

*Ministry of Science and Higher Education  
of the Russian Federation*

Polar Geophysical Institute

PGI-26-01-146

**PHYSICS OF AURORAL PHENOMENA**

49<sup>th</sup> Annual Seminar

Abstracts

2 – 6 March 2026

Apatity  
2026

The organizing committee:

Andrey Demekhov (chair)

Andris Lubchich

Irina Despirak

Boris Gvozdevsky

Konstantin Orlov

Tatyana Popova

Pavel Setsko

Addresses:

**Apatity department**

Akademgorodok, 26a

Apatity, 184209

Murmansk region

Russia

**Murmansk department**

Khalturina str., 15

Murmansk, 183010

Russia

The editor:

A.A. Lubchich

A.A. Mochalov

<https://seminar.pgia.ru>

© Polar Geophysical Institute, 2026

## CONTENTS

### SESSION 1. GEOMAGNETIC STORMS AND SUBSTORMS

A.A. Chernyshov, S.A. Pulinets, S.I. Svertilov, D.V. Chugunin, K.G. Tsybulya, A.M. Padokhin, V.V. Bogomolov, I.V. Yashin and M.M. Mogilevsky	Preliminary Analysis Results of the Geomagnetic Event of 19–22 January 2026 from the Ionosfera-M Satellites of the Ionosond Project	15
I.V. Despirak, N.G. Kleimenova, A.A. Lubchich, L.I. Gromova	Supersubstorms in the strong magnetic storm on 10-11 October 2024	16
L.I. Gromova, N.G. Kleimenova, S.V. Gromov, L.M. Malysheva	Extreme enhancements of the eastward electrojet	17
Mostafa Hegy	Evaluating Neural Network Performance in Forecasting Key Geomagnetic Indices During Solar Cycle 25	17
G.A. Makarov	Relationships between auroral electrojets and ring current components	18
V.V. Mishin, Yu.Yu. Klibanova, R.A. Marchuk, V.E. Kapustin	Multiple substorms and ring current dynamics during and post storm	18
V.D. Nikolaeva, P.A. Klimov, N.V. Surovtsev, A.V. Artemyev, R.E.Saraev	Auroral Research with the ISS Using "UV Atmosphere" (Mini-EUSO) Telescope	19
V.A. Parkhomov, V.V. Mishin, R.A. Marchuk, Yu.V. Penskiikh, S.Yu. Khomutov	Features of Geomagnetic Disturbances in the Auroral Zone Generated by X-Ray Radiation from Chromospheric Flares with Intensities $X \Rightarrow 10$	19
Yu.V. Penskiikh, V.V. Mishin, R.A. Marchuk	Calculation of Hall and Pedersen currents using the magnetogram inversion technique during geomagnetic disturbances	20
K.G. Ratovsky, V.V. Klimenko, M.V. Klimenko, A.M. Vesnin, K.V. Beliuchenko	Comparative analysis of ionospheric responses to geomagnetic events identified by the AE-index during minimum and maximum solar activity	20
L. Raykova, V. Guineva, R. Werner, R. Bojilova	Comparative analysis of MPB events over 13-month intervals around the December solar minimums of 2008 and 2019	21
A.V. Rubtsov, V.A. Pilipenko, D. Yuan, W. Chen, I.V. Despirak, A.A. Lubchich, Ya.A. Sakharov, P.V. Setsko, A.A. Vlasov and Y. Zhu	Modeling of space weather risks for global infrastructure: project proposal	21
Ya. Sakharov, V. Selivanov, V. Bilin, V. Nikolaev	GIC excitation in the night sector at the high-latitude substation Vykhodnoy	22
I.I. Shagimuratov, I.I. Efishov, G.A. Yakimova, N.Ya. Tepenitsyna and M.V. Filatov	Occurrence Jet/ SAID in TEC variations during 20 April 2018 and 2020 disturbances	22
P.I. Shustov, V.A. Frantsuzov, A.V. Artemyev, A.A. Petrukovich	Statistical study of injection penetration into the inner magnetosphere during geomagnetic storms	23
D.G. Sibeck	Sunward Plasma Flows in the Dayside Magnetosheath	23

O.I. Yagodkina, V.B. Belakhovsky, V.G. Vorobjev, Yaqi Jin, Wojciech J. Miloch	Scintillation of GPS signals during the polar substorm	24
Yu. Yasyukevich, E. Danilchuk, A. Beletsky, E. Borvenko, A. Chernyshov, V. Fainshtein, V. Ivanova, D. Khabituev, M. Kravtsova, A. Oinats, S. Olemskoy, A. Padokhin, K. Ratovsky, V. Sdobnov, A. Vesnin, A. Yasyukevich, S. Yazev	The 12 November 2025 Ugly Duckling Geomagnetic Storm: reasons and consequences	24
A.A. Zykina, V.V. Kalegaev, N.A. Vlasova	Dynamics of relativistic electron fluxes in the outer radiation belt under the influence of a long term pressure pulse on January 8, 2018	25
К.Ж. Азра-Горская, В.В. Калегаев, Н.А. Власова, А.Г. Демехов	Роль адиабатических и неадиабатических процессов в динамике электронов во время магнитных бурь 20.12.2015 г. и 25.08.2018 г.	25
Н.А. Бархатов, С.Е. Ревунов, О.М. Бархатова, Е.А. Ревунова, А.И. Попов	Анализ геоэффективности магнитных облаков в условиях 25-го солнечного цикла, предшествующих развитию суббурь	26
В.В. Вахнина, А.А. Кувшинов, А.Н. Черненко, О.В. Федяй, Р.Н. Пудовинников	Особенности защиты высоковольтных силовых трансформаторов при повышенной геомагнитной активности	27
И.И. Ефишов, И.И. Шагимурастов, М.В. Филатов	Проявление флуктуаций навигационных сигналов, ассоциированных с полярными сияниями: событие 24 марта 2023года	28
В.Э. Капустин, В.В. Мишин, Ю.В. Пенских, С.Б. Лунюшкин	Влияние азимутальной компоненты ММП на распределение продольных токов для разных уровней геомагнитной активности и угла наклона диполя	28
В.Э. Капустин, В.В. Мишин, Ю.В. Пенских, С.Б. Лунюшкин	Влияние азимутальной компоненты ММП на распределение продольных токов для разных уровней геомагнитной активности и угла наклона диполя	28
С.И. Свертилов, И.В. Яшин, В.В. Богомоллов, А.В. Богомоллов, Н.А. Васильев, В.Е. Еремеев, А.Ф. Июдин, О.А. Марченко, И.Н. Мягкова	Вариации потоков заряженных частиц в околоземном пространстве во время гелио-геофизических событий в 2025 г. По данным наблюдений на спутниках «ИОНОСФЕРА-М»	29
Т.Е. Сыренова, С.В. Подлесный, А.Б. Белецкий, М.В. Клименко, И.С. Янковский, Р.В. Васильев	Одновременные наблюдения SAR-дуги в обсерваториях ИСЗФ СО РАН и КФ ИЗМИРАН с помощью набора оптических инструментов	29
Т.Е. Сыренова, А.В. Михалев, А.Б. Белецкий, С.В. Подлесный, Р.В. Васильев	Наблюдения SAR-дуг в средних широтах во время геомагнитных бурь 19-20 января 2026 г	30
В.Л. Халипов, А.Е. Степанов	Красные дуги высокой интенсивности при воздействии импульсов давления солнечного ветра	30

## **SESSION 2. FIELDS, CURRENTS, PARTICLES IN THE MAGNETOSPHERE**

E.E. Antonova, V.G. Vorobjev, O.I. Yagodkina, M.V. Stepanova, I.P. Kirpichev, I.L. Ovchinnikov, G.I. Antonyuk	Localization and mechanism of formation of discrete forms of auroras	32
A. A. Chibrarov, A.G. Berezutsky, Yu.P. Zakharov, I.B. Miroshnichenko, V.G. Posukh, M.A. Rumenskikh, I.F. Shaikhislamov, A.E. Ivanov, M.V. Loginov	Laboratory experiment on generating a spherical plasma cloud in a dipole magnetic field at the KI-1 facility	32
A.R. Dibaeva, V.A. Sergeev.	Characteristics of pitch-angle scattering of charged particles in the current sheet useful for remote sensing of Earth's magnetosphere from low-altitude spacecraft.	33
V.S. Ismagilov, M.S. Petrishchev, Yu.A. Kopytenko	Selection of zones of anomalous ULF geomagnetic disturbances of lithospheric origin	34
<i>V.C. Исмагилов, М.С. Петрищев, Ю.А. Копытенко</i>	<i>Выделение зон аномальных УНЧ геомагнитных возмущений литосферного происхождения</i>	34
A.R. Ivanova, V.V. Kalegaev, A.G. Demekhov, T.A. Yahnina, I.A. Mironova	Electron precipitation from the Earth's outer radiation belt: scattering mechanisms, efficiency for electrons of different energies, spectral and spatio-temporal characteristics	35
V.V. Kalegaev, K.Zh. Azra-Gorskaya, N.A. Vlasova, A.A. Zykina	Dynamics of electron fluxes in the outer radiation belt under inductive electric field variations	35
G. Kotova, D. Chugunin, A. Chernyshov, M. Mogilevsky, V. Bezrukikh	Small-scale density irregularities within the plasmasphere	36
A.S. Lavrukhin, K.B. Kaportseva, A.O. Shiryayev	Analysis of interplanetary shock associated geosynchronous magnetic field perturbations during the solar cycle 25	36
M.V. Leonenko, E.E. Grigorenko, L.M. Zelenyi	Quasi-stationary electron-scale current sheet: self-consistent structure and electron acceleration by the ambipolar electric field	36
A.N. Manina; V.V. Kalegaev; V.N. Nikolaeva; A.N. Ivanova; N.A. Vlasova	Dynamics of the high-latitude Earth's magnetosphere according to polar satellite data	37
I.P. Paramonik, A.V. Divin, A.A. Chibrarov, M.S. Rumenskikh, I.F. Shaikhislamov, V.S. Semenov	Current Systems of a Diamagnetic Cavity	37
A.S. Nikolenko, M.E. Gushchin, S.V. Korobkov, I.Yu. Zudin, K.N. Loskutov, A.V. Strikovskiy, N.A. Aidakina, I.M. Vershinin, V.V. Kochedykov, D.S. Pleshkov	Features of the expansion of plasma jets with unmagnetized ions across ambient magnetic field in laboratory experiments on the "Krot" plasma device for modeling effects of active space experiments	38
M.A. Shukhtina, V.A. Sergeev	Empirical model of energetic electron fluxes at GEO.	38
S.A. Proshin, V.V. Malakhov, A.G. Mayorov	Computation of energy- and pitch-angle-dependent drift shells shapes using particle tracing in GT package	39

A.V. Suvorova	Solar wind and geomagnetic activity conditions for energetic electron injections into $L < 1.2$	39
D.S. Tonoian, X.-J. Zhang, A.V. Artemyev	Merging of OVATION Prime and ELFIN dataset: electron precipitation within 0.1–1000 keV energy range	40
В.А. Билин, В.Н. Селиванов, Я.А. Сахаров	Разработка модели для анализа геомагнитно-индуцированных токов на основе эквивалентной схемы высоковольтной сети Мурманской области.	40
Д.С. Груздов, В.В. Калегаев, Н.А. Власова	Пространственно-временная динамика потоков электронов внешнего радиационного пояса Земли во время геомагнитных возмущений	41
Ю.А. Кропотина, А.М. Быков	Области и эффективность диффузионного ускорения протонов головной ударной волной Земли при различных направлениях межпланетного магнитного поля	41
М.С. Руменских, А.А. Чибранов, А.Г. Березуцкий, В.Г. Посух, П.А. Трушин, Ю.П. Захаров, И.Б. Мирошниченко, И.Ф. Шайхисламов	Лабораторное моделирование бесстолкновительного взаимодействия лазерной плазмы с намагниченной фоновой средой методами спектроскопии	42
Н.В. Ягова, Я.А. Сахаров, В.Н. Селиванов	Об оптимальном параметре связи между геомагнитными вариациями и геоиндуцированными токами	43
Т.А. Яхнина, А.Г. Демехов, Т.А. Попова	Сравнительные характеристики Высыпаний энергичных протонов, связанных и не связанных с высыпаниями релятивистских электронов	43
<b>SESSION 3. WAVES, WAVE-PARTICLE INTERACTION</b>		
A.V. Artemyev, P.A. Klimov, V.D. Nikolaeva, X.-J. Zhang, V. Angelopoulos, K.D. Shchelkanov	Microbursts Near the Electron Isotropy Boundary: Colocation of Curvature and Whistler-Mode Scattering	45
V.B. Belakhovsky, V.A. Pilipenko, V.N. Selivanov, Ya.A. Sakharov	A comparative analysis of the influence of geomagnetic pulsations of various frequency on the growth of GICs in power lines in the Murmansk region	46
V.B. Belakhovsky, V.A. Pilipenko	Analysis of the ionospheric source of geomagnetic Pi3 pulsations using a complex of satellite and ground-based measurements	47
A.G. Berezutsky, V.N. Tishchenko, S.S. Sharipov, I.B. Miroshnichenko, A.A. Chibrarov, I.F. Shaikhislamov	The influence of thermal $\beta$ on the structure of Alfvén waves at Alfvén-Mach $M_A=0.2$	47
V.A. Frantsuzov, A.V. Artemyev, A.A. Petrukovich	Stable dispersion analysis of an arbitrary distributed plasma system with noise	48
L.S. Marchenko, R.I. Parovik	Application of the Method of Linear Extrapolation of Dynamic Spectra of Whistlers Recorded in Kamchatka for Determining Electron Concentration in the Plasmasphere	48
G.M. Neshchetkin, P.A. Bepalov and O.N. Savina	Comparative analysis of some results of quantitative processing of high-resolution data on chorus with different dynamic spectrum structures	49

D.D. Pozdnyakova, E.N. Fedorov, V.A. Pilipenko	A model of MGD wave transmission through the ionosphere to the Earth's surface: accounting for the Hall effect and Earth's conductivity	49
P.D. Shkareva, P.A. Bessalov, O.N. Savina	Atypical QP2 ELF/VLF Emissions with Blurred Periodicity Inside the Plasmasphere	50
E.S. Smirnova	Mathematical Modeling of the Spatio-Temporal Evolution of a Surface-Induced Atmospheric Acoustic Disturbance	50
В.И. Колпак, М.М. Могилевский, М.А. Евдокимова, Д.В. Чугунин, Е.Е. Титова, А.А. Чернышов, С.Е. Андреевский, Ю.В. Шлюгаев, М.П. Жильцов, Н.В. Чернева, Е.И. Малкин	Трансформация спектра низкочастотных передатчиков при распространении в приземной плазме	51
А.В.Ларченко, А.Г. Демехов	Первые результаты статистического анализа дискретных элементов хоровых ОНЧ-излучений на основе нейросетевого детектирования	51
А.С. Никитенко, Ю.В. Федоренко	Совместный анализ аврорального хисса и ГНСС-сцинтилляций для диагностики мелкомасштабной структуры ионосферы	52
В.А. Пилипенко, Н.В. Савельева, Ю.В. Федоренко, Е.Н. Федоров, В.В. Колобов	Возбуждение искусственных УНЧ-КНЧ сигналов с использованием линии электропередачи как горизонтальной антенны в эксперименте FENICS-2024	52
Н.В. Савельева, В.А. Пилипенко, Ю.В. Федоренко, Е.Н. Федоров, В.В. Колобов	Возбуждение искусственных УНЧ-КНЧ сигналов в эксперименте FENICS-2024	53
Д.А. Стуков, Н.В. Ягова	Усиления потока субрелятивистских электронов на геостационарной орбите вне сильных геомагнитных возмущений и параметры длиннопериодных геомагнитных пульсаций	53
<b>SESSION 4. THE SUN, SOLAR WIND, COSMIC RAYS</b>		
M.A. Abunina, N.S. Shlyk	Extreme Space Weather Events in 2025-2026	55
S.M. Belov, N.S. Shlyk, M.A. Abunina	An approach to cataloging and studying interplanetary disturbances caused by stealth CMEs	55
Abbi S. Demissie, Tilaye Tadesse, Araya Asfaw, Tong Shi	Potential Field Source Surface and Non-linear Force-Free Field Extrapolation to Model Magnetic Field Structure for a Giant Solar Filament	55
A.V. Dmitriev	Geomagnetic cutoff of high-energy solar cosmic rays during strong magnetic storms	56
K.B. Kaportseva, A.A. Vakhrusheva, Y.S. Shugay, A.O. Shiryaev, A.S. Lavrukhin	Modeling the Propagation of Interplanetary Coronal Mass Ejections during the 1–3 August 2024 Event Using the Drag-Based Model	56
V.V. Malakhov, A.G. Mayorov	Parameter Sensitivity Analysis and uncertainty estimation in Magnetospheric Particle Tracing Using Flexible GT Tool.	57

E.A. Mauricev, M.B. Krainev, K.A. Didenko	Calculation of the angular distributions of cosmic ray particles in the Earth's atmosphere	58
<i>E.A. Маурчев, М.Б. Крайнев, К.А. Диденко</i>	<i>Расчет угловых распределений частиц космических лучей в атмосфере Земли</i>	58
A.I. Podgorny, I.M. Podgorny	The main magnetic lines of the pre-flare arcade, on the surface of which the current density is increased	59
D. Pulatov	Interplanetary radio emission due to CME-CME interaction	60
S.V. Roslavtsev, N.A. Vlasova, V.V. Kalegaev	Forecasting Solar proton event power using machine learning method	60
A. Shiryaev, K. Kaportseva, Yu. Shugay	Differentiation of Coronal Holes and Filaments with AIA 304Å and HMI Data	61
N.S. Shlyk, M.A. Abunina, A.V. Belov, S.M. Belov	Influence of fast ICMEs on high-energy (>2 MeV) magnetospheric electron flux	61
N.S. Shlyk, M.A. Abunina	Comparison of Geoeffective Coronal Mass Ejection Speeds in Different Catalogs	62
S.A. Siruk, V.V. Alekseev, V.A. Kuzminov, A.G. Mayorov, R.F. Yulbarisov	A service for reconstructing the atmospheric ionization component induced by galactic cosmic rays	62
E.A. Skorikova, I.A. Lagoida, A.I. Madzhidov, A.G. Mayorov, S.A. Siruk	The planned experiment for measuring cosmic rays in the Russian Arctic	63
Desislava Teneva	White light corona during the rising phase of the 11 year solar cycle	63
A.A. Vakhrusheva, Y.S. Shugay, K.B. Kaportseva, V.V. Kalegaev	Interaction of coronal mass ejection observed on 18 January 2026 with high speed stream of solar wind	64
Ю.В. Балабин, Б.Б. Гвоздевский, А.В. Германенко	Новое крупное событие: GLE77 (11.11.25)	65
Ю.В. Балабин, Б.Б. Гвоздевский, А.В. Германенко	Анализ сложного события GLE74 (11.05.24)	66
Ю.В. Балабин, Б.Б. Гвоздевский, А.В. Германенко	Аномальное Форбуш-понижение 7 сентября 2025 г.	67
Ю.В. Балабин, Б.Б. Гвоздевский, А.В. Германенко, Е.А. Михалко, А.Г. Сухарев	Крупные Форбуш-эффекты в 2025-26 г.	68
В.В. Богомолов, С.И. Свертилов, И.В. Яшин, А.В. Богомолов, Н.А. Васильев, В.Е. Еремеев, А.Ф. Июдин, И.А. Кучеренко	Наблюдения солнечных и атмосферных всплесков жесткого рентгеновского и гамма излучения с помощью приборов СГ/1 на спутниках «ИОНОСФЕРА-М»	68
И.А. Дуканов, Е.В. Юшков, Д.Д. Соколов, П.Г. Фрик	Новый метод оценки чисел Рейнольдса в плазменном потоке на примере данных спутниковой миссии PARKER SOLAR PROBE	69
М.Б. Крайнев	Закономерности Регулярного Баллонного Мониторинга космических лучей, требующие объяснения при моделировании эксперимента	70

## SESSION 5. IONOSPHERE AND UPPER ATMOSPHERE

C.M. Anoruo, P.R. Fagundes, V.G. Pillat	Evolution of Ionospheric Irregularities Over the American Sector During the May 2024 Geomagnetic Superstorm	72
V.B. Belakhovsky, A.E. Vasilyev, A.S. Kalishin, Y. Jin, V. Milosh, S.A. Dolgacheva	The impact of high-latitude ionospheric disturbances on GNSS signals during strong magnetic storms of the 25 <sup>th</sup> solar cycle based on observations in the European part of Arctic	72
K.V. Beliuchenko, M.V. Klimenko, V.V. Klimenko, I.S. Yankovskiy, I.A. Nosikov, A.V. Timchenko	Three-dimensional structure of the manifestation of the polarization jet in the electron density during the “Victory Day” May 2024 geomagnetic storm.	73
V.V. Bogomolov, A.A. Belov, A.V. Bogomolov, E.D. Voskresenskov, A.F. Iyudin, P.A. Klimov, I.A. Kucherenko, A.S. Murashov, S.I. Svertilov	Results of the first months of operation of the payload for the upper atmosphere study on the small satellite "SINP-MSU-80"	73
A.A. Budovkina, I.K. Edemskiy, R.V. Vasiliev	Comparison of nighttime horizontal wind dynamics using Fabry-Perot interferometer and HWM model data	74
<i>A.A. Будовкина, И.К. Едемский, Р.В. Васильев</i>	<i>Сравнение динамики ночного горизонтального ветра по данным интерферометра Фабри-Перо и модели HWM</i>	74
I.K. Edemskiy, A.A. Budovkina, R.V. Vasiliev, A.V. Tashchilin	Observation and modeling of ionospheric effects of the midnight temperature maximum at midlatitudes.	75
<i>И.К. Едемский, А.А. Будовкина, Р.В. Васильев, А.В. Тащилин</i>	<i>Наблюдение и моделирование ионосферных эффектов полуденного максимума температуры в средних широтах.</i>	75
Hong Gao, Jiyao Xu, Yajun Zhu	Variations of NO Emission at 5.3 $\mu\text{m}$ Observed during the Geomagnetic Storm on 24 April 2023	76
S.R. Kamaletdinov, A.V. Artemyev	Comparative Analysis of Ion and Electron Contributions to Ionospheric Ionization at Subauroral Latitudes from ELFIN-DMSP Conjunctions	76
M.V. Klimenko, V.V. Klimenko, F.S. Bessarab, K.V. Beliuchenko, K.G. Ratovsky, I.S. Yankovsky, A.V. Timchenko	Ionospheric Response to Geomagnetic Storms: Insights From GSM TIP Modeling and Ground-Based Observations at WD IZMIRAN	77
P.A. Klimov, A.A. Belov, A.S. Kirillov, A.L. Kotikov, B.V. Kozelov, A.S. Murashov, V.D. Nikolaeva, A.V. Roldugin, R.E. Saraev, K.F. Sigaeva, S.A. Sharakin, K.D. Shchelkanov, A.A. Trusov, M.Yu. Zotov	Pulsating Aurora Imaging Photometers System: selected results and plans of the project	78
S.I. Knizhin, P.E. Prodan, M.A. Zverev, D.V. Kotov, S.N. Kolesnik, V.P. Lebedev	Methods for Spatial Processing of LEO Satellite Signals in the Diagnostics of Small-Scale Ionospheric Inhomogeneities	79
E.M. Kochneva, A.D. Mironov, G.A. Bazilevskaya, V.S. Makhmutov, I.A. Mironova, E.V. Rozanov	Middle atmosphere and ionosphere responses to particle precipitation during the solar and geomagnetic disturbances of October 2003.	79

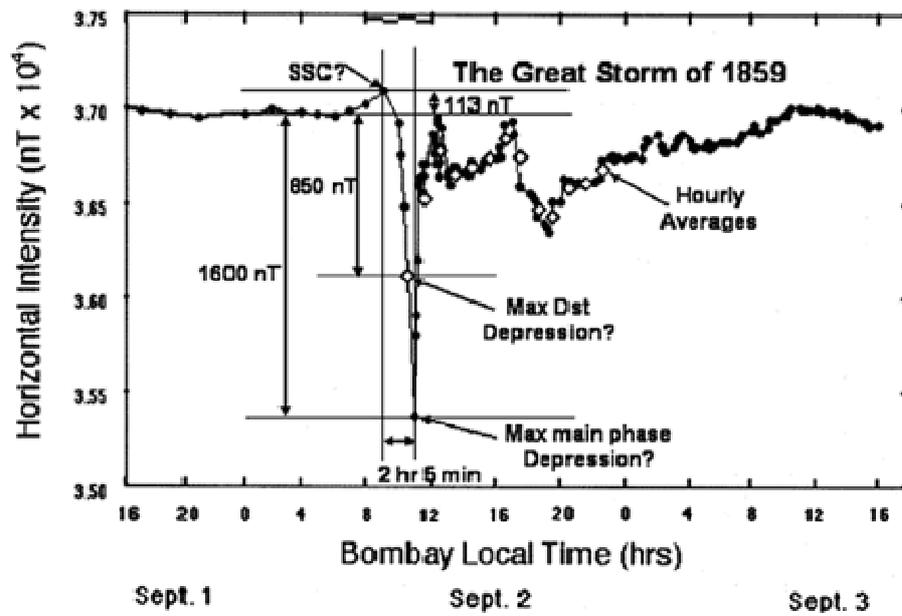
G.A. Kupriyanov, I.A. Goncharenko, I.V. Tutin	Solution to the Classification Problem of Auroral Scattering of Radar Signals Using Machine Learning Models	80
<i>Г.А. Куприянов, И.А. Гончаренко, И.В. Тютин</i>	<i>Решение задачи классификации аврорального рассеяния радиолокационных сигналов с помощью моделей машинного обучения</i>	80
V.S. Lobanova, I.A. Ryakhovsky, J.A. Korsunskaya, Y.V. Poklad, A.I. Sapunova	Estimation of the upper atmosphere ionization rate during X-class solar flares	81
<i>В.С. Лобанова, И.А. Ряховский, Ю.А. Корсунская, Ю.В. Поклад, А.И. Сапунова</i>	<i>Оценка скорости ионизации в верхних слоях атмосферы во время солнечных вспышек X-класса</i>	81
E.D. Senyagin, A.V. Timchenko, F.S. Bessarab, M.V. Klimenko	The influence of horizontal wind components on vertical drift and the formation of a sporadic E layer in the ionosphere.	82
K.D. Shchelkanov, V.D. Nikolaeva, P.A. Klimov	NEURAL NETWORK ALGORITHMS FOR DETECTING AURORAL OPTICAL MICROBURSTS	82
V.V. Surkov, D.V. Zinkin, V.A. Pilipenko	The impact of X-ray radiation from a solar flare on ionospheric parameters and the state of the Earth-ionosphere waveguide	83
A.V. Suvorova	Ionizing effect of the forbidden energetic electrons in the F-region of the low-latitude ionosphere	83
A.V. Timchenko, V.V. Nosikova., I.A. Nosikov, O.P. Borchevkina	Ionospheric features in the E-region during geomagnetic and meteorological disturbances according to vertical sounding data in Kaliningrad	84
O.S. Ugolnikov	Optical Multi-Camera Techniques for the Study of Altitude, Velocity, and Microphysics of the Clouds in Upper Atmosphere	84
O.S. Ugolnikov	Noctilucent clouds: Trends and Anomalies in 2020s	84
M.A. Volkov, A.D. Gomonov, A.V. Gurin, I.S. Maximov	Reconstruction of 2D Medium-Scale Ionospheric Structures via GNSS Phase Measurements	85
V.G. Vorobjev, O.I. Yagodkina, E.E. Antonova	Mid-latitude auroral emissions associated with proton precipitation	85
J. Wieser	UV-, VIS- and NIR-emission of 10keV electron beam excited air at 1 to 1000mbar pressure	86
В.В. Богомолов, А.А. Белов, А.В. Богомолов, Е.Д. Воскресенсков, А.Ф. Июдин, П.А. Климов, И.А. Кучеренко, А.С. Мурашов, С.И. Свертилов	Результаты первых месяцев работы полезной нагрузки для исследования верхней атмосферы на малом спутнике «НИИЯФ-МГУ-80»	86
А.Б. Белецкий, И.Д. Ткачев, С.М. Грач, И.А. Насыров, Д.А. Когогин, Р.В. Васильев, В.В. Емельянов, Ю.К. Легостаева, А.В. Шиндин	Экстремальные интенсивности свечения ионосферы, индуцированного мощным коротковолновым излучением стенда СУРА, во время развития спорадического E слоя ионосферы	87

С.М. Грач, С.А. Пулинец, А.М. Падохин, А.А. Чернышов, А.В. Шиндин, Д.А. Когогин, И.А. Насыров, А.Б. Белецкий, И.Д. Ткачев, М.А. Евдокимова, Д.В. Чугунин, Ю.К. Легостаева, В.В. Емельянов, Г.А. Курбатов	Первые результаты эксперимента СУРА – Ионосфера-М в августе 2025 года.	88
Ж.В. Дашкевич, В.Е. Иванов	Наиболее вероятные значения средних энергий авроральных электронов и концентрации окиси азота для полярных сияний в полуденном секторе авроральной зоны	89
Ж.В. Дашкевич, В.Е. Иванов	Методика оценки средней энергии авроральных электронов по интенсивности эмиссии $427.8 \text{ nm } \text{N}_2^+$	89
Г.А. Загорский, С.А. Долгачева, А.С. Калишин, И.М. Егоров, А.В. Тепляков	Сеть камер всего неба Арктического и антарктического научно-исследовательского института в высокоширотной Арктике	90
В.И. Колпак, М.М. Могилевский, М.А. Евдокимова, Д.В. Чугунин, Е.Е. Титова, А.А. Чернышов, С.Е. Андреевский, Ю.В. Шлюгаев, М.П. Жильцов, Н.В. Чернева, Е.И. Малкин	Трансформация спектра низкочастотных передатчиков при распространении в приземной плазме	90
Б.В. Козелов	Характеристики пятен в группе пульсирующих полярных сияний	91
Ю.Н. Куликов, А.С. Кириллов	Моделирование свечения Атмосферных полос синглетного кислорода $\text{O}_2(\text{b}^1\Sigma_g^+)$ в полярной ионосфере	91
И.В. Мингалев, А.Д. Гомонов, С.М. Черняков, Н.Ю. Романова, А.В. Привалов	Изменчивость состояния высокоширотной ионосферы в спокойных условиях	91
О.В. Мингалев, М.Н. Мельник, В.Г. Воробьев, О.И. Ягодкина	Последняя версия эмпирической модели высыпаний APM_GEO	92
О.В. Мингалев, М.Н. Мельник, В.Г. Воробьев, О.И. Ягодкина, С.М. Черняков, А.Д. Гомонов, Н.Ю. Романова, А.С. Калишин, И.В. Мингалев	Эмпирическая модель положения аврорального овала и главного ионосферного провала	93
И.В. Мингалев, З.В. Суворова, А.М. Мерзлый, А.Т. Янаков	Частичное отражение радиоволн декаметрового и метрового диапазонов от неоднородностей в ионосферной плазме	94
Э.Г. Мирмович	Нейтронный вариант объяснения одного типа возмущений верхней атмосферы	94
А.С. Никитенко, О.М. Лебедь, Ю.В. Федоренко, А.В. Ларченко	Восстановление параметров локальных областей ионосферного поглощения методом Монте-Карло по данным двухточечных риометрических измерений	95
А.М. Падохин, Г.А. Курбатов, Н.Д. Кречетов, Ю.С. Туманова, А.А. Чернышов, С.Е. Андреевский, О.Т. Саакян, С.И. Книжин, П.Е. Продан	О проведении экспериментов по радиопросвечиванию ионосферы сигналами прибора МАЯК	95

И.А. Павлов, А.М. Падохин	Коррекция параметров модели NEQUICK2 в европейском регионе на основе экспериментальных данных вертикального зондирования и ГНСС просвечивания	96
Ю.В. Поклад, Б.Г. Гаврилов, В.М. Ермак, В.С. Лобанова, И.А. Ряховский, А.И. Сапунова	Восстановление параметров ионосферы по сигналам передатчиков точного времени ВЕТА.	96
Д.Б. Рождественский, В.И. Рождественская, В.А. Телегин	Долгопериодные вариации F-рассеяния и критической частоты слоя F2 в зависимости от солнечной активности.	97
И.А. Ряховский, Ю.В. Поклад, Г.А. Лесников, В.М. Ермак	Пространственно-распределенная система регистрации сигналов ОНЧ диапазона	98
А.И. Сапунова, И.А. Ряховский, Ю.В. Поклад, В.С. Лобанова	Исследование влияния Луны на ионосферу Земли	98
Н.В. Савельева, В.А. Пилипенко, С.М. Пулинец, О.И. Ягодкина, Д.Д. Позднякова	Электромагнитные КНЧ шумы в области аврорального овала по данным спутников «ИОНОСФЕРА-М»	99
А.А. Синевич, А.А. Чернышов, С.А. Пулинец, Д.В. Чугунин, М.М. Могилевский	Исследование поляризационного джета по измерениям спутников Ионосфера-М	100
А.Е. Степанов, В.Л. Халипов, К.Г. Ратовский	Наклонное зондирование субавроральной ионосферы по данным дигизондов на радиотрассе Якутск – Жиганск	101
А.А. Татарников, О.В. Золотов, Б.Е. Прохоров, Ю.В. Романовская, Ю.А. Шаповалова	О разработке модели крайнего ультрафиолетового излучения Солнца MEUVM – Murmansk Extra-Ultraviolet Model	101
А.В. Тертышников	Морфология поля иона $H^+$ у нижней границы экзосферы вблизи терминатора в январе 2025г.	102
И.И. Шагимурагов, И.И. Ефишов, Н.Ю. Тепеницына, Г.А. Якимова, М.В. Филатов	Поляризационный джет и ТЕС вариации во время возмущения 7-8 апреля 2017 г.	102
И.И. Шагимурагов, Г.А. Якимова, И.И. Ефишов, Н.Ю. Тепеницына	Эффекты январской бури 2026 года в вариациях ТЕС	103
И.С. Янковский, М.В. Клименко, И.А. Носиков, А.В. Тимченко	Проект STARVISOR: Развитие сети оптических наблюдений и автоматизация обработки данных с применением технологий компьютерного зрения	103
<b>SESSION 6. LOW ATMOSPHERE, OZONE</b>		
V.V. Denisenko, S.E. Smirnov	Distortion of the atmospheric electric field by the measuring system	105
V.V. Denisenko	A model of the electric fields and currents generated by an electrified cloud	105
К.А. Didenko, A.V. Koval, Т.С. Ermakova, Е.А. Maurchev	Features of wave processes in different modes of the stratosphere polar vortex	106

A.S. Kirillov, R. Werner, V. Guineva	The study of the kinetics of electronically excited N <sub>2</sub> in atmospheres of planets of Solar system	106
Y.Y. Kulikov, V.I. Demin, V.M. Demkin, A.S. Kirillov, V.G. Ryskin	Results of seven year millimeter measurements of the middle atmosphere ozone in polar latitudes above Apatity (67N, 33E)	107
Ю.В. Балабин, А.В. Германенко	Возможность оценки толщины снежного покрова по сезонным вариациям мягких компонентов вторичных космических лучей	107
А.С. Фадеев, Т.С. Ермакова, А.В. Коваль, Б.А. Бикбулатов	Изэнтропический анализ тропосферных волн холода в периоды расщепления стратосферного полярного вихря	108
А.С. Кириллов, В.Ф. Тарасенко, Б.А. Золотенков, В.А. Кириллов	Исследование кинетики электронно-возбужденного молекулярного азота в спрайтах и разрядной камере	109
А.А. Любчик	Проявление циклов солнечной активности в вариациях температуры воздуха в Петербурге и Стокгольме	109
Е.А. Михалко, Ю.В. Балабин, А.В. Германенко	Анализ длинных рядов вариаций рентгеновского излучения в Апатитах и Баренцбурге	110
И.В. Мингалев, Е.А. Федотова, А.И. Мингалев, К.Г. Орлов, В.С. Мингалев	Моделирование взаимодействия атмосферы с различными типами поверхности Земли при наличии снежного покрова	110
 <b>SESSION 7. HELIOBIOSPHERE</b>		
П. А. Кашулин, Н.В. Калачёва	Реакции растений на высокую солнечную активность в лабораторных и полевых условиях	112
I.A. Zolotarev, G.K. Garipov, D.I. Tkachenko, G.I. Antonyuk, A.V. Sazonova, M.O. Lebedev, A.N. Efimkin, S.I. Svertilov, V.V. Bogomolov, A.A. Gross, E.V. Silina, L.S. Zolotareva, V.I. Osedlo	Орбитальная биологическая лаборатория БИОЛ 2 на спутнике СКОРПИОН. Первые результаты.	113
Author index		114

## Geomagnetic Storms and Substorms



## **Preliminary Analysis Results of the Geomagnetic Event of 19–22 January 2026 from the Ionosfera-M Satellites of the Ionosond Project**

A.A. Chernyshov<sup>1</sup>, S.A. Pulinets<sup>1</sup>, S.I. Svertilov<sup>2</sup>, D.V. Chuginin<sup>1</sup>, K.G. Tsybulya<sup>3</sup>, A.M. Padokhin<sup>4</sup>, V.V. Bogomolov<sup>2</sup>, I.V. Yashin<sup>2</sup> and M.M. Mogilevsky<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Space Research Institute of the Russian Academy of Science, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Lomonosov Moscow State University Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow, Russia*

<sup>3</sup>*Fedorov Institute of Applied Geophysics, Roshydromet, Moscow, Russia*

<sup>4</sup>*Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

The January storm was the culmination of a sequence of solar events. It was preceded by the formation of a large and magnetically complex active region, which produced a series of powerful flares over several days. The direct trigger was a long-duration X-class flare, accompanied by a massive, fast coronal mass ejection directed straight at Earth. The result of this direct "hit" was a sharp drop in the Dst index and a global magnetic storm. This event is notable for the maximum solar proton flux density during the storm reaching 37,000 pfu (proton flux units -1 proton/(cm<sup>2</sup>·s·sr)). This is the highest level recorded in the 21st century. For comparison, the strongest proton storm of the current 25th solar cycle previously recorded at the cycle's peak in October 2024 was about 1,800 units. Comprehensive study of such extreme events is crucial both for fundamental science, which deepens our understanding of solar-terrestrial connections, and for applied tasks related to protecting space-based and ground-based technology. The ideal tool for such research is a multi-satellite constellation capable of simultaneously covering different points in the near-Earth environment. This is precisely the opportunity provided by the Russian "Ionosond" project, which launched a constellation of four "Ionosfera-M" satellites into orbit in 2024 and 2025. Equipped with a suite of modern scientific instruments, these spacecrafts can conduct comprehensive measurements of key plasma parameters, electromagnetic fields, and waves. The work uses data from the LAERT onboard ionosonde, the NVK low-frequency wave complex, the SG and SPER instruments, which can detect solar cosmic rays and particle precipitation, as well as the MAYAK instrument for radio sounding of the ionosphere. This allows for detailed investigation of the structure and dynamics of such powerful storms and their impact on near-Earth space.

