  is justified by the fact that the regularities of  $\Phi_m$  variations are similar in the Northern and Southern hemispheres in many aspects.

Numerous investigations showed that the  $\Phi_m$  changes delay relative to the geomagnetic activity changes, i.e. the MIT minimum latitude depends on pre-history of the geomagnetic activity changes. In order to account for the pre-history, we used the weighted average over time (with the weight coefficient t) index of geomagnetic activity [1]

 $Kp(T) = 2.1 \ln(0.2 ap(T) + 1),$ 

where [2]

 $ap(T) = (1-T) (ap_0 + ap_{-1} T + ap_{-2} T^2 + ...),$ 

 $ap_0$ ,  $ap_{-1}$ , etc. are the values of ap-index at a present, previous, etc. three-hour intervals.

The model of the MIT minimum position is the regression equation obtained using the above data array:

 $\Phi_{\rm m} = 65.5 - 2.4 \ Kp^* + \Phi(t) + \Phi(\lambda) \exp(-0.3 \ Kp^*),$ 

where the latitudes  $\Phi_m$ ,  $\Phi(t)$ ,  $\Phi(\lambda)$ , and the geographical longitude  $\lambda$  are expressed in degrees, time t = MLT in hours,  $Kp^* = Kp(\tau)$  with  $\tau = 0.6$ ,  $\Phi(\lambda) = \Phi_N(\lambda)$  and  $\Phi(\lambda) = \Phi_S(\lambda)$  for the Northern and Southern hemispheres,

 $\Phi(t) = 3.16 - 5.6 \cos(15(t - 2.4)) + 1.4 \cos(15(2t - 0.8)),$ 

 $\Phi_{\rm N}(\lambda) = 0.85 \cos(\lambda + 63) - 0.52 \cos(2\lambda + 5),$ 

 $Φ_{\rm S}(\lambda) = 1.5 \cos(\lambda - 119).$ 

Note that the free term for  $\Phi(t)$  was chosen in such a manner that at midnight (at t = 0) the condition  $\Phi(t) = 0$  was fulfilled.

## FEATURES OF THE MODEL

Formally, this model has no limitations in local time and magnitude of the effective index of geomagnetic activity,  $Kp^*$ . But the initial array of the MIT minimums contained mainly the data in the interval 16 to 08 MLT. Therefore the model is rather qualitative outside this interval, and this is consistent with the general tendency that the MIT occurs mainly at night time. Just this is the reason of that the array of the MIT minimums practically did not contain data for local summer. The array of the MIT minimums contained mainly the data for  $Kp^*<6$ . Therefore the accuracy of the model for  $Kp^*>6$  can be not very good.

The root mean square error  $\sigma$  (in degrees of invariant latitude) of the model is near 2.0–2.3 and 2.8–2.9 for the Northern and Southern hemispheres. The relatively high error of the model for the Southern hemisphere seems to be related to greater difference between the geographical and magnetic poles in this hemisphere.

Accounting for pre-history of the geomagnetic activity variations in the MIT minimum model is important for all considered cases. For example, in the Northern hemisphere the error of the model (in degrees of invariant latitude) is 2.0-2.3 and 2.8-3.1 with accounting ( $\tau$ =0.6) and without accounting ( $\tau$ =0) for this pre-history.

The function  $\Phi(\lambda)$  shows dependence of invariant latitude of the MIT minimum on geographical longitude  $\lambda$ . Analysis shows that  $\Phi(\lambda)$  depends in a certain manner on longitudinal variations of geographical latitude  $\varphi$  at a fixed invariant latitude, for example, at 65°  $\Phi$ , which is denoted as  $\varphi(65,\lambda)$ . In this case

 $\Phi(\lambda) = -0.13 (|\phi(65,\lambda)| - 65)$ 

with a correlation coefficient *K*=0.9 for the Northern hemisphere; here all latitudes and longitudes are measured in degrees. This equation shows that the amplitude of the  $\Phi(\lambda)$  longitudinal changes is 13% of amplitude of  $\varphi(65,\lambda)$  longitudinal changes. The contribution of  $\Phi(\lambda)$  into invariant latitude of the MIT minimum,  $\Phi_m$ , becomes smaller as geomagnetic activity grows. Therefore at  $Kp^*=2$  and  $Kp^*=5$  the amplitude of  $\Phi_m$  longitudinal changes,  $\Phi(\lambda)\exp(-0.3Kp^*)$ , is 7% and 3% of the amplitude of  $\varphi(65,\lambda)$  longitudinal changes.

This model will be described in more detail in the paper [3].

- [1] Annakuliev S.K., Afonin V.V., Deminov M.G., Karpachev A.T. An empirical formula for the position of the main ionospheric trough during a magnetic storm // Geomag. Aeron. 1997. V. 37. P. 392-395.
- [2] Wrenn G.L. Time-weighted accumulations *ap*(t) and *Kp*(t) // J. Geophys. Res. 1987.
  V. 92. P. 10125-10129.
- [3] Deminov M.G., Shubin V.N. Empirical model of the main ionospheric trough position // Geomag. Aeron. 2018. V. 58. No. 3.

# REFINED MODEL OF THE PLASMASPHERIC COROTATION FIELD

#### Yu.V. Dumin<sup>1,2</sup>

- <sup>1</sup> Sternberg Astronomical Institute (GAISh), Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; dumin@yahoo.com
- <sup>2</sup> Space Research Institute of RAS, Moscow, Russia

## **KEYWORDS**

plasmasphere, plasmapause, corotation field, unipolar induction

## INTRODUCTION

The plasmaspheric corotation field is of crucial importance in the consideration of cold plasma dynamics in the inner magnetosphere. In particular, just the combined action of corotation and convection fields is responsible for the formation of plasmapause – the separatrix between the closed and open trajectories of cold charged particles drifting around the Earth.

Unfortunately, the corotation field is usually considered in the oversimplified approximation, when it is derived by a formal transformation between the rotating and non-rotating reference frames. A well-known artifact of such an approach is, for example, a sharp cusp of the plasmapause in the dawn-to-dusk direction, which was never observed experimentally.

## METHODS

The aim of the present work is a development of the self-consistent theory of the corotation electric field, based on the effect of unipolar induction in the entire system extending from the solid Earth to the outer magnetosphere. As a result, the corotation field emerges as a real physical field, caused by the unbalanced polarization charges, rather than the result of formal transformations between the coordinate frames. A natural factor restricting the size of the corotation field is strong distortion of the magnetic field lines near the magnetospheric boundaries, so that the polarization charges can no longer be captured there.



## RESULTS

The model developed in the present work:

- (1) provides a self-consistent physical description of the corotation field, which is formed by the effect of unipolar induction;
- (2) gives a smooth shape of the plasmapause, well in agreement with observational data,
- (3) predicts some new effects in the high-latitude ionosphere and inner magnetosphere during geomagnetic storms, which have not been taken into account before.

# SIMULATING SPACE WEATHER

## T.I. Gombosi

University of Michigan, Ann Arbor, MI, USA; tamas@umich.edu

## **KEYWORDS**

space weather, Solar storms, Geomagnetic storms, Plasma simulations, MHD, Space Weather Modeling Framework

## ABSTRACT

A successful example of research code development, community use and transition to operations is our multiphysics MHD code called BATS-R-US and the Space Weather Modeling Framework (SWMF) that couples together regional domain models.

The development of BATS-R-US started in the early 1990s [1], while SWMF was developed a decade later [2,3]. Both BATS-R-US and SWMF were developed from the beginning with high parallel performance and portability in mind.



The SWMF provides the software environment and tools to couple the various models with each other. It is a fully functional, documented software framework that allows the parallel execution and efficient coupling of multiple models. The SWMF provides a high-performance computational capability to simulate the space-weather environment from the upper solar chromosphere to the Earth's upper atmosphere and/or the outer heliosphere. Currently there are more than a dozen physics domains in the SWMF, but in an actual simulation one can use any meaningful subset of the components.



#### 116 GRINGAUZ 100: PLASMAS IN THE SOLAR SYSTEM, 2018

In the early 2010s the CCMC evaluated three physics-based and three empirical magnetosphere (geospace) models at the request of NOAA/SWPC [4,5]. Among the six models was the SWMF/Geospace configuration that included three coupled models: the global magnetosphere described by BATS-R-US, the inner magnetosphere simulated by the Rice Convection Model (RCM) and ionospheric electrodynamics solved by the Ridley Ionosphere Model (RIM). In 2014 NOAA/SWPC selected SWMF/Geospace as the first physics-based global magnetosphere model to be transitioned to operations.



- [1] Powell K.G., Roe P.L., Linde T.J., Gombosi T.I., and De Zeeuw D.L. A Solution-Adaptive Upwind Scheme for Ideal Magnetohydrodynamics. J. Computational Phys., 1999. V. 154, P. 284. doi:10.1006/Jcph.1999.6299.
- [2] Toth G., Sokolov I.V., Gombosi T.I., Chesney D.R., Clauer C.R., de Zeeuw D.L., Hansen K.C., Kane K.J., Manchester W.B., Oehmke R.C., Powell K.G., Ridley A.J., Roussev I.I., Stout Q.F., Volberg O., Wolf R.A., Sazykin S., Chan A., Yu.B. and Kota J. Space Weather Modeling Framework: A New Tool for the Space Science Community. J. Geophys. Res., 2005. V. 110, P.12226. doi: 10.1029/2005JA011126.
- [3] Toth G., van der Holst B., Sokolov I.V., De Zeeuw D.L., Gombosi T.I., Fang F., Manchester W.B., Meng X., Najib D., Powell K.G., Stout Q.F., Glocer A., Ma Y.-J, Opher M. Adaptive numerical algorithms in space weather modeling. J. Computational Phys, 2012. V. 231, P. 870. doi: 10.1016/j.jcp.2011.02.006.
- [4] Pulkkinen A. et al. Community-wide validation of geospace model ground magnetic field perturbation predictions to support model transition to operations. Space Weather 2013. V. 11, P. 369.
- [5] Glocer A., Rastätter L., Kuznetsova M., Pulkkinen A., Singer H.J., Balch C., Weimer D., Welling D., Wiltberger M., RaederJ., Weigel R.S., McCollough J., Wing S. Community-wide validation of geospace model local K-index predictions to support model transition to operations. Space Weather, 2016. V. 14, P. 469. doi: 10.1002/2016SW001387.

# **GRINGAUZ AND I**

## T.I. Gombosi

University of Michigan, Ann Arbor, MI, USA; tamas@umicch.edu

## **KEYWORDS**

Gringauz, Gombosi, IKI, Sputnik, Prognoz, Venera, VEGA

I first met Konstantin Gringauz in 1973 when I was working on the data processing of the Prognoz-3 satellite. I joined his group as the first foreign postdoc at IKI in late 1975 when Venera-9 and -10 were orbiting Venus providing a treasure trove of new information about our sister planet. After my return to Hungary I kept a close collaboration with Gringauz and his group, culminating in our joint experiment on the Venus-Halley (VEGA) mission.

This presentation will be my reflection on our personal and professional relationship and the lessons I learned by working with one of the space pioneers.



## A MULTISCALE STRUCTURE OF THE CROSS-TAIL CURRENT SHEET AND ITS RELATION TO THE ION COMPOSITION ACCORDING TO MAVEN OBSERVATIONS IN THE MARTIAN MAGNETOTAIL

#### E. Grigorenko<sup>1</sup>, S. Shuvalov<sup>1</sup>, H. Malova<sup>2,1</sup>, L. Zelenyi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Space Research Institute of RAS, Moscow, Russia; elenagrigorenko2003@yandex.ru

<sup>2</sup> Scobeltsyn Nuclear Physics Institute of Moscow State University, Moscow, Russia

## **KEYWORDS**

Martian magnetotail, current sheet, nonadiabatic ion dynamics

## INTRODUCTION

Multilayered (embedding) Current Sheets (CS) are often observed in the Earth's magnetotail [1]. Simulations based on quasi-adiabatic dynamics of different ion components showed that the observed multiscale structures can be reconstructed by taking into account the net electric currents carried by ions with different masses and, thus, with different gyroradii [2]. The last determines the spatial scales of the corresponding current layers. The embedding can be quantitatively described by the ratio of the magnetic field value at the edges of a thin embedded layer B<sub>1</sub> to the value of the magnetic field outside the CS B<sub>0</sub> [1]. For the Earth's magnetotail it was shown that there is a relation between the B<sub>1</sub>/B<sub>0</sub> and the relative densities of heavy and light ion components [2].

## THE EMBEDDING CSS IN THE MARTIAN MAGNETOTAIL

In the Martian magnetotail the embedding feature is also often observed in the cross-tail CS formed by the draping of the IMF field lines [3]. The analysis of ~100 CS crossings by MAVEN spacecraft at  $X_{MSO}$ < –1  $R_M$  ( $R_M$  is a radius of Mars) showed that in the Martian magnetotail the relation between the embedding characteristics and ion composition is similar to the one observed in the terrestrial CSs, and the spatial scales of the embedded layers are defined by the gyroradii of the current carrying ion component. This finding confirms that the quasi-equilibrium CS state is supported by universal mechanisms based on general principles of plasma kinetic.

Authors acknowledge the support of Russian Science Foundation (RSF grant Nr. 16-42-01103).

- [1] Petrukovich A., Artemyev A., Malova H., Popov V., Nakamura R., Zelenyi L. Embedded current sheets in the Earth's magnetotail // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. A00125. doi:10.1029/2010JA015749.
- [2] Zelenyi L., Malova H., Popov V., Delcourt D., Ganushkina N., Sharma S. "Matreshka" model of multilayered current sheet // Geophys. Res. Lett. 2006. V. 33. L05105. doi:10.1029/2005GL025117.
- [3] Grigorenko E., Shuvalov S., Malova H., Dubinin E., Popov V., Zelenyi L., Espley J., McFadden J. Imprints of quasi-adibatic ion dynamics on the current sheet structures observed in the Martian magnetotail by MAVEN // J. Geophys. Res. 2017. V. 122. doi:10.1002/2017JA024216.

## ION FLUXES AND ION DISTRIBUTION FUNCTION MOMENTS IN THE MARTIAN AND VENUSIAN MAGNETOSPHERES FOR 2007–2017 TIME INTERVAL. THE DATA OF THE ASPERA INSTRUMENT ONBOARD MARS EXPRESS AND VENUS EXPRESS MISSIONS

#### A. Fedorov<sup>1</sup>, <u>A. Grigoriev<sup>1</sup></u>, E. Knizhnikova<sup>1</sup>, S. Barabash<sup>2</sup>

<sup>1</sup> IRAP-CNRS-CNES-UPS, Toulouse, France; Andrei.Fedorov@irap.omp.eu

<sup>2</sup> IRF, Kiruna, Sweden

We present ion moments data set that have been obtained from the IMA mass-spectrometer which is a part of ASPERA plasma package. ASPERA experiments have been mounted onboard of ESA Mars Express and Venus express missions. Mars express is still active and we have an excellent solar and planetary ions data set from 2007 up to now. Venus Express mission has been completed in 2014 and the ions moment data set covers 2006–2014 time interval. IMA is a sophisticate ion mass-spectrometer with almost omnidirectional field of view. It accumulates a 3D distribution function of H<sup>+</sup>, He<sup>++</sup>, He<sup>+</sup>, O<sup>+</sup>, and O<sub>2</sub><sup>+</sup> every 193s. Since Venus express and Mars Express are planetary focused. 3D stabilized mission, we can expect the ion flux from almost any direction in the spacecraft reference frame. The instrument field of view is partially obscured by the spacecraft and its solar panels. We have taken into account all such circumstances during the moments calculation and the ion distribution function analysis. The presentation shows all aspects of IMA data processing, ion distribution function reconstruction, and moments calculations. The resulting data are available in AMDA database (http://amda.cdpp.eu/) online. The presentation shows examples of online data manipulation.

## OBSERVATIONS OF THE SAR ARCS DURING THE OVERLAP DETECTION OF ENERGETIC ION FLUXES WITH THE PLASMAPAUSE ABOARD THE VAN ALLEN PROBES

#### I.B. levenko, S.G. Parnikov

Yu. G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy, Yakutsk, Russia; ievenko@ikfia.ysn.ru

## **KEYWORDS**

plasmasphere, plasmapause, substorm expansion, ring current, electron temperature, ionosphere F2 region, SAR arc, Van Allen Probe

## INTRODUCTION

The stable auroral red (SAR) arcs are the consequence of interaction of the outer plasmasphere (plasmapause) with energetic ions of the ring current. An arisen downward flux of superthermal electrons along the magnetic field lines increases the ambient electron temperature at the altitudes of ionosphere F2 region. As a result, the enhancement of atomic oxygen red line intensity in the SAR arc mapping the plasmapause takes place. Our studies show that the SAR arcs appear and / or brighten during the substorm expansion phase. The SAR arc formation begins in the equatorward boundary region of the diffuse aurora (DA). In this work two events of SAR arc observations using the all-sky imager (ASI) at the Yakutsk meridian (130°E; 200°E, geom.) simultaneously with a registration of plasmapause and energetic ion fluxes aboard the Van Allen Probe satellites are considered.

## **OBSERVATION RESULTS**

The first comparison of ground and satellite observations has been carried out during the onset of large magnetic storm on March 17, 2015 (St. Patrick's Day geomagnetic storm). ASI registers the intense SAR arc at 53-59°N geomagnetic latitudes in the MLT evening sector from the start of observation at ~1116 UT (1926 MLT) during the low magnetic activity at IMF Bz>0. The Van Allen Probe B determines the plasmapause location in the L~3–4 interval and registers the inner boundary of the H<sup>+</sup> and O<sup>+</sup> energetic ion fluxes at L~2.8–3.3 near the meridian of optical observations. We show that SAR arc in this event maps the overlap region of plasmaphere dusk-bulge by the energetic ion flux of the ring current after the onset of magnetic storm (see fig. 1, 2).

In the second event on December 28, 2014 ASI observes the aurora dynamics and formation of SAR arc in early morning sector of MLT after the onset of isolated substorm expansion at ~1920 UT. The center of substorm activization was at the 0212 MLT meridian. SAR arc arises at 59–57°N magnetic latitudes during the equatorward and eastward extension of aurora. The Van Allen Probe B at 1920–1950 UT registers a sharp drop in the flux of energetic protons and ions O<sup>+</sup> in the plasmapause region near the ground observation meridian. It is assumed that in this case the dynamics of aurora and SAR arc maps the penetration of hot plasma into the outer plasmasphere in the L~3–4 interval as the result of eastward electric drift from the substorm injection region.

- The gray column shows the overlap region of ring current energetic ions O<sup>+</sup> and H<sup>+</sup> with thermal plasma that must be interfaced with the observed SAR arc at this time.
- The satellite passes the inner boundary of this region at 1210 UT with calculated L  $\sim$  2.8 at the meridian 1736 MLT.
- The outer boundary of the overlap region is registered at 1245 UT with the values of parameter L~4 at the meridian 1900 MLT.



**fig. 1.** Registration of the plasmapause and energetic particle fluxes aboard the Van Allen Probe (B) during the SAR arc observation on March 17, 2015. The density of thermal electrons and the flux of energetic protons and oxygen ions ( $s^{-1} \times cm^{-2} \times ster^{-1} \times keV^{-1}$ ) are presented



**fig. 2.** The all sky images in the 630.0 nm emission during the Van Allen Probe (B) passage of the plasmapause on March 17, 2015. The projections at the Earth surface for the glow height of 450 km in geomagnetic coordinates are presented. The images show a glow with intensity less than 2000 Rayleigh (2 kR) for better display of the SAR arc

- At 1210 UT, the equatorial boundary SAR of the arc at longitude ~ 180°E has a latitude of ~ 53.5°N, which corresponds to the L~2.8 and meridian 1852 MLT.
- At 1245 UT, the geomagnetic latitude of polar boundary of the red arc at longitude ~  $174^{\circ}E$  is 60°N, which corresponds to the L~4 and meridian 1905 MLT (see Figure 1).

## ACKNOWLEDGMENTS

The density of thermal electrons and spin averaged ECT-HOPE science data with Van Allen Probe (B) spacecraft were obtained in CDAWeb (http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/istp\_public/).

## OBSERVATION OF THE SAR ARC AND PROTON AURORA DYNAMICS AS A CONSEQUENCE OF EASTWARD PROPAGATION OF THE PC1 WAVES EXCITATION REGION ALONG THE PLASMAPAUSE

#### I.B. levenko, S.G. Parnikov, D.G.Baishev

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy, Yakutsk, Russia; ievenko@ikfia.ysn.ru

## **KEYWORDS**

plasmasphere, plasmapause, substorm expansion, ring current, SAR arc, EMIC waves, energetic protons precipitation, proton aurora

#### INTRODUCTION

The stable auroral red (SAR) arcs are the consequence of interaction of the plasmapause with energetic ions of the ring current. The geomagnetic pulsations Pc1 are registered on the Earth as a consequence of generation of electromagnetic ion cyclotron (EMIC) waves in the equatorial plane of the magnetosphere. The EMIC instability causes the scattering of ring current protons into the loss cone. Precipitation of energetic protons and their charge exchange at the heights of the ionosphere E layer can be observed as a proton aurora in the H-beta line of atomic hydrogen. This work analyzes the dynamics of the SAR arc, proton aurora and Pc1 waves in the MLT evening sector at the Yakutsk meridian (130°E – geogr.; 200°E – geom., MLT midnight is 1550 UT) using the all-sky imager (ASI) and induction magnetometer during the growth and expansion of intense substorms on December 31, 2015.

## **OBSERVATION RESULTS**

After the enhanced magnetospheric convection due to the southward IMF Bz turning ASI, observes an equatorward motion of the diffuse aurora (DA) boundary in the 557.7 and 630.0 nm emissions and H-beta (486.1 nm) band from the northern horizon of observation station. The weak SAR arc is registered equatorward of the diffuse aurora (DA) since the beginning of observations. During the expansion phase with the onset at ~1212 UT and epicenter in the midnight MLT sector the SAR arc center is located at the geomagnetic latitude of 58°N at the zenith of the station. The band in the H-beta emission is registered at latitudes of 59–61°N. In 10 minutes after the start of substorm expansion ASI registers the SAR arc intensity growth from the western horizon toward the east with an angular velocity of ~4 deg/min. As a result, along the arc a few intensity maxima are formed. At the same time, the narrow arc in the H-beta emission with similar dynamics appears poleward of the SAR arc at a distance of ~0.6° (see fig. 1).

The induction magnetometer detects a sharp increase of Pc1 pulsation amplitude at frequencies of 0.5–0.7 Hz during the arrival of end of the arc in the H-beta emission to the zenith of observation station. The Pc1 pulsations and the dynamic proton arc are registered within ~30 minutes. The SAR arc is registered by ASI until about 1400 UT. We connect the observed phenomena in the SAR arc and proton aurora with the eastward propagation of the excitation region of EMIC waves along the plasmapause in the evening MLT sector (see fig. 2).