## **Supersubstorms in the strong magnetic storm on 10-11 October 2024**

Despirak I.V.<sup>1</sup>, Kleimenova N.G.<sup>2</sup>, Lubchich A.A.<sup>1</sup>, Gromova L.I.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia*

<sup>2</sup>*Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow, Russia*

<sup>3</sup>*IZMIRAN, RAS, Troitsk, Moscow, Russia*

The aim of this study is to conduct a detailed analysis of two strong geomagnetic disturbances (so-called supersubstorms) during the severe magnetic storm of October 10–11, 2024. This was one of the strongest geomagnetic storms ( $Dst \sim -333$  nT) in solar cycle 25. The storm was triggered by an isolated coronal mass ejection (ICME), characterized by distinct sheath and magnetic cloud structures. Studying this isolated event allows us to investigate the geoeffectiveness of both the sheath and the magnetic cloud, namely, to compare the features of supersubstorms that occurred under the influence of the sheath or magnetic cloud of the CME. The interplanetary shock was recorded at  $\sim 15:20$  UT on October 10, 2024, and near  $\sim 15:50$  UT the extremely large magnetic disturbance occurred ( $SML \sim -4000$  nT). This extremely intense geomagnetic disturbance could be referred to so-called supersubstorms ( $SML < -2500$  nT). There were 3 supersubstorm events recorded during the October storm with peaks at  $\sim 15:55$  UT and  $\sim 17:06$  UT on 10 October, at  $\sim 08:15$  UT on 11 October 2024. In this work we will conduct a comparative analysis of two supersubstorm events, the SSS-1 and SSS-3, one of which was observed during the Sheath and the other in the magnetic cloud. Analysis was carried by the data collected from the ground-based networks (SuperMAG, INTERMAGNET and IMAGE) as well as from the magnetic registrations by the Iridium constellation of 66 satellites at 780 km altitude, distributed over six orbit planes spaced equally in longitude (AMPERE project). It was established that the supersubstorm observed in the initial phase of the magnetic storm shortly after the shock was atypical, because it began in the daytime rather than nighttime sector, it was near the polar rather than equatorial boundary of the auroral oval, during the expansion phase the ionospheric current rapidly propagated to lower rather than higher latitudes, the peak amplitude of the substorm reached about 4000 nT in a very local region in the absence of the extended westward electrojet in night sector. Whereas the supersubstorm during MC demonstrated the typical features of substorm. Possible reasons for the differences related to the characteristics of this coronal mass ejection are discussed.

## Extreme enhancements of the eastward electrojet

L.I. Gromova<sup>1</sup>, N.G. Kleimenova<sup>2</sup>, S.V. Gromov<sup>1</sup>, L.M. Malysheva<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*IZMIRAN, RAS, Troitsk, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow, Russia*

The eastward electrojet is one of the important elements of the ionospheric currents associated with different magnetosphere disturbances. Here we studied the extreme eastward electrojet enhancements basing on their ground magnetic signature defined by  $AU$ -index. The values of  $AU$  index higher  $\sim 900$ - $1000$  nT can be attributed to the extreme ones because they are almost twice as big as usual. We found only 16 such extremely strong  $AU$ -events during 2000–2025 using 5-min data from the WDC Kyoto AE Index Portal. Our analysis of the space weather conditions in which these 16 events were observed showed that they were recorded mostly during strong ( $|Dst| > 100$  nT) magnetic storms. However, not every strong magnetic storm was accompanied by an extreme increase in the  $AU$ -index. It was found that extreme  $AU$  increases occurred *only* under the positive IMF  $B_y$  values during or after a long period of negative or close to zero IMF  $B_z$  values. The extreme  $AU$  increases could be observed in any phase of the magnetic storms but more often in the initial and main phases of the storm. In the initial storm phase, these  $AU$ -events were relatively rare phenomena with a typical duration of about 2 h and association with jumps or very significant enhancements (up to  $\sim 70$  - 80 nPa) of the solar wind dynamic pressure ( $P_{sw}$ ) under positive IMF  $B_y$  and negative IMF  $B_z$ . In the main storm phase, these events often represented the sequences of  $\sim 30$  min  $AU$  bursts followed very strong (up to 50-60 nPa) bursts of the  $P_{sw}$  and accompanied by fluctuations in IMF  $B_z$  and  $B_y$ . In the recovery storm phase, the very short ( $< 30$  min) bursts of the extreme  $AU$  increases were associated with abrupt changes of the direction or values of the IMF components observed under the rather strong ring current ( $SymH \sim -(120$ - $150$  nT)). The  $P_{sw}$  values were not the determinant parameter. The details of the studied events during some strong magnetic storms are discussed.

## Evaluating Neural Network Performance in Forecasting Key Geomagnetic Indices During Solar Cycle 25

Mostafa Hegy (*Geomagnetic and Geoelectric Department, National Research Institute of Astronomy and Geophysics, Cairo, Egypt.*)

### Abstract

Geomagnetic storms, characterized by sudden disturbances in Earth's magnetic field, pose significant risks to technological infrastructure and human activities. This study evaluates the performance of neural network (NN) approaches for predicting different geomagnetic indices during Solar Cycle 25. Nonlinear Autoregressive Networks with Exogenous Inputs (NARX) were trained and tested using solar wind parameters as predictors and geomagnetic indices (Dst, Kp, and Ap) as outputs. The models were evaluated for prediction accuracy, robustness, and computational efficiency using metrics such as root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE), and the cross-correlation coefficient (R). The results demonstrated strong forecasting capability, achieving Root Mean Squared Error (RMSE) values as low as 0.011 and correlation coefficients up to 0.99 for Dst index predictions. These results highlight the NARX model's robustness and accuracy in capturing the complex dynamics of geomagnetic storms. This comprehensive evaluation supports the model's utility for operational space weather forecasting, providing significant improvements over baseline forecasting methods.

## **Relationships between auroral electrojets and ring current components**

G.A. Makarov (*Federal Research Centre “The Yakut Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences”*), Yu.G. Shafer (*Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy of SB RAS, Yakutsk, 677980, Russia.*)

The paper uses daily average values of the geomagnetic indices AU, AL, SYM-H, and ASY-H and interplanetary parameters for the period 1981–2015. The dataset was divided into two parts, depending on the magnetic field direction in the interplanetary sectors, and into five groups, depending on the solar wind (SW) speed. To highlight the effect of the IMF sector structure, the differences  $\Delta$  of their seasonal variations in the positive (+) and negative (-) IMF sectors were formed in the indices. Simple waves with disturbance maxima in the autumn months are obtained in all data groups. To eliminate the effect of the IMF sector structure, half-sums  $S$  of the seasonal variations of the indices in the (+) and (-) IMF sectors were formed. The average annual values of the half-sums of all indices increase with increasing SW speed. Variations in  $S(\text{AU})$  are characterized by an annual wave with a maximum in the summer months in all data groups and, as previously suggested, this is due to the influence of illumination in the auroral zone. Variations in other indices, as expected, have equinoctial maxima in all activity groups. A correlation analysis was carried out for 5 activity groups in general to identify: a) the relationships between the differences in the indices in their seasonal variations in the (+) and (-) IMF sectors and b) the relationships between the half-sums of the indices in their seasonal variations in the (+) and (-) IMF sectors. It was found that in both cases the closest relationship ( $|r| > 0.96$ ) is visible in the ratios  $\Delta(\text{AL})$  and  $\Delta(\text{ASY-H})$ ,  $\Delta(\text{AL})$  and  $\Delta(\text{SYM-H})$ ,  $\Delta(\text{ASY-H})$  and  $\Delta(\text{SYM-H})$ , whereas in the pairs  $S(\text{AL})$  and  $S(\text{AU})$ ,  $S(\text{AU})$  and  $S(\text{ASY-H})$ ,  $S(\text{AU})$  and  $S(\text{SYM-H})$  the relationship is lower ( $|r| < 0.93$ ). Thus, it has been shown that, when considering daily average data, there are close relationships between the indices of the auroral westward electrojet and the symmetric and asymmetric ring current components. The indices of the auroral eastward electrojet and the ring current components, as well as the indices of both auroral electrojets, are less closely related.

## **Multiple substorms and ring current dynamics during and post storm**

V.V. Mishin<sup>1</sup>, Yu.Yu. Klibanova<sup>2</sup>, R.A. Marchuk<sup>1</sup>, V.E. Kapustin

<sup>1</sup>*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia*

<sup>2</sup>*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Irkutsk State Agrarian University named after A. A. Ezhevsky", Irkutsk, Russia*

This paper examines an event of multiple substorms that were observed initially during a moderate storm on March 8-10, 2008, and for a week afterward, against the backdrop of a high-speed solar wind. From the SUPERMAG project website, we study the relationship of magnetic disturbances at low latitudes with the dynamics of the energy flux from the solar wind into the magnetosphere and geomagnetic activity at auroral latitudes during and after a storm

## **Auroral Research with the ISS Using "UV Atmosphere" (Mini-EUSO) Telescope**

V.D. Nikolaeva<sup>1</sup>, P.A. Klimov<sup>1,2</sup>, N.V. Surovtsev<sup>2</sup>, A.V. Artemyev<sup>3</sup>, R.E. Saraev<sup>1,2</sup>  
for the JEM-EUSO Collaboration

<sup>1</sup> *D.V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia.*

<sup>2</sup> *Faculty of physics, M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia.*

<sup>3</sup> *Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

Several scientific instruments operate simultaneously aboard the International Space Station (ISS), enabling investigations of the energetic radiation belt dynamics and their influence on the upper atmosphere. The astrophysical detectors CALET and MAXI, mounted on the Japanese experimental module, primarily study cosmic ray acceleration and gamma-ray bursts; however, CALET also measure electron fluxes at energies  $>1.6$  MeV and  $>3.6$  MeV, while MAXI's Radiation Belt Monitor (RBM) resolves electron fluxes ( $>0.3$  MeV) at 1 s cadence.

The "UV Atmosphere" (Mini-EUSO) telescope, deployed on the Russian segment of the ISS since 2019, features a  $40^\circ$  field of view,  $490$  cm<sup>2</sup> aperture for high sensitivity, and  $2.5$   $\mu$ s temporal resolution, facilitating detection of transient atmospheric emissions. While primarily targeting thunderstorm phenomena (ELVES, sprites, blue jets), but in high latitudes, it can register both pulsating aurorae (PsA) and recently discovered optical microbursts (OMB). However, such studies have not previously been conducted using this instrumentation.

The ISS's  $\sim 52^\circ$  inclination precludes auroral oval overflights every orbit, but pre-noon sector passes over the USA/Canada region become feasible during moderate-to-intense geomagnetic disturbances, when equatorward oval expansion occurs. Since 2019, more than 150 measurement sessions have been conducted, during each the ISS completes 6 to 10 orbits around Earth at different longitudes and periodically enters the Canadian sector. For all sessions, an analysis of the geophysical conditions, storm and substorm activity (SYM-H variation and AU/AL indices) was conducted. A dedicated database catalogs "UV Atmosphere" sessions with accompanying geomagnetic parameters: <https://uhedr.sinp.msu.ru/mini-euso-sessions.html>.

Session 31 (11–12 January 2021) exemplifies optimal conditions: telescope operation over the Canadian sector at peak geomagnetic latitudes, with the polar orbit fully nightside. Substorm activity during the storm recovery phase positioned the auroral oval's equatorial boundary within the instrument's field of view, according to CARISMA magnetometer data. Distinct auroral signatures revealed dynamic fine-scale spatiotemporal structure at the equatorward oval edge, including equatorward expansion. Concurrent MAXI observations registered precipitating electrons ( $E > 300$  keV), while CALET data ( $E > 1.6$  MeV) showed no variations.

This work was supported by Russian Science Foundation grant No. 22-62-00010 (<https://rscf.ru/project/22-62-00010/>).

## **Features of Geomagnetic Disturbances in the Auroral Zone Generated by X-Ray Radiation from Chromospheric Flares with Intensities $X \Rightarrow 10$**

V.A. Parkhomov<sup>1</sup>, V.V. Mishin<sup>2</sup>, R.A. Marchuk<sup>2</sup>, Yu.V. Penskiikh<sup>2</sup>, S.Yu. Khomutov<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Baikal State University, Irkutsk*

<sup>2</sup> *Institute of Solar-Terrestrial Physics SbrRAS, Irkutsk*

<sup>3</sup> *Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation RAS, Paratunka, Kamchatka Krai*

We present the results of long-term studies of geomagnetic disturbances in the auroral zone during chromospheric flares accompanied by large X-ray fluxes ( $X \sim 10$ ). For some flares, the excitation of long-period oscillations ( $T \sim 100$ - $500$  s) was detected. A sharp, explosive substorm initiation was detected after the arrival of X-rays and geomagnetic pulsations characteristic of a substorm expansion phase onset. Using the ISTP SbrRAS magnetogram inversion technique, maps of distribution of equivalent currents were constructed for the March 7, 2012, substorm. Hypotheses are presented for interpreting the substorm initiation by the flare's X-ray flux.

## **Calculation of Hall and Pedersen currents using the magnetogram inversion technique during geomagnetic disturbances**

Penskikh Yu.V., Mishin V.V., Marchuk R.A. (*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia*)

By solving the inverse problem of the magnetogram inversion technique, using data of geomagnetic variations field from a worldwide network of ground stations, we obtain equivalent current functions. A method for calculating the Hall and Pedersen currents using the gradient of equivalent current function in the approximation of uniform conductivity and radial geomagnetic field is demonstrated. The vector fields of the Hall and Pedersen currents are shown. The calculation results based on the example of a strong substorm on December 20, 2015 are discussed.

## **Comparative analysis of ionospheric responses to geomagnetic events identified by the AE-index during minimum and maximum solar activity**

K.G. Ratovsky<sup>1</sup>, V.V. Klimenko<sup>2</sup>, M.V. Klimenko<sup>2</sup>, A.M. Vesnin<sup>1</sup>, K.V. Beliuchenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia*

<sup>2</sup>*West Department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Kaliningrad, Russia*

This paper presents comparative analysis of ionospheric responses to geomagnetic events identified by the AE-index (AE-storms) during solar minimum and maximum activity. The analysis includes the identification of geomagnetic events based on the AE-index and the calculation of a "reference" ionospheric response. The "reference" response represents the dynamics of the average ionospheric disturbance, obtained using the superimposed epoch method with key moments corresponding to the AE-maximum for winter, spring, summer, and autumn AE-storms. As an ionospheric characteristic, we used the regional electron content (REC), which is the average value of the total electron content (TEC) over all longitudes for the selected latitudinal zone. The ionospheric disturbance represents the relative (percentage) deviation of observed values from the 27-day running average REC. The division of AE-storms into minimum and maximum solar activity was performed according to the following criterion: events that occurred in years with the annual average F10.7-index < 110 s.f.u. were attributed to the minimum of solar activity (193 events), and the remaining events were attributed to the maximum of solar activity (363 events).

An initial analysis showed that the "reference" responses to solar maximum AE-storms are more negative than to solar minimum events. It was hypothesized that this difference is due to the higher percentage of isolated events at solar minimum (44%) compared to those at solar maximum (25%). However, the analysis of only isolated AE-storms confirmed that the "reference" response to solar maximum events is more negative than that to solar minimum events. Larger differences are observed at the equinoxes compared to the solstices, and in the high-latitude zone of the Southern Hemisphere compared to other latitude zones. An analysis of the reasons for the differences in "reference" responses between solar minimum and maximum is the subject of this paper.

The research was funded by the Russian Science Foundation (project No. 25-27-00217).

## Comparative analysis of MPB events over 13-month intervals around the December solar minimums of 2008 and 2019

Raykova L.<sup>1</sup>, Guineva V.<sup>1</sup>, Werner R.<sup>1</sup>, Bojilova R.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Space Research and Technology Institute (SRTI) – Bulgarian Academy of Sciences, Stara Zagora Department, Bulgaria; [heiti456@gmail.com](mailto:heiti456@gmail.com)

<sup>2</sup>National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography (NIGGG) - Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria

### Abstract

This study presents a comparative analysis of midlatitude positive bay (MPB) events observed at the Panagyurishte (PAG) geomagnetic observatory during two solar minimum periods centered on December 2008 and December 2019. The analysis covers 13-month intervals for each period, including six months before and six months after the respective December minimum. MPB events are examined in terms of occurrence rate, diurnal distribution of onset times in Universal Time (UT), and event amplitudes.

This approach allows a direct comparison of MPB activity under similar low solar activity conditions and provides a basis for assessing differences in event occurrence, timing characteristics, and amplitudes between the two periods.

The results show that, despite comparable low solar activity conditions, the two periods differ in the monthly distribution of MPB events and in the distribution of events with moderate amplitudes (10–20 nT) and larger amplitudes (>20 nT), as well as in small differences in the UT distribution of event onset times. At the same time, both periods exhibit an increased MPB occurrence in March and in September-October.

## Modeling of space weather risks for global infrastructure: project proposal

A.V. Rubtsov<sup>1,2</sup>, V.A. Pilipenko<sup>3</sup>, D. Yuan<sup>1,2</sup>, W. Chen<sup>1,2</sup>, I.V. Despirak<sup>4</sup>, A.A. Lubchich<sup>4</sup>, Ya.A. Sakharov<sup>4</sup>, P.V. Setsko<sup>4</sup>, A.A. Vlasov<sup>5</sup> and Y. Zhu<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Shenzhen Key Laboratory of Numerical Prediction for Space Storm, School of Aerospace, Harbin Institute of Technology, Shenzhen, China

<sup>2</sup> Key Laboratory of Solar Activity and Space Weather, School of Aerospace, Harbin Institute of Technology, Shenzhen, China

<sup>3</sup> Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow, Russia

<sup>4</sup> Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia

<sup>5</sup> Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

Space weather impact on modern high-technological infrastructure in space and on the ground receives more and more attention every year from researchers and industry all over the world. These studies have an important practical aspect — risk assessment for sensitive nationwide or even global infrastructure, such as power transmission lines, pipelines, global navigation satellite systems (GNSS), etc. Geomagnetically induced currents (GICs) during intense geomagnetic disturbances have been proved to affect power line operation, sometimes leading to power outage. But the real picture of physical processes behind the GIC enhancements is not clear yet. Traditionally the intensity of GIC bursts in power lines is associated with the intensity of magnetic field time derivative dB/dt. However, the measurements of GICs show the lack of one-to-one correspondence between GIC intensity and dB/dt. Moreover, there are indications that GICs strongly depend on power grid topology, local time, location of auroral oval and auroral electrojets, crust conductivity, and possibly other parameters. Ionospheric large-scale turbulence in auroral and equatorial regions lead to increasing number errors and signal deterioration in GNSS and radiowave propagation. Thus, the ionospheric turbulence and meso-scale ionospheric current disturbances responsible for GIC bursts are different, but mutually related aspects of the space weather hazards. In this talk, we will present a proposal for the project aiming to analyze nationwide and global effects of space weather using ground-based and spacecraft measurements, and advanced numerical modeling. Utilizing observational infrastructure from the Chinese Meridian Project II and the Russian GIC monitoring network, we will assess the physical vulnerability and potential socio-economic impacts on the national power grids of China and Russia. Unresolved problems of the GIC prediction methods will be discussed as well.

## **GIC excitation in the night sector at the high-latitude substation Vykhodnoy**

Ya. Sakharov<sup>1</sup>, V. Selivanov<sup>2</sup>, V. Bilin<sup>1</sup>, V. Nikolaev<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Polar Geophysical Institute, Murmansk, Russia, [sakharov@pgia.ru](mailto:sakharov@pgia.ru)*

<sup>2</sup> *Center for Physical and Technical Problems of Northern Energy, Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences, Apatity*

<sup>3</sup> *Murmansk Arctic University, Apatity, Russia*

The work examines the distribution of the amplitudes of bursts of geomagnetically induced currents over local time for the Vykhodnoy substation, located in the auroral zone. To conduct our analysis, we used the GIT database, created by the team in 2023.

The obtained amplitude distributions were compared with frequency graphs of GIC bursts occurrence of with an amplitude greater than 2A. The results of the comparisons allow us to note that the qualitative identification of two intervals of local magnetic time in which GIC bursts are observed, before and after midnight, does not contradict the previously made conclusions of the work [ Milan et al , 2023 ] .

## **Occurrence Jet/ SAID in TEC variations during 20 April 2018 and 2020 disturbances**

I.I. Shagimuratov<sup>1</sup>, I.I. Efshov<sup>1</sup>, G.A. Yakimova<sup>1</sup>, N.Ya. Tepenitsyna<sup>1</sup> and M.V. Filatov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *West Department IZMIRAN, Kaliningrad, Russia*

<sup>2</sup> *Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia*

An analysis of the Jet/ SAID occurrence is presented for the geomagnetic disturbances of April 20, 2018 and 2020. The probability of Jet/ SAID formation is highest at the equinox, which prevented consideration of this event. The minimum Dst value was approximately 68 nT for both events and occurred around 13 UT. The geomagnetic index AE exceeded 1200 nT in the interval 08-14 UT on April 20, 2020, and 1500 nT around 10 UT in 2018, respectively. According to DMSP data for these geomagnetic conditions, the Jet was recorded at Canadian longitudes for both events. During the Jet existence, a deep trough, narrow in latitude and elongated in longitude, was observed on TEC maps. The trough was recorded at subauroral latitudes equatorial to the precipitation region. The trough was located at latitudes 45°-50°N, near magnetic latitude 55°-62° (MLAT), during the morning hours (~05 MLT). A good spatiotemporal correspondence was recorded between the polarization jet and the trough in the TEC variations. Analysis suggests that the trough can be considered a signature of the Jet in the TEC measurements.

## Statistical study of injection penetration into the inner magnetosphere during geomagnetic storms

P.I. Shustov<sup>1</sup>, V.A. Frantsuzov<sup>1</sup>, A.V. Artemyev<sup>1,2</sup>, A.A. Petrukovich<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Department of Earth, Planetary, and Space Sciences, University of California, Los Angeles, California, USA

Energetic particle injections (10–300 keV) from the magnetotail plasma sheet play a crucial role in supplying the inner magnetosphere during geomagnetic storms. These injections not only contribute directly to the formation of the ring current but also transport energetic particles that serve as a “seed population” for relativistic electrons in the outer radiation belt. Despite their importance, the efficiency with which injections originating in the near-Earth magnetotail ( $L \sim 7 - 10$ ) penetrate deep into the inner magnetosphere ( $L < 6$ ) remains a subject of ongoing debate.

In this study, we present a statistical analysis of injection penetration probability during geomagnetic storms (Sym-H  $< -50$  nT) over the period 2013–2019. Data from the THEMIS satellites operating in the nightside sector at  $L > 6$ , and from the Van Allen Probes (RBSP), covering the region  $4 < L < 6$  were utilized. More than 4000 injection events were identified using THEMIS data, while approximately 2000 events were detected by RBSP. To cross-match these events, a backward drift trajectory tracing method based on a dipole approximation was employed. This approach enabled the exclusion of re-registrations of highly dispersed injections (i.e., drift echoes) and the isolation of primary penetration events. To obtain an accurate estimate of the penetration probability, the number of detected events was normalized by the satellites’ residence time in different magnetic local time (MLT) sectors. In addition, the dependence of the penetration probability on the geomagnetic storm phase (main phase versus recovery phase) was examined.

The analysis confirms that the occurrence of fast plasma flows or magnetic field dipolarization in the magnetotail is not a sufficient condition for deep particle injection. An estimate of the average conditional probability of injection penetration from the near-tail into the inner magnetosphere during geomagnetic storms was obtained. The results indicate that only a fraction of tail activations successfully overcome the entropy barrier and reach the inner magnetosphere without significant losses at the magnetopause.

## Sunward Plasma Flows in the Dayside Magnetosheath

D.G. Sibeck (*Heliophysics Division, NASA/GSFC, Greenbelt, MD, USA*)

Solar wind densities and dynamic pressures can fall abruptly upon the arrival of a magnetic cloud. Results from the SWMF BATS-R-US global magnetohydrodynamic (MHD) simulation indicate that the arrival of a factor of 10 decrease in the solar wind density associated with an antisunward-moving tangential discontinuity in the solar wind immediately causes the subsolar bow shock to move outward at a velocity half that of the solar wind. Shortly thereafter, the subsolar magnetopause moves outward and magnetic field strengths within the dayside magnetosphere fall. The sudden drops in solar wind densities and dynamic pressure reverse flows within the pre-existing magnetosheath, resulting in cold dense inner magnetosheath plasma moving sunward and away from the Sun-Earth line. Meanwhile, the newly-arriving magnetosheath plasma comes to a halt, resulting in a stagnant hot tenuous plasma in the outer subsolar magnetosheath. Transient sunward plasma velocities peak at velocities half those in the solar wind in the outer magnetosphere at and/or just inside the subsolar magnetopause. Towards the end of the run, the magnetopause overshoots its final position and begins moving antisunward, indicating the start of an oscillation, while the speed of the outward bow shock motion diminishes. Plasma briefly flows antisunward and away from the Sun-Earth line throughout the magnetosheath.

## **Scintillation of GPS signals during the polar substorm**

O.I. Yagodkina<sup>1</sup>, V.B. Belakhovskiy<sup>1</sup>, V.G. Vorobjev<sup>1</sup>, Yaqi Jin<sup>2</sup>, Wojciech J. Miloch<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia*

<sup>2</sup>*Department of Physics, University of Oslo, Oslo, Norway*

Behavior of GPS signal scintillations at the high-latitude station New Alesund (NYA, 78.9° N, 11.95° E) during the polar substorm on December 11, 2015 was studied. The trajectories of some GPS radio signals passed evening side ionospheric irregularities in the form of auroral arc and glow patch formed during the substorm development. The intense arc was located on the polar edge of the auroral oval, and the glow patch was recorded in the area of the polar cap. From the radio signal package of 12 GPS satellites, those whose signals led to an increase in scintillation were identified. The amplitude and phase indices of scintillations, ( $S4$ ,  $\delta\phi$ ), as well as the behavior of the total electronic content ( $TEC$ ) are considered. The dependence of the scintillation characteristics on geomagnetic activity and on the geometry of the passage of the GPS radio signals through the irregularities is shown. Based on optical and DMSP satellite observations, it is concluded that scintillations recorded during the expansive phase and the beginning of the recovery phase of the substorm are caused by fluxes of precipitating electrons in both the E and F regions of the ionosphere. During the recovery phase of the substorm, data from the low-altitude DMSP F16-F19 spacecraft made it possible to evaluate the characteristics of the penetrating electrons, as well as the size and the intensity of the auroral arc and the patch. It is suggested that the increase in the  $S4$  amplitude index at the substorm recovery phase is associated with an increase in the solar wind dynamic pressure due to an increase in plasma density  $N_e$ .

## **The 12 November 2025 Ugly Duckling Geomagnetic Storm: reasons and consequences**

Yu. Yasyukevich<sup>1,2</sup>, E. Danilchuk<sup>1,2</sup>, A. Beletsky<sup>1</sup>, E. Borvenko<sup>1</sup>, A. Chernyshov<sup>3</sup>, V. Fainshtein<sup>1</sup>, V. Ivanova<sup>1</sup>, D. Khabituev<sup>1</sup>, M. Kravtsova<sup>1</sup>, A. Oinats<sup>1</sup>, S. Olemskoy<sup>1</sup>, A. Padokhin<sup>4,5</sup>, K. Ratovsky<sup>1</sup>, V. Sdobnov<sup>1</sup>, A. Vesnin<sup>1</sup>, A. Yasyukevich<sup>1</sup>, S. Yazev<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup> Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

<sup>3</sup> Space Research Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

<sup>4</sup> Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia;

<sup>5</sup> Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio wave Propagation of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

The 12 November 2025 G4 geomagnetic storm – the third most intense of solar cycle 25 – was triggered by interplanetary coronal mass ejections (ICMEs) which shock waves arrived to the Earth (at the L1 Lagrange point) at 22:15 UT and at ~23:38 UT on 11 November 2025, and was re-enhanced by another ICME arrived at 18:53 UT on 12 November 2025. The first ICME influenced not much on the geomagnetic activity, but influenced the propagation of the second one. Minimal Dst index reached –217 nT, SYM-H index reached –254 nT, and maximal Kp index reached 9- on 12 November 2025. This study presents a comprehensive analysis of the storm's causes and its complex effects on near-Earth space, combining data from GNSS networks, ionosondes, optical instruments, frequency radars (SuperDARN and SuperDARN-like), cosmic ray monitors, and solar wind satellites. The analysis reveals significant global ionospheric disturbances. The auroral oval expanded equatorward, reaching geomagnetic latitudes of ~35°N in the American sector. We recorded super equatorial plasma bubbles almost reaching the auroral oval boundary in the American sector. The crests of the equatorial ionization anomaly intensified exceeding 175 TECU, and shifted poleward by 8–10°. At mid-latitudes, the F2-layer critical frequency (foF2) exhibited a strong negative disturbance (–50%) during the main phase, followed by an unusually prolonged and intense positive phase exceeding +100%. These ionospheric perturbations, along with increased small-scale irregularities (quantified by the Rate of TEC Index, ROTI), directly impacted technological systems. Precise Point Positioning (PPP) errors for GNSS increased to 2–3 meters at high latitudes and in regions affected by the equatorial bubble. Additionally, the event featured a significant Forbush decrease in cosmic ray intensity and 77th ground-level enhancement (GLE) associated with the X5.1 solar flare. The results underscore the complex chain of processes from solar storm to geomagnetic and ionospheric responses, highlighting the substantial risks posed by such strong storms to modern satellite-based navigation and communication systems.

## Dynamics of relativistic electron fluxes in the outer radiation belt under the influence of a long term pressure pulse on January 8, 2018

Zykina A.A.<sup>1,2</sup>, Kalegaev V.V.<sup>1,2</sup>, Vlasova N.A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Phys. fac. MSU,*

<sup>2</sup> *SINP MSU, Moscow, [anya.zykina@gmail.com](mailto:anya.zykina@gmail.com)*

The results of a study of the dynamics of relativistic electron fluxes in the Earth's outer radiation belt under the influence of a prolonged (about 7 hours) pressure pulse on January 8, 2018 are presented. The analysis of variations in the parameters of the interplanetary medium and the response of the outer radiation belt to external influences is carried out. The work is based on experimental data on the fluxes of relativistic electrons obtained from the GOES geostationary satellite and the Van Allen Probes spacecraft (VAP-A and VAP-B), whose orbit passes through the core of the outer radiation belt near the equatorial plane.

The event began at 6:46 UT with a sharp compression of the magnetosphere (the distance to the subsolar point decreased by 3L in less than a minute), which was triggered by the arrival of a pulse of solar wind pressure. The 4-fold increased pressure persisted for about 6 more hours, during which time the magnetosphere was in a compressed state. According to the VAP-A data, spatiotemporal profiles of electron fluxes with energies of 0.1-2.7 MeV were constructed. For all energies, an increase in the flux was recorded at 6:46 UT - a reaction to the compression of the magnetosphere.

Similarly, for electron energies of 1-2.7 MeV, repeated short-term increases in fluxes at a distance of 4-5 L are observed after the start of the event. The period of repetition of the flow increases is different for each energy. The reason for this could be an electric field detected by both VAP-A and VAP-B spacecrafts at the moment of arrival of the pressure pulse and lasting about 1 minute. When passing through the region with an electric field, the electrons accelerated and were fixed by VAP-A several times repeatedly with a period coinciding with the theoretical drift period, which is different for each energy. These "peaks" in electron fluxes were recorded during the entire 6-hour event on both VAP spacecraft with each passage through the ~3.5-4.5 L region.

## Роль адиабатических и неадиабатических процессов в динамике электронов во время магнитных бурь 20.12.2015 г. и 25.08.2018 г.

Азра-Горская К.Ж.<sup>1,2</sup>, Калегаяев В.В.<sup>1,2</sup>, Власова Н.А.<sup>1</sup>, Демехов А.Г.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *НИИЯФ МГУ*

<sup>2</sup> *Физический факультет МГУ, г. Москва, Россия*

<sup>3</sup> *ПГИ*

[azragorskayaCG@my.msu.ru](mailto:azragorskayaCG@my.msu.ru)

Представлены результаты исследования роли адиабатических и неадиабатических процессов в динамике потоков электронов внешнего радиационного пояса Земли во время двух магнитных бурь 20.12.2015 и 25.08.2018 гг. ( $|Dst_{min}|=170$  нТл и  $|Dst_{min}|=205$  нТл, соответственно), развивающихся под влиянием различных условий в межпланетной среде. Первая магнитная буря (20.12.2015 г.) началась и развивалась под воздействием пришедшей к Земле сложной гелиосферной структуры, сформировавшейся при взаимодействии двух корональных выбросов масс. Вторая буря (25.08.2018 г.) началась в результате прихода относительно слабого межпланетного коронального выброса массы, а на фазе восстановления на магнитосферу Земли воздействовал высокоскоростной поток солнечного ветра из корональной дыры.

Проведены исследования потоков электронов в широком энергетическом диапазоне — от ~200 кэВ до ~3 МэВ — полученных на космических аппаратах Van Allen Probes A и B для обеих бурь, соответственно, прибором MagEIS. Для оценки роли адиабатических и неадиабатических процессов построены профили плотности потоков электронов в фазовом пространстве для каждого пролета спутника через внешний радиационный пояс, сгенерированные с использованием модели TS04 на сайте <https://rbpsgway.jhuapl.edu/>. Анализ динамики профилей позволяет оценить роль различных конкурирующих процессов потерь и ускорения-переноса частиц на разных этапах развития бурь.

На фоне адиабатических изменений, связанных с развитием буревых токовых систем выделены процессы, приводящие к реальным потерям и ускорению частиц, таким как выход частиц за магнитопаузу и локальное ускорение. Показано, что высокоскоростной поток является фактором, более эффективно воздействующим на динамику потоков электронов.

Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ им. М.В. Ломоносова.

## **Анализ геоэффективности магнитных облаков в условиях 25-го солнечного цикла, предшествующих развитию суббурь**

Н.А. Бархатов<sup>1</sup>, С.Е. Ревунов<sup>1</sup>, О.М. Бархатова<sup>2</sup>, Е.А. Ревунова<sup>2</sup>, А.И. Попов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина, Нижний Новгород, Россия*

<sup>2</sup> *Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, Нижний Новгород, Россия*

Работа посвящена анализу геоэффективности магнитных облаков солнечного ветра на примере их способности вызывать суббуревые явления. Магнитные облака обладают характерной магнитной структурой и возможностью длительного, упорядоченного воздействия на магнитосферу Земли. Это позволяет использовать их в виде индикатора суббурь. Исследование выполнено на материалах 25-го солнечного цикла, который характеризуется умеренной солнечной активностью. Именно поэтому в пределах этого цикла физические особенности магнитных облаков становятся более значимыми в процессах генерации высокоширотной геомагнитной активности, чем уединенные экстремальные значения параметров солнечного ветра.

В данном исследовании интервалы магнитных облаков солнечного ветра определялись согласно каталогу Ian Richardson and Hilary Cane (<https://izw1.caltech.edu/ACE/ASC/DATA/level3/icmetable2.htm>). С ноября 2019 г. по январь 2025 г. по данным каталога было отмечено 90 магнитных облаков. Эти события были нами уточнены на предмет удовлетворения характерным признакам магнитных облаков с помощью программы поиска магнитных облаков в потоке данных [Бархатов и др., 2010 г.]. В результате нами было верифицировано всего 40 магнитных облаков. Отбор анализируемых суббурь проводился по показаниям AL-индекса внутри интервалов, соответствующих времени воздействия этих магнитных облаков на магнитосферу. Для определения времени начала суббури использовался автоматический алгоритм, детально представленный в работе [Воробьев и др., 2016]. В результате, на интервалах действия верифицированных магнитных облаков, был обнаружен 31 достоверный случай суббурь, ими вызванных.

Исследование влияния параметров магнитных облаков на суббури показало заметную статистическую зависимость интенсивности суббурь от величины магнитного поля на оси спирального облака. Также было отмечено, что спиральные магнитные облака с осями, близкими к плоскости эклиптики преобладают среди событий, вызывающих значительные суббури. Известно [Бархатов и др., 2014], что такая «лежащая» конфигурация облаков способствует более устойчивому воздействию на магнитосферу Земли.

*Бархатов Н.А., Калинина Е.А. Определение параметров магнитных облаков и прогноз интенсивности магнитных бурь // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 50. № 4. С. 477–485, 2010*

*Бархатов Н.А., Виноградов А.Б., Ревунова Е.А. Проявление ориентации магнитных облаков солнечного ветра в сезонной вариации геомагнитной активности // Космические исследования, Т. 52, № 4. С. 286-295. 2014.*

*Воробьев В.Г., Ягодкина О.И., Зверев В.Л. Исследование изолированных суббурь: условия генерации и характеристики различных фаз // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 56. № 6. С. 721–732. 2016.*

## Особенности защиты высоковольтных силовых трансформаторов при повышенной геомагнитной активности

Вахнина В.В., Кувшинов А.А., Черненко А.Н., Федяй О.В., Пудовинников Р.Н. (Тольяттинский государственный университет, г. Тольятти, Россия, [VVVahkina@yandex.ru](mailto:VVVahkina@yandex.ru))

Предлагаемые в мировой практике решения с использованием блокировочных элементов за счет принудительного разземления нейтралей силовых трансформаторов (например, емкостное заземление нейтрали, тиристорная система защиты) при повышенной геомагнитной активности не позволяют эффективно защитить высоковольтную электрическую сеть от геоиндуцированных токов (ГИТ), т.к. могут привести либо к резонансным явлениям, либо к перенапряжениям при несимметричных коротких замыканиях. Также при разземлении нейтралей высоковольтных трансформаторов требуется дорогостоящее специальное коммутационное оборудование.

Наиболее перспективной защитой высоковольтных силовых трансформаторов при повышенной геомагнитной активности будет использование устройств, сочетающих в себе функции мониторинга ГИТ и резистивно-тиристорного заземления силовых трансформаторов, когда резистивное заземление нейтрали используется только при одновременном выполнении двух критериев: фиксации возрастания ГИТ и насыщенного состояния магнитопровода по 6-й гармонике тока намагничивания, а при отсутствии хотя бы одного из указанных критериев – режим глухозаземленной нейтрали. Структурная схема такого устройства защиты (УЗ) приведена на рисунке 1.

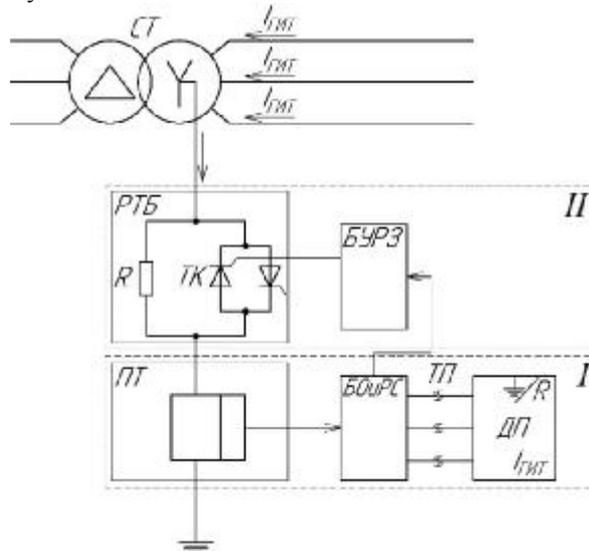


Рисунок 1 – Структурная схема устройства защиты высоковольтного силового трансформатора с функцией индикации насыщенного состояния магнитопровода.

Разработанное устройство защиты состоит из двух подсистем:

- канала мониторинга, включающего блок измерения тока нейтрали ПТ, блок обработки и регистрации сигнала БОИРС, токовую петлю ТП для передачи сигнала в диспетчерский пункт ДП (подсистема I УЗ). Канал мониторинга УЗ может работать независимо;
- силового блока (резисторно-тиристорный блок РТБ) и блока управления режимом заземления нейтрали БУРЗ (подсистема II УЗ).

В диспетчерский пункт энергообъекта передается информация о текущем состоянии заземления нейтрали высоковольтного силового трансформатора и уровня ГИТ.

## **Проявление флуктуаций навигационных сигналов, ассоциированных с полярными сияниями: событие 24 марта 2023года**

И.И. Ефишов<sup>1</sup>, И.И. Шагимурагов<sup>1</sup>, М.В. Филатов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Калининградский филиал ИЗМИРАН, г. Калининград, Россия*

<sup>2</sup>*Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Россия*

Проведён анализ сцинтилляций GPS-сигналов во время сияний, которые регистрировались на широтах Кируны (67.7N°) 24 марта 2023года. Показана прямая связь сцинтилляций с дискретными формами полярных сияний. В качестве индикатора сцинтилляций использованы индексы ROT/ROTI. При проявлении дискретных форм полярных сияний регистрировались интенсивные кратковременные всплески TEC флуктуаций в пролётах спутников над станцией наблюдения. Индекс ROT превышал 2-3 TECU длительностью 2-3 мин. Выявлено пространственно-временное соответствие кратковременных всплесков в вариациях ROT с дискретными формами полярных сияний. Результаты свидетельствуют, что индексы ROT/ROTI, полученные из стандартных 30 сек GPS - наблюдений могут быть использованы в качестве индикатора наличия сияний в случаях, невозможности их регистрации оптическими средствами.

## **Влияние азимутальной компоненты ММП на распределение продольных токов для разных уровней геомагнитной активности и угла наклона диполя**

Капустин В. Э., Мишин В.В., Пенских Ю.В., Лунюшкин С.Б. (*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия, [kapustin@iszf.irk.ru](mailto:kapustin@iszf.irk.ru)*)

На основе техники инверсии магнитограмм (ТИМ) исследовано влияние компоненты межпланетного магнитного поля (ММП)  $B_y$  на азимутальную асимметрию крупномасштабных распределений продольных токов (ПТ) для ряда событий в период 2008 – 2009 гг. Распределения рассчитаны по данным, усредненным по четырём уровням геомагнитной активности ( $AE < 100$ ,  $100 < AE < 300$ ,  $300 < AE < 600$ ,  $AE > 600$  нТл) и наклону геомагнитного диполя в различные сезоны года. При обоих знаках компоненты ММП  $B_y$  и усилении уровня геомагнитной активности найдены следующие статистические закономерности: в летнем сезоне и сезоне равноденствия наблюдается уменьшение асимметрии ПТ, а в зимнем сезоне – не наблюдается.

## **Влияние азимутальной компоненты ММП на распределение продольных токов для разных уровней геомагнитной активности и угла наклона диполя**

Капустин В.Э., Мишин В.В., Пенских Ю.В., Лунюшкин С.Б. (*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия, [kapustin@iszf.irk.ru](mailto:kapustin@iszf.irk.ru)*)

На основе техники инверсии магнитограмм (ТИМ) исследовано влияние компоненты межпланетного магнитного поля (ММП)  $B_y$  на азимутальную асимметрию крупномасштабных распределений продольных токов (ПТ) для ряда событий в период 2008 – 2009 гг. Распределения рассчитаны по данным, усредненным по четырём уровням геомагнитной активности ( $AE < 100$ ,  $100 < AE < 300$ ,  $300 < AE < 600$ ,  $AE > 600$  нТл) и наклону геомагнитного диполя в различные сезоны года. При обоих знаках компоненты ММП  $B_y$  и усилении уровня геомагнитной активности найдены следующие статистические закономерности: в летнем сезоне и сезоне равноденствия наблюдается уменьшение асимметрии ПТ, а в зимнем сезоне – не наблюдается.

**Вариации потоков заряженных частиц в околоземном пространстве во время гелио-геофизических событий в 2025 г. По данным наблюдений на спутниках «ИОНОСФЕРА-М»**

Свертилов С.И., Яшин И.В., Богомолов В.В., Богомолов А.В., Васильев Н.А., Еремеев В.Е., Июдин А.Ф., Марченко О.А., И.Н. Мягкова (МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, [sis@coronas.ru](mailto:sis@coronas.ru))

В докладе представлены результаты наблюдений вариаций потоков заряженных частиц в околоземном пространстве во время геомагнитных возмущений, а также прихода солнечных космических лучей (СКЛ) по данным приборов СПЭР/1, установленных на космических аппаратах (КА) «Ионосфера-М». Спектрометры плазмы и энергичной радиации СПЭР/1 предназначены для измерения потоков и дифференциальных энергетических спектров низкоэнергичных электронов и протонов в диапазоне энергий 0.05 - 20 кэВ, а также заряженных частиц средних и высоких энергий: электронов в энергетическом интервале ~0.15 – 10 МэВ и протонов в энергетическом интервале ~2.0 – 160.0 МэВ. В течение 2025 г. осуществлялся мониторинг потоков энергичных электронов и протонов в различных областях околоземного пространства. Проводился анализ динамики заполнения полярных шапок частицами СКЛ. Кроме того, рассматриваются вариации пространственных распределений потоков суб-релятивистских электронов во внешнем радиационном поясе во время геомагнитных бурь, а также динамика потоков низкоэнергичных (0.05 – 1.0 кэВ) электронов и протонов на разных широтах в околоземном пространстве. Для указанного событий проводилось сопоставление данных по потокам заряженных частиц с показаниями приборов, обеспечивающих контроль магнито-волновой обстановки на спутниках «Ионосфера-М».

**Одновременные наблюдения SAR-дуги в обсерваториях ИСЗФ СО РАН и КФ ИЗМИРАН с помощью набора оптических инструментов**

Т.Е. Сыренова<sup>1</sup>, С.В. Подлесный<sup>1</sup>, А.Б. Белецкий<sup>1</sup>, М.В. Клименко<sup>2</sup>, И.С. Янковский<sup>2</sup>, Р.В. Васильев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия

<sup>2</sup> КФ ИЗМИРАН, г. Калининград, Россия

В работе представлены возможности одновременного наблюдения событий в верхней атмосфере однотипными цветными камерами всего неба. Одна камера установлена в обсерватории КФ ИЗМИРАН в пос. Ульяновка, Калининградская область, географические координаты 54 N, 22 E, высота 30 м над уровнем моря. Вторая - в с. Торы, в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН, географические координаты 52 N, 103 E, высота 670 м.

Геомагнитная буря 19 января 2026 года началась в ~ 19:30 UT, когда регион Восточной Европы находился в вечернем секторе, а Восточная Сибирь - в ночном. Это привело к тому, что камера в обсерватории КФ ИЗМИРАН позволила зафиксировать субавроральное свечение STEVE, которое сменилось дугой зеленых пульсирующих сияний вблизи южного горизонта камеры на широтах ~ 52 N. Во время геомагнитной бури 19-21 января 2026 камерами в обоих регионах были зарегистрированы среднеширотные сияния, в том числе структуры, соответствующие SAR-дугам. Период одновременной регистрации протяженной дуги составил около 30 минут. Совместный анализ полученных снимков с использованием метода калибровки с идентификацией звезд и привязки к географическим координатам позволил оценить пространственно-временные характеристики наблюдаемых явлений. Подобный анализ позволит отслеживать пространственную эволюцию как дуг, так и фоновой авроральной активности. Обсуждается возможность использования подобных инструментов для одновременных наблюдений явлений верхней атмосферы Земли.

## **Наблюдения SAR-дуг в средних широтах во время геомагнитных бурь 19-20 января 2026 г**

Т.Е. Сыренова, А.В. Михалев, А.Б. Белецкий, С.В. Подлесный, Р.В. Васильев (*ИСЗФ СО РАН, г. Иркутск, Россия*)

В работе рассматриваются условия регистрации и особенности SAR-дуг во время большой геомагнитной бури 19-20 января 2026 г. Геомагнитная буря характеризовалась предшествующим очень сильным радиационным штормом ( $S=4$ ) и большой величиной скорости солнечного ветра ( $\geq 1600$  км/сек). Максимальное значение Dst составило величину  $-218$  нТ, что не является экстремально высоким для больших геомагнитных бурь. Типичный и наиболее вероятный широтный диапазон наблюдения SAR-дуг  $\sim 45^\circ - 60^\circ$  геомагнитных (дипольных) широт или параметр оболочки Мак-Илвейна  $L \sim 2.0 - 4.0$ . Наблюдение SAR-дуг осуществлялось в Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (географические координаты  $52^\circ\text{N}$ ,  $103^\circ\text{E}$ , геомагнитная дипольная широта  $\sim 42^\circ\text{N}$ ,  $L \sim 2.0$ ). SAR-дуги наблюдались на фоне полярных сияний в северной части небосвода (эмиссии [OI] 557.7 нм и  $\text{N}_2^+$  427,8 нм и 630 нм) и среднеширотных сияний в эмиссии [OI] 557.7 нм вплоть до зенитных направлений. В отдельные моменты времени SAR-дуги уходили за южный горизонт в точке наблюдения, что может соответствовать геомагнитным дипольным широтам  $38-40^\circ\text{N}$ . Кроме того, 20 января была зарегистрирована двойная SAR-дуга, разделенная по широте.

## **Красные дуги высокой интенсивности при воздействии импульсов давления солнечного ветра**

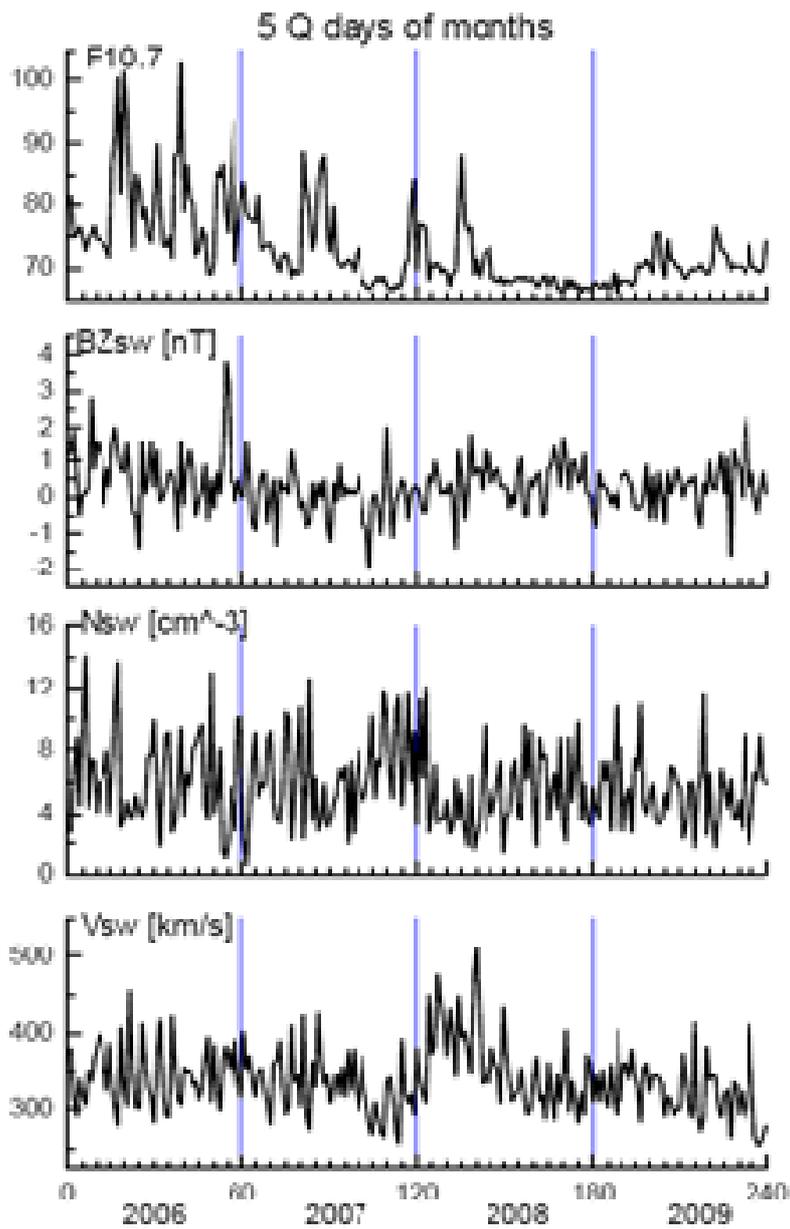
В.Л. Халипов<sup>1</sup>, А.Е. Степанов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Добровольный исследователь, г. Якутск, Россия*

<sup>2</sup> *Институт космофизических исследований и аэрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН, г. Якутск, Россия*

По имеющимся в публикациях оптических измерений красных дуг выявлены события с интенсивностью свечения линии 630.0 нм в несколько кРл. Такая геофизическая ситуация развивается при высокой геомагнитной активности и смещении плазмопаузы до L-оболочки 3 - 2.5. Импульс давления солнечного ветра порождает Альвеновские волны, которые распространяются во внутреннюю магнитосферу и оказываются захваченными в области ионосферного резонатора. Совершая многократные колебания между северным и южным полушариями, волны вызывают разогрев верхней F-области ионосферы. Для аналогичной геофизической ситуации рассмотрены события разогрева области F по измерениям электронной температуры на спутниках Ореол-3 и DMSP. Красные дуги могут возникать и на фазе внезапного начала во время импульса давления солнечного ветра на земную магнитосферу, когда нет кольцевого тока.

*Fields, Currents, Particles in the magnetosphere*



## **Localization and mechanism of formation of discrete forms of auroras**

E.E. Antonova<sup>1,2</sup>, V.G. Vorobjev<sup>3</sup>, O.I. Yagodkina<sup>3</sup>, M.V. Stepanova<sup>4</sup>, I.P. Kirpichev<sup>2</sup>, I.L. Ovchinnikov<sup>1</sup>, G.I. Antonyuk<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow, 119991, Russia,*

*e-mail: [elizaveta.antonova@gmail.com](mailto:elizaveta.antonova@gmail.com)*

<sup>2</sup>*Space Research Institute (IKI) Russian Academy of Science, Moscow, Russia*

<sup>3</sup>*Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia*

<sup>4</sup>*Department of Physics, University of Santiago de Chile, Santiago, Chile*

A revision of the basic mechanisms of magnetospheric dynamics (see, for example, GRL, 2025, doi:10.1029/2024GL114315) includes clarification of the level of turbulence of magnetospheric domains, the spatial localization of the auroral oval and auroral structures. Among the current tasks is also solving the problem of the formation of narrow auroral structures, the dimensions of which along the magnetic field lines far exceed their transverse dimensions. Such structures form rayed arcs, often called picket arcs. At the zenith, this form of auroral display is called a corona. Rayed arcs are often observed at latitudes of the auroral oval, but can also be observed in the cusp region (GA, 2024, doi:10.1134/S0016793224600103). Rayed arcs are the brightest auroral structures, with brightness far exceeding that of other auroral forms. During observations, small-scale fluctuations of the electric and magnetic fields are simultaneously recorded, which led to the dominance of ideas about the acceleration of electrons, causing the appearance of rayed arcs by Alfvén waves and the flow of energy into the arc along magnetic field lines. The advantages of an alternative mechanism, discussed in (Proc. XLVIII Annual Seminar, Apatity, doi: 10.51981/2588-0039.2025.48.002) for creating a rayed arc are highlighted.

## **Laboratory experiment on generating a spherical plasma cloud in a dipole magnetic field at the KI-1 facility**

A. A. Chibranov, A.G. Berezutsky, Yu.P. Zakharov, I.B. Miroschnichenko, V.G. Posukh, M.A. Rumenskikh, I.F. Shaikhislamov, A.E. Ivanov, M.V. Loginov

*ILP SB RAS, Novosibirsk, Russia, [chibranov2013@yandex.ru](mailto:chibranov2013@yandex.ru)*

An experiment was conducted on the KI-1 laser-plasma setup involving the expansion of a spherical laser plasma cloud into a dipole magnetic field. The plasma cloud was created by irradiating a spherical polyethylene target with four beams of a pulsed CO<sub>2</sub> laser. A dipole-configured magnetic field was generated by a solenoid inside a vacuum chamber. Measurements were conducted using a system of combined magnetic and electric probes, as well as photorecording systems.

As a result, three-dimensional probe measurements of the diamagnetic cavity and plasma flow dynamics were obtained. It was shown that a spatially inhomogeneous diamagnetic cavity forms as the plasma cloud expands in a dipole magnetic field. When the cloud expanded toward the increasing field, the cavity radius was  $R_b \approx 7$  cm, while when expanding away from the dipole,  $R_b > 11$  cm. The formation of a shock compression layer with increasing plasma density and magnetic field was detected in the direction toward the dipole.

The experiments were supported by Program 10 "Experimental Laboratory Astrophysics and Geophysics" of the National Center for Physics and Mathematics.

**Characteristics of pitch-angle scattering of charged particles in the current sheet useful for remote sensing of Earth's magnetosphere from low-altitude spacecraft.**

A.R. Dibaeva, V.A. Sergeev.

*Saint Petersburg State University, St-Petersburg, Russia*

One of the important mechanisms violating the adiabatic motion of charged particles in the magnetosphere is the field line curvature scattering. This process leads to pitch angle scattering and loss cone filling as particles cross the equatorial current sheet. This makes it possible to remote sensing of the magnetosphere's magnetic configuration using observations of precipitating particle fluxes from low-altitude spacecraft. The method is based on the consideration of the adiabaticity parameter  $K$  which is equal to the ratio of the radius of curvature of the field line to the particle gyroradius calculated using the selected model.

We numerically trace the trajectories of the electrons for a simple current sheet model at different energies in order to estimate the pitch-angle scattering amplitudes. First results obtained from the numerical simulation allow us to analyze the dependence of the loss cone filling on electron energies and parameters of the current sheet model. The results are compared with experimental observations obtained from the POES. We discuss preliminary conclusions as well as directions for further development of the model including possible modifications to more accurately describe the observed effects.

## **SELECTION OF ZONES OF ANOMALOUS ULF GEOMAGNETIC DISTURBANCES OF LITHOSPHERIC ORIGIN**

V.S. Ismagilov, M.S. Petrishchev, Yu.A. Kopytenko

*SPbF Izmiran, St. Petersburg, Russia. e-mail: [ivs@izmiran.spb.ru](mailto:ivs@izmiran.spb.ru)*

A statistical method is considered for isolating weak electromagnetic anomalies of lithospheric origin against the background of strong technogenic interference. A study of ULF geomagnetic disturbances for the period 01.02 – 07.10.2000 was carried out at three magnetic stations located on the Earth's surface in a triangle ~4.5 km apart (magnetic gradiometer) at a distance of ~62 km from the epicenter of the M6.9 earthquake that occurred on 07.01.2000. For the period 01.02 – 07.10.2000, dynamic histograms of probability distributions of the magnitude of the ULF were constructed variations of the magnetic field in the frequency range of 0.04-0.2 Hz. During this period, synchronous short-term (4-6 days) shifts in probability distributions were detected at all three stations of the magnetic gradiometer in the direction of higher than background values of the COE. On the obs. There are no anomalous displacements in Kakioka, which is about 215 km away from the epicenter. This means that the anomalous events are not the result of high geomagnetic disturbances.

The most probable values of the RMS are used to construct the gradient vectors of the magnetic field. During the background RMS values, the gradient vector points to the noisiest magnetic station. During periods of abnormal increases in RMS, the gradient vector rotates and points to the epicenter zone of the future earthquake.

## **ВЫДЕЛЕНИЕ ЗОН АНОМАЛЬНЫХ УНЧ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ЛИТОСФЕРНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ**

В.С. Исмагилов, М.С. Петрищев, Ю.А. Копытенко

*СПбФ ИЗМИРАН, С.-Петербург, Россия. e-mail: [ivs@izmiran.spb.ru](mailto:ivs@izmiran.spb.ru)*

Рассматривается статистический способ выделения слабых электромагнитных аномалий литосферного происхождения на фоне сильных помех техногенного происхождения. Проведено исследование УНЧ геомагнитных возмущений за период 01.02 – 10.07.2000 г. на трех магнитных станциях расположенных на земной поверхности треугольником в ~4.5 км друг от друга (магнитный градиентометр) на расстоянии ~62 км от эпицентра землетрясения М6.9, произошедшего 01.07.2000 г. За период 01.02 – 10.07.2000 г. построены динамические гистограммы распределений вероятностей величины СКО УНЧ вариаций магнитного поля в диапазоне частот 0.04-0.2 Гц. За этот период на всех трех станциях магнитного градиентометра обнаружены синхронные кратковременные (4 – 6 суток) смещения распределений вероятностей в сторону больших, чем фоновые, значений СКО. На obs. Какиока, удаленной от эпицентра на ~215 км эти аномальные смещения отсутствуют. Это означает, что аномальные события не являются следствием высокой геомагнитной активности и созданы удаленным литосферным источником.

По наиболее вероятным значениям СКО построены вектора градиентов магнитного поля. В период фоновых значений СКО вектор градиента указывает на наиболее зашумленную магнитную станцию. В периоды аномальных увеличений СКО вектор градиента поворачивается и указывает на зону эпицентра будущего землетрясения.

## **Electron precipitation from the Earth's outer radiation belt: scattering mechanisms, efficiency for electrons of different energies, spectral and spatio-temporal characteristics**

A.R. Ivanova<sup>1,3</sup>, V.V. Kalegaev<sup>1,3</sup>, A.G. Demekhov<sup>2</sup>, T.A. Yahnina<sup>2</sup>, I.A. Mironova<sup>4</sup>

<sup>1</sup> *Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia*

<sup>3</sup> *Faculty of physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

<sup>4</sup> *St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia*

According to the NOAA POES/METOP satellites, statistics of relativistic and subrelativistic electrons precipitation from the Earth's outer radiation belt during various geomagnetic disturbances were collected. Two different magnetic storms were being considered: weak prolonged storm including the HILDCAA event on October 11-16, 2017, and powerful but rapidly fading storm on March 23-30, 2023. Precipitation caused by resonant interaction with whistler waves, EMIC waves, and scattering on the curvature of a magnetic line were considered. The main parameter studied was the slope of the integral energy spectrum (as a measure of the ratio of electron fluxes of different energies) of the precipitation. Energy channels: >40 keV, >130 keV, >287 keV, >700 keV.

Precipitation caused by scattering on the curvature of the magnetic line have a compact range of slope values of the integral energy spectrum and the distribution resembles a normal one. The results of the analysis for such precipitation events are expected. The scattering efficiency of such mechanism is the same for all energies (and is approximately equal to 1), therefore, the slope of these spectra corresponds to the slope of the spectrum of the radiation belt trapped particles. From the theoretical concepts of EMIC waves, the maximum scattering efficiency should be observed for relativistic electrons, and for subrelativistic electrons, the scattering efficiency should decrease to lower energies. Hence, a more rigid integral spectrum is expected for the EMIC events (compared to the scattering on the curvature of the magnetic line) and for most events this is the case. The unexpected soft events were caused by two reasons: too much flux of subrelativistic particles or “contamination” by other scattering mechanisms. The expected scattering efficiency, monotonously decreasing to lower energies, is not observed for all considerable events. Possibly, this indicates the constant presence of an additional mechanism of subrelativistic electron scattering.

Other precipitation (most likely caused by scattering by whistler waves) have the widest and most uniform distribution of the integral spectrum slope. Perhaps such a wide distribution is caused by several mechanisms at once, for example, by different types of whistler modes.

The spatial and temporal characteristics of precipitation events caused by different scattering mechanisms with different slopes of the integral spectrum during two various magnetic storms were also considered.

This research is supported by Theoretical Physics and Mathematics Advancement Foundation “BASIS”.

## **Dynamics of electron fluxes in the outer radiation belt under inductive electric field variations**

V.V. Kalegaev<sup>1,2</sup>, K.Zh. Azra-Gorskaya<sup>1,2</sup>, N.A. Vlasova<sup>1</sup>, A.A. Zykina<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics of Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *Physical Faculty of Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

Solar wind pressure pulses can initiate rapid acceleration of energetic electrons in the Earth's outer radiation belt, which is caused by the generation of the inductive induction electric field in the magnetosphere. From the other hand, substorms are also produce the inductive electric field and corresponding plasma injections inside the inner magnetosphere. The intensity of these processes is related both to the parameters of the solar wind and the interplanetary magnetic field, as well as to the state of the magnetosphere. We study and compare the effects of the inductive electric fields produced by substorms and by pressure pulses on the dynamics of the outer radiation belt. Geomagnetic disturbances that occurred on October 11, 2017, on January 8, 2018 and on June 22, 2015 have been considered in detail.

### **Small-scale density irregularities within the plasmasphere**

G. Kotova, D. Chugunin, A. Chernyshov, M. Mogilevsky, V. Bezrukikh

*Space Research Institute of Russian academy of Sciences, Moscow, Russia*

The data from the wide-angle plasma analyzer (Faraday cup) installed on the Magion-5 satellite suggests the almost constant existence of small scale density oscillations in the inner plasmasphere. The frequency of these oscillations is close to 30 mHz and the spatial dimensions are about 100 km. The amplitude of these density fluctuations is proportional to the background density itself. Data obtained during several plasmasphere crossings are presented and analyzed.

The work was supported by a grant from the Russian Science Foundation No. 25-12-00059.

### **Analysis of interplanetary shock associated geosynchronous magnetic field perturbations during the solar cycle 25**

A.S. Lavrukhin<sup>1</sup>, K.B. Kaportseva<sup>1</sup>, A.O. Shiryayev<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *M.V.Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *M.V.Lomonosov Moscow State University, Faculty of Space Research, Moscow, Russia*

Interplanetary shocks usually cause the sudden impulse / sudden commencement (SI/SC) of magnetic field on the Earth surface. The magnitudes of observed SI/SC's vary at different stations and are strongly influenced by various SC-associated magnetospheric current systems. Using only ground stations data it is difficult to estimate the contribution of magnetopause compression to SI/SC under the influence of an interplanetary shock and influence of its inclination on the magnetopause compression asymmetry. Thus it may be useful to use the geosynchronous spacecraft data. We have selected several SC/SI events during the ongoing 25th solar cycle, when the GOES 16, 17/18 spacecraft were located almost symmetrical about the x-axis on the dayside, to study the geosynchronous magnetic field perturbations on the dusk and dawn sides and compare the observed asymmetries to the calculated interplanetary shock inclination angle.

### **Quasi-stationary electron-scale current sheet: self-consistent structure and electron acceleration by the ambipolar electric field**

M.V. Leonenko, E.E. Grigorenko, L.M. Zelenyi (*Space research institute of RAS, Moscow, Russia*)

We report on observation of the self-consistent configuration of the intense Electron-Scale Current Sheets (ECSs) located near the neural plane in the Earth's magnetotail under the presence of strong guide field ( $B_M$ ). During the interval of interest ion Bursty Bulk Flow (BBF) moving tailward was observed in the extremely hot PS.

The ECSs with current densities  $j \sim 100 \text{ nA/m}^2$  have the specific 1D planar configuration self-consistently supported by the delicate balance between central field-aligned current and perpendicular currents in its southern and northern edges. The field-aligned current is carried by the suprathermal high-speed electron beam, while the perpendicular currents are supported by the diamagnetic and  $\mathbf{ExB}$  drifts due to the presence of the strong ambipolar electric field ( $\sim 50 \text{ mV/m}$ ).

We demonstrate that the strong electric current in the ECSs can exist without strong electron anisotropy due to the contribution of the diamagnetic and  $\mathbf{ExB}$  drifts. We found that the vertical pressure balance in the ECSs is mainly contributed not by the increase in guide magnetic field, but by the enhancement of the electron pressure.

It has been shown that the strong ambipolar electric field related to the ECSs can accelerate field-aligned electron beams providing the energy gain up to  $\sim (6-8) \text{ keV}$ . Such acceleration can have a cascade behavior by producing new ECSs in other PS locations. The results of our study shed a new light on the mechanisms of the intense ECSs formation and illustrate the variety of magnetic structures which could exist in hot collisionless plasma.

This work was supported by the Russian Science Foundation grant No. 25-42-00028.

## **Dynamics of the high-latitude Earth's magnetosphere according to polar satellite data**

A.N. Manina<sup>1,2</sup>; V.V. Kalegaev<sup>1,2</sup>; V.N. Nikolaeva<sup>1</sup>; A.N. Ivanova<sup>1,2</sup>; N.A. Vlasova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics of Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *Physical Faculty of Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

Satellite measurements of charged particle fluxes make it possible to study the structure and dynamics of the magnetosphere during geomagnetic disturbances. The region of the inner magnetosphere is identified by measurements of the fluxes of trapped particles, while the dynamics of the auroral magnetosphere is manifested in spatiotemporal variations in the fluxes of charged particles in the auroral oval region. The most complete information about the structure of the magnetosphere can be obtained in the presence of a third population of particles, solar energetic protons, accessing the polar caps during solar proton events.

Such an event was recorded during the magnetic storm on 27/02/2023. Measurements of the Meteor-M2 and DMSP polar satellites made it possible to determine the position of the high-latitude boundaries of the main magnetospheric structures: areas of solar proton penetration (3-10 MeV); areas of auroral electron and ion precipitation (30 eV÷30 keV); areas of electron capture (> 100 keV) in the outer radiation belt of the Earth. Analysis of satellite measurements in the evening and morning sectors of the magnetosphere has shown that the boundaries of all magnetospheric structures shift to lower latitudes during the main phase of the magnetic storm. In the orbits of polar satellites, a morning-evening asymmetry is observed in the fluxes of trapped electrons and solar energetic particles in the main phase of the storm, associated with the formation of a partial ring current in the evening magnetosphere. The presence of solar energetic protons has been detected in the region of the auroral oval and in the region of the outer radiation belt, which indicates the possibility of diffusive penetration of solar particles through the flanks of the magnetosphere.

The research was carried out within the framework of the state assignment of the Lomonosov Moscow State University.

## **Current Systems of a Diamagnetic Cavity**

I.P. Paramonik<sup>1</sup>, A.V. Divin<sup>1</sup>, A.A. Chibrarov<sup>2</sup>, M.S. Rumenskikh<sup>2</sup>, I.F. Shaikhislamov<sup>2</sup>, V.S. Semenov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia, [igorparamonik@gmail.com](mailto:igorparamonik@gmail.com)*

<sup>2</sup> *Institute of Laser Physics, SB RAS, Novosibirsk, Russia*

Spherically symmetric expansion of a plasma cloud from a point source into an external magnetic field is a fundamental model problem for describing various astrophysical phenomena in space plasma. Examples of such events, occurring across a wide range of scales, include supernova explosions, coronal mass ejections, the interaction of the solar or interstellar wind with the galactic magnetic field, and experiments in the Earth's magnetosphere (AMPTE, CRRES). As it expands, the plasma displaces the surrounding magnetic field and forms a diamagnetic cavity.

Laboratory experiments with laser plasma at the KI-1 facility (Institute of Laser Physics SB RAS, Novosibirsk) established the existence of a weakly magnetized ion regime. In this regime, the gyroradius of particles in the expanding cloud is comparable to or exceeds the magnetic stopping radius. At a late stage of the process, this leads to anomalously fast magnetic field penetration into the cavity, accompanied by the generation of azimuthal Hall magnetic fields. Particle-in-Cell (PIC) numerical simulations confirmed the presence of Hall fields in this problem and revealed the existence of a double, nested quadrupole structure of the azimuthal field, consisting of outer and inner parts. Furthermore, both laboratory and numerical simulations confirmed the dependence of the field configuration and intensity on the density of the external background plasma: the inner structure becomes less pronounced as the background density increases.

This work demonstrates the current systems of a diamagnetic cavity associated with Hall magnetic fields for different background plasma densities. Using 2D PIC simulations as an example, it is shown how these current systems close in fundamentally different ways to produce distinct magnetic field structures under sub-Alfvénic and super-Alfvénic plasma expansion regimes.

## **Features of the expansion of plasma jets with unmagnetized ions across ambient magnetic field in laboratory experiments on the "Krot" plasma device for modeling effects of active space experiments**

A.S. Nikolenko, M.E. Gushchin, S.V. Korobkov, I.Yu. Zudin, K.N. Loskutov, A.V. Strikovskiy, N.A. Aidakina, I.M. Vershinin, V.V. Kochedykov, D.S. Pleshkov

*Federal Research Center A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences (IAP RAS), Nizhny Novgorod, Russia*

The propagation of ionized matter flows across an external magnetic field is a fundamental problem arising in various fields of space and laboratory plasma physics. In the near-Earth environment, these processes occur during the interaction of the solar wind with the Earth's magnetosphere, as well as during active geophysical experiments [1], such as Fluxus, North Star [2] in the ionosphere and AMPTE [3], CRRES [4] in the magnetosphere. The large-scale plasma facility "Krot" is used to conduct laboratory experiments on limited modeling of phenomena arising from the injection of plasma jets into the Earth's ionosphere and magnetosphere [5, 6]. Compact coaxial accelerators are used as the source of plasma jets in laboratory experiments. These accelerators inject plasma flows into a vacuum or less dense background plasma/neutral gas along or across a quasi-homogeneous magnetic field in an "unbounded" expansion regime. The main results of studies of two scenarios for plasma motion across a magnetic field in laboratory experiments are presented. When a jet is injected along the magnetic field ( $\mathbf{B}_0$ ), deceleration of the jet boundary across  $\mathbf{B}_0$  leads to the development of a flute instability, classified as a Large Larmor Rayleigh-Taylor instability (unmagnetized ions). When a plasma jet is injected across magnetic field in a vacuum, the plasma collimates in a plane formed by the initial velocity and external magnetic field vectors—a "plasma slab." The length over which the plasma flow propagates across the field in a laboratory experiment exceeds one meter and is approximately ten gyroradii of the jet ions. Based on a combination of experimental data from probe and non-contact diagnostics, it has been investigated that the observed plasma motion is possible only due to its polarization across the injection direction,  $\mathbf{V}_0$ .