**fig. 1.** Longitudinal dynamics of the SAR arc and proton aurora during the substorm on December 31, 2015. All sky images in the 630 and 486.1 nm emissions in a projection onto the Earth's surface for the glow heights of 450 and 110 km respectively in geomagnetic coordinates are presented

- In 10 minutes after the onset of substorm expansion the SAR arc brightening from the western horizon to the east at an angular velocity of ~4°/min occurs.
- At the same time the dynamic aurora in 486.1 nm (H-beta) emission appears on the western horizon and propagates eastward northern than the SAR arc by ~0.6° latitude.
- As a result, three intensity maxima are formed along the SAR arc with a fixed longitudinal position for 4 minutes.
- At a latitude of 59–61°N at this time a stable aurora band in the H-beta emission is observed, which arose during the convection enhancement.
- After the disappearance of the proton arc, the SAR arc becomes uniform and moves equatorward.

124 GRINGAUZ 100: PLASMAS IN THE SOLAR SYSTEM, 2018



**fig. 2.** Dynamics of the Pc1 pulsation, SAR arc and proton aurora during the substorm on December 31, 2015. ASI data as keograms in the 630 and 486.1 nm emissions for the luminosity heights of 450 (**a**) and 110 (**b**) km. **Z** is a zenith of observation station. (**c**) Geomagnetic pulsation records in H and D components

- The induction magnetometer registers the sudden occurrence of geomagnetic pulsations Pc1 simultaneously with the appearance of the arc eastern edge in the H-beta emission at the meridian of observations.
- The SAR arc brightening at the station meridian occurs at the same time. Pulsations Pc1 and a dynamic arc in the H-beta emission are registered within ~30 minutes.

## ACKNOWLEDGMENTS

The research was partly supported by RFBR grants No 15-05-02372 a. The data on solar wind and IMF were provided by the ACE Science Center (http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/index.html).

# **GRINGAUZ AND KOKOSCHKA**

#### Wing-Huen Ip

Institute of Astronomy National Central University No. 300, Jhongdai Road Jhongli, Taiwan; wingip@astro.ncu.edu.tw

Tamara Breus showed me an article she wrote in memory of Prof. Konstans Gringauz. The article was entitled "An Unforgettable Personality" which reminded me of several anecdotes that had to do with my encounters with Konstans. I would like to record them here because they represented my trespass into a rare moment in space science in which everyone was the youngest and brightest.

The first time I met Konstans was in Lindau the week before the big international conference on the space explorations of Comet Halley in Heidelberg in October, 1986. There was a workshop for the experimental teams of different missions to get together at the Max-Planck-Institut fuer Aeronomie to compare their results. From Moscow came Alex Galeev, Konstans Gringauz, Misha Verigin, and many of their colleagues. When I saw Konstanz I gave him a copy of the Nature paper I wrote together with Max Wallis in which we made some comparison of the solar wind interactions with Venus and comets. I thought that would be a good way to introduce myself. A few hours later I came down the stairway and saw Konstans standing in front of the entrance with the paper in hand. I asked him whether he had had a chance to read it. Being Konstans Gringauz, he sternly replied that not only had he read it he had even found it useful. And then he started fanning himself with the Nature paper because it was a hot day. A good introduction that was!

But then Konstans was kind to me in several ways. In one of his first papers discussing his PLASMAG results on the Halley observations by the Vega spacecraft, he used the current disruption model which Asoka Mendis and I proposed several years earlier to explain the possible occurrence of anomalous ionization in the coma of comet Halley. Perhaps this was because such an effect was reminiscent of what he suggested for the production of the nightside ionosphere of Venus on the basis of his Venera observations, a feat very close to his heart.

There must have been more than 500 participants in the Heidelberg meeting. The auditorium was jam packed when the introductory talks by leading figures in the Vega, Giotto, Sakigake, and Suisei projects were given. I was sitting about two rows behind Girngauz when I saw Oleg Vaisberg, with a cup of coffee in hand, walking through the doorway, looking for a place to sit, and then wanting to walk past Konstans. Before Oleg was able to get through he managed to pour half a cup of coffee onto Konstans by accident! I watched all these like reading a page out of a play of Shakespeare.

A couple of years later, Konstans invited me to visit IKI. He was a very good host, showing me around Moscow, and taking me to visit several of the great museums. It was at the Puschkin Museum that Konstans discovered in surprise that I did not know who Oskar Kokoschka was. To this day I am still embarrassed by this and paintings by Kokoschka never fail to remind me of Gringauz.

Konstans also took me to the Moscow Circus on the Lenin Hill. (I remember he came back with two tickets in hand and proudly pronounced that he managed to winkle them only because he is Lenin medalist twice.) I had never seen anything like it before. A day or two later I still found myself telling people how amazing the magic shows were until someone (it could be Misha Verigin) mentioned gingerly that the State Ministry of Economic Planning was even better. This was because it succeeded in making the treasure of the whole nation disappear into thin air. It was 1990.

#### 126 GRINGAUZ 100: PLASMAS IN THE SOLAR SYSTEM, 2018

The last time I met Konstans was in Lindau. He came on the heel of the ill-fated Phobos mission to Mars. But he wanted to give a talk on comets instead. Before his visit to Lindau. Konstans made a tour through the United States. Along his trail, rumors were generated that Gringauz was very unhappy with me. This information came from San Diego, and then Ann Arbor, and then Cambridge. Mass. I was puzzled and curious about what I had done wrong to cause his wrath. Yes. I had some different opinion on the nature of the so-called cometopause discovered by Gringauz himself. But that shouldn't have been so critical. Besides, I had done little at that moment because I was very much occupied by the illness and ultimately the untimely death of my younger brother Simon. One of the few things I did was a review chapter on cometary plasma physics written in collaboration with Ian Axford, Finally, I had to confront Konstans in his Teeseminar on comet observations at the Institute. He was holding a preprint of that review and kept staring at me. (I think only his colleagues at IKI could imagine how.) Then he announced a score of 44 to 1 as if it were a soccer match (which it actually was). It turned out that in this review chapter all figures except one were all from the Giotto measurements. And the one on Vega observations had to do with the electric field measurements that were lacking in the Giotto mission. I forgot exactly when was the Gringauz seminar but it was definitely a hot day.

Now that I have more time to reflect on the whole affair and have hence reached a deeper appreciation of the admirable performance by our IKI colleagues and their international partners under very difficult circumstances. I would, of course, put much more emphasis on the scientific achievements of the Vega mission. However, I believe that the heart of the matter is simply that Konstans relished such combative approach for priority and honor – as he had never stopped from doing since the Sputnik days. In all, I feel that Konstans Gringauz was like a caricature by Oskar Kokoschka, emerging out of a thunderstorm and then disappeared into yet another, one that we all now must endure.

This note was composed on November 25, 1995.

# THE NEXT BIG THING: THE SECOND COMING OF COMET HALLEY IN THE SPACE AGE

#### Wing-Huen Ip

# Institute of Astronomy National Central University No. 300, Jhongdai Road Jhongli, Taiwan; wingip@astro.ncu.edu.tw

The Return of Comet Halley in 1986 was instrumental in the development of deep-space planetary exploration of many space-faring nations. This is especially true in the area of asteroidal and cometary missions. The progress made in aerospace technology over the last 30 years has made sample return missions to asteroids and also comets almost something routine in near future. In the next 30 years, we would probably begin to see fleets of spaceships landing or leaving asteroids and comets monthly for scientific investigations and resource utilizations. By 2050, survey stations managed by international consortia might have been established on some Kuiper belt objects orbiting outside Neptune's orbit. The time is thus ripe to explore the last frontier of the solar system, namely, the Oort cloud and its comets at 30,000 AU away from the Sun. The expressway to reach the distant Oort cloud comets for in-situ measurements, which would likely be the only missing link in our understanding of the origin of our planetary system is actually Comet Halley. This is because its retrograde orbit could mean that it is a bona fide Oort cloud comet. This also means that the next big thing would probably be a rendezvous and sample return mission to Comet Halley during its perihelion approach in 2061. The interplanetary journey of the Rosetta spacecraft took 10 years (2004–2014) before it reached comet 67P/Churuyumov-Gerasimenko The orbital configuration of Comet Halley is such that it would take much longer. Taking 20 years as a nominal time scale from launch to rendezvous under the assumption that some advanced propulsion systems would be made available, and another 10 years for development of the spacecraft systems and instrumentation before launch, it would mean a mission plan has to be put in place by 2030. Professor Konstans Gringauz would have been delighted by this challenging project for the second coming of Comet Halley which first space visit in 1986 was so much cherished by him.

# GEOEFFICIENCY OF SOLAR ACTIVE PHENOMENA AND INTERPLANETARY SPACE IN THE 24<sup>TH</sup> SOLAR CYCLE

#### V.N. Ishkov

IZMIRAN, Troitsk, Moscow, Russia; ishkov@izmiran.ru

## **KEYWORDS**:

Solar activity, flare events, coronal holes, coronal mass ejections, solar wind, space environment, space weather, geoefficiency

## INTRODUCTION:

Within already realized history of reliable solar cycles (SC) it becomes understandable that, beginning from maximum  $22^{nd}$  and on the end of  $23^{th}$  SC, the condition for the generation of solar magnetic field significantly changed and its gave beginning to a new period of lowered solar activity (SA) – the epoch of the SCs of low and average value [1]. Begun in 2009 the current  $24^{th}$  SC reached maximum only in April 2014 (W\*=82) and is developed as the SC of low height. The current SC – the first part of the physical 22-year SC and according to the Gnevyshev–Ol' rule, which undoubtedly works inside the epochs, the following  $25^{th}$  SC must be higher than the cycle of middle value. One of the most interesting special features of  $24^{th}$  SC is uncommonly large quantity (~1/3) of complexes of active regions, intermediate structure between active region (AR) and complexes of activity. It follows that the  $24^{th}$  SC develops according to the scenario of typical SCs in the epoch of lowered SA. On this scenario the most powerful flare events usually occur on the phase of the decrease and sometimes on the phase of increase of SA.

# MAIN CHARACTERISTICS AND EVOLUTION OF THE CURRENT 24 SOLAR CYCLE

Evolution of the current 24 SC shows that during the present period after 9.5 years of development, since April, 2016 the current  $24^{th}$  SC has formally entered a minimum phase. Thus the phase of a maximum has formally taken the period from August, 2013 to November, 2014 and became the shortest (16 months) maximum phase for a reliable SCs. The length of ascending branch became record too – 5.32 years The current SC (9.5 years) develops as a cycle of low size with peculiarities:

- the ascending branch became record on duration (54 months);
- the first big (Sp≥500 msh) sunspot group February, 2011, and the first very big (Sp≥1500 msh) November, 2011 ~ and only huge (Sp≥2500 msh) October, 2014.

The processes of reorganization of the general magnetic field to the level of an era of the lowered SA which have begun in the middle of 22 and taken all 23 SCs have led to significant reduction of the general magnetic field of the Sun that has entailed:

- considerable reduce (~700 Gs from the level of 1998) values of magnetic field in sunspots umbra which was stabilized at the level ~2050 Gs [http://www.leif.org/research/Livingston%20and%20Penn.png];
- change of the mode of changes of polar magnetic fields: the size of polar magnetic field was about 7–8 Gs in phases of minima previous 3 SC and only 4–5 Gs in the last minimum of 2008-2009 [2].
- the mean magnetic field densities of coronal holes ranged from 0.2 to 8.7 G with a mean value of 3.0±1.6 G derived in SC24 are significantly smaller

than the values derived by [3] (1982, 3–36 G) and [4] (2009, about 20 G) for solar maxima, and match better with the values they derived for solar minima (1-7 G, respectively about 5 G) [5].

Compared to values typically observed from the mid-1970s through the mid-1990s, the following proton parameters are lower on average from 2009 through 2014: solar wind speed and beta (~11%), temperature (~40%), thermal pressure (~55%), mass flux (~34%), momentum flux or dynamic pressure (~41%), energy flux (~48%), IMF magnitude (~31%), and radial component of the IMF (~38%) [6].

### SOLAR ACTIVE EVENTS GEOEFFICIENCY

The full chain of disturbances from the separate large flare event it is possible to present in the form of three separate stages actions (http://sec.noaa.gov/NOAAscales), which consistently are implemented in environment. First, at the moment of geoeffective solar flare development, environment irradiates by the fluxes of electromagnetic radiation ( $\mathbf{R}$  – electromagnetic impact). Then, through the temporary space from several minutes to 10 hours in environment come the fluxes of the solar charged particles ( $\mathbf{S}$  – corpuscular impact – solar proton event) and finally in 17–96 hours in environment come the streams of plasma, increased speed, density and temperature ( $\mathbf{G}$  – plasma impact), causing disturbances in the terrestrial magnetic field – the magnetic storms. Let us note that the solar filament ejections and coronal holes cause in environment only magnetic disturbances.

The significant reduction of the general magnetic field of the Sun has defined quantity and geoefficiency of the solar active phenomena.

Rate of development and level of flare activity in the current SC is significantly lower than previous 5 SC: there were only 58 flare events of the x-ray class  $X \ge 1.0$  (4 -  $\ge$ 5), very large (X $\ge$ 10) and extreme (X $\ge$ 15) solar flares were not observed absolutely.

It is important to note that time between the first signs of emergence of a new magnetic flux and the beginning of the period of flare energy release has decreased (10–20 h), though the period of changes hasn't undergone ~55 h [7]. This has led to emergence of the AR in which large flare events occur directly in day of the beginning of a new magnetic flux emergence (for example AR11121, AR11158, AR11598). This fact complicates a possibility of the operational forecast of periods of large solar flare events realization. In last cycles of a space age this time interval made not less than 24 hours.

The number of solar proton events (Epr>1010 MeV), 96 against 149 in 23, 127 in 22, 146 in 21 and 144 in 20 SCs especially strong and very strong and also increases on neutron monitors has significantly fallen (GLE-events). During evolution of the current SC in the Earth's environment it was registered 96 SPE (Epr>10 MeV Jpr≥1 pfu) from which 39 with a fluxes of protons <100 pfu,  $8 - \ge 100 - \le 1000$  pfu and  $5 - \ge 1000$  pfu, among which was 2 GLE-events (5/17/2012 and 06.09.20117), [http://gle.oulu.fi/#/] and >7 flares with solar neutrons. A full flux of protons E>10 MeV during the first 2100 days of SC 23 in 4.4 above, than for the same period of SC 24 [8].

Considerable decrease in number of flare events has led to reduction of number of usually stronger sporadic geomagnetic disturbances that can be explained with strongly fallen geoefficiency of coronal mass ejection which number has decreased slightly, but angular width, in comparison with 23 SC, has considerably increased for events of identical speed of distribution [9]. In 2009–2018 273 magnetic storms from which 178 small, 75 moderate, 15 strong and 6 very strong were registered. Significant decrease of recurrent minor of the magnetic storms quantity connected with CH probably can be explained: first noticeable reduction of value of magnetic field in CH that has affected characteristics of solar wind high-speed streams connected with them,

#### 130 GRINGAUZ 100: PLASMAS IN THE SOLAR SYSTEM, 2018

secondly change practically of all parameters of solar wind and interplanetary magnetic field and, as a result, characteristics of a magnetosphere. Respectively, the number of the periods of quiet geomagnetic conditions has strongly grown. Ap index has reached a minimum in October, 2009, 10 months later after a minimum in Wolf's numbers. The maximum of average monthly values of Ap index has reached in September, 2017 (18.1), with the previous peaks in March, 2015 (16,3), March 2012 (16,1) and in September, 2015 (15,8). In June, 2015, the smoothed value has exceeded 10 for the first time in the current SC [http://legacy-www.swpc.noaa.gov/ftpdir/weekly/Ap.gif].

## CONCLUSIONS

From the above it follows that the current SC develops according to the scenario typical for reliable SCs. Some features of development of the last three SCs and a picture of development typical for this cycle AR confirm the happened change of the mode of generation of magnetic fields in a convective zone of the Sun. It has led to the fact that the Sun has entered the period of low and middle solar cycles which has to last 5 SCs (~50 years) – an epoch of the lowered SA. Reduction of quantity of strong sporadic geomagnetic indignations, strong SPE will be a consequence of observed deficiency of flare-active AR, and very much strong and extreme flare events are improbable. Weakening of the mode of solar magnetic fields in an interplanetary space has led to reduction of galactic cosmic ray modulation zone and significant increase of background intensity in interplanetary space and space environment (an external radiation belt) and, respectively, to growth of a radiation background for SCs in epoch of lowered CA, and not just during a minimum phases. Increased background of galactic cosmic rays calls into question the possibility of long-distance space flights in the interplanetary space and the creation of long-term accommodation modules on the lunar surface before 2070.

- [1] Ishkov V.N. Periods of "lowered" and "increased" solar activity: observant special features and key facts // Proceed. of conf. "Solar and sun-earth physics - 2013", ed by. Yu. Nagovitsin, publ. VVM, Saint Petersburg, P. 111-114 2013, (Rus) http://www.gao.spb.ru/russian/publ-s/conf\_2013/conf\_2013.pdf).
- [2] Wang Y.-M., Robbrecht E., Sheeley N.R. Jr. On the Weakening of the Polar Magnetic Fields during Solar Cycle 23, The Astroph. J.V. 707. 2. P. 1372-1386 (2009). doi:10.1088/0004-637X/707/2/1372.
- [3] Harvey K.L., Sheeley N.R. Jr., Harvey J.W. Magnetic measurements of coronal holes during 1975–1980, Solar Physics, 79, P. 149-160, 1982.
- [4] Wang Y. Coronal Holes and Open Magnetic Flux, Space Science Reviews. 144. 1-4. 383-399. 2009.
- [5] Hofmeister S.J., Veronig A., Reiss M.A., Temmer M., Vennerstrom S., Vrsnak B., and Heber B. Characteristics of Low-latitude Coronal Holes near the Maximum of Solar Cycle 24, The Astroph. J., 835:268, (17pp), 2017.
- [6] McComas D.J., Angold N., Elliott H.A., Livadiotis G., Schwadron N.A., Skoug R.M., Smith C.W. Weakest Solar Wind of the Space Age and the Current "Mini" Solar Maximum, The Astroph. J.V. 779. № 2. PP. 10 (2013).
- [7] Ishkov V.N. The emerging magnetic fluxes are the key to predicting large solar flares, // Bull. of the RAS. Physics T. 62, N 9. C. 1835-1839, 1998.
- [8] Mewaldt R., Cohen C., Mason C., Von Rosenvinge T., Vourlidas A. A 360° Survey of Solar Energetic Particle Events and One Extreme Event // 34th ICRC 2015. https:// pos.sissa.it/236/139/pdf.
- [9] Selvakumaran R., Veenadhari B., Akiyama S., Pandya M., Gopalswamy N., Yashiro S., Kumar Mäkelä P., Xie H. On the reduced geoeffectiveness of solar cycle 24: a moderate storm perspective // JGR. Space physics, V. 121. 9, 2017, P. 8188-8202, doi: 10.1002/2016JA022885.

# DYNAMICS OF INHOMOGENEOUS PLASMA AND ELECTROSTATIC TURBULENT FIELDS IN ARAKS EXPERIMENTS

#### N.I. Izhovkina

IZMIRAN, Moscow, Russia, Troitsk; izhovn@izmiran.ru

In nuclear explosion plasma and in plasma clouds and streams in cosmic experiments, non monotonous plasma turbulent structures are observed. The formation of such structures is revealed in experiment ARAKS data. Injection of electron pulses from the rockets into ionosphere was effectuated with parameters of pulses 27 keV and 15 keV for different series of pulses and current ~0.5 A. On board of the rockets, retarding potential analyzers were used to measure electron fluxes with energies of electrons <3 keV. Wave emission was registered by devices on the separated nose cone of the rocket at the distance  $\sim$ 1–2 km from the rocket. During electron gun pulses, wave emission was observed in the ranges from VLF to HF. Injection of pulses was made at the altitudes of 100-200 km. It is shown that the appearance of non monotonous fluxes at energies >200 eV can be explained by excitation of non monotonous electrostatic turbulent structures and polarization drift of charged particles. The energy loss of particles by collisions is increasing with atmospheric density, so these fluxes disappeared gradually at the altitudes <130 km. Wave emission was observed for all series of electron pulses. It is the main marker of plasma instability.

# MAGNETOHYDRODYNAMIC TYPES OF THE SOLAR WIND AND THEIR SOURCES

#### K.B. Kaportseva<sup>1</sup>, A.T. Lukashenko<sup>2</sup>, I.S. Veselovsky<sup>1</sup>

- <sup>1</sup> Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; kb.kaportceva@physics.msu.ru
- <sup>2</sup> Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; a\_lu@mail.ru
- <sup>3</sup> Space Research Institute of RAS, Moscow, Russia; veselov@dec1.sinp.msu.ru

## **KEYWORDS**

solar wind, classification, heliosphere, solar wind sources, heliospheric plasma, solar wind parameters, solar activity

## INTRODUCTION

We use the magnetohydrodynamic (MHD) classification to make an analysis of frequency of occurrence of solar wind types. This classification is based on four parameters: proton density *n*, speed *V*, temperature *T* and dimensionless plasma parameter  $\beta$  for protons. The statistical analysis of the main MHD parameters is done in [1]. In the space of these parameters the boundaries for fast (f) and slow (s), hot (h) and cold (c), dense (d) and rarefied (r), magnetized (m) and nonmagnetized (n) wind are set. In total, we obtain 2<sup>4</sup>=16 solar wind types: fhdm, fhdn, fhrm, etc. We also add a zero type, which corresponds to the solar wind streams, where value of at least one parameter is close to the statistical average. For our work we use the 1-minute OMNIWeb data [2] for the period from 1996 to 2017 (23<sup>rd</sup> and 24<sup>th</sup> solar cycles). The example of the alternation of wind types (magnetized subset) for 2016–2017 is shown in fig. 1.



**fig. 1.** Magnetized types of solar wind in Carrington rotations 2173–2198: fhdm – red, fhrm – yellow, fcdm – blue, fcrm – cyan, shdm – purple, shrm – pink, scdm – dark-green, scrm – light-green

All these types occur due to different solar activity phenomena and appear with various frequencies at different phases of the solar cycle. The frequency of occurrence of magnetized types for the same period you can see in the table 1.

In our classification magnetized types are much more abundant then nonmagnetized, but the most common type is zero type. Hence, there is only a limited sense to search localized coronal sources of the solar wind with average properties. It is due to nonlocality of the phenomenon. We assume that the whole corona is responsible for the intermittent production of the solar wind with average properties. table 1. The frequency of occurrence of magnetized types (separately and in total), nonmagnetized types and the zero type in Carrington rotations 2173–2198

type	%
fhdm	2.6
fhrm	16.6
fcdm	0.4
fcrm	3.9
shdm	0.9
shrm	0.2
scdm	19.0
scrm	7.4
magnetized (total)	51.1
nonmagnetized	10.2
zero	38.7

We also tried to find a correspondence of common and rare types with their sources such as coronal holes, CME, etc. Comparison with previous classifications ([3–5] for example) are made and discussed.