This work was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-12-00459.

1. Winske D., Huba J.D., Niemann C., et al. // *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*. 2019. V. 51, No. 5. P. 1.
2. Gavrilov B.G., Zetzer J.I., Podgorny I.M., et al. // *Cosmic Research*. 2003. V. 41, No. 1. P. 28.
3. Bernhardt P.A., Roussel-Dupre R.A., Pongratz M.B., et al. // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 1987. V. 92, No. A6. P. 577.
4. Huba J.D., Bernhardt P.A., Lyon J.G. // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 1992. V. 97, No. A1. P. 11.
5. Nikolenko A.S., Gushchin M.E., Korobkov S.V., et al. // *Plasma Physics Reports*. 2023. V. 49, No. 11. P. 1284.
6. Korobkov S.V., Nikolenko A.S., Gushchin M.E., et al. // *Astronomy Reports*. 2023. V. 67, No. 1. P. 93.

## **Empirical model of energetic electron fluxes at GEO.**

M.A. Shukhtina, V.A. Sergeev (*Saint-Petersburg State University*)

### **Abstract**

We propose an empirical model for the omnidirectional fluxes of energetic electrons with energies 40-275 keV at the geostationary orbit (GEO) during disturbed periods. Different from other models, it presents the electron fluxes as the result of injections, superimposed on some quiet background. The injection strength is parametrized by the positive increment of mid-latitude substorm MPB index (McPherron and Chu, 2017). The model is based on observations from GOES-13 and GOES-15 spacecraft made in 2017 and is tested on the period 2012-2016. It reproduces such well-known features, as midnight-dawn maximum, evening minimum and energy dispersion of the peak fluxes, demonstrating the drift mechanism, governing the EE fluxes. The best correlations with observations are manifested for moderate geomagnetic activity.

Unexpectedly it appeared that the model works even for supersubstorms, revealing the flux saturation prescribed to the Kennel-Petschek limit.

We conclude that substorm-related injections are the main factor, driving the EE fluxes at GEO.

The work is supported by Saint-Petersburg State University (research Grant N 116234986)

McPherron, R. L., & Chu, X. (2017). The mid-latitude positive bay and the MPB index of substorm activity. *Space Science Reviews*, 206(1-4), 91–122. <https://doi.org/10.1007/s11214-016-0316-6>

## **Computation of energy- and pitch-angle-dependent drift shells shapes using particle tracing in GT package**

S.A. Proshin, V.V. Malakhov, A.G. Mayorov (*National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia*)

Standard methods for calculating drift shells (IRBEM, shellg) use a simplified approach by computing the value of parameter L through tracing Earth's magnetic field lines. This method provides sufficient accuracy for solving many problems in the area of Earth's radiation belts but is generally not suitable for precise reconstruction of shape and position of drift shells in fields with complex configurations. Furthermore, this approach does not account for dependence on particle energy and equatorial pitch angle in radiation belt particles. Such differences can be significant especially at the lower boundary of the inner radiation belt where flux values exhibit strong gradients across geomagnetic coordinates.

We present rigorous calculations of drift shells in an undisturbed magnetosphere computed via trajectory simulations of trapped protons within Earth's magnetic field. The form and location of each shell are reconstructed based on gyrocenter calculations from obtained trajectories according to their strict definition [1]. Calculations were performed using the GT environment [3] for protons with energies ranging from 10 MeV to 4 GeV under conditions of an undisturbed magnetosphere covering values of parameter L between 1.1 and 6. Our analysis revealed that even for minimum-energy particles, the shapes and positions of drift shells calculated by standard methods differ significantly compared to those derived through tracers. The effect is particularly pronounced over the South Atlantic Magnetic Anomaly region near the lower boundary of Earth's inner radiation belt. Values of fluxes determined by these two approaches, may vary up to 0.02 Re, which is substantial given the sharp dependency of fluxes on this variable in this region. Additionally, we employ more accurate models such as CHAOS[2] for better representation of the main component of Earth's magnetic field. We also include lithospheric components modeled with LCS.

1. J. G. Roederer, B«Coordinates for representing radiation belt particle flux», *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 123:1381, 2018.

2. Finlay et al., B«The CHAOS-7 geomagnetic field model and observed changes in the South Atlantic Anomaly», *Earth, Planets and Space*, 72:156, 2020.

3. <https://github.com/agmayorov/GTsimulation.git>

## **Solar wind and geomagnetic activity conditions for energetic electron injections into $L < 1.2$**

A.V. Suvorova (*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics MGU, Moscow, Russia*)

The sudden enhancements of quasi-trapped energetic electrons fluxes below the inner radiation belt (IRB) have remained a puzzling phenomena for decades. It is known as enhancements of forbidden energetic electrons (FEE). The FEE enhancements are studied using data from low-Earth orbit NOAA/POES satellites. Characteristic features of FEE behavior include variations in the frequency of FEE occurrence depending on solar cycle and month (annual variation). In the present study we conducted detailed analysis of several FEE events in order to find key solar wind parameters and geomagnetic conditions which lead to the statistical properties of FEE. We found that (1) an abrupt and significant change in the solar wind pressure is a key solar wind driver of the FEE enhancements observed; (2) a significant difference in ionization between sunlight and the dark ionosphere is a necessary condition for FEE occurrence.

## **Merging of OVATION Prime and ELFIN dataset: electron precipitation within 0.1–1000 keV energy range**

D.S. Tonoian<sup>1</sup>, X.-J. Zhang<sup>1</sup>, A.V. Artemyev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*University of Texas at Dallas, Richardson, TX, USA*

<sup>2</sup>*University of Texas at Arlington, Arlington, TX, USA*

Diffuse electron precipitation plays a crucial role in connecting Earth's magnetosphere and ionosphere and provides the most significant energy input for ionospheric ionization. Long-term, multi-satellite measurements from the DMSP mission provide a fundamental dataset of such precipitation, which is combined into the OVATION Prime model. However, this dataset and model are limited to energies <30 keV. A promising extension to higher energies can be obtained from ELFIN CubeSat measurements of precipitating electron fluxes in the 50–6000 keV range, although these measurements alone do not capture the important plasma sheet contribution at <50 keV. This study aims to merge the ELFIN dataset with the OVATION Prime model to extend each ELFIN precipitating spectrum to lower energies based on statistical DMSP observations. We describe the methodology for merging ELFIN and OVATION Prime, present the results of our analysis of precipitating electron spectra over the 100–10<sup>6</sup> eV range.

## **Разработка модели для анализа геомагнитно-индуцированных токов на основе эквивалентной схемы высоковольтной сети Мурманской области.**

Билин В.А.<sup>1</sup>, Селиванов В.Н.<sup>2</sup>, Сахаров Я.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Полярный Геофизический Институт, Апатиты, Россия [bilinvlad@gmail.com](mailto:bilinvlad@gmail.com)*

<sup>2</sup> *Центр физико-технических проблем энергетики Севера ФИЦ КНЦ РАН, г. Апатиты*

Данная работа входит в состав более широкой задачи, направленной на создание метода и программных средств расчёта геомагнитно-индуцированных токов в элементах энергосистемы произвольной конфигурации в заданные моменты времени с использованием данных о вариациях в магнитном поле Земли. В работе рассмотрен высоковольтный участок электроэнергетической сети Мурманской области, включающий в себя 8 подстанций 330 кВ, 38 подстанций 150кВ и 36 подстанций 110кВ. В рамках исследования была сформирована база данных, содержащая детализированную информацию о подстанциях, трансформаторах и линиях электропередачи рассматриваемого участка сети. На основе этих данных была сформирована эквивалентная электрическая схема рассматриваемого участка электрической сети. Построение схемы выполнено в автоматическом режиме с применением собственной программы, использующей данные базы данных. Схема включает в себя 82 подстанции, 152 трансформатора, 166 ЛЭП. На основе сформированной эквивалентной схемы был разработан прототип модели и выполнен расчёт ГИТ для двух базовых сценариев однородного геоэлектрического поля с напряжённостью 1 В/км, ориентированного в северном и восточном направлениях. Полученные результаты позволили проанализировать распределение токов в элементах сети и подтвердить работоспособность реализованного расчётного подхода, так же проверить способность модели работать с эквивалентными схемами, содержащими сотни узлов и сотни связей между ними.

Исследование выполнено в рамках гранта Российского научного фонда № 25-29-01240, <https://rscf.ru/project/25-29-01240/>.

## **ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ПОТОКОВ ЭЛЕКТРОНОВ ВНЕШНЕГО РАДИАЦИОННОГО ПОЯСА ЗЕМЛИ ВО ВРЕМЯ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ**

Груздов Д. С.<sup>1,2</sup>, Калегаев В. В.<sup>1,2</sup>, Власова Н. А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова,*

<sup>2</sup> *НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия, [gruzdov.ds20@physics.msu.ru](mailto:gruzdov.ds20@physics.msu.ru)*

Внешний радиационный пояс Земли (ВРПЗ) является одной из самых динамичных областей в магнитосфере. Наиболее существенные изменения ВРПЗ происходят под влиянием солнечного ветра и сопровождаются геомагнитными возмущениями. Во время таких событий могут наблюдаться сильные вариации потоков энергичных электронов, изменения пространственных параметров внешнего пояса: максимум ВРПЗ или его высокоширотная граница.

Вариации захваченных (на орбите космических аппаратов Van Allen Probes-A; -B) и квазизахваченных (на низкой полярной орбите спутника Метеор-М2) потоков электронов ВРПЗ изучались на разных фазах геомагнитных бурь разной интенсивности. Временные и пространственные профили потоков электронов в разных энергетических диапазонах ( $>0,1$ ,  $>0,3$ ,  $>0,7$  и  $>2$  МэВ) были восстановлены из спутниковых измерений, полученных во время нескольких пересечений радиационного пояса. Для анализа неадиабатических процессов ускорения электронов ВРПЗ были рассчитаны профили плотности электронов в фазовом пространстве в зависимости от параметра Родерера на основе данных Van Allen Probes о потоках электронов в зависимости от их локальных питч-углов и параболической модели магнитного поля A2000.

В работе рассмотрены три умеренно-слабые магнитные бури, сопровождаемые продолжительной суббуревой активностью: 01-05.02.2015, 6-12.11.2015 и 11-16.10.2017. Данные о потоках электронов в максимуме ВРПЗ на высоких широтах и вблизи геомагнитного экватора имеют сходство для всех трех событий, в связи с чем, при небольшой разнице во времени между измерениями двух спутников (не более 30 минут), можно ожидать похожую динамику потоков.

На главной фазе бурь суббуревые активизации и резонансное взаимодействие частиц с волнами ОНЧ диапазона приводят к ускорению частиц меньших энергий (100-300 кэВ); к концу фазы восстановления растет жесткость энергетического спектра, поток частиц с энергией  $E > 2$  МэВ увеличивается примерно на 1.5-2 порядка. Во время главных фаз событий 06-12.11.2015 и 11-16.10.2017 потоки частиц с  $E > 0,3$  МэВ,  $E > 0,7$  МэВ,  $E > 2$  МэВ уменьшаются, что связано, предположительно, с Dst-эффектом и потерями на магнитопаузе.

Во время события 11-16.10.2017 наблюдается характерный отклик ВРПЗ на суббуревые инжекции в начале события: предположительно последовательное воздействие индукционного электрического поля, генерируемого в ходе серии суббурь, на частицы меньших энергий приводит к возрастанию потоков, что наблюдается по градиенту плотности электронов в фазовом пространстве. Для событий 01-05.02.2015 и 06-12.11.2015 подобного явления не наблюдается.

Помимо прочего, в событии 11-16.10.2017 наблюдается формирование «дополнительного» радиационного пояса релятивистских электронов с максимумом на  $L \sim 4.8$ . Присутствует временная задержка в формировании дополнительного максимума для частиц разных энергий, что связано с разной эффективностью ускорения электронов разных энергий. Двухпиковая структура наблюдается как на высоких широтах, так и вблизи геомагнитного экватора.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-62-00048.

## **Области и эффективность диффузионного ускорения протонов головной ударной волной Земли при различных направлениях межпланетного магнитного поля**

Ю.А. Кропотина, А.М. Быков (*ФТИ им. А.Ф. Иоффе*)

Построены гибридные кинетические модели головной ударной волны Земли для различных направлениями межпланетного поля. Исследована зависимость направления межпланетного поля ширины и расположения областей инжекции и ускорения протонов по механизму Ферми 1-го порядка, а также эффективности инжекции. Построены траектории и распределения надтепловых протонов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 25-72-20007. Моделирование осуществлялось с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М.В. Ломоносова.

### **Лабораторное моделирование бесстолкновительного взаимодействия лазерной плазмы с намагниченной фоновой средой методами спектроскопии**

М.С. Руменских, А.А. Чибранов, А.Г. Березуцкий, В.Г. Посух, П.А. Трушин, Ю.П. Захаров, И.Б. Мирошниченко, И.Ф. Шайхисламов (*Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия*)

Импульсное расширение локализованного плазменного облака в разреженную намагниченную среду сопровождается рядом физических эффектов, воздействующих на динамику заряженных частиц. Один из таких эффектов – магнитно-ламинарный механизм – представляет собой процесс бесстолкновительного взаимодействия замагниченной фоновой плазмы и быстрой плазмы, распространяющейся поперек линий магнитного поля. Движение плазмы поперек магнитного поля индуцирует азимутальное электрическое поле, что вызывает дрейф заряженных частиц фоновой плазмы в направлении  $E \times B$ . Это приводит к образованию азимутальных потоков фоновой плазмы за счет замедления ионов быстрой поперечной плазмы.

В экспериментах на стенде «КИ-1» проявление магнитно-ламинарного механизма было зафиксировано в ускорении различных ионных потоков при помощи эмиссионной спектроскопии. При рассмотрении слоя плазмы, соответствующего радиусу магнитной каверны, наблюдалось доплеровское смещение линии  $H\alpha$ . Кроме того, данный эффект был подтвержден коллекторной диагностикой азимутальных ионных потоков. Этот эффект характерен для ряда астрофизических и космических процессов, а также активных экспериментов в слоях атмосферы Земли.

В работе представлены результаты лабораторного моделирования расширения квазисферического облака лазерной плазмы в фоновую водородную плазму с продольным магнитным полем (50–100 Гс) на вакуумном стенде «КИ-1». При индукции магнитного поля 50 Гс на расстоянии 20 см от мишени зафиксировано значительное доплеровское смещение линии  $H\alpha$ , свидетельствующее о формировании азимутальных потоков ионов водорода фоновой плазмы. При увеличении поля до 100 Гс наблюдается сжатие магнитной каверны и проникновение ионов углерода лазерной плазмы на расстояние 20 см, о чём свидетельствует усиление интенсивности спектральных линий углерода. Данные коллекторной диагностики подтверждают наличие направленных азимутальных потоков (вращение против часовой стрелки при наблюдении со стороны камеры) на границе каверны. Полученные результаты качественно согласуются с теоретическими представлениями о бесстолкновительном взаимодействии плазм [1].

[1] Bashurin V. P., Golubev A. I., Terekhin V. A. The collisionless deceleration of an ionized cloud dispersing in a uniform plasma in a magnetic field // *J. Appl. Mech. Tech. Phys. (Engl. Transl.)*; (United States). – 1984. – Т. 24. – №. 5.

## **Об оптимальном параметре связи между геомагнитными вариациями и геоиндуцированными токами**

Ягова Н.В.<sup>1,2</sup>, Сахаров Я.А.<sup>3</sup>, Селиванов В.Н.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской Академии Наук (ИФЗ РАН), Москва, Россия, [nyagova@ifz.ru](mailto:nyagova@ifz.ru)

<sup>2</sup> Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геофизический центр Российской академии наук (ГЦ РАН), Москва, Россия

<sup>3</sup> Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Полярный геофизический институт (ПГИ), Апатиты, Россия

<sup>4</sup> Центр физико-технических проблем энергетики Севера – филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук» (ЦЭС КНЦ РАН), Апатиты, Россия

В работе [1] было показано, что интегральное по меридиональной цепочке станций значение  $S(|dB_y/dt|)$  демонстрирует высокие уровни корреляции со среднечасовым уровнем геоиндуцированных токов (ГИТ) на станции Выходной сети измерений ГИТ [2]. Производная по времени широтной компоненты магнитного поля  $B_y$  определялся по временным вариациям сигнала, а суммирование производится по дискретному набору шагов между временными отсчетами. Настоящая работа является продолжением [1] и также посвящена задачам мониторинга ГИТ и апостериорной оценки причины сбоев в технологических системах. Работа нацелена на поиск оптимального набора параметров для определения текущего значения ГИТ по вариациям геомагнитного поля. Для этого исследуется зависимость коэффициентов корреляции от набора включенных в анализ станций и частот временных отсчетов. Анализируется влияние суточной и сезонной вариаций, и зависимость от масштабов осреднения ГИТ.

Работа поддержана грантом РНФ № [21-77-30010](#) (П)

Литература

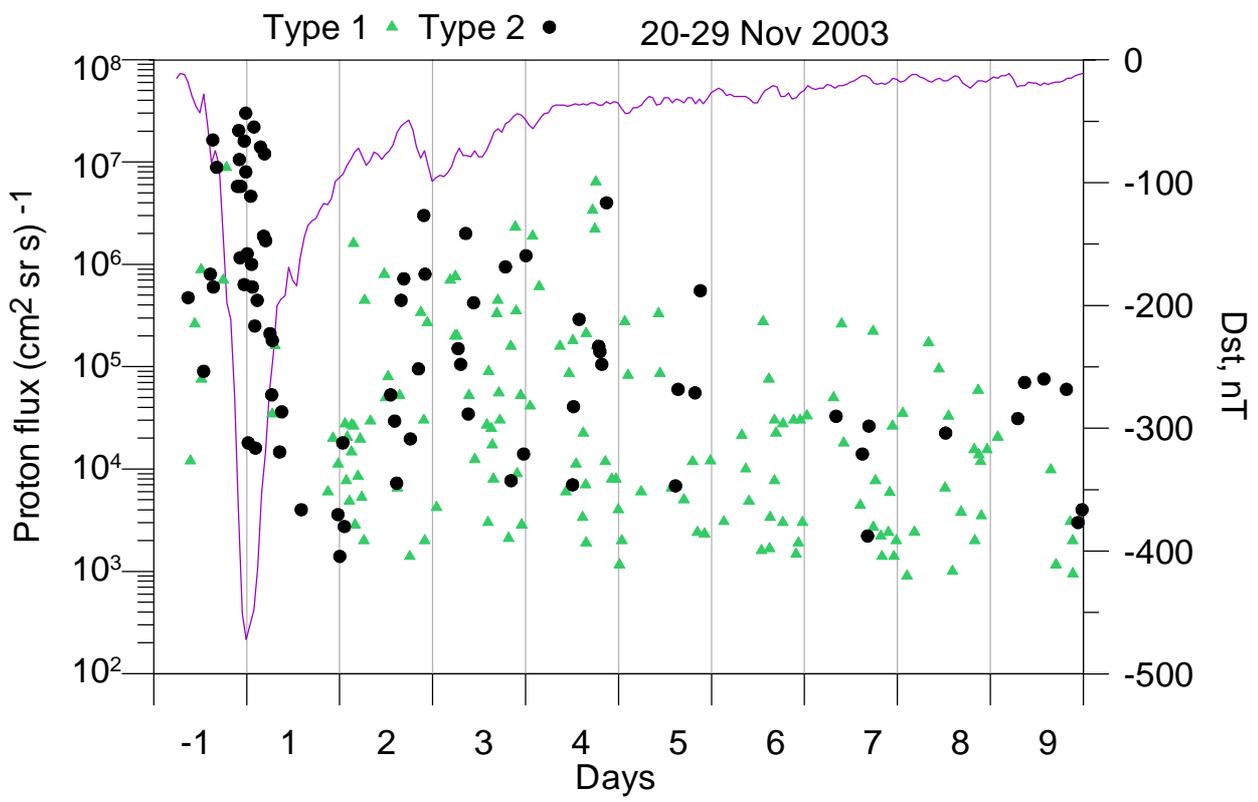
1. Сахаров Я. А., Ягова Н. В., Пилипенко В. А. и др. Возможности и ограничения применения индексов геомагнитной активности в задачах мониторинга Геоиндуцированных токов // Изв. РАН. Серия физическая (в печати)
2. Селиванов В. Н., Аксенович Т. В., Билин В. А. и др. // Солнечно-земная физика. 2023. Т. 9. С. 93-101 DOI: 10.12737/stp-93202311

## **Сравнительные характеристики Высыпаний энергичных протонов, связанных и не связанных с высыпаниями релятивистских электронов**

Яхнина Т.А., Демехов А.Г., Попова Т.А. (ПГИ, г. Апатиты, Россия, [tyahnina@gmail.com](mailto:tyahnina@gmail.com))

В работе проведен анализ высыпаний энергичных (~40 кэВ) протонов в интервале 08-18.10.2017 по данным низкоорбитальных спутников NOAA/POES. Этот интервал включает умеренную магнитную бурю. Рассматриваемые изолированные высыпания энергичных протонов в анизотропной зоне к экватору от границы изотропии протонов были разделены на две группы. Первая группа включает высыпания, не связанные с высыпанием релятивистских (~800 кэВ) электронов, во второй группе протонные высыпания всегда сопровождаются высыпанием релятивистских электронов. Проведено сравнение характеристик, таких как: количество случаев наблюдения, поток высыпающихся частиц, геомагнитная широта и локализация по MLT для указанных групп. Показано, что количество высыпаний первой группы примерно в 6 раз превышает количество высыпаний второй группы. При этом интенсивность высыпаний первой группы заметно уступает интенсивности второй группы. Геомагнитная широта высыпаний первой группы в среднем оказалась выше на 5 градусов, чем для второй группы. Максимальное число случаев первой группы наблюдалось в предполуденном секторе MLT, тогда как высыпания второй группы, т.е. связанные с высыпаниями релятивистских электронов, - в послеполуденном секторе MLT. Наряду с высыпаниями протонов в окрестности проекции их источника (обс. Ловозеро) анализировались пульсации диапазона Pc1. Полученные результаты могут быть использованы для локализации области ионно-циклотронной неустойчивости и определения ее характеристик.

*Waves, Wave-Particle Interaction*



## **Microbursts Near the Electron Isotropy Boundary: Colocation of Curvature and Whistler-Mode Scattering**

A.V. Artemyev<sup>1</sup>, P.A. Klimov<sup>2,3</sup>, V.D. Nikolaeva<sup>2</sup>, X.-J. Zhang<sup>4</sup>, V. Angelopoulos<sup>1</sup>, K.D. Shchelkanov<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> *Department of Physics, University of Texas at Arlington, Arlington, Texas, USA*

<sup>2</sup> *Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, 1(2), Leninskie gory, Moscow 119991, Russia*

<sup>3</sup> *Department of Physics, Lomonosov Moscow State University, 1(2), Leninskie gory, Moscow 119991, Russia*

<sup>4</sup> *Department of Physics, University of Texas at Dallas, Richardson, Texas, USA*

Field-line curvature scattering (FLCS) within the plasma sheet-to-outer radiation belt transition region serves as a key driver of energy-latitude dispersion in energetic electron precipitation observed at low latitudes. This precipitation forms the isotropy boundary of electrons, located between the isotropic <200 keV electron fluxes of the plasma sheet and the anisotropic relativistic fluxes of the outer radiation belt. During geomagnetically active periods, the transition region becomes populated with plasma sheet injections that introduce various transient electron precipitation mechanisms, significantly complicating the structure of the isotropy boundary. In this study, we show that the timescales of these precipitations can reach subsecond levels, allowing them to be interpreted as microbursts. Observations of such microbursts substantially enhance the spatial and temporal variability of the isotropy boundary. By combining low-altitude ELFING satellite measurements with high-temporal-resolution (~40 ms) near-UV imaging photometer data from the PAIPS project, we separate between FLCS-driven precipitation patterns that form the isotropy boundary and electron scattering by whistler-mode waves, which generates microbursts. We identify, for the first time, the near-colocation of these two precipitation mechanisms within the transition region -- an important feature not previously reported.

## **A comparative analysis of the influence of geomagnetic pulsations of various frequency on the growth of GICs in power lines in the Murmansk region**

Belakhovsky V.B.<sup>1</sup>, Pilipenko V.A.<sup>2</sup>, Selivanov V.N.<sup>3</sup>, Sakharov Ya.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Polar Geophysical Institute, Apatity*

<sup>2</sup> *Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow*

<sup>3</sup> *Center for Physical and Technical Problems of Northern Energy, Federal Research Center, Kola Science Center, Russian Academy of Sciences, Apatity*

[belakhov@mail.ru](mailto:belakhov@mail.ru)

The paper presents a comparative analysis of the influence of geomagnetic pulsations of the Pg type and low-frequency pulsations of the Pc5-6, Pi3 type on the growth of geomagnetically induced currents (GICs) in the power transmission lines (PTL) of the Murmansk region using magnetometer data at the PGI Loparskaya observatory (LOP) and data from the Vykhodnoy substation (VKH), located near Murmansk.

Previously, the issue of the influence of Pg pulsations (giant pulsations) on the growth of GICs has not been considered in the scientific literature, since these pulsations have relatively small amplitude (within several tens of nT) and are quite rare in the data of ground-based magnetometers. Pg pulsations belong to the Pc4 frequency range and have a period of ~1.5-2.5 minutes; they represent a resonant wave structure in the magnetosphere, excited by ring current protons as a result of the development of kinetic instabilities. In ground-based data, Pg pulsations are more pronounced in the Y-component of the geomagnetic field. Due to their monochromatic nature, Pg pulsations can be used as a marker for assessing the influence of geomagnetic disturbance frequency on the growth of the GIC. Approximately ten events were analyzed. Although Pg pulsations resulted in a larger jump in geomagnetic field variability (dB/dt) than Pc5-6/Pi3 pulsations, the GIC amplitude during Pg pulsation recording was smaller. The pulsation amplitudes were comparable (10-20 nT), while the frequencies differed by a factor of 5-8. Thus, as the frequency of geomagnetic pulsations decreased (from approximately 8 to 1.5 mHz), the GIC amplitude increased.

It is supposed that the skin effect causes low-frequency signals (Pc6 pulsations) to penetrate deeper into the Earth's lithosphere. This leads to an increase in the loop area and the creation of a greater magnetic flux, which leads to a higher induced EMF and, consequently, a higher GIC in the power transmission lines. The skin-layer thickness estimates for Pg and Pc6 pulsations demonstrate agreement between this mechanism and experimental observations. Therefore, when predicting the GIC in process lines, it is necessary to consider not only the dB/dt variability of the geomagnetic field, but also the frequency content of the signal.

The study was supported by grant No. 25-17-20038 from the Russian Science Foundation, <https://rscf.ru/project/25-17-20038/>, and a grant from the Ministry of Education and Science of the Murmansk Region.

## Analysis of the ionospheric source of geomagnetic Pi3 pulsations using a complex of satellite and ground-based measurements

Belakhovsky V.B.<sup>1,2</sup>, Pilipenko V.A.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia*

<sup>2</sup> *Institute of Solar-Terrestrial Physics of the Siberian Branch of the RAS, Irkutsk, Russia*

<sup>3</sup> *Institute of Physics of the Earth, Moscow, Russia*

Pi3 pulsations provide a significant increase in magnetic field variability (dB/dt) and, consequently, an enhancement of geomagnetically induced currents (GICs) in technological systems. Pi3 is one of the few remaining ULF phenomena whose physical mechanism has not been definitively established, despite numerous morphological studies. Here using data from the CARISMA and THEMIS magnetometer networks (Canada), NORSTAR riometers, and GOES, MMS, THEMIS, and Cluster satellites the physical nature of Pi3 pulsations (5-20 minutes) was investigated. The event on September 4, 2022, under consideration is unique because the main space missions studying the magnetotail (MMS, THEMIS, and Cluster) were aligned roughly along the X-coordinate in the GSM system in the magnetotail. This event is a moderate-intensity magnetic storm (Dst = -71 nT) caused by a corotating interaction region. During the event powerful substorms with intensities of ~1500 nT were observed by CARISMA network magnetometers. These substorms were accompanied by a noticeable increase in riometer absorption (>5 dB).

To more clearly identify Pi3 pulsations the raw geomagnetic data have been detrended using a smoothing procedure. Pi3 pulsations lead to a noticeable increase in geomagnetic field variability (dB/dt) up to ~600 nT/min. A comparison of Pi3 pulsations at closely spaced stations reveals a lack of clear correlation between them. Pi3 irregular pulsations intensely modulate electron fluxes in the magnetosphere, according to GOES satellite data and riometric absorption. A comparison of magnetic field variations at GOES-16 geostationary satellite and at magnetically conjugated SNKQ station shows that not all Pi3 trains at SNKQ station are accompanied by similar pulsations at the GOES-16 satellite.

Thus, Pi3 pulsations observed on the Earth's surface may have not only a source in the magnetosphere associated with the excitation of MHD waves, but changes in ionospheric conductivity due to substorm-associated precipitation can be an additional source of these disturbances. Therefore, Pi3 pulsations observed at the Earth's surface may represent a superposition of waves generated in the magnetosphere and ionosphere.

The study is supported by a grant № 24-77-10012 from the Russian Science Foundation.

## The influence of thermal $\beta$ on the structure of Alfvén waves at Alfvén-Mach $M_A=0.2$

A.G. Berezutsky, V.N. Tishchenko, S.S. Sharipov, I.B. Miroshnichenko, A.A. Chibrarov, I.F. Shaikhislamov.  
*Institute of Laser Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia*

This work presents the results of numerical simulations of Alfvén wave generated by periodic laser plasma bunches in essentially sub-Alfvén bunch expansion. The calculations show that the Alfvén wave structure is preserved in the range of  $\beta=10^{-5}$  to  $10^{-1}$ , while at  $\beta=1$ , the Alfvén "tail" observed in the  $M_A=0.2$  (Tishchenko V.N. et al. 2022) mode increases in duration, reaching the region of bunch expansion.

The work was supported by the Foundation for the Advancement of Theoretical Physics and Mathematics "BASIS".

## **Stable dispersion analysis of an arbitrary distributed plasma system with noise**

V.A. Frantsuzov<sup>1,2</sup>, A.V. Artemyev<sup>2</sup>, A.A. Petrukovich<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IKI), Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *Faculty of Physics, National Research Institute Higher School of Economics, Moscow, Russia*

<sup>3</sup> *Department of Earth, Planetary, and Space Sciences, University of California, Los Angeles, USA*

Plasma micro-instabilities, although driven by the kinetic properties of charged-particle distribution functions, largely control the dynamics of large-scale plasma systems. These instabilities are responsible for releasing the free energy stored within particle distributions and for driving their relaxation toward more stable states. In the absence of collisions – such as in space plasmas – micro-instabilities provide the primary mechanism for particle energy and momentum exchange, enabling the system to evolve toward equilibrium.

The basic theoretical framework used to investigate plasma instabilities is perturbation theory, which treats instabilities as spatially and temporally growing perturbations of an initial plasma state. Applied to particle velocity distributions, this approach encompasses a wide range of instabilities and yields their dispersion relations (frequency as a function of wave number) and growth rates. Historically, perturbation theory has been applied to model distributions described by analytical functions designed to mimic characteristic features of realistic plasmas. However, with the rapid development of in-situ charged-particle measurements from space missions, this approach is increasingly being used directly on spacecraft data interpolated onto velocity.

The integration of spacecraft observations with perturbation theory for instability identification introduces several new challenges. First, distribution functions measured by spacecraft contain finite – and sometimes significant – noise associated with measurement techniques, and this noise must be properly treated to minimize its impact on the resulting wave modes. Second, unlike idealized model distributions tailored for the study of a specific instability, real measured distributions may be unstable to multiple modes simultaneously, requiring accurate identification and separation of these modes within perturbation analyses. Third, the natural boundaries of the measured velocity-space domain must be handled carefully to avoid artificial effects on the computed wave modes. Today, several well-developed numerical codes address these challenges from different perspectives, however, the most general case remains problematic. In this work we present an advanced version of such a dispersion solver that combines the most desirable features of existing tools and provides improved capability for recognizing and separating multiple wave modes in spacecraft-measured distribution functions.

## **Application of the Method of Linear Extrapolation of Dynamic Spectra of Whistlers Recorded in Kamchatka for Determining Electron Concentration in the Plasmasphere**

L.S. Marchenko, R.I. Parovik (*IKIR FEB RAS, Paratunka, Kamchatka region, Russia*)

Software packages have been developed based on the analysis of whistlers recorded in Kamchatka (the "Karymshina" observation point) to determine the nose frequency using the linear extrapolation method and to subsequently estimate the electron concentration in the plasmasphere (Park's method, DE1 model). In this process, a graph of electron concentration versus time,  $N_1(t)$ , is constructed over the entire time interval of the whistler's existence, and the data are then averaged. The obtained concentration estimates at an altitude of 1000 km correlate with data acquired using the International Reference Ionosphere (IRI) model.

The work was carried out at the expense of the State assignment of IKIR FEB RAS (reg. topic No. 124012300245-2). The experimental data used in this work were obtained from the Shared Use Center "North-East Heliogeophysical Center" (SWHC CUC) CKP 558279.

## Comparative analysis of some results of quantitative processing of high-resolution data on chorus with different dynamic spectrum structures

G.M. Neshchetkin<sup>1,2</sup>, P.A. Bespalov<sup>1,2</sup> and O.N. Savina<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Federal Research Center named after A.V. Gaponov-Grekhov, Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia, gneshchetkin@hse.ru*

<sup>2</sup> *National Research University Higher School of Economics, Nizhny Novgorod, Russia*

This paper presents a comparative analysis of selected results from the quantitative processing of high-resolution data accumulated during the Van Allen Probe A mission. The analysis is based on high-resolution data on the wave magnetic field of VLF chorus. Two original and complementary methods for processing the observational data were used. The first method involves calculating the Hausdorff dimension to determine the general properties of a theoretical model suitable for a quantitative description of the dynamics of a system that describes the excitation of VLF chorus with different dynamic spectrum structures. The second method involves a direct search for the roots of the characteristic equation responsible for the linear stage of chorus excitation. For the comparative analysis, 22 typical examples of chorus with different dynamic spectrum structures were selected - these are emissions with spectral elements in two frequency bands (below and above the gap near half the minimum electron cyclotron frequency), in the lower and upper frequency bands. In all cases, the dimension turned out to be fractional and small ( $2 < \dim < 10$ ), indicating complex system dynamics. The roots of the characteristic equation corresponding to the linear excitation stage of the chorus were determined. The analysis revealed a topologically stable structure in the distribution of the roots of the characteristic equation for chorus with different dynamic spectrum structures.

The work of ONS and GN was carried by the Foundation for the Development of Theoretical Physics and Mathematics "Basis" (project No. 23-1-1-67-1).

## A model of MGD wave transmission through the ionosphere to the Earth's surface: accounting for the Hall effect and Earth's conductivity

Pozdnyakova D.D.<sup>1,2</sup>, Fedorov E.N.<sup>1</sup>, Pilipenko V.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Schmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS, Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *Institute of Solar-Terrestrial Physics of the Siberian Branch of the RAS, Irkutsk, Russia*

A model for the transmission of Alfvén and fast magnetosonic (FMS) modes through the ionosphere to the Earth's surface has been developed. The model is based on comprehensive analytical relations describing the interaction of magnetohydrodynamic (MHD) wave harmonic with a plane-layered system magnetosphere – "thin ionosphere" – atmosphere – Earth and can be used to study pulsations in the Pc2-5 and Pi2-3 ranges. This model allows the isolation of the influence of individual factors on the interaction of Alfvén and FMS waves with the ionosphere, such as ionospheric conductance, wave scale, geomagnetic field inclination, ground conductivity, etc. The spatial structure of the multi-component electric and magnetic field formed in the upper ionosphere upon the incidence of either Alfvén or FMS waves has been calculated together with the amplitude of the ground response. Attention is paid to the study of ionospheric shielding of incident high-frequency (Pc2-3 ranges) Alfvén waves, caused by the manifestation of the inductive Hall effect. For an incident FMS mode, the influence of Earth's conductivity on wave reflection is investigated. Specifically, reflection efficiency is compared for the granite crust and the ocean surface. An explanation is provided for the polarization structure of Pi2 pulsation fields recorded by low-orbit satellites at low latitudes.

This work was supported by Russian Science Foundation grant #24-77-10012.

## **Atypical QP2 ELF/VLF Emissions with Blurred Periodicity Inside the Plasmasphere**

P.D. Shkareva<sup>1</sup>, P.A. Bespalov<sup>1,2</sup>, O.N. Savina<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Federal Research Center named after A.V. Gaponov-Grekhov, Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia, [polina.shkareva@mail.ru](mailto:polina.shkareva@mail.ru)*

<sup>2</sup> *National Research University Higher School of Economics, Nizhny Novgorod, Russia*

The presentation reports on examples of atypical quasiperiodic (QP2) emissions in the ELF/VLF frequency range observed by Van Allen Probes spacecraft inside the plasmasphere. The analyzed events are observed as sequences of spectral bursts that retain the characteristic spectral morphology of QP2 emissions but are distinguished by the absence of a well-defined temporal periodicity. The observed emissions occupy a frequency range of approximately 0.3–10 kHz. The duration of individual spectral burst varies from ~5 to 40 s, while the time intervals between consecutive bursts span a wide range from ~60 to 300 s and do not form a stable repetition period. The characteristic temporal scales of most events fall within ~90–240 s. The spectral structures exhibit a non-uniform intensity distribution over frequency and time, as well as variations in spectral bandwidth reaching several hundred hertz. Spectral analysis of magnetic field variations in the frequency range of ~4–11 mHz reveals no pronounced spectral lines or regular geomagnetic pulsations synchronous with the occurrence of the spectral bursts. The presented examples demonstrate the existence of atypical QP2 emissions with poorly defined temporal characteristics inside the plasmasphere and illustrate the diversity of spectral–temporal manifestations of ELF/VLF wave activity.

The work of ONS and PDSH was carried out by the Foundation for the Development of Theoretical Physics and Mathematics "Basis" (project No. 23-1-1-67-1).

## **Mathematical Modeling of the Spatio-Temporal Evolution of a Surface-Induced Atmospheric Acoustic Disturbance**

E.S. Smirnova (*Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, Correspondence: [smirnova.ekaterina.serg@gmail.com](mailto:smirnova.ekaterina.serg@gmail.com)*)

Spatio-temporal evolution of an acoustic disturbance generated by a localized source at the lower boundary of a stratified atmosphere is modeled within a linear framework. Starting from the linearized conservation laws for momentum, mass, and energy about a stationary background state, a closed Klein–Gordon–type equation with variable coefficients is obtained, accounting for vertical inhomogeneity of the medium and the varying speed of sound. The source is imposed through boundary forcing at the ground level, allowing a consistent formulation of an initial–boundary value problem relevant to near-surface excitation. The modeling relies integral representations of the solution and their asymptotic approximations derived for the associated initial–boundary value problem for Klein–Gordon equation, providing analytical insight into the propagation dynamics of such acoustic disturbances.

*The study was supported by the Government program (contract №124012500442-3)*

## Трансформация спектра низкочастотных передатчиков при распространении в приземной плазме

В.И. Колпак<sup>1,2</sup>, М.М. Могилевский<sup>2</sup>, М.А. Евдокимова<sup>2</sup>, Д.В. Чугунин<sup>2</sup>, Е.Е. Титова<sup>2</sup>, А.А. Чернышов<sup>2</sup>, С.Е. Андреевский<sup>1</sup>, Ю.В. Шлюгаев<sup>3</sup>, М.П. Жильцов<sup>4</sup>, Н.В. Чернева<sup>5</sup>, Е.И. Малкин<sup>5</sup>

<sup>1</sup> ИЗМИРАН, Троицк, Москва, Россия

<sup>2</sup> ИКИ РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup> НИРФИ ННГУ, Н.Новгород, Россия

<sup>4</sup> ООО «НПП «АСТРОН ЭЛЕКТРОНИКА», Орел, Россия

<sup>5</sup> ИКИР ДВО РАН, Паратунка, Россия

Приводятся результаты анализа спектральных характеристик излучения двух наземных низкочастотных передатчиков: JLI/NDT, расположенного в Японии, работающего на частоте 22,2 кГц и NPM, расположенного на Гавайях, работающего на частоте 21,4 кГц. Измерения волновой формы сигнала проводились на борту спутников «Ионосфер-М» и в пункте наблюдений «р.Карымшина» (ИКИР ДВО РАН, Паратунка). Излучение, прошедшее ионосферу над передатчиком, представляет собой квазишумовой сигнал без явных признаков модуляции. В сопряженной области шумовой спектр излучения преобразуется в последовательность радиоимпульсов, частота заполнения которых изменяется в диапазоне +/- ~100 Гц от центральной частоты излучения. Период следования импульсов носит квазипериодический характер и постепенно изменяется от 1,5 до 0,2 секунд. Дисперсия импульсов в большинстве измерений положительная и варьируется в пределах 100 – 400 Гц/сек. В отдельных случаях наблюдается отрицательная дисперсия импульсов. Проводится сравнение измерений на спутниках «Ионосфера-М» и ДЕМЕТЕР. Обсуждается возможный физический механизм, приводящий к трансформации спектра сигналов. Наземные измерения были проведены Ч.Н.В. и М.Е.И. при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 25-12-00059) и частично в рамках государственного задания ИКИР ДВО РАН (рег. № 124012300245-2).

## Первые результаты статистического анализа дискретных элементов хоровых ОНЧ-излучений на основе нейросетевого детектирования

Ларченко А.В., Демехов А.Г. (Полярный Геофизический Институт, г. Анатиты, Россия)

В работе рассматривается возможность исследования статистических закономерностей дискретных элементов хоровых ОНЧ-излучений на основе автоматизированного нейросетевого подхода к их выделению. Интерес к подобному анализу обусловлен важной ролью хоровых излучений в процессах взаимодействия волн и частиц магнитосфере Земли и их влиянием на динамику радиационных поясов.

Ранее статистические характеристики хоровых ОНЧ-излучений исследовались, как правило, на основе выборок, сформированных вручную по динамическим спектрограммам, что накладывало существенные ограничения как на объем анализируемых данных, так и на воспроизводимость результатов.

В настоящем докладе предлагается альтернативный подход, основанный на использовании нейросетевого метода детектирования дискретных элементов хоровых ОНЧ-излучений, разработанного для задач автоматического анализа динамических спектров. Нейронная сеть Mask R-CNN, обученная на размеченных данных, позволяет выполнять пиксельную сегментацию отдельных элементов хоров и определять их временно-частотные границы без участия оператора.

С использованием ограниченного набора данных спутников Van Allen Probes на основе результатов нейросетевого детектирования проведена параметризация хоровых элементов, включая оценку характерных частотных диапазонов, длительностей, скоростей частотного дрейфа и других характеристик. В докладе приводятся статистические распределения полученных параметров.

## **Совместный анализ аврорального хисса и ГНСС-сцинтилляций для диагностики мелкомасштабной структуры ионосферы**

Никитенко А.С., Федоренко Ю.В. (*Полярный Геофизический Институт, г. Апатиты, Россия, [alex.nikitenko91@gmail.com](mailto:alex.nikitenko91@gmail.com)*)

Проведено исследование взаимосвязи между наземными наблюдениями аврорального ОНЧ-хисса и фазовых сцинтилляций сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС). Данные по хиссу получены в обсерватории Ловозеро (октябрь 2021 – декабрь 2023 гг.), данные по сцинтилляциям – с помощью ГНСС-приёмника PolaRx5S в Апатитах (~80 км от Ловозеро).

Выявлено 8 событий с явной временной связью всплесков хисса и усиления сцинтилляций. Определение азимута прихода и поляризации хисса показало, что область его «засветки» у земли локализована вблизи проекции линии «Апатиты–спутник» на высоту 300 км. Оптические наблюдения all-sky камеры подтвердили наличие авроральных дуг в этих же областях.

Полученное пространственное совпадение указывает на общую физическую причину явлений. Предполагается, что оба процесса связаны с рассеянием на мелкомасштабных (сотни метров) неоднородностях электронной концентрации в ионосфере. Таким образом, одновременная регистрация хисса и сцинтилляций может объясняться воздействием одних и тех же неоднородных структур.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-17-20038, <https://www.rscf.ru/project/25-17-20038/> и гранта Министерства образования и науки Мурманской области».

## **Возбуждение искусственных УНЧ-КНЧ сигналов с использованием линии электропередачи как горизонтальной антенны в эксперименте FENICS-2024**

В.А. Пилипенко<sup>1,2\*\*</sup>, Н.В. Савельева<sup>1,2\*</sup>, Ю.В. Федоренко<sup>3\*\*\*</sup>, Е.Н. Федоров<sup>1\*\*\*\*</sup>, В.В. Колобов<sup>4\*\*\*\*\*</sup>

*1 Институт Физики Земли РАН, Москва, Россия*

*2 Геофизический центр РАН, Москва, Россия*

*3 Полярный Геофизический Институт, Апатиты, Россия*

*4 Кольский научный центр РАН, Апатиты, Россия*

*\*e-mail: [nasa2000@yandex.ru](mailto:nasa2000@yandex.ru)*

*\*\*e-mail: [space.soliton@gmail.com](mailto:space.soliton@gmail.com)*

*\*\*\*e-mail: [yury.fedorenko@gmail.com](mailto:yury.fedorenko@gmail.com)*

*\*\*\*\*e-mail: [enfedorov1@yandex.ru](mailto:enfedorov1@yandex.ru)*

*\*\*\*\*\*e-mail: [v.kolobov@ksc.ru](mailto:v.kolobov@ksc.ru)*

В июле-августе 2024 года на Кольском полуострове был проведен эксперимент по генерации ультранизкочастотных (УНЧ) и крайне-низкочастотных (КНЧ) сигналов в ночные часы с использованием выведенной из работы линии электропередачи (ЛЭП) с расстоянием между заземлителями 130 км в качестве горизонтальной излучающей антенны. Частота генератора от сеанса к сеансу менялась от 1 до 194 Гц. В работе представлены результаты регистрации УНЧ (<10 Гц) и КНЧ (>10 Гц) сигналов на станциях Ловозеро, Верхнетуломский и Баренцбург, удаленных от передающей линии на 50, 185 и 1130 км. Зарегистрированы сигналы с частотами от 1 до 64 Гц. Проведено сопоставление с теоретическими оценками с использованием численной модели УНЧ/КНЧ-поля в атмосфере и ионосфере, создаваемого линейным приземным током. Проведенные наблюдения показали перспективность активных экспериментов с использованием ЛЭП для возбуждения искусственных УНЧ/КНЧ-сигналов на большой площади.

Работа поддержана грантом РФФ [21-77-30010-П](#).

## Возбуждение искусственных УНЧ-КНЧ сигналов в эксперименте FENICS-2024

Н.В. Савельева<sup>1,2\*</sup>, В.А. Пилипенко<sup>1,2\*\*</sup>, Ю.В. Федоренко<sup>3\*\*\*</sup>, Е.Н. Федоров<sup>1\*\*\*\*</sup>, В.В. Колобов<sup>4\*\*\*\*\*</sup>

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

<sup>2</sup> Геофизический центр РАН, Москва, Россия

<sup>3</sup> Полярный Геофизический Институт, Апатиты, Россия

<sup>4</sup> Кольский научный центр РАН, Апатиты, Россия

\*e-mail: [nasa2000@yandex.ru](mailto:nasa2000@yandex.ru)

\*\*e-mail: [space.soliton@gmail.com](mailto:space.soliton@gmail.com)

\*\*\*e-mail: [yury.fedorenko@gmail.com](mailto:yury.fedorenko@gmail.com)

\*\*\*\*e-mail: [enfedorov1@yandex.ru](mailto:enfedorov1@yandex.ru)

\*\*\*\*\*e-mail: [v.kolobov@ksc.ru](mailto:v.kolobov@ksc.ru)

В июле-августе 2024 года на Кольском полуострове был проведен эксперимент по генерации ультранизкочастотных (УНЧ) и крайне-низкочастотных (КНЧ) сигналов в ночные часы с использованием выведенной из работы линии электропередачи с расстоянием между заземлителями 130 км в качестве горизонтальной излучающей антенны. Частота генератора от сеанса к сеансу менялась от 1 до 194 Гц. В работе представлены результаты регистрации УНЧ (<10 Гц) и КНЧ (>10 Гц) сигналов на станциях Ловозеро, Верхнетуломский и Баренцбург, удаленных от передающей линии на 50, 185 и 1110 км. Зарегистрированы сигналы с частотами от 1 до 64 Гц. Проведено сопоставление с теоретическими оценками с использованием численной модели УНЧ/КНЧ-поля в атмосфере и ионосфере, создаваемого линейным приземным током. Проведенные наблюдения показали перспективность этого типа активных экспериментов для возбуждения искусственных УНЧ/КНЧ-сигналов на большой площади.

## Усиления потока субрелятивистских электронов на геостационарной орбите вне сильных геомагнитных возмущений и параметры длиннопериодных геомагнитных пульсаций

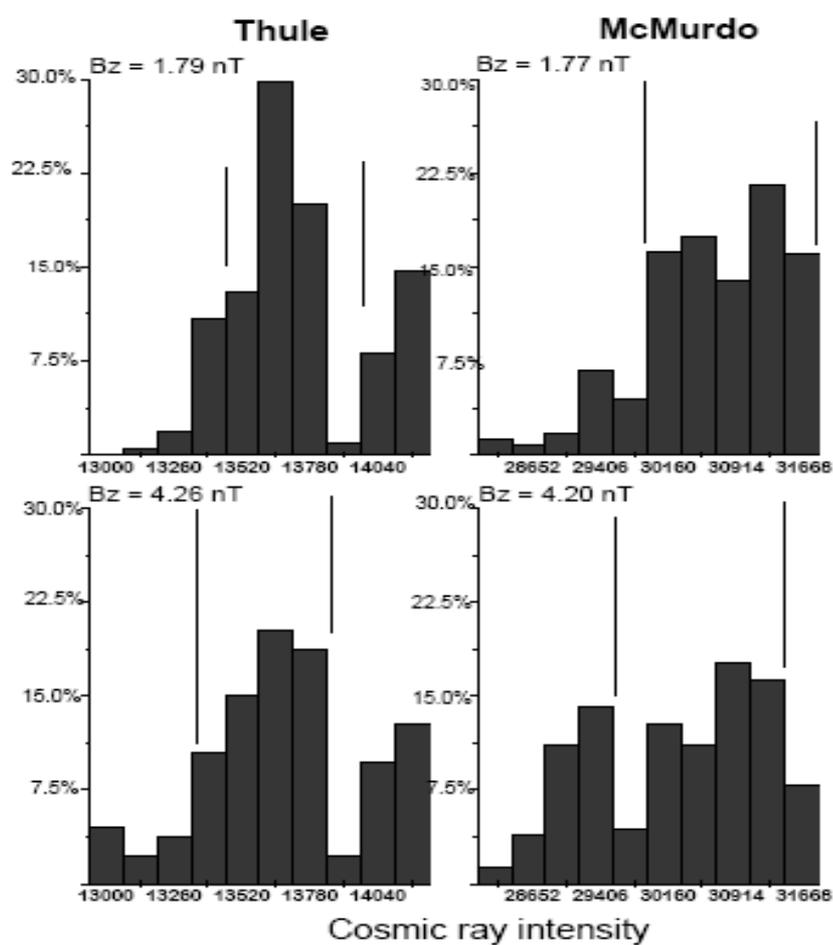
Стуков Д.А., Ягова Н.В. (ИФЗ РАН, г. Москва, Россия, [dstkov922@yandex.ru](mailto:dstkov922@yandex.ru))

Усиления потока субрелятивистских электронов отобраны по данным измерений на геостационарном спутнике GOES. Контрольная группа сформирована из интервалов без усиления при тех же значениях геомагнитных индексов [1]. Для отобранных событий рассматриваются свойства геомагнитных пульсаций диапазона 1-5 мГц (Pc5-б/Pi3) по данным измерений на том же спутнике. Для отдельных событий анализируются волновые формы, спектральный состав и поляризация пульсаций, а также их взаимосвязь с вариациями потока электронов с энергиями от 40 до 500 кэВ. Анализируется связь пульсаций с флуктуациями динамического давления солнечного ветра и межпланетного магнитного поля в том же частотном диапазоне и наземный отклик по данным станций сети CARISMA.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИФЗ РАН.

Д. А. Стуков, Н. В. Ягова. Потоки электронов с энергиями 40-500 кэВ на геостационарной орбите вне сильных геомагнитных возмущений и параметры межпланетной среды // Солнечно-земная физика (в печати)

## The Sun, Solar Wind, Cosmic Ray



## **Extreme Space Weather Events in 2025-2026**

M.A. Abunina, N.S. Shlyk (*IZMIRAN*)

This study presents a comprehensive analysis of the most powerful events in the interplanetary medium that triggered the strongest responses in geomagnetic activity ( $K_{pmax} \geq 8-$ ) during 2025-2026. Variations in solar wind parameters, geomagnetic activity, and cosmic rays were examined for the periods of January 1–2, April 16, June 1–3, and November 11–13, 2025, January 19-21, 2026. Solar sources were identified for all events, and their characteristics are discussed. All events under consideration were caused by complex interplanetary disturbances with two or more solar sources.

## **An approach to cataloging and studying interplanetary disturbances caused by stealth CMEs**

Belov S.M., Shlyk N.S., Abunina M.A. (*IZMIRAN, Moscow, Russia*)

Coronagraphs on spacecraft near Earth are the primary instrument for observing coronal mass ejections (CMEs). Their data (particularly from SOHO/LASCO) have been used for many years to catalog interplanetary disturbances. However, a problem is that CMEs occurring in the central region of the solar disk are often invisible in the coronagraph's view plane. This problem is made significant by the fact that these ejections are the most likely ones to reach Earth. Therefore, coronagraph observations are clearly insufficient for a comprehensive cataloging of geoeffective CMEs. Our group is developing the Forbush Effects and Interplanetary Disturbances (FEID) catalog, which contains over 9,300 events. Since we aim to fully describe all events and their solar sources, identifying all geoeffective CMEs is a pressing issue. In 2024, we began manually cataloging CMEs invisible to coronagraphs using SDO images, noting the ejection time and position on the solar disk. This report will present statistics on such CMEs for 2024 and assess the viability of our approach. Other solutions, such as software-based dimming detection, will also be discussed.

## **Potential Field Source Surface and Non-linear Force-Free Field Extrapolation to Model Magnetic Field Structure for a Giant Solar Filament**

Abbi S. Demissie<sup>1</sup>, Tilaye Tadesse<sup>2</sup>, Araya Asfaw<sup>1</sup>, Tong Shi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Geophysics, Space Science, and Astronomy (IGSSA), Addis Ababa University, Addis Ababa, Ethiopia*

<sup>2</sup> *Space Radiation Analysis Group, NASA Johnson Space Center, 2101 E NASA Pkwy, Houston, TX77058, USA*

<sup>3</sup> *Department of Climate and Space Sciences and Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, MI, USA*

### **Abstract**

Solar filaments are intriguing structures suspended in the solar corona at heights up to 100 Mm above the chromosphere, but they are made of chromospheric material which is one hundred times cooler and denser than the coronal material. Studying filament magnetic field structures, magnetic energy and electric current density is crucial to know its stability, because unstable conditions can result in explosive events like flares and coronal mass ejections (CMEs). A few recent studies have been conducted to model large-scale filaments in the quiet Sun though the majority of studies focus on modeling small-scale active region filaments. This study is the first to use potential field source surface (PFSS) and non-linear force-free field (NLFFF) models in spherical geometry to study a giant filament (with length more than 800 Mm) along a polarity inversion line (PIL) in a weak-field region (with photospheric field region of  $\approx 50$  G). The two modeling methods are applied to data obtained from a giant filament observation on February 10, 2015 with preprocessing of photospheric full-disk vector magnetograms from the Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) and Vector Spectromagnetograph (VSM) using optimization procedure to make the boundary data more consistent with the force-free principle. The large-scale magnetic configuration surrounding the filament is derived from the PFSS model, while the NLFFF extrapolation provides a detailed three-dimensional structure of the filament using both HMI and VSM data. Results from both instruments show good agreement. The NLFFF extrapolation based on HMI data yields higher total and free magnetic energy compared to VSM data. Moreover, the total surface electric current density is greater with VSM data, consistent with the magnetic field strength derived from both instruments.

**Keywords** Sun: Magnetic field structure, magnetic energy. Sun: corona, filaments, prominences. Methods: numerical

## **Geomagnetic cutoff of high-energy solar cosmic rays during strong magnetic storms**

A.V. Dmitriev (*SINP MSU, Moscow, Russia, [dalex@srd.sinp.msu.ru](mailto:dalex@srd.sinp.msu.ru)*)

The dynamics of the geomagnetic cutoff latitude of solar cosmic rays (SCR) was studied during three strong geomagnetic storms in September 2017, May 2024, and November 2025. Fluxes of high-energy solar protons with energies above 16 MeV were observed by the low-altitude polar satellites of the POES/METOP mission. SCR cutoff latitudes were determined in the Northern and Southern Hemispheres, both during quiet periods and during the geomagnetic storms. The experimental results are compared with an elliptical SCR cutoff model [1]. It is shown that, on average, the model provides a good prediction of the experimental data over the dynamic range of its input parameters. However, outside the dynamic range, particularly in the range of geomagnetic dipole tilt angles and geomagnetic activity levels, the model produces significant systematic errors, indicating the need for further improvement. Perspectives of improving the modeling of the SCR geomagnetic cutoff during strong magnetic storms are discussed based on new experimental data.

The study was conducted as part of a state assignment from Lomonosov Moscow State University.

Dmitriev, A. V., P. T. Jayachandran, and L.-C. Tsai (2010), Elliptical model of cutoff boundaries for the solar energetic particles measured by POES satellites in December 2006, *J. Geophys. Res.*, 115, A12244, doi:10.1029/2010JA015380

## **Modeling the Propagation of Interplanetary Coronal Mass Ejections during the 1–3 August 2024 Event Using the Drag-Based Model**

K.B. Kaportseva<sup>1</sup>, A.A. Vakhrusheva<sup>1,2</sup>, Y.S. Shugay<sup>1</sup>, A.O. Shiryayev<sup>1,3</sup>, A.S. Lavrukhin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *M.V.Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *M.V.Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, Russia*

<sup>3</sup> *M.V.Lomonosov Moscow State University, Faculty of Space Research, Moscow, Russia*

The interplanetary conditions during 31 July–2 August 2024 are analyzed, when interplanetary disturbances associated with coronal mass ejections (CMEs) were registered near the Earth and resulted in a geomagnetic storm with a minimum Dst index of  $-101$  nT ( $K_p = 7$ ). The main sources of the disturbances were CMEs observed on 31 July–2 August and associated with flare activity in active region NOAA 3768, which was located in the western part of the solar disk during the studied period. According to the CACTus, DONKI, and LASCO CDAW databases, the CME speeds ranged from 500 to 1100 km/s. The later CMEs propagated through a disturbed solar wind, which affected their propagation speed in the heliosphere and, consequently, their arrival time at the Earth. The geomagnetic storm commenced with the arrival of an interplanetary shock on 3 August at about 23:00 UT, followed by a decrease of the Dst index to  $-101$  nT. The arrival of interplanetary disturbances was also detected by the STEREO-A spacecraft, located about  $20^\circ$  west of the Earth, and by the Parker Solar Probe, located about  $10^\circ$  west of the Earth at a heliocentric distance of  $\sim 0.7$  AU. The CME propagation was modeled using the drag-based model (DBM). Different scenarios of CME propagation and interaction at various heliocentric distances were considered.

## **Parameter Sensitivity Analysis and uncertainty estimation in Magnetospheric Particle Tracing Using Flexible GT Tool.**

V.V. Malakhov, A.G. Mayorov (*National Research Nuclear University “MEPhI”*)

Particle tracing in electro-magnetic fields is a well-established technique widely applied for many physics tasks in the Earth's magnetosphere. Nowadays, there are a large number of tools available for researchers. However, no matter how routine the procedure is, it nevertheless requires tuning a large number of parameters, which obviously affects the shape of individual trajectories and accuracy of their reconstruction. Yet, for all its widespread use, there is little to no discussion in literature devoted to parameters selection and their effect on the accuracy as well as to the accuracy of the procedure itself in this region. Moreover, a vast majority of the tools neither allow fine tuning nor provide a thorough description of hardcoded parameters.

Here, we analyze the effects of the most explicit parameters on individual trajectories for particles from three geomagnetic sources: galactic cosmic rays, albedo, and the penumbra region. Parameters examined include solver type (e.g., Runge-Kutta, Buneman-Boris and other), step scheme (adaptive or fixed), step length (seconds for fixed steps; points per Larmor radius/period for adaptive), break conditions, set of Earth's magnetic field (EMF) components (main, external, lithospheric), degree of accuracy in the main magnetic field description (provided by different models). We employ our particle tracing tool GT [], developed with emphasis on flexibility and parameters' customization as well as thorough description of the tracing region. The tool allows toggling all the aforementioned parameters in particular offering notably wide possibilities in defining the EMF.

In addition, we will discuss trajectories' uncertainties associated with different parameters, and their effect on computation of quantities that are more general and structures: asymptotic directions, interaction points, cutoff rigidities, penumbra structure.

## **Calculation of the angular distributions of cosmic ray particles in the Earth's atmosphere**

Maurchev E.A.<sup>1</sup>, Krainev M.B.<sup>2</sup>, Didenko K.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation  
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *Lebedev Physical Institute, RAS, Moscow, Russia*

The paper considers the modeling of the cosmic ray (CR) particle transport through the Earth's atmosphere using the RUSCOSMICS model. Primary CR consist of protons by almost 90%, the remaining 10% are mainly helium nuclei, heavier nuclei and electrons (less than 1%). Therefore, the model primary particle generator is defined as a source of protons and helium nuclei with differential energy spectra corresponding to the galactic CR (GCR) spectra. Atmospheric parameters are defined with the NRLMSISE-00 model, the geometry is used in a "flat" approximation with a height boundary of 100 km, while the sensitive volumes are determined in increments of 1 km.

As a result, information is collected on the angular distributions of secondary CR with different values of the lower energy threshold depending on the type of particle (protons  $E_{1p} > 5$  MeV and  $E_{2p} > 30$  MeV, electrons  $E_{1e} > 0.2$  MeV and  $E_{2e} > 5$  MeV and muons  $E_{1\mu} > 15$  MeV and  $E_{2\mu} > 100$  MeV). These thresholds are determined based on the parameters of the detector used to register the ionizing component in the regular balloon monitoring of CR conducted by the S.N. Vernov Laboratory of Solar Physics and Cosmic Rays of the Russian Academy of Sciences (LPI RAS). The resulting angular distributions are planned to be used in the interpretation of the data obtained during this monitoring.

## **Расчет угловых распределений частиц космических лучей в атмосфере Земли**

Маурчев Е.А.<sup>1</sup>, Крайнев М.Б.<sup>2</sup>, Диденко К.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, г. Москва, г. Троицк*

<sup>2</sup> *Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, г. Москва*

В работе рассматривается моделирование прохождения частиц космических лучей (КЛ) через атмосферу Земли при помощи модели RUSCOSMICS. Первичные КЛ почти на 90% состоят из протонов, остальные 10% — это в основном ядра гелия, более тяжелые ядра и электроны (менее 1%). Поэтому модельный первичный источник частиц определяется как источник протонов и ядер гелия с дифференциальными энергетическими спектрами, соответствующими спектрам галактических КЛ (ГКЛ). Параметры атмосферы задаются при помощи модели NRLMSISE-00, геометрия используется в «плоском» приближении высотой 100 км, при этом с шагом 1 км определены детектирующие объемы.

В качестве получаемого результата собирается информация об угловых распределениях вторичных КЛ с различными значениями нижнего порога по энергии в зависимости от типа частицы (протоны  $E_{1p} > 5$  МэВ и  $E_{2p} > 30$  МэВ, электроны  $E_{1e} > 0.2$  МэВ и  $E_{2e} > 5$  МэВ и мюоны  $E_{1\mu} > 15$  МэВ и  $E_{2\mu} > 100$  МэВ). Эти пороги определяются, исходя из параметров детектора, используемого для регистрации ионизирующей компоненты в регулярном баллонном мониторинге КЛ, проводимом Лабораторией Физики Солнца и космических лучей им. С.Н. Вернова ФИАН. Получаемые угловые распределения планируется использовать в интерпретации получаемых во время этого мониторинга данных.

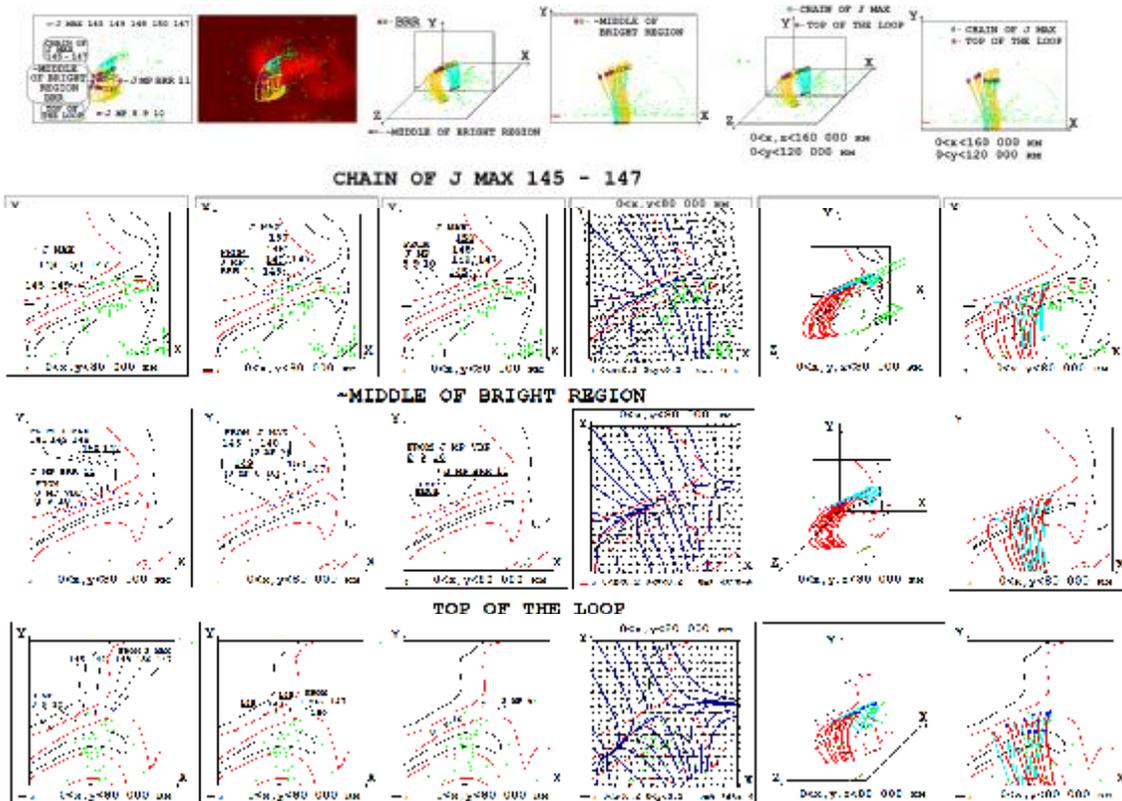
**The main magnetic lines of the pre-flare arcade, on the surface of which the current density is increased**

A.I. Podgorny<sup>1</sup>, I.M. Podgorny<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Lebedev Physical Institute RAS, Moscow, Russia, [podgorny@lebedev.ru](mailto:podgorny@lebedev.ru)

<sup>2</sup>Institute of Astronomy RAS, Moscow, Russia, [podgorny@inasan.ru](mailto:podgorny@inasan.ru)

The analysis of the pre-flare configuration on May 26, 2003, above the active region AR 10365 at 02:32:05, three hours before the M 1.9 flare at 05:50:03, was continued. The configuration was obtained by MHD simulation in the corona. To study the physical processes occurring in the solar corona during a flare, it is necessary to establish with sufficient accuracy the properties of the magnetic field configurations near points on the magnetic arcade lines. These configurations may have the property of accumulating magnetic energy of a solar flare and causing flare instability. However, in the real field of the solar corona this process is difficult to establish due to the superposition of additional field configurations, which leads to the appearance of additional physical processes. The determination of such configurations in a complex field of arcades in the corona is necessary for studying the physical mechanism of solar flares, with the aim, in particular, of creating a system for predicting solar flares based on an understanding of their physical mechanism, using the results of MHD simulation. For this purpose, all the main magnetic lines of the arcade were found, which pass through three-dimensional current density maxima that form a chain, or which pass through plane current density maxima in planes perpendicular to the main magnetic lines. Areas on the main arcade lines were found where the properties of configuration promote the occurrence of a flare. Such properties appear in the section of lines located at the top of the loop and continuing in the region projected along the line of sight onto the bright region of the flare emission on the solar disk.



## **Interplanetary radio emission due to CME-CME interaction**

D. Pulatov (*Samarkand State University, Samarkand 140104, Uzbekistan*)

We analyzed the interaction between two CMEs observed in the interplanetary medium at 18:06 UTC and 19:30 UTC on 6 April 2001, respectively, and the associated long-wavelength radio observations using DH type II burst. We identified the first (CME1) and second (CME2) CMEs and their associated DH type II burst using the SOHO/LASCO catalog and the Wind/Wave catalog, respectively. CME1 traveled through the SOHO FOV at a linear velocity of 648 km/s at an position angle (PA) of 106°. CME2 is a halo-CME, traveled much faster than the CME1, at a linear speed of 1270 km/s and interacted with CME1 at 20:42 UTC at a distance of 11.82 Rs. The CME that separated at 19:30 UTC reached Earth on 8 April and caused a geomagnetic storm (Dst = -59 nT). Both CMEs ejected from the NOAA AR9415 active region in the eastern part of the Solar surface and did not trigger a Solar Energetic Particle (SEP) event. As a given Gopalswamy et al (2008), space weather events are more likely to trigger a SEP event if a CME originating in the western hemisphere is accompanied by a DH type II burst. The DH type II burst began at 19:35 UTC on 6 April and ended at 01:50 UTC on 7 April and duration for ~6 h. The center frequency of the emission in the DH spectrum during the interaction appears to decrease with increasing interaction height.

## **Forecasting Solar proton event power using machine learning method**

S.V. Roslavl'tsev<sup>1</sup>, N.A. Vlasova<sup>2</sup>, V.V. Kalegaev<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *Skobel'syn Institute of Nuclear Physics of Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

Email: [roslavl'tsev.sv22@physics.msu.ru](mailto:roslavl'tsev.sv22@physics.msu.ru)

Solar proton events (SPEs) represent one of the main manifestations of solar activity and constitute a radiation hazard factor in space weather, making the forecasting of SPE power an urgent problem. The primary sources of solar energetic particle fluxes are considered to be two components of the explosive process on the Sun: solar flares and coronal mass ejections (CMEs). Currently, experimental data available in real-time are limited to flare characteristics only, namely soft X-ray solar radiation (0.05–0.4 nm and 0.1–0.8 nm) during the flare: the flare onset time and maximum radiation flux density (X-ray flare classification). The maximum solar proton flux is typically achieved several hours ( $\geq 2$  hours) after the initial detection of protons in near-Earth space. Therefore, for real-time forecasting of SPE power, the event onset time can be utilized. Experimental data from geostationary GOES satellites are available every 5 minutes.

The objective of this work is to develop a real-time forecasting system for two SPE characteristics: the maximum proton flux with energy  $>10$  MeV and the time of its occurrence (duration of the flux rise phase). To address this task, three machine learning models were developed using the following algorithms: linear regression, random forest, and gradient boosting. Model training was performed using data from the SPE catalogs of the 23rd and 24th solar activity cycles, available on the Space Weather Center website of Moscow State University [[https://swx.sinp.msu.ru/apps/sep\\_events\\_cat/](https://swx.sinp.msu.ru/apps/sep_events_cat/)]. Events were selected where the proton flux with energy  $>10$  MeV exceeded 10 particles/(cm<sup>2</sup>·s·sr). The input parameters for the models were the X-ray flare classification and the time interval between the onset of the flare and the beginning of the solar proton flux increase. Model validation was performed. Model accuracy was evaluated using data from the 25th solar activity cycle SPE catalog. The prediction results are presented, the contributions of input parameters to model forecasting are evaluated, and the feasibility of using machine learning algorithms for solving this task is discussed. The research was conducted as part of the state assignment of Lomonosov Moscow State University.

## Differentiation of Coronal Holes and Filaments with AIA 304Å and HMI Data

A. Shiryayev<sup>1,2</sup>, K. Kaportseva<sup>1</sup>, Yu. Shugay<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Space Physics Laboratory SINP MSU

<sup>2</sup> Space Research Faculty SINP MSU

Coronal holes are sources of quasi-stationary high-speed solar wind streams with typical velocities of about 500–800 km/s [Veselovsky 2010]. Long-lived coronal holes lead to the formation of stream interaction regions (SIRs/CIRs), which are characterized by enhanced plasma density and can cause moderate geomagnetic disturbances and recurrent geomagnetic storms.

The association between coronal holes and high-speed solar wind streams makes it possible to use coronal hole area to estimate the solar wind speed near Earth [Shugai 2021]. Identifying coronal-hole boundaries and estimating their areas requires segmentation of solar images acquired in the 193 Å and 211 Å channels of the SDO/AIA observatory. In these wavelength ranges, coronal holes appear as regions of reduced intensity [Garton et al. 2018; Heinemann et al. 2019]. Because solar filaments also appear as dark structures in images at these wavelengths, the development of methods to discriminate between filaments and coronal holes can improve the accuracy of coronal-hole boundary determination.