- Veselovsky I.S., Dmitriev A.V., Suvorova A.V. Algebra and statistics of the solar wind // Cosmic Research. 2010. V. 48. No. 2. P. 113-128.
- [2] https://omniweb.gsfc.nasa.gov.
- [3] Richardson I.G., Cane H.V., Cliver E.W. Sources of geomagnetic activity during nearly three solar cycles (1972–2000) // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. No. A8.
- [4] Yermolaev Yu.I., Nikolaeva N.S., Lodkina I.G., Yermolaev M.Yu. Catalog of largescale solar wind phenomena during 1976–2000 // Cosmic Research. 2009. V. 47. No. 2. P. 81-94.
- [5] Xu F., Borovsky J.E. A new four-plasma categorization scheme for the solar wind // J. Geophys. Res. Space Physics. 2015. V. 120. No. 1. P. 70-100.

# VARIATIONS OF SOLAR WIND SPEED, JOVIAN MEV-ENERGY ELECTRONS AND GALACTIC PROTONS

#### K. Kecskemety<sup>1</sup>, E.I. Daibog<sup>2</sup>, Yu.I. Logachev<sup>2</sup>

- <sup>1</sup> Wigner Research Centre for Physics, Budapest, Hungary Affiliation; kecskemety.karoly@wigner.mta.hu
- <sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, D.V. Skobeltsyn Nuclear Physics Research Institute, Moscow, Russia

## **KEYWORDS**

solar wind structures, Jovian electrons, galactic protons, 27-day variation, magnetic connection, SOHO

## ABSTRACT

During the minimum of solar activity in 2007–2008 an extremely long stable state of solar wind (SW) speed structures existed, which lasted for more than a year, 14 revolutions of the Sun. According to the data of a high-latitude neutron monitor (NM, Apatity) and the >50 MeV integral channel of the COSTEP EPHIN detector aboard SOHO, the period of 27-day variations of galactic proton fluxes are determined, and compared with the periods of long-lived SW structures. Throughout this time period the >50 MeV proton flux variations in autocorrelation with the variations of SW velocity.

At the same time, the variations in the NM count rates were synchronous with the variations of high-energy protons with a period of 27.1 days. At this time interval, periodic fluxes of high-energy (>1 MeV) Jovian electrons were also observed. Deviations of variations in the flux of Jovian electrons from the expected synodic Sun-Earth period, equal to 27.3 days were detected. The mean value of the electron variation periods was 26.1 days, for protons it was 27.1 days. Prior to the optimum magnetic connection of the Earth and Jupiter (taking the solar wind velocity of 450 km /s observed on February 15, 2008), the fluxes of electrons and protons were in correlation first, then the profiles began to "diverge" and, after the optimal Earth–Jupiter connection, anticorrelation was observed that persisted for 7 rotations of the Sun until the end of the presence of Jovian electrons.

An explanation of this effect was found taking into account the time evolution of the structure of the SW speeds and the magnetic traps associated with it, as well as the influence of the mutual arrangement in the space of the Earth and Jupiter.

# SUPRATHERMAL TAIL OF THE SOLAR WIND AT 1 AU

#### K. Kecskemety<sup>1</sup>, M.A. Zeldovich<sup>2</sup>, Yu.I. Logachev<sup>2</sup>

- <sup>1</sup> Wigner Research Centre for Physics, Budapest, Hungary Affiliation; kecskemety.karoly@wigner.mta.hu
- <sup>2</sup> Lomonosov Moscow State University, D.V. Skobeltsyn Nuclear Physics Research Institute, Moscow, Russia

## **KEYWORDS**

suprathermal ions, solar activity minimum, elemental abundances, solar wind, near-equatorial coronal holes

## ABSTRACT

During quiet periods near two solar cycle minima the abundances of thermal and suprathermal ions <sup>4</sup>He/O, C/O, and Fe/O are analyzed and compared in solar wind streams from coronal holes. The fluxes of ions with energies of ~0.04–2 MeV/nucleon were studied using data from the ULEIS instrument aboard the ACE spacecraft together with thermal ions in the fast and slow (Maxwellian) solar wind using data SWICS/ACE.

Results were obtained during quiescent periods in 2006–2012 and 2015–17 during which solar wind flows from near-equatorial coronal holes (CHs) were detected at 1 AU. During and around the SC 23 minimum the C/O and Fe/O ratios for suprathermal ions were nearly equal to the relative abundances of the corresponding solar wind ratio while the suprathermal <sup>4</sup>He/O ratio sometimes exceeded the corresponding by a factor of two [1]. The intensities of the suprathermal <sup>3</sup>He, <sup>4</sup>He, C, O, and Fe ions in outflows from CHs increased with the speed of the solar wind. During decreasing solar activity of SC 24 suprathermal Fe/O ratios corresponded to the Fe/O value of thermal ions in fast solar wind from CHs.

The results of our study suggest that the sources of suprathermal ions from CHs in periods of low solar activity are accelerated solar wind ions forming a continuously present high-temperature "tail" of the solar wind. The thermal and suprathermal Fe/O ratios were found to be higher in 2015–17 in comparison to the ratios in 2006–10. This effect possibly can be explained by that the second quiet period was disposed at time when solar activity has not reached its minimum of 24 SC yet.

## REFERENCES

 Zeldovich M.A., Logachev Yu.I., Kecskemety K. Quiet-time 0.04-2 MeV/nucleon lons at 1 AU in Solar Cycles 23 and 24, Solar Phys. 2018. 293:3.

## POLAR RECONNECTION JETS AND CONIC-LIKE CURRENT SHEETS AS SOURCES OF ENERGETIC PARTICLES AT HIGH HELIOLATITUDES

O. Khabarova<sup>1</sup>, H. Cremades<sup>2</sup>, O. Malandraki<sup>3</sup>, L.A. Merenda<sup>4</sup>, V. Obridko<sup>1</sup>, R. Kislov<sup>5,1</sup>, V. Kuznetsov<sup>1</sup>, H. Malova<sup>5,6</sup>, A. Kharshiladze<sup>1</sup>, A. Bemporad<sup>7</sup>

- <sup>1</sup> Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences (IZMIRAN), Moscow, Russia; habarova@izmiran.ru
- <sup>2</sup> UTN FRM and CONICET, Mendoza, Argentina
- <sup>3</sup> National Observatory of Athens, Athens, Greece
- <sup>4</sup> Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza, Mendosa, Argentina
- <sup>5</sup> Space Research Institute of RAS, Moscow, Russia
- <sup>6</sup> Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, MSU, Moscow, Russia
- <sup>7</sup> INAF Torino Astronomical Observatory, Pino Torinese (TO), Italy

## **KEYWORDS**

polar jet; coronal hole; current sheet; solar corona; solar wind

## ABSTRACT

A recent finding of conic current sheets (CCSs) in the polar heliosphere gives a new opportunity to solve a mystery of Ulysses observations of energetic particles at high heliolatitudes [1]. Polar CCSs are long-lived elongated magnetic tornado-like structures observed during the minimum of the solar activity cycle. CCSs are formed inside polar coronal holes and characterized by the decreased plasma speed and beta. They can be observed directly in the solar wind up to several AU and indirectly via reconstructions of the magnetic field and the solar wind speed in the corona. The structure and key characteristics of polar CCSs can be modeled within the MHD approach [2]. We have found that the circle-like rotating root of a CCS serves as footpoints for reconnection-driven polar jets inside polar coronal holes. This phenomenon naturally explains the occurrence of energetic particles of keV-MeV energies observed by Ulysses at edges of CCSs in the solar wind.

This work is partly supported by the International Space Science Institute (ISSI) in the framework of International Team 405 entitled "Current Sheets, Turbulence, Structures and Particle Acceleration in the Heliosphere." and RFBR grants 16-02-00479, 17-02-00300 and 17-02-01328.

- [1] Khabarova O.V., Malova H.V., Kislov R.A., et al. High-latitude conic current sheets in the solar wind // Astrophysical Journal. 2017. V. 836, issue 1. id 108. https://doi. org/10.3847/1538-4357/836/1/108.
- [2] Kislov R.A., Kuznetsov V.D., Khabarova O.V., Malova H.V., Obridko V.N. MHD modeling of the high-latitude conic-like current sheets in the solar wind // This meeting.

## MHD MODELLING OF THE HIGH-LATITUDE CONIC-LIKE CURRENT SHEETS IN THE SOLAR WIND

# R.A. Kislov<sup>1,2</sup>, V.D. Kuznetsov<sup>2</sup>, O.V. Khabarova<sup>2</sup>, H.V. Malova<sup>1,3</sup>, V.N. Obridko<sup>2</sup>

- <sup>1</sup> Space Research Institute of RUS, Moscow, Russia
- <sup>2</sup> Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radiowave Propagation RAS (IZMIRAN), Troitsk, Moscow, Russia
- <sup>3</sup> M.V.Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics (SINP MSU), Moscow, Russia

## **KEYWORDS**

current sheet, solar wind, MHD model, Ulysses, conic-like current sheets, polar heliosphere

An analytical MHD model of the quasi-stationary conic-like current sheet (CCS) often called "magnetic tube" is developed. According to Ulysses observations at high heliolatitudes, a polar CCS is a high- plasma beta and low speed structure, governed by the magnetic field [1]. Different types of plasma equilibrium for various distances from the Sun are considered. The model applied to the velocity-free case describes a CCS near the Sun and contains quasi-periodic solutions. A solar wind speed dominating case describes a CCS at large distances. The developed stationary one-fluid MHD model describes the main features of the observed structure, namely, a sharp increase in the interplanetary magnetic field and the plasma density and a decrease in the solar wind speed and plasma beta in comparison with the surrounding solar wind. It is suggested that a CCS originates from a local peak of the plasma density at the solar pole that occurs under the condition of overlaping dipole and quadrupole solar magnetic fields.

## REFERENCES

[1] Khabarova O.V., Malova H.V., Kislov R.A., Zelenyi L.M., Obridko V.N., Kharshiladze A.F., Tokumaru M., Sokół J.M., Grzedzielski S., Fujiki K. High-latitude Conic Current Sheets in the Solar Wind // The Astrophysical Journal. 2017. V.836:108 (14 pp).

# IS THE HELIOSPHERIC CURRENT SHEET THE ONLY ONE EQUILIBRIUM CURRENT SHEET OF THE HELIOSPHERE?

#### R.A. Kislov<sup>1,2</sup>, H.V. Malova<sup>1,3</sup>, O.V. Khabarova<sup>2</sup>

- <sup>1</sup> Space Research Institute of RAS, Moscow, Russia
- <sup>2</sup> Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radiowave Propagation RAS (IZMIRAN), Troitsk, Moscow, Russia
- <sup>3</sup> M.V. Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics (SINP MSU), Moscow, Russia

## **KEYWORDS**

current sheet, MHD model, quadrupole magnetic field, dipole magnetic field, neutral line, north-south asymmetry, Heliosphere

The heliospheric current sheet (HCS) separates the regions of opposite polarity of the interplanetary magnetic field (IMF). Shape of the HCS correlates with structure of the neutral line of the solar magnetic field. During the period of quiet Sun its magnetic field is approximately dipole-like with the small angle between the rotational axis of the Sun and the symmetry axis of magnetic dipole. In this case the neutral line of the solar magnetic field lies on the magnetic equator. Correspondingly, the HCS is extended near the same plane. However the solar magnetic field has not got dipole component only. Always it has a small quadrupole component of the solar magnetic field that can dominate the dipole component during the period of a high solar activity. As a result two neutral lines of the solar magnetic field can be formed. These neutral lines are being expanded to the whole heliosphere as the neutral surfaces of the IMF. Two large-scale long-lived current sheets correspond to them.

We have developed the stationary 2D self-consistent MHD model which allows to investigate large-scale structure of current sheets and their positions. Mixed dipole and quadrupole solar magnetic field is considered. In the case of dipole-dominant magnetic field the only small displacement of HCS from equatorial plane can take place. In the case of small difference between values of magnetic field's dipole and quadrupole harmonics an additional current sheet can appear on one of the solar poles. It appears on the pole which is opposite to the direction of the HCS displacement and moves to direction of the HCS. This second current sheet and the HCS have opposite directions of currents. In the limit case of the dominating quadrupole magnetic field two current sheets have a symmetry relatively to the equatorial plane. If the dipole component of the magnetic field changes its sign and its absolute value is being increased then the HCS is being moved toward the pole. Finally, in the case of the strong dipole magnetic field, HCS is being disappeared in the pole region and the second current sheet takes its place on the equatorial plane. This second current sheet is being become the HCS. These described cases correspond to subsequent quasi-stationary stages of the solar cycle. Today there is no direct evidence of really-existing two or more global current sheets in the heliosphere exist but it should be a subject of further investigations.

# DEVELOPMENT OF METHODS FOR MEASURING ELECTRIC FIELDS IN SPACE PLASMA

#### S.I. Klimov

Space research institute of RAS, Moscow, Russia

Some studies, particularly measurements of the electric fields in near-earth space have been a topical area of space research. Electric field (EF) is caused by the large – and small-scale motion of cosmic plasma, accelerate or retard the charged particles, generate plasma instability, etc.

In early 1968 I started to prepare the space experiment "OM" ("Development of methods of measurement of electric fields"). Two methods were chosen for testing: a double Langmuir probe with floating potential and barium clouds. To implement the experiment, it was necessary to develop almost from scratch:

- probes with stable and identical parameters for a pair of probes;
- measuring transducers that optimally correspond to the parameters of probes;
- rods for placing probes.

For carrying out the experiment a spacecraft with the symbol "KS" (Kuibyshev Satellite) which is passing payload to serial satellites of TsSKB "Progress" (then Kuibyshev, now Samara) was used.

EF measurements conducted 6–7 April 1972 on "Cosmos-484" are unique almost until now, because: 1) the full vector (three orthogonal components) of the quasi-stationary electric field was measured; 2) measurements of the EF were carried out on a very low circular orbit with the height of 220±10 km, i.e. in the main F-layer of the ionosphere, both in the polar and equatorial regions; 3) measurements were carried out synchronously with the measurement of spillover electrons with energies >30 and >300 Kev. It should be noted that scientific information in the USSR at that time was processed almost manually, and that fact, of course, greatly delayed the publication of the results, especially in foreign journals.

Satellite "Interkosmos-10" (IK-10) was launched on October 30, 1973 in an orbit with initial parameters: apogee – 1477 km, perigee – 260 km, inclination – 74°. In addition to the bovine telemetry system, the TC-1 broadband telemetry system manufactured in Czechoslovakia was installed on the IK-10. The COSPAR report "Space research carried out in the USSR in 1980" noted, at K.I. Gringauz's insistence, the following "According to the data of the satellite "Intercosmos-10", the distribution of electrostatic jumps (EJ), or double layers, in the auroral ionosphere was investigated. EJ regularly registered at altitudes from 200 km-lower border-to the apogee of the satellite (1400 km). In the frequency band 0.03...70 Hz for the first time EJ structure of one measuring component of the electric field was fully resolved".

Scientific and methodological experience gained in the course of experiments on "Cosmos-484" and "Intercosmos-10", scientific results based on the experimental data, provided the basis for the implementation of a number of subsequent projects. An integrated approach to measurements and the formation of information on their board, led to the implementation of a virtually new method of research — combined wave diagnostics (CWD). CWD makes it possible to investigate the power of electromagnetic, electrostatic and magnetic fields, as well as the spectra of fluctuations of plasma particles in a wide range of frequencies, including constant fields. Testing and development of the HPC method was performed on SC: "Prognoz-8, -10", "VEGA-1, -2", "Phobos-1, -2", "Interball-1" and on the Russian segment of the ISS (experiment "Obstanovka – 1<sup>st</sup> stage").

## PRE-STORM ULF VARIATIONS IN THE SOLAR WIND DENSITY AND INTERPLANETARY MAGNETIC FIELD AS KEY PARAMETERS TO BUILD A MID-TERM PROGNOSIS OF GEOMAGNETIC STORMS

#### T.G. Kogai<sup>1</sup>, O.V. Khabarova<sup>2</sup>, O.V. Mingalev<sup>1</sup>

- <sup>1</sup> Polar Geophysical Institute 26a, Academgorodok street, Apatity 184200, Russia; tan1418@yandex.ru
- <sup>2</sup> Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, the Ionosphere and Radio Wave Propagation (IZMIRAN), Troitsk, Moscow, Russia; habarova@izmiran.ru

## **KEYWORDS**

geomagnetic storms, mid-term forecast, WIND, ACE, solar wind density, interplanetary magnetic field, ULF variations

## INTRODUCTION

The constant improvement of geomagnetic storm prediction techniques represents the key task of the solar-terrestrial physics. The biggest problem of space weather predictions is that most prognoses can produce an alert just 40 minutes in advance of a geomagnetic storm commencement; therefore there is no time to implement space weather counter-measures.

So-called short-term prognoses of geomagnetic storms use the lag between the time of obtaining the information about an approaching geoeffective stream from a spacecraft located at the 1<sup>st</sup> Lagrangian point (L1) and the actual time when the stream hits the terrestrial magnetosphere. It is assumed that the response of the magnetosphere to changes in solar wind conditions is almost instantaneous, and short- and mid-term prognoses of geomagnetic storms are built on using the solar wind speed *V* and the interplanetary magnetic field (IMF) *B* strength/direction measured at L1 as model parameters.

However, this does not account for the prehistory and assumes additionally that both severe and weaker geomagnetic storms of any kind are produced by a combination of the same key solar wind parameters. As a result, all prognostic techniques focus on ICMEs [1]. Meantime, it is known that weak and moderate geomagnetic storms are not associated with solar wind conditions typical of severe geomagnetic storms, and most prognoses therefore fail to predict them [1,2].

The accuracy of mid-term prognoses that could give longer alert times (from several hours to 3 days) and greater flexibility in making a decision is still low. Improvement requires the resolution of at least two important unresolved problems: how to predict energetic particle flux increases determined by different sources, and how to predict geomagnetic storms from several hours to three days in advance. We discuss here a possible solution of the latter problem, following the technique suggested in [1,2].

## METHODS

We performed case studies and statistical analysis of the WIND spacecraft high resolution data for the period of 1-3 days before geomagnetic storm commencements, revisiting the method suggested and results obtained in [1–4]. Key solar wind parameters such as the solar wind density *n*, *V* and the vertical IMF component *Bz* were employed in order to estimate their geoeffectiveness. The difference between the approach discussed in [1–3] and those used for the short-term space weather prediction is that we consider the magnetosphere being a memory-possessing system, assuming that the 1–3 day pre-history

impacts the probability of the magnetospheric response that leads to a geomagnetic storm commencement. In particular, we re-examined the idea that n and B variations of a ULF-frequency range can be used for prognostic aims. We used Wavelet transform coefficients to find the best combination of various input parameters to create an alert.

## RESULTS

1. We confirm that characteristic Ultra Low Frequency (ULF) variations in the solar wind density with a period of 1-100 minutes represent the most appropriate input parameter for the mid-term forecast of geomagnetic storms in agreement with [1-4]. If the rates of a smooth density growth as well as the power of density variations exceed certain thresholds, a geomagnetic storm is highly probable to occur in the following few days (see fig. 1).



**fig. 1.** Example of building a several-hour-in-advance alert. From top to bottom: the solar wind density and its first derivative, the Wavelet Morlet transform power, and the SYM-H parameter that characterizes the geomagnetic field variations. The thresholds are shown by blue horizontal lines and the alert is shown by a vertical line

- 2. Solar wind speed variations are less important for the mid-term prognosis.
- Geomagnetic storms may occur without any changes in the solar wind speed, but all significant density changes provoke at least low-intensity geomagnetic storms.
- 4. The main source of the ULF-variations in the solar wind density and the IMF are small-scale magnetic islands (SMIs) that occur in large-scale magnetic cavities formed by strong current sheets of various origins as discussed in [5-7].

## **DISCUSSION AND CONCLUSIONS**

The pre-history of geomagnetic storms is generally ignored in most space weather prognoses. We fill this gap with the analysis of the solar wind/IMF parameters that usually are not treated as geoeffective. The role of density
#### 142 GRINGAUZ 100: PLASMAS IN THE SOLAR SYSTEM, 2018

variations is found to be very important. We show that density/IMF variations in the ULF range are related to the pre-storm occurrence of SMIs in front of a geoeffective stream. SMIs may represent potentially geo-bioeffective structures, being an underestimated source of (ULF) magnetospheric waves that occur at the magnetopause due to the solar wind-magnetosphere interaction. SMIs can be geoeffective because (i) they produce particles accelerated to several MeV energies locally in the solar wind, (ii) ULF pulses create or significantly modulate fluxes of so-called "killer" electrons in the Van Allen belts with energies up to a few MeV (iii) ULF pulses of the solar wind destabilize the magnetosphere as the turbulent IMF drives auroral activity more strongly than the laminar solar wind (iv) ULF pulses generate lower-latitude geomagnetic field variations in the ULF range and long-lived plasma vortices in the nightside plasma sheet, associated with various secondary effects, and (v) SMIs represent a source of ULF solar wind pressure variations known for their geoeffectiveness.

The occurrence of SMIs in magnetic cavities formed by the heliospheric current sheets from one side and an ICME or a CIR from the other was discussed in [5-7]. For an observer at the Earth's position, characteristic plasma/IMF variations associated with SMIs occur before the onset of a geomagnetic storm produced by a geoeffective ICME or CIR. Therefore, this phenomenon can be used for prognostic purposes.

Using the obtained results, the Polar Geophysical Institute – IZMIRAN team is going to build an online mid-term prognosis of geomagnetic storms, employing L1 spacecraft data.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

The work was supported by RFBR grants 16-02-00479, 17-02-00300, and 17-02-01328. OVKh is partly supported by the International Space Science Institute (ISSI) in the framework of International Team 405 entitled "Current Sheets, Turbulence, Structures and Particle Acceleration in the Heliosphere."

- [1] Khabarova O.V. Current Problems of Magnetic Storm Prediction and Possible Ways of Their Solving // Sun and Geosphere. 2007. V.2, No. 1, P. 33-38 http://sg.shao.az/ v2n1/SG\_v2\_No1\_2007-pp-33-38.pdf.
- [2] Khabarova O.V. Investigation of variations in the solar wind parameters before the onset of geomagnetic storms. PhD thesis. 2003. 150 p., DOI: 10.13140/ RG.2.2.20747.18728.
- [3] Khabarova O.V., Rudenchik E.A. Peculiarities of solar wind and IMF oscillatory regime's changes before geomagnetic storms - Wavelet analysis results // Herald of the Department of Earth Sciences by Russian Academy of Sciences. 2003. No 1(21) http://files.olgakhabarova.webnode.com/200000019-44bb445b55/density\_ before\_storms.pdf.
- [4] Khabarova O.V., Yermolaev Yu.I. Solar wind parameters' behavior before and after magnetic storms // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2008.
   V. 70, No. 2-4, P. 384-390, DOI 10.1016/j.jastp.2007.08.024.
- [5] Khabarova O., Zank G.P., Li G., le Roux J.A., Webb G.M., Dosch A., Malandraki O.E. Small-scale magnetic islands in the solar wind and their role in particle acceleration. 1. Dynamics of magnetic islands near the heliospheric current sheet// The Astrophysical Journal. 2015. V. 808. No. 181. doi:10.1088/0004-637X/808/2/181.
- Khabarova O.V., Zank G.P., Li G., Malandraki O.E., le Roux J.A., Webb G.M. Small-scale magnetic islands in the solar wind and their role in particle acceleration.
   II. Particle energization inside magnetically confined cavities// The Astrophysical Journal. 2016. Vo. 827. No. 122, doi:10.3847/0004-637X/827/2/122.
- [7] Khabarova O.V., Zank G.P. Energetic Particles of keV–MeV Energies Observed near Reconnecting Current Sheets at 1 AU// The Astrophysical Journal. 2017. Vo. 843. No. 1. https://doi.org/10.3847/1538-4357/aa7686.

# STUDIES OF THE EARTH'S PLASMASPHERE USING THE DATA OF THE INTERBALL MISSION

#### G.A. Kotova

Space Research Institute of RAS, Moscow; kotova@iki.rssi.ru

#### **KEYWORDS**

plasmasphere, spacecraft potential, plasmaspheric notches, plumes, plasma density, plasma temperature, plasmaspheric boundary layer

#### INTRODUCTION

The Interball 1 orbiter was launched on 3 August 1995 into highly elliptical orbit with ~200,000 km apogee, and nearly 4 days period. The initial perigee of the spacecraft was ~800 km, it was raised to nearly 25000 km in 1998 and then fell gradually. The spacecraft returned the data till October 2000. [1]. The Interball 2 was launched into an orbit with the apogee of 20000 km, and a period of rotation round the Earth of 6 h. Such an orbit is most suitable to measure variations of plasma characteristics in the plasmasphere every 6 h and analyze the development of geomagnetic storms. For thermal plasma measurements on both spacecraft the plasma package Alpha-3 was installed. This package included a plane wide-angle retarding plasma analyzer PL-48, which was also installed on the Magion 5 sub-satellite of Interball 2.

For the analyses of the obtained data the data processing technique was developed, which allowed determining of the density *n* and temperature *T* of cold plasmaspheric ions as well as the value of the spacecraft potential  $\Phi_0$ .

It was shown that the calculated spacecraft potential suddenly dropped when the spacecraft entered the optical shadow of the Earth, while no abrupt changes of plasma density or temperature were observed at the boundary of the shadow. This reasonable and predictable behavior of spacecraft potential and plasma density and temperature suggests the applicability of the data processing technique [2].



**fig. 1.** Classed post map of spacecraft potential in cylindrical coordinates: X is opposite to the solar – ecliptic  $X_{SE}$ -axis, and Y – is the distance from the Earth – Sun line. Color tints on the left show spacecraft potential values

#### MAIN RESULTS OBTAINED BY THE INTERBALL MISSION

1. Magion 5 for the first time directly observed the long-lived (2–3 days) depleted regions ( $\Delta$ MLT ~3 hours) in the plasmasphere that extend out from L~3. These observations correspond to the observations of 'notches' by the IMAGE spacecraft [3]. In the notch structures (2, 3) the temperature is higher than in the nearby regions (1, 4). Notches are likely formed close to midnight during AE intensifications [4].



**fig. 2.** Two examples of density and temperature measurements on the successive passes through the plasmasphere in different regions at the same MLT

- 2. For the first time, after a period of moderate geomagnetic activity similar isolated patches of dense plasma were observed during the INTERBALL-1 crossings of the same L-shell in Southern and Northern hemispheres. These plasma patches likely correspond to observations of plasmaspheric tails (plumes), and this suggests that the minimal field-aligned extension of plasmaspheric plumes is from -20° to +20° of geomagnetic latitude [5].
- 3. Measurements on the Interball satellites indicate that during the main phase of magnetic storms the temperature of ions in the plasmasphere as a rule decreases, the plasma density increases or remains at the same level as in undisturbed conditions. Such temperature decrease in the vicinity of the equatorial plane was described by the model of the drift shell displacement from the Earth, which is caused by a decrease in the magnetic field in the inner plasmasphere during the development of a magnetic storm. It is shown as well that for thermal equatorial plasma the third adiabatic invariant also conserves in processes with a characteristic time shorter than the period of charged particle drift around the Earth. [6]
- 4. The cold plasma data obtained in 1995–2000 on the INTERBALL-1 spacecraft were used for the development of semi-empirical model of the Earth's plasmasphere. First the 2D physics-based model was developed, which used data on a single pass of the satellite through the plasmasphere to restore the plasma distribution in the entire meridional plane [7]. Then this model was expanded into 3D one using an analytic relation for plasmapause position. 6 parameters with clear physical sense are used to describe cold plasma distribution in the whole plasmasphere [8].

Our approach can be applied for the extrapolation of data from magnetospheric satellites with very different orbits into the entire plasmasphere. It seems that wider MLT coverage during an orbiter pass through the plasmasphere will lead to better reconstruction of the complete plasmasphere density distribution.



fig. 3. Time sequence (from bottom to top) of ion energy spectra (collector currents) on two passes of INTERBALL-1 through the plasmasphere



**fig. 4.** The density (below) and temperature (above) of thermal protons measured on the INTERBALL-2 satellite, when the satellite successively passed through the nightside plasmasphere. A thin solid line on temperature plot 3 is the temperature profile calculated in a proton drift approximation in the equatorial plane

**5.** Using the INTERBALL-1 data, Kotova et al. [9] found that it is the position of the plasmapause  $L_{PN}$ , determined from the experimental data by the criterion, used in [10] (behind this boundary the plasma density decreases by 5 or more times when the *L* shell is increased by 0.5), that correspond rather satisfactorily with the "best fitted position" of the plasmapause  $L_{PM}$  defined in the above 3D semi-empirical model. This justifies the reasonability of using such a criterion in comparison with many other formal criteria for determination of the plasmapause position from the experimental data.



**fig. 5.** Ion density distribution in the equatorial plane calculated from the measurements on 29 December 1995. In our stationary case plasma stream lines (point lines) shown in the figure, coincide with the lines of constant electric potential. It is seen that in the inner plasmasphere the density is almost independent of longitude/MLT, significant dependence appears only in the outer plasmasphere for L>3

**6.** In situ cold plasma measurements obtained with a high time resolution instrument on-board MAGION 5 were used to analyze physical properties of the thin plasmasphere boundary layer (PBL) near the plasmapause  $L_{PP}$  [11]. In this layer the plasma density *N* is decreasing exponentially with *L*: N-exp( $(L_{PP}-L)/W_B$ ), where  $W_B$  corresponds to the characteristic width of the PBL, the distance in *L* within which the density varies by a factor of *e*.

The density in the boundary layer is inversely proportional to the volume of the unit magnetic flux tube, whereas its width is proportional to the volume of magnetic flux tube. The characteristic width of the plasmasphere boundary layer linearly depends on the time elapsed since the most recent maximum value of  $K_P$ . Empirical relation for the dependence of the plasmasphere boundary layer width on most recent maximum value of  $K_P$  and on the lapse time between this maximum and the plasmapause observations is proposed (fig. 6).



**fig. 6.** Comparison of experimental ( $W_B$ ) and calculated ( $W_{BCalc}$ ) widths of PBL. On the solid line  $W_B = W_{BCalc}$ 

- [1] Zelenyi L.M., Triska P., Petrukovich A.A. INTERBALL project: dual probe and dual mission // Adv. Space Res. 1997. V. 20(4/5) P. 549-557.
- [2] Kotova G., Verigin M., Bezrukikh V. The effect of the Earth's optical shadow on thermal plasma measurements in the plasmasphere // J. Atm. Sol.-Terr. Phys. 2014. V.120. P. 9-14.
- [3] Sandel B.R. et al. Extreme ultraviolet imager observations of the structure and dynamics of the plasmasphere // Space Sci. Rev. 2003. V. 109, P. 25-46.
- [4] Kotova G.A. et al. Study of notches in the Earth's plasmasphere based on data of the MAGION-5 satellite // Cosmic Res. 2008. V. 46(1), P. 15-24.
- [5] Kotova G.A. et al. Interball 1/Alpha 3 cold plasma measurements in the evening plasmasphere: Quiet and disturbed magnetic conditions // Adv. Space Res. 2002, V. 30, P. 2313-2318.
- [6] Verigin M.I. et al. Ion drift in the Earth's inner plasmasphere during magnetospheric disturbances and proton temperature dynamics // Geomag. Aeron. 2011. V. 51(10). P. 39-48.
- [7] Verigin M.I. et al. Restoration of the proton density distribution in the Earth's plasmasphere from measurements along the INTERBALL-1 satellite orbit // Geomag. and Aeron. 2012. V. 52(6), P. 725-729.
- [8] Kotova G., Verigin M., Bezrukikh V. Physics-based reconstruction of the 3-D density distribution in the entire quiet time plasmasphere from measurements along a single pass of an orbiter // J. Geoph. Res. 2015. V. 120. P. 7512-7521.
- [9] Kotova G., Verigin M., Bezrukikh V. Use of the physically based modeling to choose an adequate method for determining the plasmapause position // Geomag. and Aeron. 2017. V. 57(4). P. 375-383.
- [10] Carpenter D.L., Anderson R.R. An ISEE/Whistler Model of Equatorial Electron Density in the Magnetosphere // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. P. 1097-1108.
- [11] Kotova G. et al. Experimental study of the plasmasphere boundary layer using MAGION 5 data // J. Geoph. Res. 2018. V. 123. P. 1251-1259.

# DETECTION BY COSMIC RAYS OF THE TRANSITION REGIME OF SOLAR WIND TO THE ACTIVE PHASE OF A SOLAR CYCLE

#### V.I. Kozlov

Yu. G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SD RAS, Yakutsk, Russia; cosmoprognoz@mail.ru

#### **KEYWORDS**

cosmic rays, solar wind, transient regime, solar cycle

An analysis of the "group" features of the behavior of cosmic rays on large scales of averaging is of great interest from various points of view. First of all, it is important when studying the transient regime of the solar wind to the active phase of the solar cycle. Early detection of such a transitional regime could solve the practically important problem of forecasting the active phase of the solar cycle. By results studying of dynamics of fluctuations in the intensity of galactic cosmic rays (GCR) at various phases of the current cycle 24, transient regimes to the active phase of the solar cycle have been detected: http://www.forshock.ru/predlong.html, which are determined by the presence of harbingers in cosmic rays. The moments of registration of harbingers coincide with the onset of the magnetic field restructuring in the complexes of activity on the Sun. This follows from the results of comparison of the moments of registration of harbingers with the data of solar observations. Magnetic field changes were observed on the branches of ascend and descend of (both) maxima in the annual-mean values of Wolf numbers, registered in 2012 and 2014, i.e. at the phases of their maximum variability. Thus, the precursor in cosmic rays is an indicator of the restructuring of the solar magnetic field on the transient regime to the active phase of the solar cycle.

# SOLAR PLASMA FORCING ON THE ATMOSPHERE OF THE EATH AND MARS

#### A.A. Krivolutsky

Central Aerological Observatory (CAO), Dolgoprudny, Moscow, Russia; krivolutsky@mail.ru

#### **KEYWORDS**

atmospheric chemistry and dynamics, numerical models, perturbations caused by solar energetic particles, comparison with satellite observations

#### INTRODUCTION

When the area of satellite solar particle fluxes and atmospheric ozone observations began it was found that ozone content in polar regions was strongly reduced after Solar Proton Events. Theoretical studies gave the explanations of this effect: the ionization caused by energetic particles in polar regions generates new additional molecular nitrogen and hydrogen oxides which then destroy ozone in following chemical catalytic cycles:

$$\begin{split} \mathsf{NO} + \mathsf{O}_3 &\rightarrow \mathsf{NO}_2 + \mathsf{O}_2 \\ \underline{\mathsf{NO}_2 + \mathsf{O}} &\rightarrow \mathsf{NO} + \mathsf{O}_2 \\ \mathbf{O}_3 + \mathsf{O} &\rightarrow \mathsf{O}_2 + \mathsf{O}_2 \\ \mathbf{OH} + \mathsf{O} &\rightarrow \mathsf{H} + \mathsf{O}_{2e} \\ \underline{\mathsf{H} + \mathsf{O}_3 &\rightarrow \mathsf{OH} + \mathsf{O}_2} \\ \mathbf{O} + \mathsf{O}_3 &\rightarrow \mathsf{O}_2 + \mathsf{O}_2. \end{split}$$

Each pair of ions produced by the particles give 1.25 molecular of nitrogen oxides and approximately 2.0 molecular of hydrogen oxides. These values may be used in numerical photochemical simulations to reproduce ozone (and other species) response. Global numerical models [1,2] developed at the Laboratory of atmospheric chemistry and dynamics (CAO) were used for such simulations (see some results below). Then 1D photochemical model of Mars's atmosphere was used to realize the attempt for the same scenario. This model was also created at CAO. Short descriptions of the models are below.

#### MODELS

3D global photochemical non-stationary model **CHARM** (Chemical Atmospheric Research Model) calculate 41 chemical species which are involved in 127 photochemical reactions [1]. The top of the model is at 90 km and the lower boundary is placed at the surface of the Earth. Figure 1 shows calculated global mixing ratio of ozone (in ppmv).

To describe vertical and horizontal transport in simulations with CHARM General Circulation Model **ARM** (Atmospheric Research Model) was used. The upper boundary of ARM is 135 km. This non-stationary global model gives 3D fields of temperature and wind components at each step of integration (several minutes). Figure 2 illustrates temperature field which are in a good agreement with observations.

**1D** photochemical numerical model of the atmosphere of Mars **MARCH** (Mars's Chemistry) was also developed at the laboratory of Atmospheric Chemistry and Dynamics (CAO) to investigated response of chemical species to SPEs. This model involves 58 chemical reactions and 15 reactions of photolysis from the surface to 90 km. Vertical diffusion has been taken into account in the model. Figures 3, 4 show vertical distributions of several chemical components (including  $CO_2$ ) calculated with the model.



fig. 1. Global distribution of ozone mixing ratio (ppmv) for January simulated with CHARM



fig. 2. Temperature distribution for July simulated with ARM



**fig. 3.** Simulated chemical composition of the Mars's atmosphere (undisturbed profiles, 45 N) 150-proceedings of the conference



fig. 4. CO2 in the atmosphere of Mars (photochemical simulation, 45 N)

#### SPE FORCING

SPE of 14 July 2000 was selected for presentation in this paper. To simulate the response of polar Earth's ozonosphere mentioned efficiencies of NOx and HOx production have been used. Figure 5 shows calculated response of ozone at high latitude of the Northern Hemisphere. One can see strong ozone depletion in the stratosphere and mesosphere.

We were lucky to have satellite data (UARS/HALOE) for period of this SPE. Figure 6 illustrates corresponding ozone depletion which is in a good correspondence with simulations.

Finally, one can have a look on sensitivity of the atmosphere of Mars to this SPE. Figure 7 shows corresponding ionization rates caused by solar protons during SPE, which is close to the Earth's one (influence on composition was too weak).



fig. 5. Ozone response (%) after SPE of 14 July 2000 (model simulations)



fig. 6. Ozone depletion (%) during and after SPE of 14 July 2000 found from UARS observations





- [1] Krivolutsky A.A., Vyushkova T.Yu., Cherepanova L.A., Kukoleva A.A., Repnev A.I., Banin M.V. 3D global photochemical model SHARM: Input of solar activity // Geomagnetism and aeronomy. 2015. V. 55, No.1. P. 59-88.
- [2] Krivolutsky A.A., Cherepanova L.A., Vyushkova T/ Yu., Repnev A.I., Klyuchnikova A.V. Global circulation of the Earth's atmosphere at altitudes from 0 to 135 km simulated with ARM model. Consideration of the solar activity contribution // Geomagnetism and Aeronomy. 2015. V. 55, No 6, P. 468-487.

# MHD SHOCK WAVES IN COLLISIONLESS SOLAR WIND PLASMA WITH HEAT FLUXES

#### V.D. Kuznetsov<sup>1</sup>, A.I. Osin<sup>2</sup>

- <sup>1</sup> Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, the Ionosphere and Radiowave Propagation (IZMIRAN); kvd@izmiran.ru
- <sup>2</sup> Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, the Ionosphere and Radiowave Propagation (IZMIRAN); osin@izmiran.ru

#### **KEYWORDS**

MHD, collisionless plasma, heat fluxes, shock waves

#### INTRODUCTION

Anisotropic MHD equations for collisionless plasma with heat fluxes are used to describe shock waves in the solar wind. Analytic expressions are obtained for the special cases of parallel and perpendicular shocks using divergent form of MHD equations. Jump relations are solved and plasma density, velocity, parallel and perpendicular pressure as well as heat fluxes are expressed as functions of the Mach number and dimensionless upstream plasma parameters. Influence of parallel heat flux on the properties of shock waves is investigated.

#### **PARALLEL SHOCKS**

For the simple case of one-dimensional parallel shocks solution can be obtained in simple analytical form. We use 8-moment system of equations for the collisionless plasma with heat fluxes [1]. For the one-dimensional, strictly parallel motions along magnetic field lines system of equations can be written in the following divergent form:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u) = 0; \quad \frac{\partial}{\partial t} (\rho u) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_{\parallel} + \rho u^{2}) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_{\parallel} + \rho u^{2}) + \frac{\partial}{\partial x} (S_{\parallel} + 3\rho_{\parallel} u + \rho u^{3}) = 0$$

$$\frac{\partial \rho_{\perp}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (S_{\perp} + \rho_{\perp} u) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (S_{\parallel} + 3\rho_{\parallel} u + \rho u^{3}) + \frac{\partial}{\partial x} (4S_{\parallel} u + 6\rho_{\parallel} u^{2} + \rho u^{4} + 3\rho^{2}_{\parallel} / \rho) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (S_{\parallel} + \rho_{\parallel} u) + \frac{\partial}{\partial x} (2S_{\parallel} u + \rho_{\parallel} u^{2} + \rho_{\parallel} \rho_{\parallel} / \rho) = 0$$

Assuming that all these equations describe conservation of corresponding quantities a system of jump relations can be written resolving which one obtains

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = X = 1/Y; \quad \frac{u_2}{u_1} = Y; \quad \frac{\rho_{||2}}{\rho_{||1}} = 1 + M_1^2 - M_1^2 Y$$

$$\varkappa_{||1} \frac{S_{||2}}{S_{||1}} = \varkappa_{||1} + 3M_1 - M_1^3 - 3M_1 (1 + M_1^2) Y + 2M_1^3 Y^2$$

$$\frac{\rho_{\perp 2}}{\rho_{\perp 1}} = \frac{1}{Y} - 2 \frac{\varkappa_{\perp 1} \sqrt{\alpha_1} M_1}{Y} \left[ \frac{1 - Y}{2M_1^2 Y - M_1^2 - 1} \right]$$

$$\frac{S_{\perp 2}}{S_{\perp 1}} = \frac{M_1^2 - 1}{2M_1^2 Y - M_1^2 - 1}$$

where

$$Y_{\pm} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2}{M_1^2}\right) \pm \sqrt{\frac{1}{12} + \frac{1}{2M_1^4} - \frac{2\kappa_{||1|}}{3M_1^3}}$$

#### PERPENDICULAR SHOCKS

For the one-dimensional motions of plasma perpendicular to the direction of magnetic field the system of equations can be written in the following divergent form

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u) = 0; \quad \frac{\partial}{\partial t} (\rho u) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u^{2} + \rho_{\perp} + B^{2}/8\pi) = 0$$

$$\frac{\partial \rho_{\parallel}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_{\parallel} u) = 0; \quad \frac{\partial}{\partial t} (\rho_{\perp}/B) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_{\perp} u/B) = 0$$

$$\frac{\partial S_{\parallel}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (S_{\parallel} u) = 0; \quad \frac{\partial}{\partial t} (S_{\perp}/\rho) + \frac{\partial}{\partial x} (S_{\perp} u/\rho) = 0$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (Bu) = 0$$

Assuming that these equation reflect conservation of various quantities and resolving system of jump relations one obtains

$$\frac{u_2}{u_1} = Y, \quad \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{\rho_{||2}}{\rho_{||1}} = \frac{S_{||2}}{S_{||1}} = \frac{B_2}{B_1} = 1/Y, \quad \frac{S_{\perp 2}}{S_{\perp 1}} = 1/Y^2$$
$$\frac{\rho_{\perp 2}}{\rho_{\perp 1}} = 1 + 2M_1^2 (1 - Y) + \frac{M_1^2}{A_1^2} (1 - \frac{1}{Y^2})$$
$$Y = \frac{1}{3} \left[ 1 + 2\left(\frac{1}{M_1^2} + \frac{1}{A_1^2}\right) \right]$$

This solution for perpendicular shock waves coincides with that for the Chew-Goldberger-Low (CGL) [2] equations obtained in [3] but gives additional expressions for heat fluxes.

#### CONCLUSIONS

The system of MHD equations for collisionless plasma with heat fluxes for one-dimensional motions parallel and perpendicular to magnetic field lines can be written in divergent form. In the assumption that these equations reflect conservation of mass, momentum, energy and other quantities, a system of jump relations can be solved to obtain analytic solution for various plasma quantities as functions of Mach number and upstream plasma parameters.

- [1] Oraevsky V.N., Konikov Yu.V., and Khazanov G.V. Transport Processes in Anisotropic Near-Earth Plasma. Nauka, Moscow, 1985. 174 p. (in Russian).
- [2] Chew G.F., Goldberger M.L., Low F.E. The Boltzmann equation and the one-fluid hydromagnetic equations in the absence of particle collisions // Proc. Roy. Soc. London. 1956. V. A236. P. 112-118.
- [3] Morioka S., Spreiter J.R. Evolutionary conditions for shock waves in collisionless plasma and stability of the associated flow. // J. Plasma Physics. 1968. V. 2. Part 3. P. 449-463.