Filaments absorb and resonantly scatter radiation in the He II emission line [Garton et al. 2018], and therefore appear as dark regions in images at 304 Å. Since emission at this wavelength originates in the chromosphere, the presence of coronal holes does not suppress its intensity, and coronal holes do not appear as dark regions in images at this wavelength.

Magnetograms provide an additional source of information on coronal holes. Coronal holes correspond to regions of open solar magnetic field lines and are characterized by a predominantly unipolar magnetic field [Zhang et al. 2003]. Solar filaments are oriented along magnetic polarity inversion lines, whose locations can be identified from HMI magnetograms.

This work presents results of applying these methods to exclude filaments during the automatic determination of coronal hole boundaries. The impact of filament exclusion on the accuracy of solar wind speed prediction based on coronal-hole area is evaluated.

Veselovsky, I. S., A. V. Dmitriev, and A. V. Suvorova. 2010. "Algebra and Statistics of the Solar Wind." *Cosmic Research* 48 (2): 113–28.

Shugai, Yu. S. 2021. "Analysis of Quasistationary Solar Wind Stream Forecasts for 2010–2019." *Russian Meteorology and Hydrology* 46 (3): 172–78.

Garton, T. M., P. T. Gallagher, and S. A. Murray. 2018. "Automated Coronal Hole Identification via Multi-thermal Intensity Segmentation." *Journal of Space Weather and Space Climate* 8: A02.

Heinemann, S. G., et al. 2019. "CME–HSS Interaction and Characteristics Tracked from Sun to Earth." *Solar Physics* 294 (9): 121.

Parenti, S. 2014. "Solar Prominences: Observations." *Living Reviews in Solar Physics* 11.

Zhang, J., et al. 2003. "Interplanetary and Solar Surface Properties of Coronal Holes Observed during Solar Maximum." *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 108 (A4): 2002JA009538.

## Influence of fast ICMEs on high-energy (>2 MeV) magnetospheric electron flux

N.S. Shlyk, M.A. Abunina, A.V. Belov, S.M. Belov

*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of Russian Academy of Sciences (IZMIRAN), Moscow, Troitsk, Russia, [nshlyk@izmiran.ru](mailto:nshlyk@izmiran.ru)*

The behavior of high-energy electrons in the Earth's magnetosphere is still an actual problem due to the fact that large enhancements in relativistic electron fluxes can lead to failures in the operation of spacecraft. It's well-known that the main cause of such electron flux enhancements is the influence of high-speed streams from coronal holes but how can an interplanetary coronal mass ejection (ICME) affect it? Using the FEID database (<https://tools.izmiran.ru/feid>) fast geoeffective ICMEs were selected and their impact on the flux of high-energy (>2 MeV) magnetospheric electrons were analyzed. The results show that there are different scenarios depending on ICMEs speeds, the background electron flux and additional influence of other solar sources.

## **Comparison of Geoeffective Coronal Mass Ejection Speeds in Different Catalogs**

N.S. Shlyk, M.A. Abunina (*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of Russian Academy of Sciences (IZMIRAN), Moscow, Troitsk, Russia, [nshlyk@izmiran.ru](mailto:nshlyk@izmiran.ru)*)

Coronal mass ejections (CMEs) influence space weather to a high degree, and CME initial velocities are often required input parameters for various forecast models of geomagnetic disturbances or high-energy particle fluxes. This research discusses the discrepancy between CME initial velocities determined automatically in near-real time (CACTUS catalog, <https://www.sidc.be/cactus/catalog.php>), those included in the publicly available catalog of interplanetary CME propagation modeling (DONKI, <https://kauai.ccmc.gsfc.nasa.gov/DONKI/>), and those calculated with a significant delay after more thorough data processing (LASCO catalog, [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/)). In particular, interplanetary CMEs that reached Earth's orbit between 1997 and 2024 are considered (FEID database, <https://tools.izmiran.ru/feid>), for which a one-to-one correspondence was established between all catalogs (for the DONKI catalog – since 2010). Estimates of the relationship between initial velocities for different CME types and solar cycles were obtained, which can be used to generate various forecasts in quasi-real time (with the minimum delay provided by CACTUS and DONKI).

## **A service for reconstructing the atmospheric ionization component induced by galactic cosmic rays**

S.A. Siruk<sup>1</sup>, V.V. Alekseev<sup>2</sup>, V.A. Kuzminov<sup>3</sup>, A.G. Mayorov<sup>1</sup>, R.F. Yulbarisov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *National Research Nuclear University MEPhI, Moscow 115409, Russia*

<sup>2</sup> *P. G. Demidov Yaroslavl State University, Yaroslavl 150003, Russia*

<sup>3</sup> *State Scientific Research Institute of Aviation Systems (GosNIIAS), Moscow 125319, Russia*

Cosmic rays (CR) are high-energy particles propagating through space. The interaction of cosmic rays with Earth's atmosphere initiates a complex array of physicochemical processes. Secondary particles generated during the development of the atmospheric cascade produce ionization in the lower and middle atmospheric layers. The maximum intensity of this process is observed in the Arctic and Antarctic, where the geomagnetic field weakly impedes the penetration of low-energy particles. The resulting ionization has multifaceted effects on atmospheric properties, altering its conductivity and transparency, as well as influencing the rate of chemical reactions.

To monitor atmospheric ionization levels and study related phenomena, we developed a service for reconstructing the atmospheric ionization component induced by galactic cosmic rays. This involved creating a system capable of reconstructing GCR energy spectra with daily temporal resolution with high accuracy, based on measurements from the global neutron monitor network and artificial neural networks. Subsequently, for a given spatial location, the influence of geomagnetic cutoff on the GCR spectrum is taken into account, followed by a calculation of the GCR-induced ionization at a specified atmospheric depth. The service enables the generation of real-time atmospheric ionization (in ion pairs per gram) maps from the ground to the top of the atmosphere, or maps for any specified past moment.

Future development plans include extending the service to account for other cosmic radiation components, calculating radiation dose exposure for aircraft crews and spacecraft, and other related applications.

## **The planned experiment for measuring cosmic rays in the Russian Arctic**

E.A. Skorikova, I.A. Lagoida, A.I. Madzhidov, A.G. Mayorov, S.A. Siruk (*National Research Nuclear University MEPhI, Moscow 115409, Russia*)

Cosmic rays (CR) are high-energy particles propagating through space that originate either within our Galaxy or are produced by the Sun, leading to their classification as Galactic Cosmic Rays (GCR) and Solar Energetic Particles (SEP), respectively. Fluxes of GCR are subject to solar modulation and thus vary in time, while SEP appear sporadically, and their frequency of occurrence depends on the phase of the solar cycle. Ground-based detectors register secondary particles generated in air, and their sensitivity to variations in the primary CR spectrum is determined by their design as well as environmental characteristics — specifically, the geomagnetic cutoff rigidity and atmospheric depth at the instrument's location. The geomagnetic cutoff is maximal near the equator and becomes marginal close to the magnetic poles, so detectors placed in the Arctic and Antarctic are more sensitive to changes in CR spectrum outside atmosphere and magnetosphere. The atmospheric cutoff decreases with altitude, so high-altitude polar detectors are especially promising in terms of CR monitoring and are able to detect weak SEP-events that cannot be registered by other ground-based facilities. Currently there are only two high-altitude polar CR observatories — SOPO/SOPB and DOMC/DOB — and both of them are located in Antarctica, so there are no such detectors in northern hemisphere.

It is planned to establish a facility comprising a complex of neutron detectors of various designs and to conduct cosmic ray flux measurements in the Russian Arctic. The preliminary experimental program includes measurements under diverse conditions (including deployment of the setup at an altitude of approximately 1000 m above sea level), the study of primary CR flux variations, and the identification of the effects associated changing environmental parameters. This report presents the experiment's concept, as well as results from preliminary modeling, calibration, and testing of the detection system.

## **White light corona during the rising phase of the 11year solar cycle**

Desislava Teneva (*Space Research and Technology Institute, Bulgarian Academy of Sciences, Stara Zagora Department, Stara Zagora, Bulgaria*)

### **Abstract**

Structure of the solar corona highly depends on the level of the 11-year solar cycle activity. Its analysis gives an important knowledge about the solar magnetic fields, its evolution and origin. We have a series of ground-based observations of the white light corona during total solar eclipses (TSE). Using high resolution pictures of the eclipsed sun we create composite images for studying small- and large-scale structures of the corona and comparison with satellite photos. Here we consider 1999, 2012 and 2024 total solar eclipses, which are during the rising phase of solar cycle 23, 24 and 25 accordingly.

Solar corona photographs in white light during the 1999 TSE are obtained by a large-aperture cameras (200/1000mm and telescope 150/2250mm Meniskas - Cassegrain), and telescopes-refractors (63/840mm). Black and white professional photographic films Kodak T-MAX 200 Pro with unique structure are used.

During the 2012 TSE, solar corona is observed with 300 mm objective and 2000 mm Macsutov-Cassegrain telescope. Photos are made with different exposures in order to obtain high-resolution composite images. The eclipse observations are compared with near-simultaneous SOHO EUV and SOHO LASCO visible-light coronagraphic images.

The corona in white light during the 2024 TSE was observed with a 400mm Canon EOS R8 lens.

Analysis of the Ludendorf flattening indices and phase of the solar cycle shows that white light corona is an intermediate pre-maximum type. Streamers with different structure and extension as well as their connection with the active zones of the sun are considered.

Structures of the 1999, 2012 and 2024 corona are compared with the coronas observed during the 1936, 1945 and 1966 eclipses, which are also during the solar cycle rising phase of similar in yearly mean sunspot number cycles – 17, 18 and 20 accordingly.

## **Interaction of coronal mass ejection observed on 18 January 2026 with high speed stream of solar wind**

A.A. Vakhrusheva<sup>1,2</sup>, Y.S. Shugay<sup>1</sup>, K.B. Kaportseva<sup>1,2</sup>, V.V. Kalegaev<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, MSU, Moscow, Russia*

<sup>2</sup> *Faculty of Physics, MSU, Moscow, Russia*

Coronal mass ejections (CMEs) are plasma bursts from the Sun to interplanetary space. CMEs are one of the manifestations of solar activity and one of the sources of geomagnetic disturbances. The strongest magnetic storms may be caused by interaction of CMEs with high-speed streams from coronal holes and interaction of CMEs with each other [1].

Interacting with background solar wind, CMEs can change shape, accelerate or decelerate, or change their propagation direction [2]. Interaction of CME and high-speed stream often leads to CME acceleration, density increase and increased Bz [3].

On 18th January 2026 a fast halo CME was observed, associated with X1.9 flare. A strong geomagnetic storm caused by arrival of this CME to Earth started on 19 January, Dst index reached -218 nT. In this work, we investigate this event and model CME arrival to Earth using Drag-Based model [4] and taking into account CME interaction with high speed solar wind.

A. Vakhrusheva is supported by Theoretical Physics and Mathematics Advancement Foundation “BASIS” (№ 25-2-2-71-1).

1. Scolini et al. // *ApJS*. 2020. V. 247. № 1. P. 21.
2. Temmer et al. // *Living Sol Phys*. 2021. V. 18. A. 4.
3. Kay et al. // *Space Weather*. 2022. V. 20. № 9.
4. Vršnak et al. // *Solar Phys*. 2013. V.285. P. 295.

## **Новое крупное событие: GLE77 (11.11.25)**

Ю.В. Балабин, Б.Б. Гвоздевский, А.В. Германенко (*Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Россия, [balabin@pgia.ru](mailto:balabin@pgia.ru)*)

На спаде солнечной активности 25-го цикла в 2025 г. произошло крупное возрастание в солнечных космических лучах (GLE). Ему присвоено обозначение GLE77. Это первое крупное событие с 2012 г., на протяжении 13 лет регистрировались GLE только малой амплитуды 3-6 %. GLE77 произошло от вспышки в активной области 4274 с координатами N23W24. В оптическом диапазоне вспышка имела класс 3B, она сопровождалась рентгеновским излучением, максимум которого наблюдался в 10:04 UT, класс вспышки X5.1, и радиовсплеском II типа. Событие зарегистрировано мировой сетью нейтронных мониторов (НМ). Самое раннее возрастание (по минутным данным) началось в 10:12 UT на полярных станциях Моусон (Антарктида) и Ньюарк (Канада). В это же время 10:12 UT по минутным данным возрастание отметил НМ в Мехико, пороговая жесткость для которого составляет  $R_c = 7.5$  ГВ. Далее целый ряд станций показали резкий рост, доходивший до 40 % за 5 минут. Наибольшую среди всех НМ амплитуду возрастания показали НМ Наин ~150 % и Моусон ~133 %. Возрастание амплитудой 5-20 % наблюдалось на среднеширотных станциях Иркутск, Москва, Новосибирск и др. На ряде НМ (Апатиты, Певанук, Южный полюс) отмечено более одного локального максимума, что говорит об особых условиях генерации и распространения солнечных космических лучей. Межпланетная обстановка на момент вспышки и в последующие часы была спокойной, магнитосфера также находилась в спокойном состоянии.

Собраны необходимые данные, произведен анализ события GLE77 и выполнено решение обратной задачи. Получен ряд энергетических спектров СКЛ в последовательные моменты времени от начала события до 15 UT. GLE77 демонстрирует необычную динамику параметров спектров. Энергетические спектры вначале имеют экспоненциальную форму и узкое питч-угловое распределение, затем постепенно переходят к степенной зависимости, а питч-угловое распределение уширяется, появляется обратный поток. Подобные изменения в спектре, по-видимому, связаны с особенностями распространения СКЛ в межпланетном пространстве. За 4 дня до этого Земля попала в корональный выброс массы и наблюдался Форбуш-эффект, а к концу суток 11.11.25 к Земле подошел новый корональный выброс с ударной волной на фронте. Это означает, что на момент GLE77 этот фронт находился не слишком далеко от Земли и мог влиять на поток СКЛ. Значение характеристической энергии  $E_0$  экспоненциального спектра в начале события достигли значения 0.72 ГэВ, а показатель степенного спектра составил -3.8. Оба эти значения превышают типичные значения для события GLE. Это позволяет назвать данное GLE жестким: в потоке солнечных космических лучей доля высокоэнергичных частиц была немалая.

Полученные спектры СКЛ могут использоваться для расчета ионизации атмосферы на различных высотах, для вычисления экспозиционной дозы и других прикладных задач, связанных с оценкой воздействия космических факторов на наземные системы.

### **Анализ сложного события GLE74 (11.05.24)**

Ю.В. Балабин, Б.Б. Гвоздевский, А.В. Германенко (*Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Россия, [balabin@pgia.ru](mailto:balabin@pgia.ru)*)

В мае 2024 года во время сильной геомагнитной бури и Форбуш-эффекта произошло событие GLE. Возрастание в космических лучах было зарегистрировано мировой сетью нейтронных мониторов. Сильная магнитная буря явилась следствием прихода коронального выброса масс, произошедшего за несколько дней до этого во время предыдущей вспышки на Солнце. Этот выброс достиг Земли к концу суток 10.05.2024 и произвел значительное Форбуш-понижение. Генерация солнечных космических лучей происходила в активной области АО 13664 типа Beta-Gamma-Delta с координатами S17W47, вспышка имела класс X5.8, максимум излучения достигнут в 01:39 UT 11.05.2024.

Магнитная буря и Форбуш-эффект осложняют анализ GLE74. На момент начала GLE74 на Земле бушевала магнитная буря, Dst-индекс опустился ниже -400 нТл, а в космических лучах в конце предыдущих суток начался Форбуш-эффект, вызванный приходом плазменного облака от предыдущей. Понижение потока космических лучей в следствие Форбуш-эффекта на полярных нейтронных мониторах составило ~10%. Небольшая амплитуда GLE также осложняет выделение собственно возрастания на фоне общего понижения уровня счета. На нейтронных мониторах в Апатитах и Баренцбурге (Шпицберген) возрастание потока космических лучей составило 4-5% по пятиминутным данным. Наибольшую амплитуду показала станция Кергелен: 6%. (Имеется в виду нормализованная к уровню моря амплитуда возрастания.)

Данных мировой сети достаточно для решения обратной задачи: определение параметров потока солнечных космических лучей. Для используемой методики прямого решения обратной задачи требуется вычисление асимптотических конусов приема нейтронных мониторов. Неопределенность состояния магнитосферы во время бури вносит основную ошибку при решении, поэтому важно точное задание состояния магнитосферы. Обычно используется модель Цыганенко-01, хорошо описывающая магнитосферу в спокойном и слегка возмущенном состоянии, однако, в случае сильных магнитных бурь она неприменима. Для задания состояния магнитосферы в буревых условиях подходит модель Цыганенко-03, которая ранее использовалась в событии GLE66 и показала хорошие результаты. Результатом выполнения решения являются энергетические спектры и питч-угловое распределение потока солнечных космических лучей на протяжении максимальной фазы события с шагом в 5 минут с 02:30 до 04:00 UT. Параметры спектров незначительно отличаются от спектров для GLE66. Оба события являются достаточно жесткими, показатель степенного спектра примерно равен -4.

## **Аномальное Форбуш-понижение 7 сентября 2025 г.**

Ю.В. Балабин, Б.Б. Гвоздевский, А.В. Германенко (*Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Россия, [balabin@pgia.ru](mailto:balabin@pgia.ru)*)

Мировая сеть нейтронных мониторов (НМ) 6-7 сентября 2025 г. зарегистрировала аномальное падение интенсивности космических лучей. На отдельных станциях понижение составило более 20 %. Такое значительное снижение потока космических лучей отмечалось очень редко. На значительной части станций падение составило 10-15 % и затронуло как высокоширотные, так и низкоширотные станции. Такое снижение типично для сильных Форбуш-эффектов. Однако, спустя 10-12 часов интенсивность КЛ вернулась в прежнему уровню, что не характерно для Форбуш-эффекта, вызванного прохождением вблизи Земли коронального выброса массы. Нетипично для Форбуш-понижения наличие сильной анизотропии: некоторые полярные близкорасположенные НМ показали значительное различие как по величине понижения, так и по времени его наступления. Например, в Апатитах снижение в начале суток 07.09.25 составило в минимуме 10 %, а в Баренцбурге 17 %. На южно-полярной станции НМ Дом-Си отмечены два локальных минимума. Первый достигнут был примерно одновременно с Апатитами и такой же по величине, а второй случился 6 часов спустя и составил 25 %. Магнитосфера находилась в спокойном состоянии, данные о межпланетной среде показывали, что она тоже находится в спокойном состоянии. Необычное понижение вызвало интерес, были собраны доступные данные и проведен анализ этого события. Для анализа использована методика, применяющаяся для событий GLE: расчет отклика мировой сети НМ на анизотропный поток и вычисление характеристик потока, лучше всего соответствующих наблюдаемым изменениям на НМ. Обычное Форбуш-понижение имеет недостаточную анизотропию, чтобы методика могла быть применена, однако, произошедшее аномальное понижение весьма анизотропно, что нетипично для Форбуш-эффекта. Получено устойчивое решение в последовательные моменты времени на протяжении полусуток. Решения показывают непротиворечивую динамику параметров: начало и развитие, достижение минимума и восстановление потока после Форбуш-понижения.

Анализ полученного решения в совокупности с данными о межпланетной среде на протяжении нескольких суток дает следующее. В середине суток 6 сентября Земля вошла в обширную область межпланетного пространства с регулярным магнитным полем. Область хорошо выделалась низкой плотностью солнечного ветра: менее  $0.5 \text{ см}^{-3}$ , а в середине уменьшалась до  $0.1 \text{ см}^{-3}$ . О размере области говорит факт, что при скорости солнечного ветра  $>600 \text{ км/с}$  она проходила мимо Земли двое суток. Это соответствует протяженности 90-100 млн.км, более 1/3 расстояния от Земли до Солнца. Протяженность и регулярность межпланетного магнитного поля значительно ослабила диффузию частиц космических лучей поперек силовых линий, сохранив ее значение вдоль силовых линий. При таких условиях глубоко внутри области образовались направления (узкие телесные углы) с существенным недостатком частиц. Асимптотический конус приема каждого НМ за счет вращения Земли попадал в эти углы в различные моменты времени. Этим объясняется задержка достижения минимума на разных НМ. Различия в глубине минимумов объясняются тем, что угловой размер асимптотического конуса приема у каждого НМ свой, и обедненные области составляют разные доли для разных НМ.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-17-20038, <https://rscf.ru/project/25-17-20038/> и гранта Министерства образования и науки Мурманской области*

## **Крупные Форбуш-эффекты в 2025-26 г.**

Ю.В. Балабин, Б.Б. Гвоздевский, А.В. Германенко, Е.А. Михалко, А.Г. Сухарев (*Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Россия, [balabin@pgia.ru](mailto:balabin@pgia.ru), [germanenko@pgia.ru](mailto:germanenko@pgia.ru)*)

Солнечная активность идет на спад, 25-й солнечный цикл близится к завершению. Тем не менее активность остается высокой, на Солнце продолжают происходить вспышки и корональные выбросы массы, которые, достигнув Земли, вызывают Форбуш-эффекты. Суть Форбуш-эффекта в частичном экранировании обширными облаками солнечной плазмы космических лучей. Нейтронными мониторами (НМ) в Апатитах и Баренцбурге зарегистрированы несколько крупных Форбуш-эффектов в 2025 и в начале 2026 г. В Апатитах мониторинг космических лучей ведется тремя различными приборами: стандартным 18-НМ-64, бессвинцовой секцией 4-НМ-64 и детектором тепловых нейтронов 3-СНМ-18. В Баренцбурге имеется только стандартный 18-НМ-64. Кроме того, в Апатитах и Баренцбурге установлены мюонные телескопы, имеющие высокие энергетические пороги. Перечисленные приборы различаются в первую очередь рабочими энергетическими диапазонами, и Форбуш-эффекты, зарегистрированные разными детекторами, имеют различную величину. Произведены сравнение и последующий анализ Форбуш-эффектов, зарегистрированных перечисленными приборами в 2025-26 г. Сложным и комплексным является событие двойного Форбуш-эффекта в начале сентября. Самый мощный Форбуш-эффект произошел 19.01.26.

## **Наблюдения солнечных и атмосферных всплесков жесткого рентгеновского и гамма излучения с помощью приборов СГ/1 на спутниках «ИОНОСФЕРА-М»**

Богомолов В.В., Свертилов С.И., Яшин И.В., Богомолов А.В., Васильев Н.А., Еремеев В.Е., Июдин А.Ф., Кучеренко И.А. (*МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, [bogovit@rambler.ru](mailto:bogovit@rambler.ru)*)

В докладе представлены результаты наблюдений солнечных вспышек в жестком рентгеновском и гамма диапазонах, которые произошли в 2024, 2025 гг.. Приводятся примеры временных профилей всплесков солнечного излучения в разных энергетических интервалах, рассматривается методика восстановления энергетических спектров по показаниям в широких энергетических интервалах, а также по измерениям в спектральной моде. Особое внимание уделено событиям в начале ноября 2025 г., которые привели к сильным геомагнитным возмущениям.

Наблюдения осуществлялись на спутниках «Ионосфера-М». В настоящее время развернута группировка из четырех таких космических аппаратов (КА) «Ионосфера-М», предназначенных в том числе для мониторинга физических процессов в атмосфере, ионосфере и магнитосфере Земли, а также патрулирования вспышечной активности Солнца. На каждом из указанных КА установлены приборы СГ/1, представляющие собой сцинтилляционные гамма-спектрометры на основе кристаллов CsI(Tl) цилиндрической формы объемом  $\varnothing 8 \times 8$  см<sup>3</sup>. Приборы СГ/1 предназначены для мониторинга гамма излучения из атмосферы Земли, а также контроля вспышечной активности Солнца в жестком рентгеновском и гамма. Гамма-спектрометры СГ/1 обеспечивают измерение в околоземном пространстве потоков и дифференциальных энергетических спектров жесткого рентгеновского и гамма-излучения в диапазоне энергий 0.02 – 10.0 МэВ при энергетическом разрешении 7.2% на линии <sup>137</sup>Cs (0.662 МэВ), а также потоков заряженных частиц (главным образом электронов с энергиями более 0.3 МэВ) и нейтронов.

В работе также анализируются возможности этой аппаратуры по детектированию гамма-вспышек из атмосферы Земли. В частности, рассматривается амплитудное распределение кратковременных (менее 1 мс) возрастных скоростей счета в каналах одного из приборов, полученное на основе наблюдений в течение нескольких месяцев, что позволяет оценить ожидаемое количество событий типа Terrestrial Gamma ray Flash (TGF).

## **Новый метод оценки чисел Рейнольдса в плазменном потоке на примере данных спутниковой миссии PARKER SOLAR PROBE**

Дуканов И.А.<sup>1,2</sup>, Юшков Е.В.<sup>1,3</sup>, Соколов Д.Д.<sup>1,2</sup>, Фрик П.Г.<sup>4</sup>

<sup>1</sup> МГУ им. М. В. Ломоносова, Физический факультет, г. Москва, Россия,

<sup>2</sup> ИЗМИРАН, г. Троицк, Россия,

<sup>3</sup> ИКИ РАН, г. Москва, Россия,

<sup>4</sup> ИМСС УрО РАН, г. Пермь, Россия

[dukanov.ia21@physics.msu.ru](mailto:dukanov.ia21@physics.msu.ru)

Магнитное и кинетическое числа Рейнольдса ( $R_m$ ,  $Re$ ), являются параметрами подобия физических процессов, протекающих в магнитогидродинамических (МГД) системах [1]. Они характеризуют взаимоотношение между диссипацией и нелинейными эффектами течения, определяя развитие турбулентного каскада, длину инерционного интервала турбулентного спектра, скорость диссипации. Задача реконструкции чисел Рейнольдса по спектральным или корреляционным характеристикам процесса признана классической задачей астрофизики и, в частности, физики солнечного ветра. Тем не менее для плазмы солнечного ветра вопрос оценки чисел Рейнольдса выглядит весьма проблематично, потому что, с одной стороны, существует множество работ, в которых эти числа уже анализировались, см., например, обзор [2], с другой стороны, разброс существующих оценок покрывает при этом много порядков, а это, в свою очередь, наводит на мысль, о проблеме используемых для оценок методов.

Самым распространенным методом оценки чисел Рейнольдса является опосредованный способ, основанный на связи корреляционного и Тейлоровского масштаба. Заметим, что далее мы будем говорить преимущественно не о числах, а о числе Рейнольдса, предполагая в рамках доклада равенство  $Re$  и  $R_m$ , то есть близость к единице магнитного числа Прандтля (что является разумным и в контексте солнечного ветра [3]). Тейлоровский масштаб, определяющий интенсивность диссипации энергии, вычисляется обычно по автокорреляционной функции флуктуирующего магнитного поля методом Ричардсона, широко известным в литературе. Подход Ричардсона, помогая преодолеть инструментальные ограничения, подразумевает экстраполяцию автокорреляционной функции в область идеального приборного разрешения, то есть в область чрезмерно малых масштабов. Основная проблема состоит в том, что в существующих спутниковых миссиях, разрешающая способность всех магнитометров недостаточна для однозначного определения Тейлоровского масштаба – это и является причиной настолько сильной ошибки в оценке  $Re$  и  $R_m$ .

В докладе мы показываем тонкие моменты приложения этого метода, а также предлагаем возможные решения с помощью так называемого каскадного (оболочечного) МГД-моделирования [4] на численно рассчитанной эволюции спектров солнечного ветра из начальных данных, собранных вблизи Солнца спутниковой миссией Parker Solar Probe, см., например, [5]. Демонстрируя недостатки метода Ричардсона, мы предлагаем новый метод оценки, основанный на взаимосвязи этих чисел с расположением точки перегиба корреляционной функции. Используя этот метод, мы применяем его затем к реальным данным и даем пусть и грубую, но первую существенно уточненную оценку чисел Рейнольдса в солнечном ветре, и проводим сравнение с существующими ранее оценками.

1. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. – Гостехиздат, 1957.
2. Wrench D. et al. What is the Reynolds Number of the Solar Wind? – The Astrophysical Journal. – 2024. – Т. 961. – №. 2. – С. 182.
3. Pérez-de-Tejada H. Empirical values of the transport coefficients of the solar wind: Conditions in the Venus ionosheath – The Astrophysical Journal. – 2004. – Т. 618. – №. 2. – С. L145.
4. Abushzada I. et al. Turbulent dynamo in the shell model and the Kazantsev-Kraichnan approach – Physical Review E. – 2025. – Т. 112. – №. 1. – С. 015104.
5. Raouafi N. E. et al. Parker solar probe: Four years of discoveries at solar cycle minimum – Space Science Reviews. – 2023. – Т. 219. – №. 1. – С. 8.

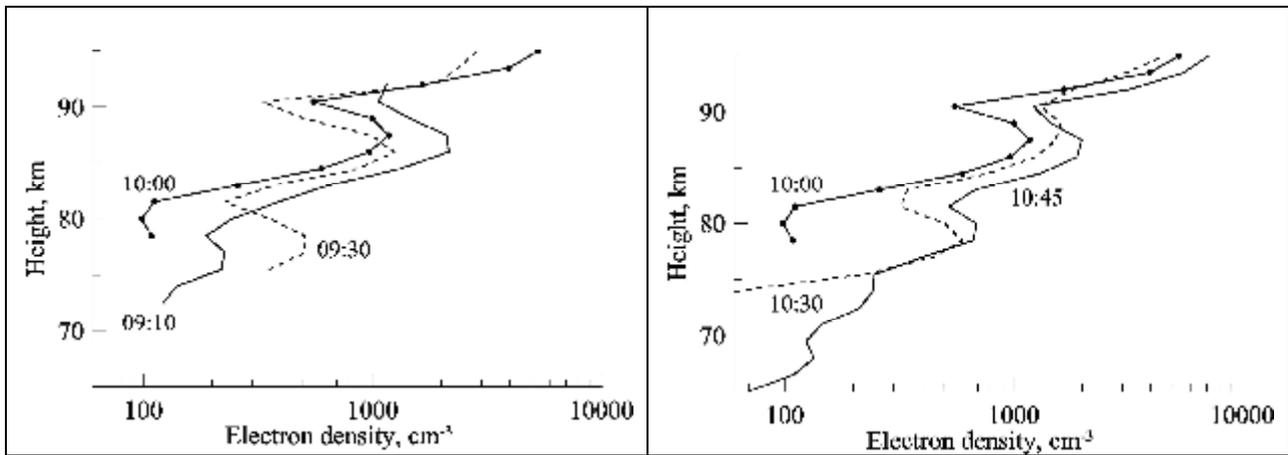
## **Закономерности Регулярного Баллонного Мониторинга космических лучей, требующие объяснения при моделировании эксперимента**

Крайнев М.Б. (ФИАН)

Эксперимент по регулярному баллонному мониторингу (РБМ) космических лучей в земной атмосфере проводится ФИАН с 1957 г. по настоящее время. В разные года приборы РБМ выпускались в разных пунктах, с разной периодичностью и в разном составе. Подавляющая часть информации, получаемой в эксперименте РБМ, связана с галактическими космическими лучами (ГКЛ). Для определения по результатам РБМ характеристик первичных ГКЛ в гелиосфере необходимо систематическое моделирование эксперимента.

Доклад будет посвящён формированию набора основных закономерностей, наблюдаемых в эксперименте РБМ - в разных пунктах его проведения на протяжении нескольких циклов солнечной активности. Эти закономерности необходимо объяснить при моделировании прохождения первичных ГКЛ через магнитосферу и их взаимодействия с атмосферой Земли.

## *Ionosphere and Upper Atmosphere*



## **Evolution of Ionospheric Irregularities Over the American Sector During the May 2024 Geomagnetic Superstorm**

C.M. Anoruo, P.R. Fagundes, V.G. Pillat (*Laboratorio de Física e Astronomia, Universidade do Vale do Paraíba (UNIVAP), Urbanova, Brazil*)

### **Abstract**

Ionospheric F-region irregularities are typical post-sunset background electron density inhomogeneous structures that are both storm-induced and naturally occurring equatorial plasma bubble (EPB) phenomena. Their dynamic morphology and latitudinal occurrence differ depending on the observational technique, including ionograms from ionosondes and ROT and ROTI derived from GPS-TEC measurements, which are commonly used to detect equatorial spread-F (ESF) and EPB-related irregularities. In this study, we investigate how the May 2024 geomagnetic storm modified ionospheric conditions over the American sector during a 30-day interval spanning quiet and storm-time periods. Manually scaled ionograms from Araguatins (ARA; within the equatorial anomaly: 5.6°S, 48.1°W, dip latitude 6.2°S) and São José dos Campos (SJC; outside the equatorial anomaly: 23.2°S, 46.0°W, dip latitude 22.1°S) were used to derive h'F, foF2, and ESF occurrence in both range and frequency spread-F. These results were compared with irregularity structures detected from ROT and ROTI across 14 GPS-TEC stations distributed over eastern and western America. The analysis reveals strong agreement between the techniques and significant storm-induced enhancements in ESF and F-region irregularities. The observed structures are attributed to the combined effects of post-sunset pre-reversal enhancement (PRE), dusk-side prompt penetration electric fields (PPEF), and storm-time neutral wind-driven dynamo electric fields.

## **The impact of high-latitude ionospheric disturbances on GNSS signals during strong magnetic storms of the 25<sup>th</sup> solar cycle based on observations in the European part of Arctic**

Belakhovsky V.B.<sup>1</sup>, Vasilyev A.E.<sup>2</sup>, Kalishin A.S.<sup>3</sup>, Jin Y.<sup>4</sup>, Milosh V.<sup>4</sup>, Dolgacheva S.A.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia*

<sup>2</sup> *Institute of Applied Geophysics named after Academician E.K. Fedorov (IPG), Moscow, Russia*

<sup>3</sup> *Arctic and Antarctic Research Institute (AARI), St. Petersburg, Russia*

<sup>4</sup> *University of Oslo, Oslo, Norway*

The increase of scintillations of GPS/GLONASS signals was analyzed using the Septentrio GNSS receiver installed in the city of Apatity and the NovAtel GPS receiver installed at the Skibotn station (Norway). Data from the vertical sounding ionosonde at the Lovozero hydrometeorological station and data from the EISCAT incoherent scatter radar in Tromsø were used to identify ionospheric disturbances. To record the aurora during the period of increasing scintillations, data from the all-sky cameras at the PGI Lovozero observatory, as well as at the Skibotn station, were used. Strong magnetic storms ( $Dst < -100$  nT) for 2021–2024 years were examined.

It has been shown that tongue of ionizations (TOI) as well as polar cap patches (PCPs) in the daytime sector, associated with disturbances in the plasma concentration in the F-region of the ionosphere, are capable of leading to a comparable (and even greater) increase in the level of phase scintillations compared to substorms. During moderate geomagnetic disturbances, the increase in phase scintillations is mainly associated with disturbances in the E-layer of the ionosphere during substorms. TOI during periods of strong magnetic storms lead to a simultaneous increase in the phase and amplitude indices of scintillations at high and polar latitudes.

The study was supported by grant No. 25-17-20038 from the Russian Science Foundation, <https://rscf.ru/project/25-17-20038/>, and a grant from the Ministry of Education and Science of the Murmansk Region.

### **Three-dimensional structure of the manifestation of the polarization jet in the electron density during the “Victory Day” May 2024 geomagnetic storm.**

K.V. Beliuchenko<sup>1,2</sup>, M.V. Klimenko<sup>2</sup>, V.V. Klimenko<sup>2</sup>, I.S. Yankovskiy<sup>2</sup>, I.A. Nosikov<sup>2</sup>, A.V. Timchenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia*

<sup>2</sup>*West Department of the Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences, Kaliningrad, Russia*

Based on the Global Self-Consistent Model of the Thermosphere, Ionosphere, and Protonosphere (GSM TIP), the ionosphere's response to the May 2024 geomagnetic storm was calculated. The three-dimensional response structure of the electron concentration over Eastern Europe was studied during the period of 17-21 UT on May 10, 2024. The simulation results revealed a fine structure in the width of the sharp decrease in the electron concentration in the F2 region, which is associated with the supersonic electromagnetic plasma drift (polarization jet) that forms in the simulation results. According to observations by the Kaliningrad Observatory, a U-shaped trace was observed on vertical sounding ionograms and STEVE images of the entire sky during the period under consideration, which is a manifestation of the polarization jet. STEVE's time-varying offsets from the all-sky camera were used to estimate the rate of electromagnetic drift. The estimates indicate the formation of supersonic velocities of ~700-900 m/s, which is consistent with the simulation results.

The work was carried out with the support of the Russian Science Foundation.  
Grant No. 25-27-00217.

### **Results of the first months of operation of the payload for the upper atmosphere study on the small satellite "SINP-MSU-80"**

V.V. Bogomolov<sup>1,2</sup>, A.A. Belov<sup>1</sup>, A.V. Bogomolov<sup>1</sup>, E.D. Voskresenskov<sup>2</sup>, A.F. Iyudin<sup>1</sup>,  
P.A. Klimov<sup>1</sup>, I.A. Kucherenko<sup>2</sup>, A.S. Murashov<sup>1</sup>, S.I. Svertilov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> – *M.V. Lomonosov Moscow State University, D.V. Skobel'tsyn Institute of Nuclear Physics*

<sup>2</sup> – *M.V. Lomonosov Moscow State University, Physical Department*

The small satellite SINP-MSU-80 (formerly known as "Scorpion") in the cubesat 16U format was launched on December 28, 2025 into a circular polar orbit with a height of about 500 km. The satellite is equipped with a complex of scientific instruments designed in SINP MSU primarily for the study of transient phenomena in the upper atmosphere. It includes the TGS gamma-ray spectrometer for detecting atmospheric gamma-ray bursts (TGF) and the SONENT optical and UV photometer spectrometer for studying high-altitude atmospheric discharges. Space radiation detectors and a biocontainer for the study of the influence of space factors on microorganisms are also installed on the SINP-MSU-80 satellite.