## CHARGE SEPARATION ELECTRIC FIELD INSIDE A PLASMOID PENETRATING THROUGH A MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION LIKE THAT OBSERVED IN THE MAGNETOPAUSE REGION: PARTICLE-IN-CELL SIMULATIONS, KINETIC AND MAGNETOHYDRODYNAMIC APPROXIMATIONS

#### J.F. Lemaire<sup>1</sup>, G. Voitcu<sup>2</sup>, M. Echim<sup>1,2</sup>

- <sup>1</sup> Royal Institute for Space Aeronomy, Avenue Circulaire 3, B-1180 Brussels, Belgium; joseph.lemaire@aeronomie.be
- <sup>2</sup> Institute of Space Science, Atomistilor 409, Magurele, Romania

### **KEYWORDS**

electric field, Polarization, Plasmoid, Tangential discontinuity, Kinetic theory, Magnetohydrodynamic approximation, Particle-in-cell simulations



**fig. 1.** Time evolution of a plasmoid penetrating a tangential discontinuity. The figure shows the number density of electrons in the plane perpendicular to the background magnetic field (left column), and in the plane determined by the bulk velocity and the background B-field (right column). Each row corresponds to a different time step (t=0, t=0.75 T<sub>Li</sub>, t=1.5 T<sub>Li</sub>, given in proton Larmor periods); from Voitcu and Echim (2016)

#### INTRODUCTION

The kinetic mechanism that builds up a charge separation electric field, or polarization density, and a polarization electric charge density within and along the surface of plasmas inhomogenities, streams or plasmoids which are moving through a uniform magnetic field had been identified and described by Schmidt (1960)<sup>1</sup>. In our presentation we first recall Schmidt's kinetic theory and its extension (i) for the cases of plasmoids which are either stopped by non-uniform magnetic fields distributions - alike the Tangential Discontinuity (TD) corresponding to Chapman-Ferraro layers - or else (ii) for the cases of plasmoids which have enough momentum flux density to pass through such a TD, as developed by *Lemaire* (1985)<sup>2</sup>. Particle-In-Cell (PIC) simulations of the electromagnetic interaction mechanism taking place in a collision-less magnetized plasma have been developed by Voitcu and Echim (2016, 2017)<sup>3,4</sup>. Their numerical PIC simulations describe the motion - as well as the change of their morphology – of simple (initially box-shaped) plasmoids that are either (i) stopped in front of a Tangential Discontinuity, or else (ii) that can pass through the TD and continue an adiabatic motion on the opposite side by conserving the total magnetic momentum as well as the total kinetic energy (drift + gyro-energies of all charged particles forming the moving plasmoids). We will illustrate the results of such PIC simulations and compare them to the predictions of the Schmidt-Lemaire kinetic theory. Finally, we will compare these theoretical and numerical simulations to results from laboratory experiments, and magnetospheric observations.

- Schmidt G. Plasma motions across magnetic fields // Phys. Fluids. 1960. V. 3. P. 961-965.
- [2] Lemaire J. Plasmoid motion across a tangential discontinuity (with applications to the magnetopause) // J. Plasma Phys. 1985. V. 33. P. 425-436.
- [3] Voitcu G., Echim M. Transport and entry of plasma clouds/jets across transverse magnetic discontinuities: Three-dimensional electromagnetic particle-in-cell simulations // J. Geophys. Res. Space Physics. 2016. V. 121. P. 4343-4361.
- [4] Voitcu G., Echim M. Tangential deflection and formation of counterstreaming flows at the impact of a plasma jet on a tangential discontinuity // Geophys. Res. Lett. 2017. V. 44. P. 5920-5927.

# THE PHYSICAL MECHANISM OF THE HEATING OF THE SOLAR ATMOSPHERE AND ITS ANALYTICAL EXPLANATION

#### I.A. Molotkov

IZMIRAN, Troitsk, Moscow, Russia; iamolotkov@yandex.ru

#### **KEYWORDS**

chromosphere, photosphere, Alfven waves, spicules, synchronous propagation, three-wave interaction

It's been established that the temperature of the Sun, incredibly high in its central areas, drops to 5,000–6,000°K on the boundary between the photosphere and the chromosphere and grows again into the millions of degrees in the higher chromosphere and the corona. More than a few papers are dedicated to the coronal and chromospheric heating, but a physical mechanism for the explaining this temperature growth has not been found.

Our discussion of the temperature growth begins by considering the hot convective expulsions from the photosphere – spicules. The development of this physical process is detailed and quantified by a system of nonlinear equations of magnetic hydrodynamics (MHD). The process starts from the interface between the photosphere and the chromosphere (P-C). In the vicinity of P-C, the boundaries of the MHD equation are significantly simplified and allow for analytical solutions. The first result is as follows. The parallel distribution into the chromosphere of Alfvén waves (very weak at first) and powerful, hot, luminescent photospheric spicules begins from the P-C interface. Even in the vicinity of the P-C interface, the amplitude of the Alfvén waves quickly grows.

The further distribution of the Alfvén waves and the spicules occurs at the same frequencies. This fact is experimentally confirmed [1]; the wave length of both disturbances ~400 km. The solution of the MHD equations proves that the distribution speeds of the Alfvén waves and the spicules in the lower chromosphere are practically equal and ~30 km/sec. Therefore, the motion of the waves and the spicules is synchronous.

Alongside the referenced synchronicity of these motions, the kinetic energy transfers from the spicules to the Alfvén waves. According to observations [2], this energy transfer explains the rapid growth of the Alfvén velocity in the so-called transition region of the chromosphere. McIntosh's group examined spicule radiation in a monochromatic light, at the wavelengths of 304 and 171 Å. Another confirmation of the energy transfer from the hot spicules to the Alfvén waves is provided by the fact that in the vicinity of the P-C interface, the temperature of the spicules is almost three times greater than that of the areas where Alfvénic oscillations originate [3]. Therefore, during its outward distribution in the chromosphere, the plasmic component of the disturbance gradually transfers its energy to the Alfvén wave.

Alfvén waves disperse through the plasma of the solar atmosphere virtually without heat emission. Parametric three-wave interaction has been well researched by now. Analytically, this interaction is rooted in the laws of energy and momentum conservation. In the specific case of the chromosphere, we demonstrate a breakdown of a powerful Alfvén wave into a magnetosonic wave and a less intense Alfvén wave. Analytical transformations show that indeed, a greater share of the Alfvénic energy transfers to the magnetosonic wave and is then consumed in the heating of the plasma [4],[5].

Therefore, the growth of solar temperatures to millions of degrees ends in the higher chromosphere.

The author is indebted to Lev Zeleny, Member of the Russian Academy of Sciences, for the opportunity to discuss this work.

- [1] Tomczyk S. et al. Alfven Waves in the Solar Corona // Science. 2007. V. 317. P. 1192-1196.
- [2] McIntosh S.W. et al. Alfvenic waves with sufficient energy to power the quiet solar and fast solar wind. // Nature. 2011. V. 475. P. 477-480.
- [3] Hollweg J.V. et al. Alfven waves in the solar atmosphere. // Solar Physics. 1982. V. 75. P. 35-61.
- [4] Molotkov I.A., Ryabova N.A. The Mechanism of the Heating of the Outer Layer of the Solar Corona. // Geomagnetism and Aeronomy, 2016, V. 56, No 3, P. 283-287.
- [5] Molotkov I.A., Vakulenko S.A. The Analysis of Heat Transfer in the Sun's Photosphere and Chromosphere // Geomagnetism and Aeronomy, 2017, V. 57, No 5, P. 562-566.

# OBSERVATION OF THE SAR ARCS WITH PULSATING PRECIPITATION OF ENERGETIC PARTICLES USING THE ALL-SKY IMAGER AND PHOTOMETRIC DATA

#### S.G. Parnikov, I.B. levenko

Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy, Yakutsk, Russia; Parnikov@ikfia.ysn.ru

#### **KEYWORDS**

plasmasphere, substorm, ring current, SAR arc, EMIC

The increase in the [OI] 630.0 nm emission in stable auroral red (SAR) arcs is due to the flow of superthermal electrons, which arises as a result of overlapping of the outer plasmasphere with energetic ions of ring current [1]. Our studies show that the SAR arcs appear and / or brightening during the substorm expansion phase. The SAR arc formation begins in the equatorward diffuse aurora (DA) boundary region.



**fig. 1.** An example of energetic particles precipitation at the SAR arc latitudes by the photometric observations on January 26, 2017. **a**, **b** – keograms in the 557.7 and 630.0 nm emissions, respectively. In fig. 1a, the location of view field of photometers for the N2+ emissions registration is shown. **c** – plots of pulsating variations for four registration direction on 70N, 45S, 45E and Z with sampling frequency of 20 Hz



**fig. 2.** Dynamic spectrum of pulsations at the SAR arc latitudes on January 26, 2017. Power spectrum of luminosity pulsations in the frequency range of 0.2–1 Hz are presented



**fig. 3.** An example of the SAR arc observations by the all sky imager during the energetic particles precipitation on January 26, 2017. **a** – the all sky image in the 630.0 nm emission. The mage show a glow with intensity less than 200 Rayleigh (0.2 kR) for better display of the SAR arc. **b** – expanded type of pulsations for a 2-minute interval

160-proceedings of the conference

Photometric observations showed that during the substorm recovery phase at the SAR arc latitudes, bursts of luminescence pulses in the 427.8 nm emission are usually observed [2].

Pulsating precipitations of energetic electrons can be caused by electromagnetic ion cyclotron (EMIC) waves as a result of modulation of the pitch-angle diffusion coefficient and, accordingly, the particle flux in the loss cone with the wave frequency [3]. Spectral analysis showed that at the moments of maximum amplification, pulsations assume a quasiharmonic character with characteristic frequencies of 0.05–1 Hz. In [4], we showed that the observed pulsations can be caused by the excitation of EMIC waves as a result of the ion cyclotron instability of the ring current O+ energetic ions.

In this work we compare the results of SAR arc observations by the all sky imager with the photometric registration data of energetic particles precipitation at the Yakutsk meridian as in the event on January 26, 2017 in fig. 1–3.

- Cole K.D. Magnetospheric processes leading to mid-latitude auroras //Annales de Geophysique. 1970. V. 26. No. 1. P. 187-193.
- [2] Ievenko I.B., Parnikov S.G., Alexeyev V.N. Relationship of the diffuse aurora and SAR arc dynamics to substorms and storms // Advances in space research. 2008. V. 41. P. 1252-1260.
- [3] Coroniti F.V., Kennel C.F. Electron precipitation pulsations // Journal of Geophysical Research. 1970. V.75. Issue 7. P. 1279-1289.
- [4] Парников С.Г., Иевенко И.Б., Алексеев В.Н. Проявление ЕМІС волн в пульсирующих сияниях на широтах sar-дуги // Материалы XII Международной Школы молодых ученых «Физика окружающей среды» им. А.Г. Колесника. Томск: ТМЛ-Пресс, 2016. 204 с. ISBN 978-5-91302-174-8. С. 152-155.

# ANALYSIS OF SOLAR WIND PARAMETERS USING THE SWAMP VISUALISATION TOOL

#### D.A. Parunakian, E.S. Belenkaya, I.I. Alexeev

Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University

#### **KEYWORDS**

solar wind, ACE, statistical analysis

#### INTRODUCTION

In this work we present analysis results for solar wind density and velocity time profiles in 1998–2018 acquired by the MAG [1] and SWEPAM [2] instruments onboard the ACE spacecraft [3,4] with a 64-second resolution. We propose a method of using these in situ measurements to determine start and end time-stamps of solar wind events associated with a fast enhancement of either of these two parameters or, rarely, both of them simultaneously. The produced list of events is compared to halo coronal mass ejection catalogs compiled based on SOHO/LASCO data. The comparison indicates that the chosen biparametric approach allows reliably identifying events observed with coronagraphs in 10-15% cases. The total duration of solar wind events in which simultaneous enhancement of the both parameters is observed is approximately 14% of the total duration of all events during solar activity maxima, and approximately 10.5% in solar activity minima.

#### DISCUSSION

During the preprocessing step we convert the annual data files from HDF4 format to HDF5, and remove records that contain an error or missing marker for either of the parameters of interest. In order to investigate possible effects connected to the solar activity cycle phase we group data files into several sets: 1998–2003, 2006–2009, and 2013–2016. Due to the substantial periods of missing and corrupted data in 2010–2012 this time interval is not used in this work. In the future we plan to expand coverage by including data acquired by WIND and DSCOVR spacecraft missions which are also located in the L1 point.

The data is analyzed using the initial version of manual and automated analysis tools from the Solar Wind Analysis and Monitoring Project (SWAMP) presented in this work. The main objective of the current version is to provide a convenient 3D visualization environment specifically designed for solar wind investigation, and to create software for automated solar wind event search and processing. The automated tool uses a 20d Daubechies wavelet for denoising the initial data set which is then analyzed with a z-score based algorithm. An example fragment of data processed by the software is illustrated in fig. 1.





In order to cross-validate classification results we have compared the list of events found against halo CME catalogs by NASA [5] and CACTUS [6]. Validation results are shown in table 1.

time interval	NASA catalog accuracy	CACTUS catalog accuracy
1999–2002	21%	15%
2003–2006	18%	12%
2007–2009	0%	13%
2013–2015	9%	10%

 Table 1. The number of event identified with the proposed method coinciding with estimated times of arrival for halo CMEs recorded in corresponding catalogs.

#### CONCLUSION

We observe that the prevailing mode of solar wind events is a fast enhancement of only one of the **n** and **v** parameters (defined as appearance of data points lying outside of the [ $\mu$ -5 $\sigma$ ;  $\mu$ +5 $\sigma$ ] interval over the last 15 minutes). Simultaneous enhancement of both of these parameters is only observed in 10–15% of cases.

- [1] C.W. Smith, L'Heureux J., Ness N.F., Acuna M.H., Burlaga L.F., Scheifele J. The ACE magnetic field experiment, in: The Advanced Composition Explorer Mission, Springer, 1998, pp. 613-632.
- [2] McComas D., Bame S., Barker P., Feldman W., Phillips J., Riley P., Griffee J. Solar wind electron, proton, alpha monitor (SWEPAM) for the Advanced Composition Explorer, in: The Advanced Composition Explorer Mission, Springer, 1998, pp. 563-612.
- [3] Stone E.C., Frandsen A., Mewaldt R., Christian E., Margolies D., Ormes J., Snow F. The Advanced Composition Explorer, Space Science Reviews 86 (1-4) (1998) 1-22.
- [4] Russell C.T., Mewaldt R., Von Rosenvinge T. The Advanced Composition Explorer Mission, Springer 464 Science & Business Media, 2012.
- [5] Gopalswamy N., Yashiro S., Michalek G., Stenborg G., Vourlidas A., Freeland S., Howard R. The SOHO/LASCO CME catalog, Earth, Moon, and Planets 104 (1-4) (2009) 295-313.
- [6] Robbrecht E., Berghmans D. Automated recognition of coronal mass ejections (CMEs) in near-real-time data, Astronomy & Astrophysics 425 (3) (2004) 1097-1106.

## DETERMINATION OF JUPITER'S MAGNETOSPHERIC PARABOLOID MODEL PARAMETERS USING JUNO MAGNETOMETER DATA

# I.A. Pensionerov<sup>1</sup>, E.S. Belenkaya<sup>1</sup>, S.W.H. Cowley<sup>2</sup>, I.I. Alexeev<sup>1</sup>, V.V. Kalegaev<sup>1</sup>, D.A. Parunakian<sup>1</sup>

- <sup>1</sup> Federal State Budget Educational Institution of Higher Education M.V. Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics (SINP MSU), Moscow, Russia; pensionerov@gmail.com
- <sup>2</sup> Department of Physics & Astronomy, University of Leicester, Leicester LE1 7RH, UK

#### **KEYWORDS**

planetary magnetospheres, Jupiter, Juno mission

#### INTRODUCTION

Jupiter has the strongest internal magnetic field among the planets of the Solar system. It is a rapidly rotating planet. Jupiter's volcanically active moon lo is a strong source of plasma. These factors provide special features of the Jupiter's magnetosphere, such as enormous size due to the strongest curent disc, and the brightest aurora.

The Juno Magnetometer (MAG) data give us a chance to observe the Jupiter's magnetosphere in a relatively long-term perspective [1]. This instrument provides a large amount of the high quality magnetic field data on the diffeent distances from the planet.

In this work we use the global paraboloid model of the magnetic field and current systems in the Jovian magnetosphere [2]. The model has a set of parameters that could be adjusted according to the MAG observations. Some of them vary in time, and MAG long-term data could help us to determine the range of their variations. We consider such parameters, as the inner and outer radii of the magnetodisc, inner radius of the tail current system, the distance to the subsolar point, and others.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

The MAG data was obtained from Planetary Data System (PDS). Instrument scientist of FGM – J.E.P. Connerney. Principal investigator of Juno mission – Scott J. Bolton.

- [1] Bagenal F., Adriani A., Allegrini F., Bolton S.J., Bonfond B., Bunce E.J., Connerney J.E.P., Cowley S.W.H., Ebert R.W., Gladstone G.R., Hansen C.J., Kurth W.S., Levin S.M., Mauk B.H., McComas D.J., Paranicas C.P., Santos-Costa D., Thorne R.M., Valek P., Waite J.H., Zarka P. Magnetospheric Science Objectives of the Juno Mission // Space Science Reviews. 2017. V. 213. Issue 1-4. P. 219-287.
- [2] Alexeev I.I., Belenkaya E.S. Modeling of the Jovian Magnetosphere // Annales Geophysicae. 2005. V. 23. No. 3. P. 809-826.

# WHAT NEW OBSERVATIONS AND KINETIC SIMULATIONS OF THE PLASMASPHERE REVEAL ON THE INNER MAGNETOSPHERE

#### V. Pierrard<sup>1,2</sup>, F. Darrouzet<sup>1</sup>, G. Lopez Rosson<sup>1,2</sup>, J. Lemaire<sup>1,2</sup>

- <sup>1</sup> Royal Belgian Institute for Space Aeronomy (IASB-BIRA), Space Physics, Belgium; viviane.pierrard@oma.be
- <sup>2</sup> Université Catholique de Louvain (UCL), Center for Space Radiations (CSR), ELI-C, Belgium

#### **KEYWORDS**

plasmasphere, radiation belts, kinetic model, plasmapause, geomagnetic storms

Using CRRES, Cluster and THEMIS observations, we analyzed how the plasmapause is formed in the post-midnight sector when the geomagnetic activity is enhanced; the plasmasphere is first eroded deeper in the magnetosphere, and its newly formed outer Plasmapheric Boundary Layer (PBL) is subsequently transmitted to other MLT sectors by co-rotation. The results of these satellites measurements are generally in excellent agreement with the prediction of plasmapause formation mechanism based on plasma quasi-interchange process [1] which is implemented in the numerical simulations codes developed at IASB-BIRA.

Our Kp-dependent 3D-model of the plasmasphere enables not only to calculate the equatorial position of the plasmapause as a function of MLT and UT, but it gives also the cold plasma density and temperature within as well as outside the plasmasphere [2]. Our 3D time-dependent model of the plasmasphere is coupled to a standard model of the ionosphere [3]. It enables to simulate the dynamical development of plasmaspheric plumes. The latter are initially generated as growing shoulders formed in the dawn sector at the onset of geomagnetic storms; then they propagate into the afternoon MLT sector where they stretch radially toward the magnetopause to form an extended plume. The continuous radial flow of plasma known as Plasmaspheric Wind [4] has also been implemented in our 3D-numerical model. Plasma densities and drift velocities from the THEMIS mission will be used as initial conditions to model the overall distribution of the plasmaspheric wind velocity.

Using CLUSTER particle flux measurements for different energy ranges, we found that the observed plasmapause positions and the observed boundaries of the radiations belts are correlated with each other [5]. These connections are currently studied in greater details by using the observations available from the Energetic Particle Telescope (EPT), the specific instrument that has been developed in Belgium by IASB-BIRA, CSR/UCL, and QinetiQ-Space. The EPT is a high time-resolution (2 sec.) spectrometer which was launched in May 2013 onboard of the PROBA-V satellite of ESA [6]. This energetic particle detector is still operating at the altitude of 820 km on a LEO polar orbit. This unique new type of detector has a field of view angle of 52°, and is providing continuously for already 5 years valuable electrons count rates in 7 energy channels (0.5 -8 MeV), in 11 channels (9.5 – 248 MeV) for the protons, and in 11 channels (38 – 900 MeV) for the helium ions. The detailed observations of EPT confirm that the calibrated fluxes of outer belt electrons drop drastically and abruptly during the main phase of geomagnetic storms [7]; these fluxes recoup eventually gradually over 1 or 2 days during the subsequent recovery phases. Sometimes at the end of such recovery periods, the fluxes of relativistic electrons can have smaller values, or else they reach values orders of magnitude larger

#### 166 GRINGAUZ 100: PLASMAS IN THE SOLAR SYSTEM, 2018

than their pre-storm intensities. Furthermore, our *EPT* measurements clearly confirm that following geomagnetic storm events the outer belt fluxes slowly decrease with a time constant ranging between 6 and 18 days. The positions of the maximum flux of relativistic electrons shift toward the Earth during the enhanced geomagnetic activity events, in a rather similar way as the surface of the plasmapause does it also during such enhancements. The fluxes of particles in the Inner Radiation Belt and South Atlantic Anomaly can also be significantly affected by geomagnetic activity, but only during the strongest storms.

- Lemaire J., Pierrard V. Comparison between two theoretical mechanisms for the formation of the plasmapause and relevant observations, Geomagnetizm I Aeronomiya. 2008. V. 48, No. 5, P. 579-597.
- [2] Pierrard V., Stegen K. A three dimensional dynamic kinetic model of the plasmasphere, Journal Geophys. Res. 2008. V. 113, A10209, doi: 10.1029/2008ja013060.
- [3] Pierrard V., Voiculescu M. The 3D model of the plasmasphere coupled to the ionosphere, Geophys. Res. Lett. 2011. V. 38, L12104, doi:10.1029/2011GL047767.
- [4] Lemaire J., Schunk R.W. Plasmaspheric wind, Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 1992. 54, 467-477.
- [5] Darrouzet F. et al. Links between the plasmapause and the radiation belts boundaries as observed by the instruments CIS, RAPID and WHISPER on CLUS-TER, J. Geophys. Res.: Space Phys., 2013. V. 118, P. 4176-4188, doi: 10.1002/ jgra.50239.
- [6] Pierrard V. et al. The Energetic Particle Telescope: First results, Space Science Rev., 2014. V. 184, P. 87-106, DOI: 10.1007/s11214-014-0097-8.
- [7] Pierrard V., Lopez Rosson G. The effects of the big storm events in the first half of 2015 on the radiation belts observed by EPT/PROBA-V. Annales Geophysicae. 2016. V. 34 P. 75-84, doi:10.5194/angeo-34-75-2016.

# FROM ARAKS TO APEX

#### S.A. Pulinets<sup>1</sup>, N.I. Izhovkina<sup>2</sup>, Z. Kłos<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Space Research Institute of RAS, Moscow, Russia

<sup>2</sup> IZMIRAN, Troitsk, Moscow, Russia

<sup>3</sup> Space Research Center PAS, Warsaw

The cooperative research of our group with the K.I. Gringauz laboratory was concentrated on the problems of wave particle interactions. They were started as early as 1975 during the Soviet-French ARAKS experiments with artificial emissions stimulated by plasma beams emitted from the rocket, and continued nearly 25 years. This period includes the results of active experiments both on satellite (APEX experiment) and ground based installation (SURA facility), as well as studies of wave particle interactions of natural origin in auroral regions including AKR studies. Different mechanisms of wave generation and transformation were proposed using the data of particle spectrometers of Gringauz laboratory and HF radiospectrometers of our group and Space Research Center of Polish Academy of Sciences. These results are accumulated in more than 15 common publications and will be presented as the short review.

# MASS LOADING INFLUENCE ON THE STRUCTURE OF MARTIAN BOW SHOCK

#### S.D. Shuvalov, O.L. Vaisberg

Space Research Institute of RAS, Moscow, Russia; shuvalovsergei@gmail.com

#### **KEYWORDS**

Mars, MAVEN, mass-loading, bow shock

#### INTRODUCTION

The structure of Martian bow shock is largely affected by mass loading processes which consist both of pickup occurring upstream of the shock, and plume which originates in magnetosphere. The first one is dependent on the intensity of extreme ultraviolet radiation from the Sun and on the density of oxygen corona which varies with season ([2], [3]). The latter is driven by the

direction of motion electric field  $\vec{E} = -\frac{1}{c} \vec{V} \times \vec{B}$  [1].

Depending on the conditions above, the bow shock can show different properties. Thus, the crossing presented in fig. 1 shows features common for a cometary-like shock with the width of the front approximately equal to the proton gyro radius.

Unlike the crossing presented in fig. 1, the crossing in fig. 2 is characterized by small mass loading with a well identified shock front.

In this work we study a number of Martian bow shock crossings by the MAVEN spacecraft within solar-zenith angle of  $\pm 30^{\circ}$ , analyzing properties of the shock with respect to the degree of mass loading processes. We study the structure of the shocks depending on magnetic and sound Mach numbers, magnetic and plasma pressure balances.



**fig. 1.** An example of cometary-like shock at Mars. From up to bottom: SWIA ion energy spectra, magnetic field magnitude, magnetic field components, STATIC ion energy spectra, STATIC ion mass spectra, solar-zenith angle.



**fig. 2.** An example of Earth-like shock at Mars. From up to bottom: SWIA ion energy spectra, magnetic field magnitude, magnetic field components, STATIC ion energy spectra, STATIC ion mass spectra, solar-zenith angle

- [1] Dong Y., Fang X., Brain D.A., McFadden J.P., Halekas J.S., Connerney J.E., Curry S.M., Harada Y., Luhmann J.G., and Jakosky B.M. 2015. Strong plume fluxes at Mars observed by MAVEN: An important planetary ion escape channel, Geophys. Res. Lett., 42, doi:10.1002/2015GL065346.
- [2] Halekas J.S. 2017. Seasonal variability of the hydrogen exosphere of Mars, J. Geophys. Res. Planets, 122, doi:10.1002/2017JE005306.
- [3] Ramstad R., Barabash S., Futaana Y., Nilsson H., Wang X.-D., and Holmstrum M. 2015. The Martian atmospheric ion escape rate dependence on solar wind and solar EUV conditions: 1. Seven years of Mars Express observations, J. Geophys. Res. Planets, 120, doi:10.1002/2015JE004816.

# SOLAR ENERGETIC PARTICLES: NUMERICAL SIMULATION METHODS FOR NOWCAST AND FORECAST

#### I.V. Sokolov, V.M. Tenishev, T.I. Gombosi

University of Michigan, 2455 Hayward Str., Ann Arbor MI 48109 USA; igorsok@umich.edu

#### **KEYWORDS**

solar energetic particles, radiation hazards, missions, manned and unmanned spacecraft

#### INTRODUCTION

Solar Energetic Particles (SEPs) are generated during the solar storms. The flare acceleration occurs suddenly during the flare stage. The protons of >GeV energy reach the Earth within an hour and produce the major radiation hazards onboard manned and unmanned missions. More gradual SEP events accompany the Coronal Mass Ejection (CMEs). The CME propagation produces the interplanetary shock wave, which is capable of accelerating the charged particles via the diffuse shock acceleration mechanism. Prediction of the SEP events and radiation hazards they produce is a major topic of the Space Weather Program. Therefore, the capability to model the SEP acceleration and transport is at the heart of the computational systems simulating the solar-terrestrial environments including those, which work in a real time.

#### **REALISTIC SOLAR WIND**

A formation of the bi-modal solar wind structure is among the topics of "Prof. K.I. Gringauz 100: Plasma in the Solar System". To simulate the SEP transport from the Sun to 1 AU, a realistic three-dimensional distribution of the interplanetary magnetic field should be known, formed by the plasma outflow from the heated Solar Corona (SC). In the UoM model for the Solar Atmosphere the only agent which both heats the SC and powers and accelerates the solar wind in the Inner Heliosphere (IH) is the Alfven wave turbulence, its dissipation and its pressure. Within the framework of this model an "ambient" solar wind produced by a quiet Sun is simulated.

#### **EVENT GENERATOR**

To simulate the dynamical processes in the interplanetary space, which is another topic of the said conference, one need to perturb the "ambient" solution and produce the CME in the simulation. To achieve this, we apply the Eruptive Event Generator using Gibson and Low configuration (EEGGL). The interactive tool EEGGL is implemented at the CCMC at NASA Goddard Space Flight Center (see http://ccmc.gsfc.nasa.gov). It allows a user to simulate the CME propagation to 1 AU as well as the shock wave production.

#### MULTIPLE MAGNETIC FIELD LINES

The last element of technology to be discussed is the Multiple Field Line Advection Model, which supports large-scale Lagrangian grid of moving with the plasma frozen in magnetic field lines. On this grid, the three-dimensional transport equation for SEPs reduces to a multitude of one-dimensional independent equations on separate magnetic field lines, with no loss in generality, thus facilitating the parallel code to solve the SEP transport.

# DETERMINING THE PHOTOELECTRON CURRENT FROM SPACECRAFT SURFACE USING ELECTRIC FIELD SENSORS DATA

#### G. Stanev<sup>1</sup>, N. Smirnova<sup>2</sup>, S. Asenovski<sup>1</sup>, L. Todorieva<sup>1</sup>, Hr. Lukarski<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Bulgarian Academy of Sciences, Sofia; gstanev@space.bas.bg

<sup>2</sup> Space Research Institute of RAS, Moscow, Russia; nsmirnova@romance.iki.rssi.ru

#### **KEYWORDS**

photoelectron current, spacecraft, electric field probe, satellite potential, spherical Langmuir probe, bias current, magnetosphere, ionosphere

In this work we consider determining the photocurrent in ionospheric-magnetospheric plasma using data from BULGARIA-1300 and INTERBALL-2 electric field sensors IESP-1 [1] and IESP-2 [2], respectively. The particular interest in the study of the photocurrent and the potential is rooted in the current widespread use of the method due to A. Pedersen for determining the concentration of ambient plasma as a function of the potential – the difference of the potentials between the spacecraft body and the probe (Usp). This method is applicable only when the probe potential is positive, and uses the fact that in this case the balance of currents depends only on the electron current and the photocurrent. Analyzing large collection of satellite data, A. Pedersen and collaborators proposed an empirical model [3] for the connection between the photocurrent density (Jph) and the satellite potential (Vs), which has been used for determining the magnetospheric plasma density from potential measurements. This method has been tested for many satellites.

Instrumentation installed on INTERBALL-2 satellite can be used to determine the photocurrent based on the comparison of the simultaneous potential measurements from the sensor IESP-2 and the electron temperature sensor KM-7 [4]. KM-7 and IESP-2 are structurally identical, since they utilize the same type of probe (spherical Langmuir probe) and measure the same quantity Usp. The probe of KM-7 is protected from UV radiation by a screen. Significant difference between the two sensors is that IESP-2 measures Usp for a fixed bias current (-72 nA / -110 nA) whereas KM-7 records current-voltage characteristics (11 measurements of Usp for different bias current values, from 153 nA to 0.15 nA). Measurements of the potential with KM-7 can be represented as values obtained from 11 virtual sensors of IESP-2 type in a shadow. Comparing the variations of Usp/KM-7 and Usp/IESP-2 allows obtaining the correct value of the bias current when measuring the potential of INTERBALL-2 satellite with respect to the plasma done by IESP-2. Data collected during ~350 orbits for ~800 hours of simultaneous work of IESP-2 and KM-7 in the course of the STO telemetry system at 8000 km altitude was studied. The analysis showed that ~75% of the potential measurements by the IESP-2 give correct values. The comparison between the simultaneous measurements of the potential of the INTERBALL-2 satellite relative to the plasma by the probe instruments IESP-2 and KM-7 permits estimating the density of the photocurrent using the method proposed by Smirnova N. and Stanev G. [5]. This estimate can be used to determine the density of the ambient plasma. Probe instruments IESP-2 and KM-7 were installed independently, but during their work it was established that they can be used as a composite instrument for measuring the parameters of the plasma in the near  $(2-3 R_E)$  magnetosphere, which allows to determine the photocurrent and to estimate the validity of the electric field measurements. The prototype of IESP-2 instrument is IESP-1, which was used in the ionosphere. IESP-1 and IESP-2 utilized spherical probes made via

#### 172 GRINGAUZ 100: PLASMAS IN THE SOLAR SYSTEM, 2018

an analogous manufacturing procedure. During measuring the electric field with IESP-1 sensor, intervals of shading of one of the probes by other parts of the satellite were observed. These can be used to determine the photocurrent from the change of the potential difference  $\Delta V$ , combined with the parameters of the plasma. Spherical probes with vitreous carbon surfaces made using original Bulgarian manufacturing technology were also installed on AKTIVNYI and APEKS satellites, and ISS.

- [1] Stanev G.A., Petrunova M.N., Teodosiev D.K. et al. An Instrument for DC and AC Electric and Magnetic Fields Measurements aboard INTERCOSMOS Bulgaria-1300 Satellite //Adv. Space Res., 1983, V. 2, pp. 43-47.
- [2] Perraut S., Roux A., Darrouzet F. et al. ULF wave measurements onboard the Interball Auroral probe //Ann. Gephys., 1998, V.16, № 9, pp. 1105-1116.
- [3] Escoubet C.P., Pedersen A., Schmidt R. et al. Density in the magnetosphere inferred from ISEE-1 spacecraft potential //JGR, 1997, V.102, pp. 17595-17609.
- [4] Afonin V., Smilauer J. Experiment KM-7 thermal plasma measurements in plasmasphere //INTERBALL mission and payload, CNES-IKI-RSA, 1995, pp. 309-312.
- [5] Smirnova N.F. and Stanev G. Determination of the Photoelectron Current Density Based on Comparison Between IESP-2 and KM-7 Probe Measurements of the Interball-2 satellite Potential Relative to Plasma // Geomagnetism and Aeronomy, 2009, V. 49, pp. 1204-1207.
- [6] Asenovski S., Smirnova N., Todorieva, L., Lukarski H., Stanev G. Determining the photocurrent of spherical probes from one-sonde-shading electric field data// J. Atmos. Sol.-Terr. Phys., Jan. 2018, Vol. 167, pp. 233-242.

# ACTIVATION OF PROMINENCE AS A CORE OF CME

#### A.V. Stepanov<sup>1</sup>, V.V. Zaitsev<sup>2</sup>

- <sup>1</sup> Pulkovo Observatory, St. Petersburg, Russia; astep44@mail.ru
- <sup>2</sup> Institute of Applied Physics, Nizhny Novgorod, Russia

#### **KEYWORDS**

Sun: prominences, electric currents, activity, CME

Activation of a solar prominence by sharp increase in electric current in the frame of the Kuperus-Raadu model is considered. The dynamics of the prominence is described in terms of the Ampere force, gravity, and the drag force. We suggest that the drag force is determined by the ion viscosity of ambient plasma. The upward Ampere force acting on the prominence increases with the electric current in the prominence, which results in the increase in the height of the prominence. As a result of the dynamical process, a new equilibrium state corresponding to the new value of the electric current is reached. The maximum height and velocity of the prominence are estimated using the nonlinear equation for prominence dynamics. A sharp increase in the electric current can be due to the magnetic Rayleigh-Taylor instability in the chromospheric footpoints of the prominence. Examples of solar active prominences are analyzed in the context of proposed model. Multiple amplification of the electric current will eventually lead to CME. Two-stage eruption of the prominences is also discussed.

# INTERPLANETARY EFFECTS ON COMETARY PLASMA BOUNDARIES

#### M. Tatrallyay<sup>1</sup>, Z. Nemeth<sup>1</sup>, A. Timar<sup>1</sup>, M.I. Verigin<sup>2</sup>, I. Apathy<sup>3</sup>

- <sup>1</sup> MTA Wigner Research Centre for Physics,1525 Budapest P.O. Box 49, Hungary; tatrallyay.mariella@wigner.mta.hu
- <sup>2</sup> Space Research Institute of RAS, Moscow, Russia
- <sup>3</sup> MTA Centre for Energy Research, 1525 Budapest P.O. Box 49, Hungary

#### **KEYWORDS**

solar wind, cometary ion, bow shock, diamagnetic cavity, magnetic field, plasma pressure, pile-up region, 3D MHD model

#### ABSTRACT

As a result of the interaction of the solar wind with a comet, different boundaries develop in the plasma environment evolving around the nucleus near the Sun. The ambient solar wind is slowed down by picked up cometary ions and a bow shock may be formed if the production rate of neutrals escaping from the surface is high enough. Interplanetary solar wind variations strongly influence the cometary environment modifying the properties of all the boundaries from the bow shock down to the diamagnetic cavity boundary deep inside the coma.

Plasma processes in the bow shock region of comet Halley are revisited here as observed by the Suisei [1] and Giotto [2] spacecraft in 1986. When comparing these observations with interplanetary measurements of the PLASMAG instrument (PI: Prof. K.I. Gringauz) aboard the closeby Vega 1 and Vega 2 spacecraft, a possible explanation was given for the relatively big jump observed by Suisei at the bow shock. The decreasing trend of the solar wind velocity observed by Giotto upstream of the bow shock is also revisited as discussed earlier [3].

The innermost region around a comet's nucleus is the diamagnetic cavity where the interplanetary magnetic field does not penetrate. The boundary of the field free region of comet Halley was observed by Giotto at a cometocentric distance of about 4000 km [4]. While orbiting comet Churyumov-Gerasimenko, the Rosetta spacecraft crossed the boundary of the diamagnetic cavity several times between April 2015 and January 2016. According to recent investigations, the multiple crossings were caused by solar wind pressure variations: the cavity performs a breathing motion in response to the changing outer pressure. It is possible to determine quantitative relationships between the solar wind pressure and the properties of the cavity boundary [5]. Thus magnetic field measurements performed in the vicinity of the boundary of the diamagnetic cavity also provide an approximation for the solar wind pressure. Based on this relationship, solar wind pressure proxy values are determined here using magnetic field data measured by the Rosetta magnetometer. The estimated pressure values are validated applying different solar wind propagation methods [6, 7] and also the results of a 3D MHD model of the heliosphere [8].

- Mukai T., Miyake W., Teresawa T., Kitayama M., Hirao K. Plasma observation by Suisei of solar-wind interaction with comet Halley. Nature Vol. 231, 1986, P. 299-303.
- [2] Huddleston D.E, Johnstone A.D., Coates A.J. Determination of comet Halley's gas emission characteristics from mass loading of the solar wind. J. Geophys. Res. Vol. 95, A1, 1990, 21 p.

- [3] Tatrallyay M., Verigin M.I., Apathy I., Remizov A.P., Szemerey I. Interplanetary effects at the time of Susei's and Giotto's encounter with comet Halley. Cospar Colloquia Vol. 4, Pergamon Press, 1993, 45 p.
- [4] Neubauer F.M. et al. First results from the Giotto magnetometer experiment at comet Halley. Nature Vol. 231, 1986, P. 352-355.
- [5] Cravens T.E. The physics of the cometary contact surface. Proc. 20<sup>th</sup> ESLAB Symposium on the Exploration of comet Halley, ESA SP-250, 1986, p. 241.
- [6] Opitz A. et al. Temporal evolution of the solar wind bulk velocity at solar minimum by correlating the STEREO A and B PLASTIC measurements. Solar Physics, Vol. 256, 2009, p. 365, doi: 10.1007/s11207-008-9304-7.
- [7] Zieger B., Hansen K.C. Statistical validation of a solar wind propagation model from 1 to 10 AU, J. Geophys. Res. Vol. 113, A08107, 2008, doi: 10.1029/2008JA013046.
- [8] Pizzo V.G. et al. Wang-Sheeley-Arge-Enlil cone model transitions to operations, Space Weather Vol. 9, S03004, 2011, doi: 10.1029/2011SW000663.

# FLUID-PARTICLE MODEL FOR INTERACTION OF THE SOLAR WIND WITH LOCAL INTERSTELLAR MEDIUM

#### V. Tenishev<sup>1</sup>, I. Sokolov<sup>1</sup>, A. Michael<sup>2</sup>, M. Opher<sup>2</sup>, T. Gombosi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Univeristy of Michigan, 2455 Hayward St., Ann Arbor, MI 48109, USA

<sup>2</sup> Boston University, 725 Commonwealth Ave, Boston, MA 02215, USA

#### **KEYWORDS**

outer heliosphere, pick-up ions, fluid-particle model, turbulence, particle transport

### INTRODUCTION

Energetic particles of solar and galactic origin populate the entire heliosphere and pose significant health and technological risks for aviation and spacecraft operators. Moving through the heliosphere they can be accelerated as in the case of solar energetic particles (SEP). They also can be deflected or even reflected as in the case of galactic cosmic rays (GCR). All these make understanding dynamics of the heliosphere crucially important for characterizing the near Earth's radiation environment due to SEP and GCR.

Heliosphere is a region that extends in space up to heliocentric distance of about 100 AU and is dominated by the solar-wind plasma and by the interplanetary magnetic field. Closer to the heliopause heliospheric plasma flow becomes highly turbulent, which is a result of interaction between outflowing solar wind and inflowing plasma of the local interstellar medium. Strong intermittent heliospheric turbulence has a major effect on transport of charged energetic particles in the outer heliosphere [1].

Neutral species that are present in the outer heliosphere are a source of pickup ions (PUI). At distances of about 10 AU PUI become an important factor affecting the state of the solar wind [2],[3]. Observations show that the solar wind temperature doesn't fall adiabatically as expected [4], since the interaction between PUI and solar wind affect the evolution of the solar wind temperature as well as increase the level of turbulence, thus affecting the energetic particle transport too [5].

The ultimate goal of our investigation is to develop the integral approach for describing dynamics of the heliosphere and transport of SEP and GCR toward the Earth to study the dynamics of solar wind interacting with the local interstellar medium, and to quantify the radiation environment in the near Earth's region. This work is conducted in collaboration of the University of Michigan and Boston University, and is based on a coupled approach that includes MHD modeling of the heliosphere and Monte Carlo simulating of PUI, SEP, and GCR.

Here, we present our current results of investigating dynamics of the outer heliosphere and discuss its effect on propagation of GCR into the inner heliosphere.

- Alouani-Bibi F., Le Roux J.A. Transport of Cosmic-Ray Protons in Intermittent Heliospheric Turbulence: Model and Simulations // Astrophysical Journal. 2014. V. 781, No. 2.
- [2] Isenberg P.A. Interaction of the solar wind with interstellar neutral hydrogen: Three fluid model // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 1986. V. 91(A9). P. 9965-9972.

- [3] Usmanov A.V., Goldstein M.L. A three-dimensional MHD solar wind model with pickup protons // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2006. V. 111(A7). doi:10.1029/2005JA011533.
- [4] Isenberg P.A., Smith C.W., Matthaeus W.H. Turbulent Heating of the Distant Solar Wind by Interstellar Pickup Protons // Astrophys J. 2003. V. 592. P. 564–573.
- [5] Smith C.W., Isenberg P.A. Matthaeus W.H., Richardson J.D. Turbulent Heating of the Solar Wind by Newborn Interstellar Pickup Protons // Astrophys. J. 2006. V. 638. P. 508–517.
## THE INFLUENCE OF JUPITER AND MARS ON THE PARAMETERS OF SPACE WEATHER

### V.E. Timofeev

Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy SB RAS, Yakutsk, Russia; vetimofeev@ikfia.ysn.ru

### **KEYWORDS**

Jupiter, Mars, synodical periods, Yakutia, the solar wind speed, temperature, precipitation

The influence of the Jupiter and Mars differing considerably from each other, on the solar activity is investigated. It is shown that they change the concentration of solar wind particles by 6.27 and 8.53 percent, respectively. Average values of effects in the temperature and solar wind speed in percentage are 1.97, 0.71 and 9.05, 2.42, respectively. The power spectrum as a function of periods with respect to the Wolf's numbers showed the noticeable effects corresponding to the periods of 399 and 780 days, which were considerably greater than 27-days variations. The analysis of data on the temperature and precipitation has revealed that their oscillations differ from the average values by (10.2–15.30) and (5.7–8.5), respectively.

### KONSTANTIN IOSIFOVICH GRINGAUZ: PIONEER OF SPACE PLASMA STUDIES

### M.I. Verigin

Space Research Institute of RAS, Moscow, Russia; verigin@iki.rssi.ru

### **KEYWORDS**

solar wind, ionosphere, plasmasphere, Martian and Venusian magneto-spheres, in-situ space plasma studies

### INTRODUCTION

The talk shortly presents scientific accomplishments of Professor K.I. Gringauz, who was a pioneer of in-situ space plasma studies and discovered the Earth's plasmasphere and the solar wind.

### **TOWARD SPACE STUDIES**

Konstantin losifovich Gringauz (fig. 1) was born on July 5, 1918, in Tula city, about 150 km south of Moscow. At the age of three he moved with his family (father – pharmacist, mother – housekeeper) to the Samara/Kuibyshev city on the banks of the Volga River where he attended school. On finishing school in 1935 he enrolled in the Electrophysical Faculty of the Popov Electrotechnical Institute in Leningrad. In the spring of 1941 Gringauz received his Diploma specializing in frequency modulation, then a brand new topic, and continued his work in the Radiotechnical Laboratory, which he had joined in 1940.

In the first winter of the great siege of Leningrad (1942) Gringauz was evacuated to Moscow where he received an assignment and moved to a former gramophone factory in Belowo city, Siberia. Within a few months a couple of engineers educated the personnel of this factory and organized production of small, rugged, and sensitive radio transmitters and receivers for tanks.