The TGS gamma-ray spectrometer providing measurements in energy range from 50 keV to 10 MeV, consists of 4 independent modules with a total area of ~250 cm<sup>2</sup>. The device will generate both monitoring data (count rate in 7 channels) and data in the event-by-event format, which allows recording the time profile of atmospheric flashes with microsecond accuracy. SONENT scientific equipment for optical measurements includes a fast imaging photometer AURA-T, a spectrometer measuring the time profiles of flashes in 4 spectral intervals corresponding to nitrogen and oxygen lines, and a pinhole camera with an angular resolution of 30 mrad.

During the flight tests of the SINP-MSU-80 satellite, the readiness of the payload for a space experiment was confirmed. The synchronization of scientific equipment with microsecond accuracy provided by satellite systems allow joint measurements of optical and hard radiation from various atmospheric transients (TGF, TLE). Daily data amount of several tens of megabytes will make it possible to transmit detailed information about these phenomena.

## **Comparison of nighttime horizontal wind dynamics using Fabry-Perot interferometer and HWM model data**

Budovkina A.A., Edemskiy I.K., Vasiliev R.V. (*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia*)

This paper compares the zonal and meridional components of the neutral wind, derived from atmospheric airglow observations obtained with a Fabry–Perot interferometer, and those calculated using the empirical Horizontal Wind Model (HWM). The interferometer is installed at the Geophysical Observatory of the Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS (Tory, 52° N, 103° E). Since the data underlying the HWM model were obtained primarily in the Western Hemisphere, verification of the model applicability for the East Siberian region remains a pressing issue.

This paper uses observational data from 2021–2025 for the local night (10–24 UTC). The analysis is performed separately for the airglow of the green oxygen line (80–120 km) and the red oxygen line (200–400 km), allowing for a comparison of the neutral wind characteristics at different altitudes. The data are divided by season based on the solstices and equinoxes and filtered by cloud cover. Model calculations were performed using versions HWM93, HWM07, and HWM14.

The results obtained can be used to assess the applicability of various HWM versions in interpreting experimental data and modeling upper atmospheric dynamics over Eastern Siberia.

## **Сравнение динамики ночного горизонтального ветра по данным интерферометра Фабри-Перо и модели HWM**

Будовкина А.А., Едемский И.К., Васильев Р.В. (*Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия*)

Работа посвящена сравнению зональной и меридиональной компонент нейтрального ветра, полученных по данным атмосферного свечения, регистрируемого интерферометром Фабри–Перо, и рассчитанных с использованием эмпирической модели Horizontal Wind Model (HWM). Интерферометр установлен в Геофизической обсерватории Института солнечно-земной физики СО РАН (с. Торы, 52° N, 103° E). Поскольку данные, лежащие в основе модели HWM, получены преимущественно в Западном полушарии, проверка применимости модели для Восточно-Сибирского региона остаётся актуальной задачей.

В работе используются данные наблюдений за 2021–2025 гг. для времени локальной ночи (10–24 UTC). Анализ проводится отдельно для атмосферного свечения зелёной линии кислорода (80–120 км) и красной линии кислорода (200–400 км), что позволяет сопоставить характеристики нейтрального ветра на различных высотах. Данные разделены по сезонам относительно дней солнцестояний и равноденствий и отфильтрованы по условию облачности. Модельные расчёты выполнены с использованием версий HWM93, HWM07 и HWM14.

Полученные результаты могут быть использованы для оценки применимости различных версий HWM при интерпретации экспериментальных данных и моделировании динамики верхней атмосферы над Восточной Сибирью.

**Observation and modeling of ionospheric effects of the midnight temperature maximum at midlatitudes.**

Edemskiy I.K., Budovkina A.A., Vasiliev R.V., Tashchilin A.V. (*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia*)

We investigate the ionospheric manifestations of the midnight temperature maximum (MTM)—an increase in atmospheric temperature at altitudes of 250-400 km near local midnight. The 630 nm airglow exhibits an increase in intensity during the night and is consistent with a change in the altitude of the electron density maximum, indicating an increase in temperature. Numerical modeling using the ISTP plasmasphere-ionosphere model clearly confirms the necessity of correct accounting for the dynamics of the neutral atmosphere, expressed predominantly by the neutral wind, using several different methods for incorporating the latter in the calculations.

Presented atmospheric airglow observations were obtained using data from the Optical Instruments of the National Heliogeophysical Complex; ionospheric parameters were determined using data from the ISTP radiophysical instruments: an ionosonde and the Irkutsk incoherent scatter radar.

**Наблюдение и моделирование ионосферных эффектов полуночного максимума температуры в средних широтах.**

Едемский И.К., Будовкина А.А., Васильев Р.В., Тащилин А.В. (*Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия*)

В работе исследуются ионосферные проявления полуночного температурного максимума (midnight temperature maximum, MTM) - роста температуры атмосферы на высотах 250-400 км вблизи времени локальной полночи. Фоновое свечение атмосферы в линии 630 нм демонстрирует рост интенсивности в ночное время и согласуется с изменением высоты максимума концентрации электронов, что свидетельствует о росте температуры. Численное моделирование с использованием плазмосферно-ионосферной модели ИСЗФ наглядно подтверждает необходимость корректного учета динамики нейтральной атмосферы, выражаемой преимущественно нейтральным ветром, на примере использования нескольких различных способов учета последнего в расчетах.

Наблюдения атмосферного свечения в работе получены по данным УНУ Оптические инструменты Национального геогеофизического комплекса, параметры ионосферы определялись по данным радиофизических инструментов ИСЗФ: ионозонда и Иркутского радара некогерентного рассеяния.

### **Variations of NO Emission at 5.3 $\mu\text{m}$ Observed during the Geomagnetic Storm on 24 April 2023**

Hong Gao, Jiyao Xu, Yajun Zhu (*State Key Laboratory of Solar Activity and Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing, China*)

The response of NO emission at 5.3  $\mu\text{m}$  in the thermosphere to the geomagnetic storm on 24 April 2023 is analyzed using TIMED/SABER observations and TIEGCM simulations. Both the observations and the simulations indicate a significant enhancement in NO emission during the storm. Observations show two peaks around 50°S/N in the altitude–latitude distribution of NO emission and its relative variation. Additionally, the peak emission and enhancement are stronger on the nightside compared with the dayside. The peak altitude in the Northern Hemisphere is approximately 2–10 km higher than in the Southern Hemisphere; meanwhile, the peak altitude on the dayside is approximately 2–8 km higher than that on the nightside. Simulations reveal three peaks around 50°S, the equator, and 65°N, with peak altitudes at higher latitudes being slightly lower than those observed. In general, the altitude–latitude distribution structure of the relative variation in simulated NO emission matches observations, with two peaks around 50°S/N. TIEGCM simulations suggest that the increase in NO density and temperature during a geomagnetic storm can lead to an increase in NO emission at most altitudes and latitudes. Furthermore, the significant enhancement around 50°S/N is mainly attributed to the changes in NO density.

### **Comparative Analysis of Ion and Electron Contributions to Ionospheric Ionization at Subauroral Latitudes from ELFING-DMSP Conjunctions**

S.R. Kamaletdinov, A.V. Artemyev (*Department of Earth, Planetary, and Space Sciences, University of California, Los Angeles, USA*)

Electron and proton precipitation into the nightside ionosphere is a key process in magnetosphere–ionosphere coupling. Although auroral electron precipitation at  $\sim 0.1$ –10 keV has traditionally been regarded as the main driver of auroral emissions, recent studies demonstrate that energetic electrons and protons ( $>30$  keV) can contribute substantially to ionospheric energy deposition, particularly during storm times. While energetic electron precipitation has been studied extensively, the role of energetic proton precipitation remains poorly quantified. Here, we use coordinated ELFING and DMSP measurements, covering electron and ion precipitation from  $\sim 30$  eV to  $\sim 6$  MeV, to quantify their respective contributions to ionospheric density enhancements. We show that, at subauroral latitudes, energetic protons precipitation in the E-region can contribute comparably to the impact of energetic electrons. These results are further supported by magnetospheric observations from the Arase and THEMIS spacecraft and by ground-based incoherent scatter radar measurements from PFISR.

**Ionospheric Response to Geomagnetic Storms: Insights From GSM TIP Modeling and Ground-Based Observations at WD IZMIRAN**

M.V. Klimenko<sup>1</sup>, V.V. Klimenko<sup>1</sup>, F.S. Bessarab<sup>1</sup>, K.V. Beliuchenko<sup>1</sup>, K.G. Ratovsky<sup>2</sup>, I.S. Yankovsky<sup>1</sup>, A.V. Timchenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*West Department of Pushkov IZMIRAN, Kaliningrad, Russia*

<sup>2</sup>*ISTP SB RAS, Irkutsk, Russia*

This work investigates the spatio-temporal features of electron density distribution in the high- and mid-latitude E and F regions, as well as the topside ionosphere, during geomagnetic storms. Using the Global Self-consistent Model of Thermosphere, Ionosphere, and Protonosphere (GSM TIP), we identify several novel aspects of ionospheric physics and morphology during and after geomagnetic storms: 1) the high-latitude positive vertical total electron content (TEC) response with maximum in winter; 2) the longitudinal dependence of positive daytime after-storm disturbances in F-region electron density with maximum in Asia sector. The modeled features are validated through a comparative analysis with independent simulation results and various experimental data, including manually scaled ionosonde parameters, all-sky imager observations, and TEC derived from GPS/GLONASS measurements. Additionally, the study examines global and regional electron content variations during disturbed periods. Our results demonstrate the reliability of the GSM TIP model in capturing complex ionospheric responses. Finally, we highlight the necessity of further validation using unique topside sounding data from the newly launched Ionosphere-M satellite constellation.

This investigation was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation grant 25-27-00217.

## **Pulsating Aurora Imaging Photometers System: selected results and plans of the project**

P.A. Klimov<sup>1,2</sup>, A.A. Belov<sup>1,2</sup>, A.S. Kirillov<sup>3</sup>, A.L. Kotikov<sup>4</sup>, B.V. Kozelov<sup>3</sup>, A.S. Murashov<sup>1</sup>, V.D. Nikolaeva<sup>1</sup>, A.V. Roldugin<sup>3</sup>, R.E. Saraev<sup>1,2</sup>, K.F. Sigaeva<sup>1,2</sup>, S.A. Sharakin<sup>1</sup>, K.D. Shchelkanov<sup>1,2</sup>, A.A. Trusov<sup>2</sup>, M.Yu. Zotov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *D.V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia.*

<sup>2</sup> *Faculty of physics, M.V. Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia.*

<sup>3</sup> *Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia.*

<sup>4</sup> *St. Petersburg Branch of the Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and RadioWave Propagation, Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia.*

The PAIPS (Pulsating Aurora Imaging System) is a stereometric system of imaging photometers and spectrometers placed in two geophysical observatories (Verkhnetulomskaya and Lovozero) separated by 153 km. The system has been operating since fall 2021 and provides measurements of auroral emissions spatiotemporal structure with high temporal resolution (1 ms). Over the course of four seasons of the project's operation, a database of pulsating aurorae (PsA) was created and analysed. A stereometric method for estimating PsA altitudes based on per-pixel signal frequency analysis was developed and implemented.

A new type of auroral emission — optical microbursts (OMB) — was discovered. OMBs are bright short-lived optical flashes with a characteristic duration of about 100 ms, occurring in groups lasting from seconds to hours. Over 4 seasons, 102 OMB series were detected. OMBs predominantly occur in the evening sector during the recovery phase of geomagnetic storms or sub-storms, with rare exceptions. Satellite charge particle detectors data analyses demonstrate that OMBs are associated with regions of increasing electron fluxes >100 keV within or at the polar boundary of the outer radiation belt. A spectrometric method for altitude estimation was developed, based on intensity ratios of molecular nitrogen lines and bands. Detector responses to nitrogen emission spectra were simulated for electron energies from 1 keV to 4 MeV. Comparing model and experimental data yielded OMB emission altitudes and precipitating electron energies around 100 keV.

Various algorithms for selecting and reconstructing track events from imaging detectors were developed. Several tracks similar to those expected from EAS were found in PAIPS data. Confirming their EAS origin would enable widespread use of small fluorescent telescopes for studying cosmic rays at EeV energies, including in the future Taiga-100 experiment.

The project intends to conduct further investigations into transient auroral emission phenomena, including OMBs, pulsating and flickering aurorae. To this end, the network of observation stations will be expanded to subauroral and polar regions (Barentsburg and Krasnoe Ozero). New photometric and spectrometric equipment will be developed. The project encompasses the development of an online software platform designed for simulating and computing optical emissions induced by high-energy particle precipitation. This platform accommodates both localized events and phenomena spanning the entire auroral oval, while providing compatibility with theoretical models and empirical spectra of precipitation fluxes.

The work was supported by the Russian Science Foundation grant no. 22-62-00010 (<https://rscf.ru/project/22-62-00010/>).

## **Methods for Spatial Processing of LEO Satellite Signals in the Diagnostics of Small-Scale Ionospheric Inhomogeneities**

S.I. Knizhin<sup>1,2</sup>, P.E. Prodan<sup>1</sup>, M.A. Zverev<sup>1</sup>, D.V. Kotov<sup>1</sup>, S.N. Kolesnik<sup>1</sup>, V.P. Lebedev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> - *Irkutsk State University, Irkutsk, Russia*

<sup>2</sup> - *Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia*

The study of physical processes within the Earth's ionospheric plasma is essential for addressing a broad range of fundamental and applied challenges. Satellite-based diagnostics currently stand as one of the most effective methods for ionospheric research, categorized into ray-based and diffraction-based approaches. Ray-based diagnostics, the more established of the two, rely on the geometric optics approximation, where received signal characteristics are treated as linear integrals along the propagation paths (straight lines at high frequencies).

In contrast, diffraction-based diagnostics account for diffraction and multipath effects. While the Born-Rytov approximation is suitable for environments causing weak phase and amplitude fluctuations, strong fluctuations typically necessitate the phase screen approximation. However, the latter requires a priori knowledge of the inhomogeneities spatial distribution.

The Double Weighted Fourier Transform (DWFT) method overcomes these limitations, allowing for the analysis of diffraction and multipath effects under conditions of strong turbulence without prior information regarding the location of plasma structures [1-2]. To enhance diagnostic resolution, dual spatial processing of the field can be employed, applying the DWFT relative to both source and receiver coordinates [1-2]. Experimentally, this spatial processing can be implemented using a network of synchronized Software-Defined Radio (SDR) receivers. Each node operates in a dual-channel mode at 150 MHz and 400 MHz to capture the signals from Low-Earth Orbit (LEO) satellites.

1. Tinin, M., & Knizhin, S. (2020). Some possibilities of spatial signal processing in an inhomogeneous medium based on DWFT. *Radio Science*, 55, e2019RS006908. <https://doi.org/10.1029/2019RS006908>

2. Knizhin, S. I. (2020). Using spatial radio wave field processing for diagnostics of inhomogeneous plasma. *Waves in Random and Complex Media*, 31(6), 2115–2134. <https://doi.org/10.1080/17455030.2020.1721613>

## **Middle atmosphere and ionosphere responses to particle precipitation during the solar and geomagnetic disturbances of October 2003.**

E.M. Kochneva<sup>1</sup>, A.D. Mironov<sup>1</sup>, G.A. Bazilevskaya<sup>2</sup>, V.S. Makhmutov<sup>2</sup>, I.A. Mironova<sup>1</sup>, E.V. Rozanov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg*

<sup>2</sup> *Lebedev Physical Institute of Russian Academia of Sciences*

During the last half of October, 2003, a series of the largest solar flares occurred, accompanied by coronal mass ejections. By causing extremely strong geomagnetic storms, these ejections led to the increase of atmospheric ionization. An excessive increase in the concentration of nitrogen and hydrogen radicals, HOx and NOx, occurred, which contributed to the destruction of mesospheric ozone. The effect was particularly strong in the Northern Hemisphere, since polar winter had already begun at that time and nitrogen radicals were not destroyed by photolysis. The individual effects of protons and electrons on radical production and their impact on the ozone layer have been widely studied. In the present study, the separate and combined effects of protons and electrons on ionization, ozone depletion, and electron content in the D-region of the ionosphere were evaluated using the model RACOP with ion chemistry. Variations in proton and electron fluxes were obtained from balloon measurements conducted by the Lebedev Physical Institute.

### **Acknowledgements**

The authors acknowledge Saint-Petersburg State University for a research project 124032000025-1.

## **Solution to the Classification Problem of Auroral Scattering of Radar Signals Using Machine Learning Models**

G.A. Kupriyanov<sup>1,2</sup>, I.A. Goncharenko<sup>1,2</sup>, I.V. Tutin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Physics Department, Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

<sup>2</sup>*JSC Scientific Research Institute for Long Distance Radiocommunication, Moscow, Russia*

This work investigates the possibility of building a classifier for auroral radar signals using interpretable machine learning (ML) methods.

The task of classifying auroral signals is a relevant problem in space monitoring technologies. Due to the lack of theoretically justified criteria for classification, a data analysis and ML model construction approach is considered [1, 2]. Based on data from a decimeter-range radar directed northward and located in the Krasnoyarsk Krai region, binary classification models were built: Random Forest, Gradient Boosting, Multilayer Perceptron, and Kolmogorov-Arnold Network. A comparative analysis of their performance, interpretation of their operation, and selection of input features were carried out.

The conducted study facilitated the identification of the most significant features and the determination of effective ML models for solving the given task.

### *Literature:*

[1] Bergardt, O. I., Kusonsky, O. A., Poddelsky, A. I., & Oinats, A. V. (2022). *Self-trained artificial neural network for physical classification of ionospheric radar data*. *Advances in Space Research*, 70(10), 2905–2919. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.07.054>

[2] Kunduri, B. S. R., Baker, J. B. H., Ruohoniemi, J. M., Thomas, E. G., & Shepherd, S. G. (2022). *An Examination of SuperDARN Backscatter Modes Using Machine Learning Guided by Ray-Tracing*. *Space Weather*, 20(9). <https://doi.org/10.1029/2022sw003130>

## **Решение задачи классификации аврорального рассеяния радиолокационных сигналов с помощью моделей машинного обучения**

Г.А. Куприянов<sup>1,2</sup>, И.А. Гончаренко<sup>1,2</sup>, И.В. Тютин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Физический факультет, Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, 119991 Россия*

<sup>2</sup>*АО «Научно-исследовательский институт дальней радиосвязи», Москва, Россия*

В данной работе исследуется возможность построения классификатора авроральных радиолокационных сигналов с применением интерпретируемых методов машинного обучения (МО).

Задача классификации авроральных сигналов является актуальной проблемой в технологиях мониторинга космического пространства. Ввиду отсутствия теоретически обоснованных критериев для классификации, рассматривается подход анализа данных и построения моделей МО [1, 2]. На основе данных радара дециметрового диапазона северного направления, расположенного в Красноярском крае, были построены модели бинарной классификации: случайный лес, градиентный бустинг, многослойный перцептрон, сеть Колмогорова-Арнольда. Проведен их сравнительный анализ, интерпретация работы и отбор входных признаков.

Проведенное исследование позволило выявить наиболее значимые признаки и определить эффективные модели МО для решения поставленной задачи.

### *Литература:*

[1] Bergardt, O. I., Kusonsky, O. A., Poddelsky, A. I., & Oinats, A. V. (2022). *Self-trained artificial neural network for physical classification of ionospheric radar data*. *Advances in Space Research*, 70(10), 2905–2919. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.07.054>

[2] Kunduri, B. S. R., Baker, J. B. H., Ruohoniemi, J. M., Thomas, E. G., & Shepherd, S. G. (2022). *An Examination of SuperDARN Backscatter Modes Using Machine Learning Guided by Ray-Tracing*. *Space Weather*, 20(9). <https://doi.org/10.1029/2022sw003130>

### **Estimation of the upper atmosphere ionization rate during X-class solar flares**

Lobanova V.S., Ryakhovsky I.A., Korsunskaya J.A., Poklad Y.V., Sapunova A.I. (*Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*)

In this study, experimental and theoretical methods were used to evaluate the impact of solar flare electromagnetic radiation on the state and dynamics of the Earth's upper atmosphere (60-600 km). Since the ionization rate is one of the most important parameters of ionospheric disturbances, its vertical profiles were calculated for two X-class solar flares that occurred on September 6, 2017, using the empirical FISM2 Flare solar irradiance model and the NRLMSISE-00 neutral atmosphere model. The results were verified using data for total electron content obtained with GNSS receiver located at the Mikhnevo mid-latitude geophysical observatory. It was found that the combination of empirical models qualitatively estimates the temporal dynamics of the increase in the ionization rate, and the observed excess of calculated data over measurement results may be due to the influence of recombination processes not considered in the calculations. Overall, the results obtained confirm the validity of the proposed approaches and open up opportunities for further research in this area. The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project registration number 122032900175-6.

### **Оценка скорости ионизации в верхних слоях атмосферы во время солнечных вспышек X-класса**

Лобанова В.С., Ряховский И.А., Корсунская Ю.А., Поклад Ю.В., Сапунова А.И. (*Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, г. Москва, Россия*)

В настоящем исследовании с помощью экспериментальных и теоретических методов оценивалось влияние электромагнитного излучения солнечных вспышек на состояние и динамику верхних слоев атмосферы Земли (60-600 км). Поскольку скорость ионизации является одним из важнейших параметров ионосферных возмущений, были рассчитаны ее вертикальные профили для двух солнечных вспышек X-класса, произошедших 6 сентября 2017 года, с использованием эмпирической модели солнечного излучения FISM2 Flare и модели нейтральной атмосферы NRLMSISE-00. Результаты верифицировались с использованием данных о полном электроном содержании, полученных с помощью GNSS-приемника, расположенного в среднеширотной геофизической обсерватории «Михнево». Было установлено, что комбинация эмпирических моделей качественно оценивает временную динамику увеличения скорости ионизации, а наблюдаемое превышение расчетных данных над результатами измерений может быть обусловлено влиянием процессов рекомбинации, не учтенных в расчетах. В целом, полученные результаты подтверждают обоснованность предложенных подходов и открывают возможности для дальнейших исследований в этой области. Исследование выполнено при поддержке министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект номер рег.№122032900175-6.

## **The influence of horizontal wind components on vertical drift and the formation of a sporadic E layer in the ionosphere.**

Senyagin E.D.<sup>1</sup>, Timchenko A.V.<sup>1</sup>, Bessarab F.S.<sup>1</sup>, Klimenko M.V.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia*

<sup>2</sup> *West Department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Kaliningrad, Russia*

This paper explores the relationship between the spatio-temporal dynamics of horizontal wind and the occurrence of Es layers. The analysis uses wind data obtained from the global horizontal wind model (HWM-14) at altitudes ranging from 80 to 140 km. The simulation results are compared with direct experimental observations of Es layers recorded by the vertical sounding ionosonde at the Kaliningrad Magnetic and Ionospheric Observatory (coordinates: 54.36° N, 20.12° E) from December 2014 to December 2024.

Funding. The research was funded by the grant Russian Science Foundation №23-77-10004, <https://rscf.ru/project/23-77-10004/>.

## **NEURAL NETWORK ALGORITHMS FOR DETECTING AURORAL OPTICAL MICROBURSTS**

Shchelkanov K.D.<sup>1,2</sup>, Nikolaeva V.D.<sup>1</sup>, Klimov P.A.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Nuclear Physics Research Institute, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia, [shchelkanov.kd18@physics.msu.ru](mailto:shchelkanov.kd18@physics.msu.ru)*

<sup>2</sup> *Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

Within the framework of the PAIPS project (Pulsating Aurora Imaging Photometer System) – a system of UV photometers with high temporal resolution on the Kola Peninsula – a new class of auroral phenomena was discovered: optical microbursts (OMB) [1]. OMB is a series of flashes lasting from 10 seconds to 3 hours with peaks duration about 100 ms.. OMBs are observed in the evening MLT sector. Over three observation seasons (from 2021 to 2024), 93 groups of such events have been registered; the catalog, lightcurves, and observation conditions are available on the project website: <https://uhocr.sinp.msu.ru/paips.html>. The formation mechanism of OMBs remains unclear.

To study the spatial distribution of OMBs, expansion of the PAIPS meridional network is planned, which requires automation of processing large data volumes. For this purpose, neural network methods for OMB recognition in PAIPS data are being developed, which will simplify the search for OMBs and increase the efficiency of event selection both in archival data and in newly incoming data from the expanding observation network.

Currently, a binary classifier based on a hybrid architecture consisting of convolutional (CNN) and LSTM blocks has been realized. The classification accuracy on the test sample is 94%. As a validation test on real data, two previously manually reviewed datasets were selected. The classifier correctly identified all series previously detected during visual analysis with a simple threshold trigger, and also discovered one additional OMB series, which demonstrates the effectiveness of the developed algorithm. Recall on these test datasets was ≈100%, suggesting a low miss rate under the tested conditions. For a more complete study of optical microbursts, this model was applied to archived data from the PAIPS photometers.

This work was supported by the Russian Science Foundation grant № 22-62-00010.

### **References**

[1] Klimov P. A., Nikolaeva V. D., Saraev R. E., Shchelkanov K. D., Belov A. A., Kozelov B. V., Murashov A. S., Roldugin A. V., Sharakin S. A. (2024). *Advances in Space Research*, **74(8)**, 3556-3568.

## **The impact of X-ray radiation from a solar flare on ionospheric parameters and the state of the Earth-ionosphere waveguide**

V.V. Surkov, D.V. Zinkin, V.A. Pilipenko (*Schmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS, Moscow, Russia*)

In this study, we develop a theoretical model [1] of the effect of X-ray radiation from a solar flare (SF) on the properties of the lower ionosphere and the Earth-ionosphere waveguide. In our model, we investigate the time dependences of ionospheric parameters during X-ray radiation, in contrast to the model [1], which deals with ionospheric parameters averaged over the time of SF. A flat flux of time-varying X-ray radiation incident on the ionosphere is considered. The interaction of this radiation with the ionosphere leads to the ionization of air molecules and the production of free electrons. The photons in the incident flux is assumed to be distributed in their energy according to Planck's law. The time dependence of the radiation temperature is estimated using data from a two-channel X-ray sensor on board the GOES satellites. The photon energy absorption coefficient is assumed to depend on the photon energies and air density. In this approach, the ionization rate is calculated as a function of altitude and time. Changes in the number densities of electrons and ions are described by a set of differential equations, which take into account the rates of production and recombination of particles. The solution of these equations is used to calculate changes in ionospheric conductivity which affect the properties of the upper wall of the Earth-ionosphere waveguide.

The theory was applied to study the relationship between the intensity of X-ray radiation and the change in the weighted average frequency of Schumann resonances (SRs), which was observed for a number of SFs of various classes. The frequency shifts of the SRs were calculated for 80 SFs observed between 2002 and 2017. The time series recorded by on-board X-ray sensors on the GOES satellites were used as the initial data. The results of our calculations are in good agreement with the experimental data [2].

The study is supported by the grant 25-27-00539 from the Russian Science Foundation.

### **References**

1. Surkov V.V. The effect of X-ray radiation from a solar flare on the frequencies of Schumann resonances // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2025. V. 271. 106537. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2025.106537>.
2. Shvets A.V., Nikolaenko A.P., Chebrov V.N., 2017. Effect of solar flare on the Schuman-resonance frequency // *Radiophys. Quantum Electron.* 2017. V. 60(3). P. 186–199. <https://doi.org/10.1007/s11141-017-9789-8>.

## **Ionizing effect of the forbidden energetic electrons in the F-region of the low-latitude ionosphere**

A.V. Suvorova (*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics MGU, Moscow, Russia*)

Trapped energetic electrons in the range of tens and hundreds of keV of the inner radiation belt (IRB) can penetrate into the quasi-trapped (forbidden) zone at drift shells  $L < 1.2$ . Measurements of the  $>30$  keV and  $>100$  keV electron fluxes onboard the NOAA/POES satellites are used to select FEE events. The forbidden zone spatially overlaps with the F region of the ionosphere. It was shown that high-intensity fluxes of these electrons, called forbidden energetic electrons (FEE), can produce ionizing effect in the low-latitude F region. The ionizing effect of FEE was studied for several case-events associated with geomagnetic storms. The ionospheric ion density  $N_i$  data from C/NOFS satellite and Global Ionospheric Map (GIM) of vertical total electron content (VTEC) are used for analysis of changes of ionospheric ionization. A direct proof of the ionizing effect of FEE fluxes is provided. The effects of ionizing particles become more evident during the recovery phase of storms, when storm-time neutral wind and electro-dynamical mechanisms cannot explain the observations. The ionizing effect of particles helps to interpret complicated cases of long-duration ionospheric positive storms (increase in total electron content). Significant long-lasting increases in VTEC and  $N_i$  spatially and temporarily coincide with FEEs.

### **Ionospheric features in the E-region during geomagnetic and meteorological disturbances according to vertical sounding data in Kaliningrad**

A.V. Timchenko, V.V. Nosikova., I.A. Nosikov, O.P. Borchevkina (*West Department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Kaliningrad, Russia*)

This paper presents an analysis of the dynamics of ionospheric parameters based on vertical sounding ionosonde data during certain geomagnetic storms and severe meteorological events in Kaliningrad, as well as during calm conditions. Features are highlighted on altitude-amplitude maps for the periods under consideration.

The research was funded by the grant Russian Science Foundation N°-23-77-10004, <https://rscf.ru/project/23-77-10004/>.

### **Optical Multi-Camera Techniques for the Study of Altitude, Velocity, and Microphysics of the Clouds in Upper Atmosphere**

O.S. Ugolnikov (*Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, [ougolnikov@gmail.com](mailto:ougolnikov@gmail.com)*)

The trends in greenhouse gases, humidity, and temperature significantly impact the properties of clouds in the middle and upper atmosphere, specifically polar stratospheric and noctilucent clouds. The key characteristics sensitive to these changes are mean altitude and particle size. These properties can be measured using an array of wide-angle cameras on the Earth's surface.

The mean altitude of the clouds can be determined by two independent techniques: field correlation (an improved triangulation method) and color analysis near the Earth's shadow. Applied to noctilucent clouds, both techniques achieve an accuracy of within a few hundred meters, and results from the same cloud ensembles are in good agreement. Field analysis also allows for the determination of all three velocity components of the clouds, including the vertical.

Multi-color photometry using calibrated cameras enables the measurement of mean particle size in different cloud fragments and can potentially track changes over time. This data can be used to test theories of particle growth and evaporation in the mesosphere.

### **Noctilucent clouds: Trends and Anomalies in 2020s**

O.S. Ugolnikov (*Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, [ougolnikov@gmail.com](mailto:ougolnikov@gmail.com)*)

Changes in climate conditions in different atmospheric layers are driving trends in the observable characteristics of noctilucent clouds and are also leading to the emergence of phenomena not previously observed. These events are fundamentally linked to wave activity in the middle atmosphere, which has also shown a tendency to increase in recent years.

Noctilucent clouds are known as a summer phenomenon, consistent with the well-known reverse annual temperature cycle of the mesosphere. However, in December 2024, structures identical to noctilucent clouds were observed in winter skies over a vast territory in Siberia. The umbral (shadow-based) method of altitude estimation placed these clouds at approximately 70 km. This is about 10 km below the typical altitude of summer noctilucent clouds and coincides with the altitude of a rapid temperature drop according to satellite data. This extraordinary event was triggered by a sudden stratospheric warming near 40 km a few days prior, which altered wave propagation and shifted the wind patterns from a winter to a summer-like state. While this type of mesosphere-stratosphere wave coupling is known, it has not previously caused such a pronounced temperature drop in the mesosphere.

During the summer of 2025, noctilucent clouds exhibited a distinct 5-day periodicity in their occurrence, which remained stable from mid-June to mid-August. This period corresponds to the (1,1) Rossby wave mode, which is also known to influence the mesosphere and noctilucent clouds; however, it has not been so strong and stable in previous measurements. The amplitude of this 5-day temperature wave in the upper mesosphere in 2025 was twice the maximum recorded over the previous 20 years of the 21st century by the EOS Aura/MLS satellite, and is possibly the highest observed in this atmospheric layer during the summer in the history of observations. A large number of optical detections across a wide longitudinal range in Russia allowed for a phase comparison between cloud occurrence and temperature, which is crucial for the study of ice nucleation.

## **Reconstruction of 2D Medium-Scale Ionospheric Structures via GNSS Phase Measurements**

M.A. Volkov<sup>1</sup>, A.D. Gomonov<sup>2</sup>, A.V. Gurin<sup>1</sup>, I.S. Maximov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Murmansk Arctic University, Murmansk, Russia*

<sup>2</sup> *Polar Geophysical Institute, Murmansk, Russia*

This study addresses the reconstruction of the ionospheric electron density distribution above Murmansk, utilizing Total Electron Content (TEC) derived from GNSS phase measurements. Within a spherical ionospheric framework, the vertical electron concentration is modeled by a Gaussian function coupled with a polynomial; the latter represents a two-dimensional Taylor series expansion in terms of angular coordinates relative to the observation point. These angles are defined by the Earth's radius and the satellite's projection onto the respective meridian and parallel planes. To solve for the unknown coefficients of the third-degree polynomial, ten simultaneous TEC values from multiple satellites are required. To account for phase ambiguity, pseudorange data are incorporated into the processing. Given that noise in the TEC data can degrade reconstruction accuracy, we employ Singular Value Decomposition (SVD) as a robust alternative to direct inversion methods. Finally, the resilience of the proposed solution against noise is validated through a Monte Carlo analysis.

## **Mid-latitude auroral emissions associated with proton precipitation**

V.G. Vorobjev<sup>1</sup>, O.I. Yagodkina<sup>1</sup>, E.E. Antonova<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> *Polar Geophysical Institute, Apatity, Murmansk Region, Russia*

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

<sup>3</sup> *Space Research Institute Russian Academy of Science, Moscow, Russia*

Brightness of auroral emissions caused by precipitating protons as well as a level of ion pressure in the ionosphere is determined generally by averaged energy ( $E_i$ ) and energy flux ( $F_i$ ) of precipitation. Thus, it can be expected that latitudinal profiles of both the proton exciting auroral luminosity and ion pressure will be very similarly. The ion pressure ( $P_i$ ) has a well-defined maximum, which is located close to the equatorial boundary of the auroral oval during the period of magnetic disturbances. With an increase in magnetic activity, the position of the  $P_i$  maximum shifts to lower latitudes, and the ion pressure increases generally due to an increase in  $F_i$ . So, during periods of giant magnetic storms, proton exciting auroras of significant intensity can be observed in the middle and even in low geomagnetic latitudes.

Observations of precipitating ions from DMSP F7 and F9 spacecraft in the time interval 21-24 MLT during calm periods and during giant magnetic storms on February 07-09, 1986 ( $Dst = -307$  nT) and March 13-14, 1989 ( $Dst = -589$  nT) were used to evaluate the brightness of proton exciting auroras. The intensity of  $H\alpha$  (656.3 nm),  $1NG N_2^+$  (427.8 nm), and  $1PG N_2$  (670.5 nm) emissions were estimated under the assumption that all ion precipitation is caused by protons. It is shown that  $H\alpha$  emission is the most intense. The brightness of this emission usually exceeds 1 kR when its maximum was observed at latitudes below  $60^\circ$  CGL. The average latitude profiles of  $E_i$ ,  $F_i$  and auroral emissions were constructed according to F7 and F9 observations at the high magnetic activity level  $\langle Dst \rangle = -320$  nT and  $\langle AL \rangle = -790$  nT. The average maximum of  $H\alpha$  intensity was  $\sim 3.5$  kR at the latitude of about  $53^\circ$  CGL and can reach 6-8 kR when it was located in lower latitudes. For comparison, the average intensity maximum of 427.8 nm and 670.5 nm proton exciting emissions at the latitude of about  $53^\circ$  CGL were approximately 1.0 kR and 0.8 kR, respectively. Latitudinal profiles of proton and electron exciting auroras are discussed.

## **UV-, VIS- and NIR-emission of 10keV electron beam excited air at 1 to 1000mbar pressure**

J. Wieser (*excitech GmbH, Branterei 33, 26419 Schortens, Germany, [jochen.wieser@excitech.de](mailto:jochen.wieser@excitech.de)*)

Various atmospheric phenomena, such as lightning or so-called *air showers*, sprites, blue jets, and elves, as well as auroras, are accompanied by light emission from excited air species. Differences in their spectral features may indicate distinct excitation mechanisms, including electrical discharges, high-energy particle excitation, or runaway-electron beam excitation, provided that thorough laboratory experiments are available for comparison. In this work, a tabletop system for electron-beam excitation of gases at relatively low energies (keV range) and pressures ranging from vacuum to several atmospheres is presented. Specifically, a 12 keV electron beam, generated in an evacuated, sealed cathode-ray tube (CRT), is transmitted through a 300 nm-thick SiN membrane into a target gas volume, leading to electrons with energies of approximately 10 keV that excite the gas. Emission spectra of laboratory air over the wavelength range from 300 to 1000 nm, excited by this 10 keV electron beam, are presented and discussed for pressures between 1 and 1000 mbar.