In the winter of 1944 Gringauz was appointed member of government Commission for studying of the effectiveness of tank radio communications under battlefield conditions. Using a short visit to Moscow on the way from Poland in 1945 he passed the entry examinations required for post-graduate studies, and, after V-J day, obtained a position in a then classified institute NII 885 where he became involved in studies of radio-wave propagation in the ionosphere. In 1947 Gringauz began to collaborate with Sergei Korolev, father of the Soviet space rocket program, and in 1948 for the first time he participated in the launching of a modified German V2 rocket (at Kapustin Yar launch site) which carried a radio sounder experiment to study the ionosphere.



**fig. 1.** K.I. Gringauz – an 'admiral' of Summer cosmophysical school, Lena river – Yakutsk, 1970

### 180 GRINGAUZ 100: PLASMAS IN THE SOLAR SYSTEM, 2018

After receiving his Ph.D. degree in 1949 Gringauz was put in charge of a laboratory for radio technology (1950). This led to a series of experiments in which phase-locked transmissions at 24 or 48 MHz and 144 MHz were used to measure the electron density  $n_e(h)$  profile in the Earth's ionosphere.

The first published measurements on 26 June, 1954 (V-1D geophysical rocket reached an altitude of only 106 km) showed clearly the presence of a sporadic *E*-layer at 102 km. A series of three measurements up to altitude of ~200 km (V-2A rocket) were made on 16 May, 25 August and 9 September, 1957, again showing sporadic *E*-layers in two last cases and also a general increase of  $n_e(h)$  toward apogee. Finally, with rockets V-5A capable of reaching 480 km altitude, the *F*-layer of the ionosphere was probed on three occasions in 1958, and it was demonstrated that, in contrast to then current ideas (fig. 2d), the electron density did not decrease rapidly above the *F*-layer maximum.

### **PIONEERING EXPERIMENTS**

In the mid 1950's Gringauz's laboratory was selected for the preparation of a plasma payload for the massive orbiter (later Sputnik 3) that would be launched by a yet not-existent rocket designed by Korolev. At the start of International Geophysical Year in 1957 the rocket was built and tested. The US was hoping to launch the world's first satellite, but progress on orbiter observatory was slow. Consequently Korolev proposed a less ambitious project: Gringauz's laboratory was selected for the construction and production of transmitter and antennae for the first Earth orbiter – 'Sputnik' in Russian. Following the launch of Sputnik 1 (fig. 3) on October 4, 1957, the 'beep. beep' of this transmitter was heard by politicians as well as radio scientists and hams around the world. Gringauz was very proud to have provided such a prominent contribution to Sputnik 1. In particular he liked to tell that he was the last to touch the Sputnik 1: "I had to do the final check to make sure the transmitter was going to work ... there was a special cover in the nose cone, so I reached inside, checked the 'beep..beep' signal and knew everything was alright... Then the cone was sealed for the last time".







**fig. 3.** Sputnik 1 with two shorter antennae for 40.002 MHz and two longer antennae for 20.005 MHz frequencies, campaigned vigorously by K.I. Gringauz

There had been some debate as to whether or not the decameter ( $f \approx 20$  MHz,  $\lambda \approx 15$  m) transmissions would be easily detectable through the ionosphere. The upper panel of fig. 4 illustrates generally correct idea that radio waves with frequencies less than the ionosphere critical frequency  $f \cos 2\varphi < f_{cr}$  will be reflected off the ionosphere. But on the basis of his radio phase experiments with geophysical rockets Gringauz was confident that inhomogeneity of the ionosphere would enable the radio signal to penetrate to the ground (lower panel of fig. 4), and his judgment was confirmed as correct, with the receiving distance being as much as 10,000 km. The transmissions continued for three weeks and were used to monitor the pressure and temperature within the orbiter.

Sputnik 3, which weighed 1327 kg, was launched on 15 May, 1958, with 12 scientific instruments aboard. A quite different type of experiment was prepared by Gringauz and his group on this occasion, namely a spherical ion trap to make in situ ion density measurements in the upper ionosphere. In all, some 10,000 retardation spectra were measured, thus supporting their previous rocket measurements of relatively high (~10<sup>5</sup> cm<sup>-3</sup>) charged particle density well above the maximum of the *F*-layer.

The ion trap technique was further developed for the first interplanetary spacecraft Luna 1 (launched on 2 January, 1959), using for the first time, a suppressing grid (fig. 5,  $\varphi_{a1} \approx -200$  V) to suppress photoelectrons. Similar grids were used afterwards in a large number of space plasma measurements being the key element of various Faraday cups and providing about two orders of magnitude reduction of the parasitic current due to photoelectrons. Additional modifications were made for Lunas 2 and 3 and Venera 1 (launched on 12 September 1959, 14 October 1959, and 1 February 1961, respectively). The outer grid voltages of four ion traps on Lunas 1 and 2 were fixed as  $\varphi_{a2}$  = +15, 0, -5, and -10 V, ranged between +25 and -19 V on Luna 3, and fixed as +50 and 0 V on Venera 1 (two traps). The ion traps of Luna 2 (fig. 6) looked in tetrahedral directions thus all four sensors could not be illuminated in the same time aboard the spacecraft rotating with uncontrolled attitude. By present-day standards these were very simple instruments indeed but they nevertheless lead to some remarkable discoveries, notably the solar wind, the plasmasphere and plasmapause, and the inner plasma sheet and magnetosheath plasmas.



**fig. 4.** Sketch prepared by K.I. Gringauz to illustrate different arguments in favor of reflection/transmission of decameter radio waves through the ionosphere

The solar wind, then termed the "solar corpuscular radiation", was directly observed in interplanetary space for the first time by Lunas 2 and 3 in 1959 and by Venera 1 in 1960. Approximately equal positive collector currents in all of four ion traps of Luna 2 (fig. 7b) permitted to evaluate total solar wind ion flux as  $2 \cdot 10^8$  cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>. The voltages chosen were such that it was not possible to measure the energy of the particles concerned. The sunward-directed ion traps of Venera 1 proved that ions were coming from the solar direction and in one case increased solar wind flux was followed by a geomagnetic storm. Measured solar wind fluxes were 2–3 orders of magnitude lower than had been considered likely on the basis of models of the behavior of comet tails and of the interplanetary medium under discussion at that time. These results were first published in 1960 and were presented at COSPAR mee-tings in Florence (1961) and Washington (1962). Table on the left summa-rizes the results



fig. 5. Schematics of ion traps with three electrodes: 1 – spacecraft surface, 2 – external grid, 3 – suppressor grid, 4 – collector. Russian 'К усилителю коллект. тока' in original publication corresponds to 'to the amplifier of the collector current'  $I_k$ 



fig. 6. Luna 2 spacecraft was the first to reach another body in the solar system. K.I Gringauz's ion traps are marked by arrows





**fig. 7.** Discovery of plasmapause (**a**) and solar wind (**b**) by Luna 2 ion traps in situ measurements. Upper envelopes of  $l_k$  with  $\varphi_{g2} = -10 \vee (1), -5 \vee (2), 0 \vee (3), +15 \vee (4),$  and lover lk envelopes with  $\varphi_{g2} = -10 \vee, -5 \vee, 0 \vee (5), +15 \vee (6)$  are presented as a functions of the altitude. Solid curves in figure (b) are the upper and lower envelopes of  $l_k$  with  $\varphi_{g2} = -10 \vee, -5 \vee, 0 \vee;$  dashed line is the upper envelope of  $l_k$  with  $\varphi_{g2} = +15 \vee$ 

of initial solar wind measure-ments, confir-ming correctness of Gringauz's first observations.

The extended plasma envelope of the Earth was detected originally by Storey by means of whistler observations. The first in situ measurements in this region were made by the ion traps of Gringauz and his group in 1959 which showed the existence of a plasma with temperatures not greater than some tens of thousands of degrees at altitudes up to ~20,000 km. What was discovered was a sharp negative gradient of collector currents lk (fig. 6a) and the (inferred) ion density at about 4 Earth radii, the existence of which Gringauz, in his paper given at the 1961 COSPAR meeting, emphasized as being "beyond doubt." The existence of this boundary, now referred as the plasmapause, that bounds the cold Earth's plasma region – the plasmasphere, was soon confirmed by Carpenter, again using whistler techniques. In fact Gringauz had difficulty in convincing some of his Soviet colleagues in the validity of the observations, especially later when the U.S. satellite Explorer 12 showed no such effect; however, it was clear that the instrument concerned in this case was not functioning properly (due to its sensitivity to solar UV) although this was not known in the Soviet Union at the time. More details of the history of plasmapause discovery were presented by both Gringauz and Carpenter in the monograph by J. Lemaire et al. "The Earth's Plasmasphere" (Cambridge University Press, 1998).

spacecraft	country	data	lon flux, cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
Luna 2	USSR	1959	2×10 <sup>8</sup>
Luna 3	USSR	1959	4×10 <sup>8</sup>
Venera 1	USSR	1961	1×10 <sup>9</sup>
Explorer 10	USA	1961	3×10 <sup>8</sup>
Mariner 2	USA	1962	2×10 <sup>8</sup>
Mars 1	USSR	1962–63	1×10 <sup>9</sup>
Explorer 18 (IMP 1)	USA	1963–64	1×10 <sup>9</sup>
Zond 2	USSR	1964	3×10 <sup>7</sup> –5×10 <sup>8</sup>
Mariner 4	USA	1964–65	3×10 <sup>7</sup> –2.5×10 <sup>9</sup>
Venera 3	USSR	1965–66	1.5×10 <sup>8</sup> –2×10 <sup>9</sup>
Pioneer 6	USA	1965–66	2×10 <sup>8</sup> -1×10 <sup>9</sup>

proceedings of the conference-183

### 184 GRINGAUZ 100: PLASMAS IN THE SOLAR SYSTEM, 2018

Early counter measurements in radiation belts, which had been discovered by Van Allen and by Vernov, suggested that the flux of energetic electrons in the outer radiation belt might be as high as  $10^{10}-10^{11}$  cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>. But negative collector currents with  $\phi_{g2}$  = +15 measured by Luna 2 ion traps (Fig. 6a) were less than ~ $10^{-10}$  A at altitudes less than 22,000 km. Since the traps responded to particles of any energy above that defined by the retarding potential, the electron fluxes were certainly less than 2·10<sup>7</sup> cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>, a result which was first published in 1960 and presented at the COSPAR meeting in Washington in 1962. The controversy was resolved later by Brian O'Brien and was connected with the fact that radiation belt electrons have relativistic energies rather than ~20 keV originally assumed (corresponding to expected auroral particles) and produced multiple counts in energetic particle counters.

The jon trap experiment of the Luna 2 spacecraft made also the first observations of the plasma sheet, at the time called the "third radiation belt." In the region 10–14 Earth radii in the anti-solar direction, negative currents were measured in all four traps indicating the presence of electron fluxes of the order of (2–4) 10<sup>8</sup> cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>. Since there was no corresponding response in the energetic particle detectors it was deduced that the electrons were relatively soft (< 20 keV). This result was reported at the COSPAR meeting in Florence in 1961, Similar results were reported from the Venera 1 spacecraft, which, in contrast to Luna 2, exited the magnetosphere on the sunward side. In a paper published in 1961 with I.S. Shklovskii as co-author it was noted that a bow shock in the supersonic solar wind might be the cause but that the particles seemed to be the same as those observed on the night side so that the term "third radiation belt" was appropriate. In fact we now know that two independent phenomena are involved, namely the plasma sheet on the night side of the Earth and the magnetosheath on the dayside, both being rather similar in terms of soft electron fluxes.

In recognition of his pioneering works in space plasma studies Gringauz was awarded in 1960 the Lenin Prize, then the highest in the USSR. In 1959 he moved with his group to the Radiotechnical Institute of the USSR Academy of Sciences and took a position as a head of the space research department. This was transformed in 1971 into the laboratory for interplanetary and near-planetary plasma studies of the newly organized Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences. He received a professorship in radiophysics in 1970.

### SPACE PLASMA STUDIES

In the decade 1961 to 1971 Gringauz was involved in experiments on a number of spacecraft, including the Venus missions Veneras 4 and 6, and on the first lunar orbiter Luna 10. Experiments of his group aboard Cosmos 2 (1962) orbiter provided evidence of the lack of charged particle thermodynamic equi-





librium in the Earth's ionosphere while Luna 10 (1966) experiments proved the existence of the geomagnetic tail downstream to lunar orbit. The bow shock associated with Venus was discovered by Venera 4 on October 18, 1967 (fig. 8), just one day before it was detected by Mariner 5 and confirmed in 1969 by Venera 6.

Many different ionospheric experiments were completed by Gringauz's group in the next decade aboard Cosmos 378, Intercosmos 2, 8, 10, 12, 14, 18, 19, and Cosmos 900 Earth's orbiters. Though providing global coverage, plasma measurements aboard orbiters can hardly be interpreted in terms of local ionosphere vertical profiles, especially useful for theoretical analysis. These vertical profiles of different physical properties of ionospheric plasma were measured by Gringauz's group during series of Vertical 1–5, 7, 10 geophysical rocket launches up to 1500 km altitudes. The first Venus orbiters, Veneras 9 and 10 (1975), provided a further opportunity to examine the plasma environment of the planet. The plasma and magnetic field experiments aboard Venera 9, 10 discovered the magnetotail of Venus while multiple crossings of the planetary bow shock permitted the position of this boundary to be determined in the period of solar activity minimum.

Especially interesting results were deduced from the measurements of electron plasma component by Gringauz's PL42 retarding potential analyzers in the shadow of Venus. The nighttime ionosphere of this planet was found in 1967 by Mariner 5 radio-occultation, but its source was not understood for a long time. Direct measurements of electron spectra at altitudes of 1500-2000 km revealed the existence of intense  $\sim 10^8$  cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> electron fluxes with energies exceeding several tens of eV (fig. 9a). Taking into account that these electrons can ionize neutral atoms of the nighttime atmosphere, Gringauz et al. evaluated the resultant equilibrium electron density profile  $n_e(h)$ . Correlation of the calculated  $n_{e}(h)$  profiles with results of almost simultaneous radio-occultations (fig. 9c) led them to the discovery of the ionization source of the Venusian nighttime ionosphere and pushed them to correct available models of its nighttime atmosphere (curves 'before' in fig. 9b) by about two orders of magnitude (line with dot in fig. 9b). Subsequent in situ PVO measurements confirmed both that magnetotail electrons really reach ionospheric heights, and that the planetary nighttime atmosphere is much less dense (curve 'after' in fig. 9b) than was assumed before.



**fig. 9.** Electron spectra measured by RPA above night side of Venus (**a**) and compa-rison of radio-occultation  $n_e(h)$  profiles with those ones produced by precipitating elect-rons (**b**). Dashed line with dot in fig. 9b is the corrected profile of neutral atmosphere



**fig. 10.** Martian bow shock (BS) crossings by Mars 2: **1** – 17.02.71, **2** – 08.01.72, **3** – 12.05.72; Mars 3: **4** – 15.12.71, **5** – 09.01.72, **6** – 21.01.72, **7** – 21.01.72; and Mars 5: **8** – 13.02.74, **9** – 20.02.74, **10** – 22.02.74, **11** – 24.02.74

Also in the seventies Gringauz used his chance to participate in the discovery of the Martian magnetosphere from the first Martian orbiters. The bow shock crossing was clearly seen in the data of his modulational Faraday cups (for ions) and retarding potential analyzers (for electrons). The position of this boundary as measured by Mars 2, 3 (1971) and Mars 5 (1974) is presented in fig. 10. Before these measurements Martian bow shock was touched only ones by Mariner 4 (1965). Different structures in the near-Martian plasma – magnetosheath, magnetopause, magnetotail, boundary layer, were generally



fig. 11. Spacecraft trajectories near Halley's comet and locations of the mass-loading bow shock (crosses), cometopause (circles), cometosheath, and cometary plasma region as identified from plasma in-situ observations



**fig. 12.** Neutral gas density profile determined from Vega 1 Plasmag measurements on March 6, 1986. Dashed line – theoretical model

described after Mars 2, 3, 5 measurements. All these structures were found later in Phobos 2 (1989) plasma and magnetic field measurements, though a proper understanding of physical processes prevailing in the formation of the Martian magnetosphere (and, hence, terminology used for its description) is not well established.

Perhaps the crowning achievement of Gringauz's career was the design and implementation of the robust and self-confident Plasmag experimental package on the two Soviet probes to Halley's comet, Vega 1, 2 (1986, fig. 11). The ram-direction Faraday cup of this package was used to determine the neutral gas density profile  $n_n(r)$  of cometary coma. Those first in situ measurements in fig. 12 were presented to the scientific community meeting in IKI on the day after the Vega 1 flyby and are the most distant neutral gas measurements in all cometary missions. These observations, together with revealed solar wind deceleration due to pick-up of ions of cometary origin, were shown to be consistent with a total outflow of  $\approx 1.3 \cdot 10^{30}$  molecules/s  $\approx 40$  tons/s. Though the existence of the unique cometary mass-loading bow



**fig. 13.** Discovery of the 'cometopause' (left panel) and first in situ measurements of cometary ion energy/charge (mass/charge) spectra at cometocentric distance of (1.4–1.7)×10<sup>4</sup> km (right panel)



fig. 14. Spectra of ions as measured by TAUS on March 16, 1989 and magnetic field value B and  $B_x$  component by MAGMA measurements.

shock (fig. 11) was predicted by the theory, it was observed for the first time by the Plasmag instrument. Closer to the cometary nucleus, in the cometosheath, an unpredicted distinct transition to slow-moving dense plasma was observed (the cometopause, fig. 11, 13), within which in the cometary plasma region it was possible to obtain a mass spectrum on the assumption that the ions were singly charged (fig. 13, right panel). The ions detected by the ram direction electrostatic analyzer of Plasmag package were atomic and molecular hydrogen, carbon, the water, carbon monoxide and carbon dioxide groups and heavier species with masses around 60, 70 and 85. By exploiting the solar and ram direction Faraday cups, evidence for magnetic reconnection and plasma acceleration was found in the vicinity of a field reversal.

In 1986, following the success of the Vega missions, Gringauz was awarded the State Prize of the USSR in recognition of his scientific achievements. In 1988 he received the COSPAR Award for outstanding contributions to space research made during his 40 years involvement in the field.

The last space experiments TAUS, HARP, and SLED in which Gringauz actively participated (during the Phobos 2 mission) led also to a number of new findings. An analysis of electron spectra measured by HARP in the plasmasheet and magnetotail lobes led to the conclusion that these electrons can be considered as the source of the ionization in Martian nighttime atmosphere. In addition to the plasma structures revealed by Mars 2, 3, 5 orbiters the plasma sheet in the Martian magnetotail was discovered by the TAUS team (fig. 14). The observations demonstrated that the plasma sheet in the Martian magnetotail surrounded the magnetic neutral sheet, similar to the plasma sheet in the geomagnetic tail. However in contrast to the case of the Earth the Martian plasma sheet mainly consisted of planetary heavy ions (m/q>3). 2-D ion spectra measured by TAUS demonstrated a supersonic, highly anisotropic ion distribution function in this region. Detailed statistical considerations permitted an evaluation of the loss rate of planetary oxygen through the plasmasheet as ~150 g s<sup>-1</sup>. TAUS measurements also revealed the deceleration of the solar wind upstream of the Martian bow shock. An analysis of this deceleration permitted a determination of the height profile of the planetary neutral gas corona and of the upper limit of the Martian atmosphere loss rate as < 2.5 kg s<sup>-1</sup>. If this rate were permanent, the present planetary atmosphere would be dissipated in  $\sim 3 \times 10^8$  years and, therefore, loss of the neutral gas through the corona is important in the evolution of the Martian atmosphere.

### **CONCLUDING REMARKS:**

Konstantin Gringauz collaborated widely in his scientific activity. Most of the sensors for the experiments of his group were developed, produced, and tested together with the Moscow Institute for Vacuum Technology. Electronics for space experiments were built originally in-house and than for the Prognoz, Mars 2, 3, 5, Venera 9, 10 missions together with the Odessa Politechnical Institute. International collaboration began with the Intercosmos 2 orbiter with scientists from East Germany, Bulgaria, and Csehoslovakia participating originally on the data analysis stage. These countries together with Poland and Hungary were involved afterward in the space hardware development for other Intercosmos and Vertical missions. In the course of preparations for the Vega mission Gringauz developed a close relationship with members of the Max-Planck Institut für Aeronomie in Lindau and later, in connection with the Phobos missions, also with scientists from Ireland, Austria, Belgium and USA.

Konstantin Gringauz was active in COSPAR from 1961 onwards and was most recently co-Chairman of Interdisciplinary Space Plasma Scientific Commission. For a long time he was a Chairman of the Solar Wind and Interplanetary Magnetic Field section of IAGA. He was an initiator and a Chairman of the Solar Wind and Interplanetary Magnetic Field Section of the Russian Geophysical Committee, and a member of the Editorial Board of the international scientific magazine II Nuovo Cimento. He was elected as a Member of the International Academy of Astronautics and participated in the activity of the Russian Association of the Members of this Academy.



fig. 15. Martian crater Gringauz is centered at Lat = -20.67°, Lon = 324.3°

Konstantin Gringauz was an intense, enthusiastic and well-read person, with interests in music, art, literature, history and especially politics. It is characteristic of him that in 1988, during the gradual reforms that were taking place in the Soviet Union, he published a telling criticism of the Soviet space program in a leading newspaper 'Pravda', the first occasion on which this had happened. He maintained his scientific activities to the very end of his life as co-principal investigator of an experiment being prepared for the scheduled Mars-96 mission. His death occurred on 10 June, 1993, as a result of a heart attack, shortly before his 75<sup>th</sup> birthday.

On July 1, 2013 International Astro-nomical Union gave 'Gringauz' name to one of the Martian craters with 71 km diameter (fig. 15, https://planetarynames. wr.usgs.gov/Feature/15150?\_\_fsk=-954671006)

### TOTAL OXYGEN LOSS FROM MARS AND HOW TO EVALUATE IT BY IN-SITU MEASUREMENTS

### M.I. Verigin, G.A. Kotova

Space Research Institute of RAS, Moscow, Russia; verigin@iki.rssi.ru

### **KEYWORDS**

planetary atmosphere dissipation, Martian ion loss rate, possibility of total atmosphere loss rate evaluation by in-situ ion measurements

### INTRODUCTION

The process of oxygen non thermal loss from Mars is well known for many decades (see, e.g., [1,2]). About 64% of O atoms, originating at exobase due to dissociative recombination of  $O_2^+$  ions, have sufficient energy to escape planetary gravity and to produce hot oxygen corona. O atoms are finally ionized and the resulting O<sup>+</sup> ions are swept away by the solar wind. O<sup>+</sup> ions in the vicinity of Mars were revealed in 1989 by mass-spectrometric plasma measurements onboard PHOBOS 2 orbiter [3,4]. Earlier MARS 5 ion measurements [5,6] had no mass-spectrometric possibilities and could not pretend for detection of Martian heavy ions, however, these measurements was explained by the presence of protons only [7], though the authors of the data disagreed [8] and are still in disagreement [9] with the explanation proposed.

In-situ POBOS 2 measurements as well as subsequent ion measurements by MEX orbiter (see, e.g., [10]) provide possibility to evaluate a part of the planetary oxygen lost in the close vicinity of the planet at heights less than several thousands of km from Mars. Similar restrictions are usual in a large number of papers modeling loss of ions of Martian origin. On the other hand, the specific scale of Martian hot oxygen corona is several millions of km, and it is at these distances most of the oxygen of planetary origin is ionized and picked up by the solar wind [11]. The mass loading of solar wind flow by O<sup>+</sup> ions results in solar wind deceleration up to ~100 km/s upstream of the planetary bow shock, thus providing possibility to evaluate upper limit of hot oxygen corona density [11, 12].

First direct observations of O atoms of Martian corona started just in 2014 onboard MAVEN orbiter by IUVS experiment [13]. In the present talk these initial observations will be compared with the results of PHOBOS 2 coronal density deductions. Possibility of direct in-situ measurements of Martian ion losses via oxygen corona will also be discussed.

### DATA ANALYSIS

Fig. 1 a,b,c presents altitude brightness profiles of Martian coronal oxygen taken from [13], with  $3\sigma$  uncertainties in gray. We scanned fig. 1c data, approximating the dayside global average profile (points in fig. 1d), and fitted it by the simple relation (1) that describes escaping (second term) and bounded parts (first and third terms) of total coronal oxygen brightness profile:

 $Ra(p) = a \cdot e^{(1.2-p)/h} + b/p + c/p^4$ ,

(1)

where *p* is IUVS impact parameter in planetary radii, *a*~15.4, *b*~3.5, *c*~57 and *h*~0.03. Then using inverse Abel transform one may evaluate the oxygen corona number density  $n_o(r)$  as a function of planetocentric radius *r*.



fig. 1. Brightness profiles as measured by IUVS spectro-meter aboard MAVEN (a,b,c) and results of its fitting (d)



fig. 2. O density profiles from IUVS and TAUS observations (a) and solar activity variations in 21–24 Solar cycles (b)

$$n_{\rm O}(r) = -\frac{10^6}{\pi g} \int_{r}^{\infty} \frac{dRa(p)}{dp} \cdot \frac{dp}{\sqrt{p^2 + r^2}} \approx 163 \cdot \left(a\sqrt{\frac{\pi}{2rh}}e^{(1.2-p)h} + \frac{b}{r^2} + \frac{3c\pi}{2r^5}\right), \tag{2}$$

with a factor  $g \approx 5.76 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$  appropriate for the oxygen line 1304 Å at time when the data were collected [13]. Planetocentric distance *r* and scaleheight *h* are in planetary radii in the above relations.

Oxygen number density as deduced from relation (2) is plotted by heavy blue IUVS line in Fig. 2a. This density is compared with upper limit of the weighted oxygen and hydrogen number densities, evaluated in [12] using solar wind preshock deceleration (heavy red TAUS line):

$$n_{\rm O}(r) + n_{\rm H}(r) \, \frac{m_{\rm H} \, \tau_{\rm O}}{m_{\rm O} \, \tau_{\rm H}} \approx \frac{2700}{r^2} \, \cdot \left( \, 1 + \frac{15.4}{r^3} \, \right), \tag{3}$$

where  $m_{H}$ ,  $m_{O}$  and  $\tau_{H}$ ,  $\tau_{O}$  are hydrogen and oxygen masses and ionization timescales, respectively. Dashed red line in fig. 2a is ~0.7 of relation (3) that represents  $m_{O}(r)$  addendum only [12]. It is easy to observe good correspondence of MAVEN IUVS results with previous deductions from TAUS experiment aboard PHOBOS 2 Martian orbiter. The correspondence is even better if one take into account higher solar activity (twice sunspot number) during POBOS 2 observations as compared with MAVEN observational period (fig. 2b).



fig. 3. Optional design of ion spectrometer for measuring oxygen loss by Mars

### DISCUSSION AND POSSIBILITY OF MARTIAN OXYGEN LOSS RATE MEASUREMENTS BY IN-SITU ION INSTRUMENT

In order to deduce oxygen loss rate from both approaches we should reliably determine radial distribution of escaping part of corona up to several millions of km. Present UV instruments doubtfully can measure oxygen density profile above several thousands of km both from its sensitivity and orbital limitations. At 4000 km height escaping O constitutes minor part of oxygen corona (see Fig. 1d). On the other hand, by specially designed ion spectrometer we can measure picked-up O<sup>+</sup> ions very far from Mars. At such distances, originating from corona picked up ions have complicated, anisotropic, ring/bi-shell velocity distributions. The instrument for measurements of these ions must have energy range above 60 keV, must have sharp energy and fine angular resolutions and must have possibility to separate heavy ions from protons. Optional design of such an instrument is presented in Fig. 3. Accompanying measurements of interplanetary magnetic field is highly welcomed. Both measurements should start from several millions of km from Mars while spacecraft approaching planet

### REFERENCES

- [1] McElroy M.B. Mars: An evolving atmosphere, Science, 175, 433, 1972.
- [2] Krasnopolsky V.A. Photochemistry of the atmospheres of Mars and Venus, Springer-Verlag, Berlin, 1986.
- [3] Rosenbauer H. et al. Nature, 341, 612, 1989.
- [4] Lundin R. et al. Nature, 341, 609, 1989.
- [5] Vaisberg O.L. in: Physics of Solar Planetary Environments, 2, AGU publ., Boulder, Colorado, 854, 1976.
- [6] Vaisberg O., and Smirnov V. Adv. Space Res., 6, #1, 301, 1986.
- [7] Bezrukikh V.V., Verigin M.I., Shutte N.M. Kosmich. Issled. 6, 583, 1978.
- [8] Vaisberg O.L., and Smirnov V.N. Kosmich. Issled. 16, 588, 1978.
- [9] Vaisberg O.L. Planet. & Space Sci., 119, 69, 2015.
- [10] Dubinin E. et al. Space Sci. Rev., 126, 209, 2006.
- [11] Verigin M.I. et al. J. Geophys. Res., 96, #A11, 19315, 1991.
- [12] Kotova G.A. et. al. J. Geophys. Res., 102, #A2, 2165, 1997.
- [13] Deighan J. et al. Geophys. Res. Lett., 42, doi:10.1002/2015GL065487, 2015.

### EMISSION OF ELECTROMAGNETIC WAVES FROM AN INHOMOGENEOUS PLASMA WITH LANGMUIR TURBULENCE

### A.S. Volokitin<sup>1,2</sup>, C. Krafft<sup>3</sup>

<sup>1</sup> IZMIRAN, Troitsk, 142190, Moscow, RUSSIA

- <sup>2</sup> Space Research Institute (IKI) 117997, 84/32 Profsoyuznaya Str., Moscow, Russia
- <sup>3</sup> Laboratoire de Physique des Plasmas, Ecole Polytechnique, 91128 Palaiseau Cedex, France, Université Paris Sud, 91405 Orsay Cedex, France

### **KEYWORDS**

emission, radiobursts, turbulence, Langmuir waves

### INTRODUCTION

In the solar wind radiobursts, Langmuir turbulence generates electromagnetic waves at the fundamental plasma frequency  $\omega_{\rm p}$  due to the transformation of Langmuir waves on the ambient density fluctuations. The process can be either a linear wave transformation on the plasma inhomogeneities or a fusion of Langmuir waves with ion-acoustic oscillations. If sufficiently intense and long-wave density fluctuations exist in the plasma, the first mechanism may be more efficient than the second one. In this case, the nature of the low-frequency oscillations is not important but only their spectrum, so that ion-acoustic oscillations can be considered. We confine ourselves to low-intensity Langmuir waves which, owing to the smallness of their high frequency pressure, do not affect the plasma density oscillations, especially in the long-wave region.

The approach used to calculate the radiation intensity at  $\omega_p$  is the following (see also [1]). Knowing the Langmuir waves' fields and the distribution of the plasma density oscillations in a given plasma volume, one determines the distribution of the high-frequency currents therein, that is, the source of the radiation. Further, using retarded potentials, one calculates the flux of the Poynting vector through the surface surrounding the source volume [2]. However, it is necessary to take into account the dispersion of the electromagnetic waves in the plasma.

The distributions of the plasma density and of the Langmuir fields necessary for calculating the intensity of the electromagnetic radiation are obtained on the basis of a numerical solution of non-selfconsistent Zakharov equations in a two-dimensional volume with periodic boundary conditions that describes the plasma medium with external density oscillations of characteristic lengths considerably exceeding the Langmuir wavelengths. The simulation results allow to calculate the spatial distribution of the electric currents with frequencies close to  $\omega_{\rm p}$ . On this basis, the radiation efficiency at the fundamental harmonic  $\omega_{\rm p}$  is determined as a function of the level of the Langmuir turbulence and of the characteristics of the long-wavelength plasma density fluctuations.

The solar wind plasma is characterized by density fluctuations  $|\delta n/n| \ge 1-3\%$  of rather high level which have spatial scales much larger than the wavelengths of the Langmuir waves excited by electron beams during radio bursts of type III. In the framework of a 1D analysis, the influence of such fluctuations on the beam relaxation and the Langmuir spectrum turned out to be very significant [3]. In a real 3D situation, an additional effect affects the wave spectrum, i.e. the angular wave scattering on the density fluctuations and the wave diffusion in the k-space. This effect is also important in laboratory plasmas where relativistic electron beams can relax [4]. A mechanism of broadening of

### 194 GRINGAUZ 100: PLASMAS IN THE SOLAR SYSTEM, 2018

the wave spectrum in a inhomogeneous plasma is proposed in [4], where the diffusion of the wave spectrum in the k-space occurs as a result of the resonance scattering of waves by density fluctuations. However, if the frequency of these fluctuations is small, the diffusion occurs mainly along the wave vectors' angles and is slow.

Another approach to study wave diffusion is to consider the motion of Langmuir wave quanta as quasi-particles in a field whose potential depends on the coordinates in accordance with the plasma frequency variations determined by the density fluctuations. In our case, the dynamics of this field is given by the evolution of the sound turbulence and has a random character. One can expect that some quanta remain for a long time trapped in the potential well. Other quanta diffuse in the k-space due to scattering at small angles if a resonance condition is satisfied. Other ones are not captured but perform random walks with frequent reflections and deflections on the density humps and wells. One can find a power-law dependence  $D_{kk} \sim (\delta k)^2 / \tau \sim \Delta n$  of the diffusion coefficient  $D_{kk}$  in the k-space on the density fluctuations intensity  $\Delta n = <(\delta n/n)2>1/2$ . Random walks of quanta in the 2D and 3D cases can lead to the formation of a caustic grid, similar to the propagation of light in a randomly inhomogeneous plasma [5].

This picture is confirmed owing to the numerical solution of non-selfconsistent Zakharov equations in a 2D plasma with external density oscillations of lengths much larger than the Langmuir wavelengths. The dimensions of the modeling area reach several tens of thousands of Debye lengths  $\lambda_D$ . Initially the density fluctuations (Langmuir waves) are described by a Gaussian packet of waves with random phases and characteristic lengths around  $200-500\lambda_D$  (wave vectors around  $k\lambda_D=0.01-0.1$ ). The growth rates of the average squares of the parallel and perpendicular wave vectors calculated by the simulations are in agreement with the estimates obtained but differ significantly from those for resonant diffusion [4].

### REFERENCES

- [1] Galeev A.A., Krasnoselskikh V.V. JETP Letters, 24 1976, 558-561.
- [2] Landau L.D. & Lifshitz E.M. The classical theory of fields, Pergamon Press, 1975.
- [3] Krafft C., Volokitin A., Krasnoselskikh V. The Astrophysical Journal, 778 2013, 111-122.
- [4] Nishikawa K., Ryutov D.D. J. Phys. Soc. Jpn., 41 1976, 1757-1765.
- [5] Klyatskin V.I. Waves in random media, 3(2) 1993, 93-100.

### WAVE FOCUSING IN PLASMA WITH SMALL-SCALE FLUCTUATIONS OF DENSITY

### A.S. Volokitin<sup>1,2</sup>, B. Atamaniuk<sup>3</sup>

- <sup>1</sup> IZMIRAN, Troitsk, Moscow, Russia
- <sup>2</sup> Space Research Institute of RAS, Moscow, Russia

<sup>3</sup> Centrum Badan Kosmicznych PAN, ul. Bartycka 18A, 02-716 Warszawa, Poland

### **KEYWORDS**

plasma waves, propagation, turbulence, striation

### INTRODUCTION

In the ionospheric plasma, density fluctuations are sometimes observed, strongly elongated along the magnetic field. Small-scale filamentation of plasma density can develop as a result of instability of longitudinal electric currents [1] or filamentational instability of waves of cyclotron waves in the ionosphere [2]. The presence of such plasma inhomogeneities can affect the properties of wave propagation, the transverse wavelength  $\lambda_{\perp}$  of which significantly exceeds the characteristic filamentation dimension of the inhomogeneity. In particular, the plasma region filled with small-scale inhomogeneities can acquire lens properties and lead to wave focusing. This phenomenon is considered for the example of the evolution of a Langmuir wave with  $\lambda_{\perp}$  in a plasma in which there are small-scale density perturbations concentrated in a region with characteristic size L> $\lambda_{\perp}$ . Under the assumption that the amplitudes of density fluctuations  $\delta n/n <<1$  are small, the effective permittivity of a finely inhomogeneous plasma is calculated. The one-dimensional numerical simulation based on Zakharov's equations demonstrates the focusing of a wide wave packet of Langmuir waves in a region with filamentation of the plasma density, properties of wave propagation, the transverse wavelength  $\lambda_{\perp}$ of which significantly exceeds the characteristic filamentation dimension of the inhomogeneity.

Focusing (or defocusing) of a wave in a region with plasma filamentation is of a general nature, as illustrated by considering the propagation of an electromagnetic wave of the whistler type in a plasma containing quasistatic density inhomogeneities. Analogously to the case of a Langmuir wave, nonlinear corrections to the dielectric tensor are calculated taking into account the presence of small-scale density fluctuations elongated along the magnetic field. Thus, the plasma region filled with small-scale fluctuations can be regarded as an ordinary large-scale inhomogeneity of the plasma, which acts as a date.

The work was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research, project No. 16-52-16010 NTSNIL\_a.

### REFERENCES

- [1] Galperin Yu., Zelenyi L., Kuznetsova M. Cosm. Res., XXIV, pp. 865-874, 1986
- [2] Stenflo L., Shukla P.K. J.Geophysical Research: Space Physics, 1988, 93, 4115-4117 p.

### MARTIAN AND LUNAR STUDIES IN THE RUSSIAN SPACE PROGRAM

### L.M. Zelenyi

Space Research Institute of RAS, Moscow, Russia; Izelenyi@iki.rssi.ru

### INTRODUCTION

Investigations of our Solar system as a home for Humanity, plays one of primary roles in future plans of Russian Space Agency and Russian Academy of Sciences for the next ten years. These studies include a number of questions of a primary scientific importance but also are considered as a prelude to exploration of the Solar System.

The major line of Russian planetary studies is devoted to investigations of the Moon and Mars.

### MARTIAN STUDIES PROGRAM

Currently Russia together with European Space Agency are working on the EXOMARS program, which is devoted to the search of the extinct (or even present) primitive life on Mars. This activity was motivated both by an earlier findings of significant amount of subsurface water in certain Martian regions and recent discovery of the methane eruptions to the Martian atmosphere.

First mission of this program – TRACE GAS ORBITER, launched from Baikonur on March 2016, is already inserted to the Martian orbit and right now is accomplishing slow aerobraking maneuvers.

The second part of this program will start at 2020 when (again from BAIKONUR) will be launched Russian landing platform carrying European rover Pasteur with a comprehensive suite of instruments including a sophisticated drill. After rover will egress, the surface platform will start its own science mission as a stationary scientific station to characterize the surface environment including climate monitoring on long time scale, atmosphere chemistry, distribution of subsurface water and dosimetry.

### LUNAR STUDIES PROGRAM

Russian Lunar program includes several landers (LUNA-25, LUNA-27 and LUNA-28) to explore south polar regions of the Moon with their permafrost deposits and one orbiter (LUNA-26) to investigate space plasma in Lunar vicinity.

The main scientific tasks of Lunar program will be the study of mineralogical, chemical, elemental and isotopic content of regolith and search for a volatiles in regolith of polar areas; investigation of plasma, neutral and dust exosphere, and the study of interaction of space environment with Lunar surface at poles. Inner structure of the Moon will be also studied by seismic, radio and laser ranging methods.

**Future plans** that are more distant include the mission to **Venus** and stereo investigations of the **Sun** from close approach.

# информация / information

# Martian Crater Gringauz

# ГРИНГАУ3100GRINGAUZ

### INFORMATION

address: SPACE RESEARH INSTITUTE (IKI) Profsoyuznaya street 84/32 post code 117997 metro station: Kaluzhskaya Moscow, Russia





### ИКИ РАН

площадь академика Келдыша метро «Калужская», первый вагон из центра, по тоннелю – прямо, по второму поперечному тоннелю – направо, выход на площадь, далее по стрелкам на схеме

### **IKI RAS**

You should get off at "Kalyzhskaya" metro station using the southern exit. After leaving a station lobby through glass doors you should go straight to the end of the tunnel, then take right and use the stairs to get to the surface. From this point you may follow either arrow on this map

### СХЕМА МОСКОВСКОГО МЕТРОПОЛИТЕНА MOSCOW METRO MAP

4 DB Advances Concession			
<u><u><u></u><u></u><u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u><u></u></u></u></u>	Алтуфьево	Медведково	
0 0	Бибирево	Бабушкинская	
азт + С Планерная азт + С Речной вокзал Изметтаря авт + С Речной вокзал	отрадное	- Свиблово	
Сходненская Водный стадион Vodry Stadow As	Окоужная Владыкино Ботанический	Ботанический сад	
Тушинская зо вальногу ТизМенкуу 8-2 Лискоборы Спротоку Соронания	Contraction to an and a	Residence	
Пятницкое	Фонвизинская в починости	Филона Белокаменная а	Шёлковская
Wooce & Schelenstyle	Тимирязевская : Водету: Водету:	Бульвар Рокоссовско	ro
Митино в выва боло бо	сполучинскихи войстаникихи Фрутырская в Футырская в Витыровская в Витыровская в	Алексеевская	Первомайская
BOJOKCOJAMCKAR & 20 Televalametrys	Савёловская Достоевская	Рижская Черкизовская Олокомотив	*
Мякинино Мухитика Михитика Мухитика Михитика Михитика Мухитика Мухитика Мухитика Ми	Про	Спект Мира	A. Kanayteedaye
Стротино в в Строне Стр	Менделеевская	Сокольники сокольники красносельская	Партизанская
ADMARTCKOE	Ответствии совется сове совется совется со	хая Комсомольская	Измайлово А
A Xopouleso	аяковская цветной Сретенси бульва	IP Voscular Bonors	Соколиная 8
Кунцевская в.э. Хороцевская Кунцевская в.э.	бульвар тиренения вания Тургеневская	Чистые пруды	ская ская новокосино на
Верикана Баррикадна	я Пушкинская Кузнецкий Мост	Спатуя Руда	Перово
Филёвский Составится и Краснопресни Краснопресни Краснопресни	тверская Чеховская	Chalterships Record and an	ссе Энтузиастов
Петерикана Станование Стано	изация Аландара Охотный Китай-гол	Ави	на н
AS Respect	Арбатская Ряд Театральная	Римская с Ллощадь	Corneys
Lehrp (MUK) AenoBoli Lehrp Andreas Andreas Andreas	Пл. Революции	sched Revelyutsi	Андроновка в я
Вагратионовская венет венет во ворошне венет в ворошение венет в ворошение в ворош	Children Card Descard and Card	Таганская	Нижегородская
NYTY308CKas	TKINHCKAR	окузнецкая Марксистская	Новохохловская
Kynstypes to op	откількаум Третьяковская Бесуцаянская	Andetarskept Apponetapce	ая
Славянский Парк В Ставлянския Солавянския Солавянский Спарк	- Полянка	Крестьянская Застава ктутуальната Талана Волго	градский проспект
Saryandy tuber Perk tobedy Chop Tuberan Chop Tuberan Chop tuber	Добрынинская	елецкая	Текстильщики в
Мизикун Лукники в Шаб	оловская Серпуховская		5
Ломоносовский проспект информации - Воробоевы горы Укладууну Сату	Argalia publicanistika	Дубровка Угрешская в	Кузьминки
Раменки Университет Ленинский	= Tyneckas a	MOSK <sup>th</sup> Detroits	= Рязанский
Dpocnext	ИНА В	озаводская	Rystansky Prospekt
Вернадского Учерни на Акалеминие	Крымская верхние взил	Kathathanskaya	
ала на вого-Западная Профскоза	Haratuncean D	HORADKA	
о Тропарёво к Новые Чері	Марастискира Техник Емушки = Нагорная Кол	еринк в Волжская мелокара	проспект & Laterative Respect
тератия воде Снижний	нахимовский конт	лискира Люблино skaya	- Жулебино в
Беляево	Bapwaeckan R	Братиславская	Zhulattine
Саларьево в Коньково	Каковская Севастопольская	темировская Марьино	Котельники в
- Тё́плый Ста Troby Stan	но чертановская Цар	MUNHO R	and and a
R Assessments	=Южная	хово с	R 441
•••• Орновоясе	невская	иодедовская	en lie
а Битцевский парк Лесона Военну Лек Лесона	арховая в наличино в Аннино в	Зябликово в в	Apres
Улица Старокач	аловская об Бульвар Дмитрия	Красногвардейская 6 20 Алма-Атин Вланиралериккуз	ская
В Бунинская Улица Бульвар	Улица	anger Zerstanden Antonio	
Bantinskaps Alleys Ulitia Gorcholms VillakOBA 50	Liliza Subelevskaya + Dec		

### ТОЧКИ ПИТАНИЯ ВБЛИЗИ ИКИ LUNCH POINT NEAREST IKI



- 1. ИНСТИТУТ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАН, столовая, 1-й этаж, секция A3 SPACE RESEARCH INSTITUTE OF THE RAS, Food Center, ground floor, section A3
- 2. ТЦ «КАЛУЖСКИЙ», ул. Профсоюзная, 61а, зона ресторанов, 2-й этаж "KALUZHSKIY" Market Center, Profsoyuznaya street, 61a, 2 floor
- «ПРОКАФЕ» в бизнес-центре Газпром, ул. Обручева, 23 "PROCAFE" in Business Center Gas Field, Obrucheva street, 23
- Кафе «АНДЕРСОН», ул. Обручева, 30/1 Café "ANDERSON", Obrucheva street, 30/1