## **Результаты первых месяцев работы полезной нагрузки для исследования верхней атмосферы на малом спутнике «НИИЯФ-МГУ-80»**

В.В. Богомолов<sup>1,2</sup>, А.А. Белов<sup>1</sup>, А.В. Богомолов<sup>1</sup>, Е.Д. Воскресенсков<sup>2</sup>, А.Ф. Июдин<sup>1</sup>, П.А. Климов<sup>1</sup>, И.А. Кучеренко<sup>2</sup>, А.С. Мурашов<sup>1</sup>, С.И. Свертилов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына*

<sup>2</sup> *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет*

Малый спутник «НИИЯФ-МГУ-80» (прежнее название «Скорпион») в формате кубсат 16U был запущен 28 декабря 2025 г на круговую полярную орбиту высотой около 500 км. На спутнике установлен комплекс научной аппаратуры НИИЯФ МГУ, предназначенный в первую очередь для исследования транзиентных явлений в верхней атмосфере. В его состав входят гамма-спектрометр ТГС для регистрации атмосферных гамма-вспышек (TGF) и оптический и УФ спектрометр-фотометр СОНЭТ для исследования высотных атмосферных разрядов. Также на спутнике «НИИЯФ-МГУ-80» установлены детекторы космической радиации и биоконтейнер для исследования влияния факторов космического пространства на микроорганизмы.

Гамма-спектрометр ТГС, осуществляющий измерения в диапазоне от 50 кэВ до 10 МэВ, состоит из 4-х независимых модулей общей площадью ~250 см<sup>2</sup>. В приборе формируются как мониторинговые данные (скорости счета в 7 каналах), так и данные в формате событийной записи, позволяющей записать временной профиль атмосферной гамма-вспышки с микросекундной точностью. В состав научной аппаратуры СОНЭТ для оптических измерений входят быстрый изображающий фотометр АУРА-Т, спектрометр, измеряющий временные профили вспышек в 4-х спектральных интервалах, соответствующих линиям азота и кислорода, и лимбовая камера-обскура с угловым разрешением 30 мрад.

В ходе лётных испытаний спутника «НИИЯФ-МГУ-80» была подтверждена готовность полезной нагрузки к проведению космического эксперимента. Синхронизация научной аппаратуры с микросекундной точностью, обеспечиваемая бортовыми системами, позволяет проводить совместные измерения оптического и жёсткого излучения различных атмосферных транзиентов (TGF, TLE), при этом суточный объём информации в несколько десятков мегабайт дает возможность передать на Землю детальную информацию об этих явлениях.

**Экстремальные интенсивности свечения ионосферы, индуцированного мощным коротковолновым излучением стенда СУРА, во время развития спорадического E слоя ионосферы**

А.Б. Белецкий<sup>1</sup>, И.Д. Ткачев<sup>1</sup>, С.М. Грач<sup>2</sup>, И.А. Насыров<sup>3</sup>, Д.А. Когогин<sup>3</sup>, Р.В. Васильев<sup>1</sup>, В.В. Емельянов<sup>3</sup>, Ю.К. Легостаева<sup>2</sup>, А.В. Шиндин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ИСЗФ СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup> ННГУ им.Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

<sup>3</sup> КФУ, Казань, Россия

С начала 2010-х годов на стенде СУРА регулярно проводятся экспериментальные кампании по регистрации искусственного оптического свечения (ИОС) ионосферы с использованием комплекса оптического оборудования. Наблюдения, в том числе многопозиционные, проводятся с помощью камер и фотометров с узкополосными фильтрами. Регистрируются эмиссии атомарного кислорода 630 нм и 557.7 нм, а также линия ионов молекулярного азота  $1\text{NGN}_2^+(0-0)$  391.4 нм. Кроме этого в эксперименте августа 2024 года использовалась широкоугольная обзорная RGB камера. В данной работе приводится анализ экстремально высоких интенсивностей ИОС ионосферы, зарегистрированного 5 августа 2024 года во время развития мощного спорадического слоя E. Интенсивность индуцированной эмиссии 557.7 нм достигала ~ 300 Рл. Кроме этого наблюдалось ИОС в линии 391.4 нм и, предположительно, гидроксила в полосах OH(9-3) и OH(5-0). В нескольких циклах нагрева ионосферы наблюдались пятна подавления интенсивности по данным синего канала обзорной камеры на фоне роста интенсивности линии 391.4 нм, зарегистрированной фотометром. Это может указывать на одновременное действие механизмов генерации излучения  $1\text{NGN}_2^+$  и подавление излучения континуума в спектральном диапазоне синего канала обзорной камеры (~ 410-520 нм), предположительно обусловленного излучением  $\text{NO}_2^*$ .

Работа выполнена с использованием УНУ «Стенд СУРА», оборудования УНУ «Оптические инструменты» при поддержке Минобрнауки (субсидия № 075-GZ/C3569/278) и грантов РНФ 23-77-10029 и 25-72-20019.

**Ключевые слова:** ионосфера; спорадический слой E; стимулированное свечение атмосферы; мощное радиоизлучение; стенд СУРА

## **Первые результаты эксперимента СУРА – Ионосфера-М в августе 2025 года.**

Грач С.М., Пулинец С.А., Падохин А.М., Чернышов А.А., Шиндин А.В., Когогин Д.А., Насыров И.А., Белецкий А.Б., Ткачев И.Д., Евдокимова М.А., Чугунин Д.В., Легостаева Ю.К., Емельянов В.В., Курбатов Г.А.

*ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия*

*Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия*

*Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия*

*Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия*

*ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия*

*МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия*

Представлены первые результаты эксперимента по исследованию взаимодействия мощных радиоволн с ионосферной плазмой при пролетах ИСЗ Ионосфера-М №1 и №2 над стендом СУРА. 20 и 22 августа 2025г. ИСЗ пересекали проекцию диаграммы направленности (ДН) стенда практически вдоль геомагнитного меридиана в вечернее время. Во время пролётов ИСЗ воздействие осуществлялось волной накачки (ВН) обыкновенной поляризации, эффективная мощность превышала 200 МВт. 20 августа ДН была наклонена на 12° к югу от вертикали в плоскости геомагнитного меридиана; 22 августа ДН была направлена вертикально вверх. В обоих экспериментах частота ВН была меньше порядка критической частоты слоя F2. Время пролета спутника над ДН стенда составляло  $\approx 25$  с. ВН включалась до входа ИСЗ в область засветки излучением стенда за время, достаточное для развития искусственных ионосферных возмущений. В ходе эксперимента регистрировались ионограммы вертикального зондирования с помощью ионозонда CADI вблизи стенда, и внешнего зондирования с использованием бортового ионозонда ЛАЭРТ, осуществлялось просвечивание ионосферы с помощью бортового МАЯКа когерентными сигналами 150/400 МГц, регистрация искусственного радиоизлучения и искусственного оптического свечения ионосферы (ИОС) с длинами волн 630 нм, 557,7 нм и 391,4 нм с помощью трёхканального фотометра вблизи стенда и пяти ПЗС камер в трех разнесенных на 120-270 км регистрационных пунктах (22 августа регистрация ИОС не велась из-за сильной облачности), а также регистрация магнитной и электрической компонент электромагнитного поля в низкочастотном диапазоне с помощью бортового прибора НВК.

Экспресс анализ данных экспериментов показал, что 20 августа расположение областей генерации ИОС и пониженной (в результате воздействия ВН) электронной концентрации практически совпадали и находились вблизи «магнитного зенита»; наблюдавшееся уменьшение яркости ИОС в линиях 557,7 и 391,4 нм во время пролёта ИСЗ связано, по всей видимости, с увеличением высоты ионосферы. 22 августа область пониженной электронной концентрации была несколько смещена к северу относительно центрального луча ДН. Во время пролетов над работающим стендом наблюдалось просачивание энергии ВН до высот верхней ионосферы, а также некоторое усиление и уширение спектра низкочастотных электромагнитных шумов в диапазоне 10-20 кГц, регистрировавшихся на спутнике. Полученные результаты нуждаются в более детальном анализе.

Работа выполнена с использованием УНУ «Стенд СУРА», оборудования УНУ «Оптические инструменты», оборудования, полученного в рамках Программы развития МГУ, а также при поддержке грантов РФФ 23-77-10029 и 25-72-20019.

### Наиболее вероятные значения средних энергий авроральных электронов и концентрации окиси азота для полярных сияний в полуденном секторе авроральной зоны

Ж.В. Дашкевич, В.Е. Иванов (*Полярный геофизический институт, Апатиты, Мурманская область, Россия*  
E-mail: [zhanna@pgia.ru](mailto:zhanna@pgia.ru))

На основе моделирования свечений полярных сияний получена зависимость высоты максимума объемной интенсивности полосы  $\lambda 427.8$  нм от средней энергии потока высыпающихся электронов. На основе полученной зависимости и экспериментальных данных построено среднестатистическое распределение средней энергии потоков авроральных электронов, ответственных за полярные сияния в полуденном секторе авроральной зоны, максимум которого локализован в области средних энергий  $E_{cp}$  от 3 до 4.5 кэВ. Показано, что удовлетворительное согласие смоделированной зависимости  $I(\lambda 557.7)/I(\lambda 427.8)$  от  $I(\lambda 427.8)$  с экспериментальными данными для потоков высыпающихся электронов со средними энергиями  $3 \div 4.5$  кэВ можно получить только для концентраций окиси азота, лежащих в интервале  $[NO]_{max} = 2 \times 10^8 \div 4 \times 10^7$  см<sup>-3</sup>. При этом наблюдается зависимость  $[NO]_{max}$  от уровня геомагнитной активности  $A_p$ . С увеличением индекса геомагнитной активности  $A_p$  от 5 до 40 концентрация окиси азота  $[NO]_{max}$  уменьшается с  $2 \times 10^8$  до  $4 \times 10^7$  см<sup>-3</sup>. Полученные значения средней энергии высыпающихся электронов  $E_{cp}$  и концентраций окиси азота  $[NO]_{max}$  могут быть использованы при решении различных задач по моделированию авроральных событий как входные среднестатистические параметры.

### Методика оценки средней энергии авроральных электронов по интенсивности эмиссии 427.8 НМ 1NG N<sub>2</sub><sup>+</sup>

Ж.В. Дашкевич, В.Е. Иванов (*Полярный геофизический институт, Апатиты, Мурманская область, Россия*  
E-mail: [zhanna@pgia.ru](mailto:zhanna@pgia.ru))

Показана возможность оценки средней энергии потока высыпающихся электронов по величине интенсивности излучения одной линии полярного сияния  $\lambda 427.8$  нм. В основу предложенной методики положена экспериментальная зависимость отношения  $I_{630.0}/I_{427.8}$  от интенсивности  $I_{427.8}$ . Согласно экспериментальным данным, отношение  $I_{630.0}/I_{427.8}$  демонстрирует непрерывное уменьшение с увеличением интенсивности эмиссии 427.8 нм. Поскольку отношение интенсивностей этих эмиссий слабо зависит от величины потока высыпающихся электронов, можно полагать, что увеличение интенсивности эмиссии 427.8 нм для «среднестатистического» полярного сияния в основном определяется увеличением средней энергии авроральных электронов. Как показали результаты модельных расчетов, влияние на зависимость средней энергии потока авроральных электронов  $E_{cp}$  от отношения  $I_{630.0}/I_{427.8}$  трех факторов, формы энергетического спектра авроральных электронов, содержания атомарного кислорода нейтральной атмосферы и концентрации нечетного азота NO, не превышает 20%. Поэтому, принимая во внимание экспериментальную зависимость отношения интенсивностей  $I_{630.0}/I_{427.8}$  от интенсивности эмиссии 427.8 нм и смоделированные зависимости средней энергией  $E_{cp}$  от отношения  $I_{630.0}/I_{427.8}$  можно установить связь между  $E_{cp}$  и интенсивности эмиссии 427.8 нм.

Такая зависимость средней энергии потока авроральных электронов от интенсивности излучения эмиссии 427.8 нм в полярных сияниях была рассчитана в рамках модели авроральной ионосферы. Аналитическая аппроксимация полученной зависимости может быть использована в разработке методик оперативной диагностики.

## **Сеть камер всего неба Арктического и антарктического научно-исследовательского института в высокоширотной Арктике**

Загорский Г.А.<sup>\*</sup>, Долгачева С.А., Калишин А.С., Егоров И.М., Тепляков А.В. (*Государственный научный центр Российской Федерации Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия, \* E-mail: [gazagorskiy@aari.ru](mailto:gazagorskiy@aari.ru)*)

В отделе геофизики Арктического и антарктического научно-исследовательского института ААНИИ активно развиваются оптические средства геофизического мониторинга. Как известно, к основным проявлениям геомагнитной активности в высоких широтах относятся высыпания энергичных частиц магнитосферного происхождения и связанные с ними полярные сияния. По этой причине, наземный мониторинг оптических явлений в авроральной зоне является одним из ключевых. С 2022 года ААНИИ разворачивает сеть камер всего неба (КВН). На данном этапе развития сети организованы наблюдения в двух точках, одна на ледовой базе Мыс Баранова, вторая в ледовом лагере близь ледостойкой самодвижущейся платформы «Северный полюс». За время работы двух камер была накоплена значительная статистика. Основу статистических данных составляют кадры с полярными сияниями различных морфологий. Также была получена статистика по наблюдению внутренних гравитационных волн (ВГВ) по камерам станции с Мыса Баранова.

## **Трансформация спектра низкочастотных передатчиков при распространении в приземной плазме**

В.И. Колпак<sup>1,2</sup>, М.М. Могилевский<sup>2</sup>, М.А. Евдокимова<sup>2</sup>, Д.В. Чугунин<sup>2</sup>, Е.Е. Титова<sup>2</sup>, А.А. Чернышов<sup>2</sup>, С.Е. Андреевский<sup>1</sup>, Ю.В. Шлюгаев<sup>3</sup>, М.П. Жильцов<sup>4</sup>, Н.В. Чернева<sup>5</sup>, Е.И. Малкин<sup>5</sup>

<sup>1</sup> *ИЗМИРАН, Троицк, Москва, Россия*

<sup>2</sup> *ИКИ РАН, Москва, Россия*

<sup>3</sup> *НИРФИ ННГУ, Н.Новгород, Россия*

<sup>4</sup> *ООО «НПП «АСТРОН ЭЛЕКТРОНИКА», Орел, Россия*

<sup>5</sup> *ИКИР ДВО РАН, Паратунка, Россия*

Приводятся результаты анализа спектральных характеристик излучения двух наземных низкочастотных передатчиков: JJI/NDT, расположенного в Японии, работающего на частоте 22,2 кГц и NPM, расположенного на Гавайях, работающего на частоте 21,4 кГц. Измерения волновой формы сигнала проводились на борту спутников «Ионосфер-М» и в пункте наблюдений «р.Карымшина» (ИКИР ДВО РАН, Паратунка). Излучение, прошедшее ионосферу над передатчиком, представляет собой квазишумовой сигнал без явных признаков модуляции. В сопряженной области шумовой спектр излучения преобразуется в последовательность радиоимпульсов, частота заполнения которых изменяется в диапазоне +/- ~100 Гц от центральной частоты излучения. Период следования импульсов носит квазипериодический характер и постепенно изменяется от 1,5 до 0,2 секунд. Дисперсия импульсов в большинстве измерений положительная и варьируется в пределах 100 – 400 Гц/сек. В отдельных случаях наблюдается отрицательная дисперсия импульсов. Проводится сравнение измерений на спутниках «Ионосфера-М» и ДЕМЕТЕР. Обсуждается возможный физический механизм, приводящий к трансформации спектра сигналов. Обработка и интерпретация бортовой информации выполнена К.В.И., М.М.М., Е.М.А., Ч.Д.В., Ч.А.А. при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 25-12-00059). Наземные измерения были проведены Ч.Н.В. и М.Е.И. при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 25-12-00059) и частично в рамках государственного задания ИКИР ДВО РАН (рег. № 124012300245-2).

### **Характеристики пятен в группе пульсирующих полярных сияний**

Б.В. Козелов (*Полярный геофизический институт, 184209 Академгородок 26а, г. Апатиты, Мурманская обл., Россия*)

По одновременным данным наблюдений камерой всего неба на Верхнетуломском полигоне (VTL) и камерой с малым полем зрения в обсерватории Ловозеро (LOZ) триангуляцией определялась высота пятен в группах пульсирующих полярных сияний (ППС). По высоте определялась зависимость энергии вызвавших ППС электронов от L-оболочки. В проанализированных случаях получено, что меньшим L соответствуют большие энергии электронов в каждом событии, что совпадает с ожидаемой зависимостью для взаимодействия волн с частицами в магнитосфере. Методом SVD выявлялись основные пространственные компоненты (собственные функции) в ППС, определены характеристики временной динамики основных пространственных компонент.

### **Моделирование свечения Атмосферных полос синглетного кислорода $O_2(b^1S_g^+)$ в полярной ионосфере**

Ю.Н. Куликов, А.С. Кириллов (*Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Россия*)

Коэффициенты гашения синглетного кислорода  $O_2(b^1\Sigma_g^+)$  при неупругих столкновениях с молекулами  $O_2$  и  $N_2$  рассчитаны согласно квантово-химическим приближениям и используются для определения колебательных населенностей электронно-возбужденного молекулярного кислорода на высотах высокоширотной ионосферы Земли при высыпании авроральных электронов. Представлены результаты расчётов относительных населенностей синглетного кислорода  $O_2(b^1\Sigma_g^+,v)$ , образованного в случае высыпания в атмосферу Земли высокоэнергичных частиц. Исследуются вклады различных процессов в образование синглетного кислорода  $O_2(b^1\Sigma_g^+,v=0-2)$  и в свечение Атмосферных полос 762, 771, 780 нм молекулярного кислорода, связанных с излучательными переходами на основное состояние  $X^3\Sigma_g^-$ . Показано, что доминирующий вклад в образование синглетного кислорода  $O_2(b^1\Sigma_g^+,v=0-2)$  и свечение Атмосферных полос 762, 771, 780 нм вносят неупругие столкновения молекул  $O_2$  с авроральными электронами и с метастабильным атомарным кислородом  $O(^1D)$ .

### **Изменчивость состояния высокоширотной ионосферы в спокойных условиях**

Мингалев И.В., Гомонов А.Д., Черняков С.М., Романова Н.Ю., Привалов А.В. (*Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Россия, [mingalev\\_i@pgia.ru](mailto:mingalev_i@pgia.ru)*)

Представлены результаты анализа данных ионозонда наклонного зондирования на короткой радиотрассе Мурманск-Туманный длиной около 100 км для оценки разнообразия типов состояния ионосферы в спокойных условиях и данных о широтных профилях ионосферного ВПЭС, в авроральной и субавроральной зоне, полученных с использованием фазоразностного метода. Анализ данных показал, что часто случаются ситуации, когда в спокойных условиях для двух моментов времени, отличающихся на 24 или 48 часов имеет место качественно разное состояние ионосферы. Другой важной особенностью поведения высокоширотную ионосферы, подтвержденной в ходе анализа данных, является возможность быстрого изменения параметров ионосферы даже в спокойных условиях. Изложенные результаты анализа данных наблюдений позволяют сделать вывод о том, что в рамках принятого в существующих эмпирических моделях подхода к описанию распределений параметров ионосферной плазмы невозможно описать реальное поведение высокоширотной ионосферы даже в спокойных условиях. Для решения этой задачи требуется разрабатывать новый подход.

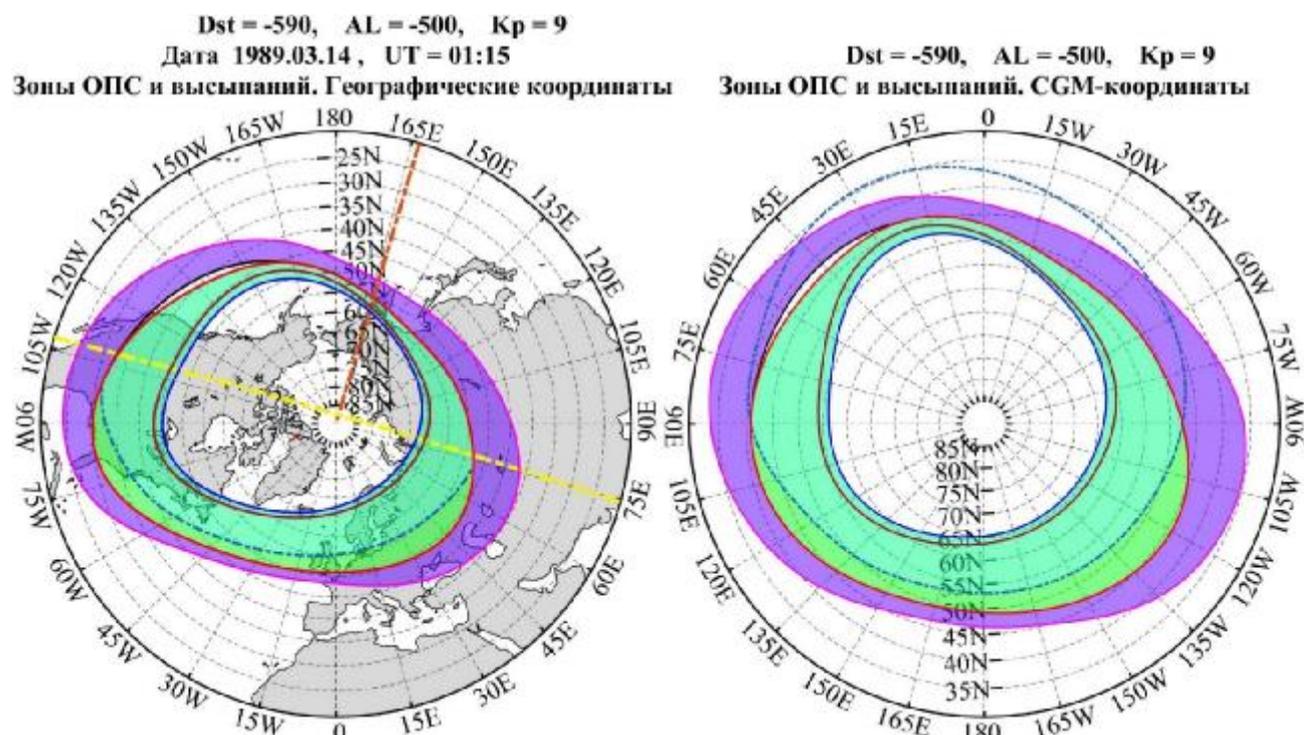
## Последняя версия эмпирической модели высыпаний APM\_GEO

О.В. Мингалева, М.Н. Мельник, В.Г. Воробьев, О.И. Ягодкина (Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Мурманская обл.)

В ПГИ разработана и в течение многих лет совершенствуется эмпирическая модель авроральных высыпаний электронов и протонов для северного полушария APM\_GEO, которая много лет широко используется в российском научном сообществе. Входными параметрами модели являются дата, время по UT и значения геомагнитных индексов Dst и AL. В модели в исправленных геомагнитных координатах и в географических координатах рассчитываются границы зон высыпаний, а также рассчитываются распределения средней энергии и плотности потока энергии высыпающихся электронов и протонов на сетке, регулярной по долготе и с фиксированным числом точек по широте в каждой из присутствующих зон высыпаний. Границами статистической обоснованности модели являются условия  $Dst \geq -200$  нТл и  $AL \geq -1500$  нТл.

Проведена доработка и проверка на данных измерений новой версии модели APM\_GEO с целью обеспечить физически правильную форму зон высыпаний при любых значениях индексов и их соответствие с известными данными для экстремально сильных магнитных бурь. Доработанная версия модели сохраняет физически правильную выпуклую форму границ для любых больших значений модулей индексов Dst и AL вне указанных диапазонов статистической обоснованности, а также соответствует известным данным для очень сильных магнитных бурь и суббурь.

Создан комплекс программ модели APM\_GEO на языке FORTRAN, который максимально оптимизирован и использует параллельные вычисления на ядрах центрального процессора с помощью системы Open MP.



**Рис. 1.** Положение зон высыпаний во время сильнейшей магнитной бури 12-14.03.1989 г. в момент минимума  $Dst = -590$  нТл при умеренно возмущенном  $AL = -500$  нТл и  $Kp = 9$ .

**Эмпирическая модель положения аврорального овала и главного ионосферного провала**

О.В. Мингалев<sup>1</sup>, М.Н. Мельник<sup>1</sup>, В.Г. Воробьев<sup>1</sup>, О.И. Ягодкина<sup>1</sup>, С.М. Черняков<sup>1</sup>, А.Д. Гомонов<sup>1</sup>, Н.Ю. Романова<sup>1</sup>, А.С. Калишин<sup>2</sup>, И.В. Мингалев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Полярный геофизический институт, г. Апатиты (Мурманская обл.)

<sup>2</sup>Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург

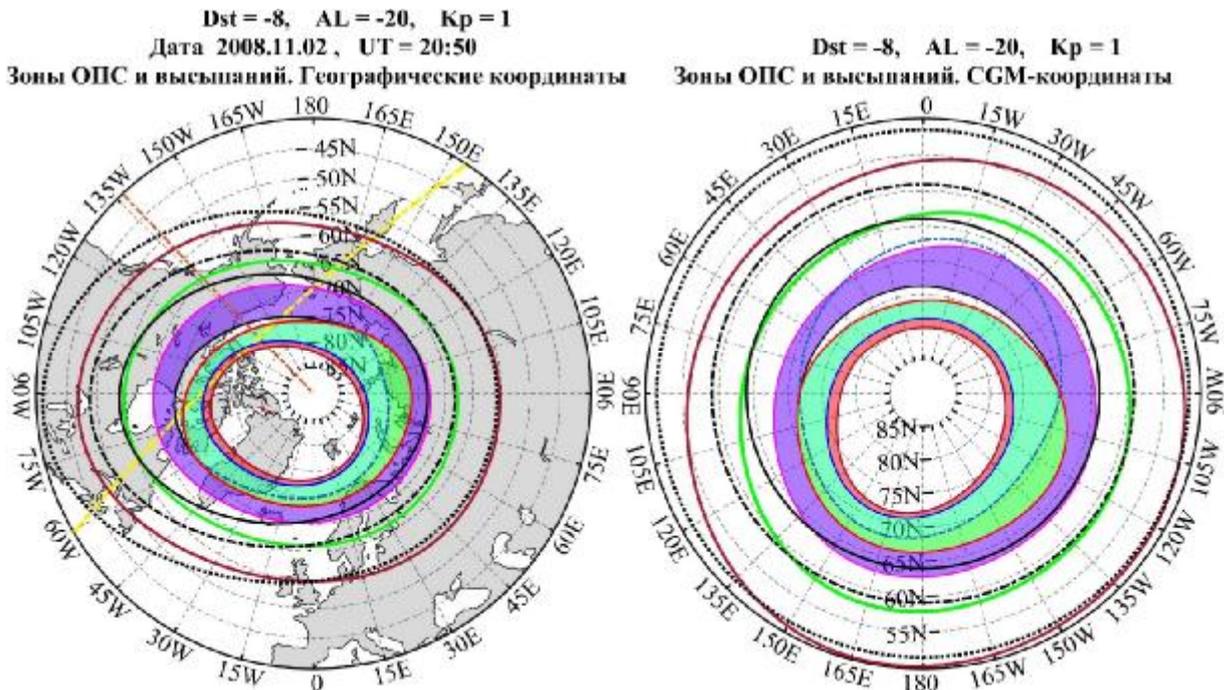
Эмпирическая модель АРМ\_GEO с геомагнитными индексами Dst и AL в качестве входных параметров показала себя значительно более адаптивной к отображению положения крупномасштабных неоднородных структур высокоширотной ионосферы сравнению с эмпирическими медианными моделями ионосферы, имеющими в качестве геомагнитных входных параметров только или 3-х часовой геомагнитный индекс Ap или индекс Kp.

Отсюда вытекает следующий замысел создания более адаптивной модификации модели ГДМИ, в которой к единственному геомагнитному входному параметру – взвешенному индексу Ap добавляются текущие значения индексов Dst, AL и Kp. Распределение параметров ионосферы следует натягивать по методике, используемой в модели ГДМИ, на модифицированные главные линии, когда положение АО берется по модели АРМ\_GEO, а ГИП «приклеивается» к экваториальной границе зоны жестких диффузных высываний электронов (DAZ) со стороны экватора с помощью какой-либо его эмпирической модели, которая определяет зависимость от индекса Kp сдвига по исправленной геомагнитной широте между экваториальной границей зоны DAZ и минимумом ГИП, а также зависимость от индекса Kp аналогичного сдвига между минимумом ГИП и экваториальной границей ГИП.

Наиболее подходящей для такой процедуры является эмпирическая модель ГИП, предложенная в работе [Na Yang, Huijun Le, Libo Liu, Statistical analysis of ionospheric mid-latitude trough over the Northern Hemisphere derived from GPS total electron content data. // Planets and Space. 2015. 67:196. DOI 10.1186/s40623-015-0365-1]. В этой работе предложены следующие эмпирические зависимости сдвига в градусах по исправленной геомагнитной широте  $dQ_1^{ГИП}(Kp)$  между полярной границей ГИП и его минимумом, а также

аналогичный сдвиг  $dQ_2^{ГИП}(Kp)$  между минимумом ГИП и экваториальной границей ГИП

$$dQ_1^{ГИП}(Kp) = 5.01 - 0.13 \cdot Kp, \quad dQ_2^{ГИП}(Kp) = 8.08 - 0.57 \cdot Kp.$$



## **Частичное отражение радиоволн декаметрового и метрового диапазонов от неоднородностей в ионосферной плазме**

Мингалев И.В.<sup>1</sup>, Суворова З.В.<sup>1</sup>, Мерзлый А.М.<sup>2</sup>, Янаков А.Т.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Россия, [mingalev\\_i@pgia.ru](mailto:mingalev_i@pgia.ru)

<sup>2</sup>ИКИ РАН, г. Москва, Россия

В докладе изложены результаты численного моделирования отражения радиоволн декаметрового и метрового диапазонов от различных неоднородностей плазмы в E-слое ионосферы. Обсуждается зависимость амплитуды отраженного сигнала от критической частоты плазмы внутри неоднородности и другие аспекты.

## **Нейтронный вариант объяснения одного типа возмущений верхней атмосферы**

Э.Г. Мирмович (ГБПОУ МО «Колледж «Подмосковье», [mirmovich1940@mail.ru](mailto:mirmovich1940@mail.ru))

О необходимости корректировки критериев потенциальных источников чрезвычайных ситуаций (ЧС) в околоземном космическом пространстве (ОКП) как важных составляющих «космической погоды», разработанных учёными и специалистами Гидрометеослужбы России и введенных в 1993 году как в ионосферно-магнитной, так и в радиационной составляющей, говорилось автором в нескольких работах (например, [1]). Так, в этих критериях нет влияния геомагнитных бурь на объекты энергетики, работу управляющих и измерительных научных приборов любых орбитальных космических аппаратов (КА), отсутствует учёт загрязнения ОКП «спутниковым» (в т.ч. опасным) и другим мусором, риск от которого стал угрозой вообще космическим исследованиям посредством КА, чему посвящено уже несколько детальных исследований. Но также необходим пересмотр состава солнечных космических лучей (СКЛ), особенно количества нейтронов в них, что важно для безопасности полётов на длинных авиатрассах и космонавтов на орбите, а также для корректировки взглядов на наличие и роли нейтронов в энергетической деятельности Солнца (в свете измерений нейтронов с  $E > 20$  МэВ на ИСЗ "SMM", ИСЗ "КОРОНАС-Ф", на аэростатах и в других экспериментах), хотя механизм их выброса в космическое пространство по-прежнему не ясен.

Нейтроны в составе СКЛ — это, как правило, высокоэнергетичные частицы, образующиеся при солнечных вспышках, движущиеся с релятивистскими скоростями ( $c \sim 3_{10}8$  км/с). Их времени жизни ( $\sim 11 - 14$  мин.) как раз хватает, чтобы преодолеть расстояние от Солнца до встречи с верхней атмосферой Земли практически вместе с фотонами, благодаря своей высокой кинетической энергии.

Популярный сегодня в отечественной и зарубежной печати, но не получивший адекватного объяснения, открытый автором ещё в 1972 году [2 – 5] эффект опережения отдельным классом положительных термосферно-ионосферных возмущений (ТИВ) начала магнитной бури в послеполуденные часы, с началом иногда почти одновременно с солнечной вспышкой [2, 3], к объяснению которого автор хотел бы привлечь воздействие рентгеновской и нейтронной компонентами на молекулярный состав верхней термосферы (а не только на области D), повышая концентрацию её атомной составляющей. Такие нейтроны не имеют отношения к дневному каспу, воздействием которого автор поначалу объяснял это явление по предложению Ю.И. Гальперина в своей диссертации [4].

### **Литература**

1. Мирмович, Э.Г. Потенциальные источники чрезвычайных ситуаций гелиогеофизического происхождения / 16-я Всеросс. открытая научн. конф. «Физика плазмы в солнечной системе», М., ИКИ РАН. 2021. С. 279.
2. Мирмович, Э.Г. Фундаментальность явления опережения начала магнитной бури одним из типов положительных возмущений среднеширотной ионосферы / Там же. С. 192.
3. Mirmovich, E.G. Ionospheric Behavior during August 2-11, 1972... over Khabarovsk. Report UAG, №.28, WDCenter A, Boulder, Colorado, USA, 1973, part II. PP. 557–561.
4. Мирмович, Э.Г. Исследование и прогноз термосферно-ионосферных возмущений / Автореф. дисс... канд. физ.-мат. наук. Иркутск. 1981. 23 с.
5. Данилов, А.Д., Мирмович Э.Г., Морозова Л.Д. О возможной природе положительной фазы ионосферных бурь // Геомагн. и аэроном. Т. 25, №5. 1985. С. 768–772.

## **Восстановление параметров локальных областей ионосферного поглощения методом Монте-Карло по данным двухточечных риометрических измерений**

Никитенко А.С., Лебедь О.М., Федоренко Ю.В., Ларченко А.В. (*Полярный Геофизический Институт, г. Анатиты, Россия, [alex.nikitenko91@gmail.com](mailto:alex.nikitenko91@gmail.com)*)

Работа направлена на количественную проверку предположения, объясняющего одновременную наземную регистрацию всплесков ОНЧ-хисса и значительного риометрического поглощения их пространственным разнесением. Для этого разработана численная модель (метод Монте-Карло), восстанавливающая параметры гауссовой дуги поглощения по данным двух риометрических станций (Ловозеро, Туманный). Применение к событиям 2023 г. позволило восстановить локализованные (~90-100 км) области поглощения, смещенные к станции с максимумом сигнала. Совпадение их положения с авроральными дугами (all-sky камера) и оценки энергий электронов (40-50 кэВ) указывают на связь с высыпавшимися частицами. Разработанная модель доказала свою эффективность для диагностики. Полученные результаты дают количественное подтверждение, что совместная регистрация явлений возможна благодаря пространственному разделению области генерации хисса и зоны поглощения в рамках одной авроральной структуры. Ограничением метода является неоднозначность решений при близких уровнях поглощения, что требует расширения сети наблюдений.

## **О проведении экспериментов по радиопросвечиванию ионосферы сигналами прибора МАЯК**

Падохин А.М., Курбатов Г.А., Кречетов Н.Д., Туманова Ю.С., Чернышов А.А., Андреевский С.Е., Саакян О.Т., Книжин С.И., Продан П.Е.

*ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия*

*МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия*

*Институт космических исследований РАН, г. Москва, Россия*

*Полярный геофизический институт РАН, г. Мурманск, Россия*

*ИГУ, г. Иркутск, Россия*

В 2024 и 2025 гг. на орбиту были выведены две пары спутников «Ионосфера-М» российского проекта «Ионозонд». Среди научного оборудования спутников находится прибор МАЯК — когерентный двухчастотный передатчик VHF/UHF диапазона. Таким образом впервые за многие годы появилась возможность проводить регулярные эксперименты по радиопросвечиванию ионосферы над территорией РФ с низких полярных орбит. Доклад посвящен особенностям проведения таких экспериментов с использованием имеющегося в научных организациях РФ приемного оборудования, включая специализированные приемники АДК-4М и ITS30(3)S, а также разработке прототипа нового цифрового приемника, на основе технологий программно определяемого радио (SDR) и популярных плат ВЧ прототипирования HackRF и USRP, включая алгоритмы обработки и анализа данных, применяемые для оценки полного электронного содержания ТЕС. Обсуждаются результаты сопоставления экспериментальных данных, полученных на специализированных приемниках и разработанном прототипе, в том числе в условиях интенсивных радиочастотных помех. В докладе анализируются результаты первых экспериментов с использованием прибора МАЯК, предложен оригинальный метод локальной коррекции ионосферной модели NeQuick2 по данным одноточечных наблюдений, обсуждаются перспективы восстановления работы российской трансконтинентальной RT системы и развертывания новых приемных пунктов.

Работа выполнена с использованием, оборудования, полученного в рамках Программы развития МГУ.

## **КОРРЕКЦИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ NEQUICK2 В ЕВРОПЕЙСКОМ РЕГИОНЕ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ И ГНСС ПРОСВЕЧИВАНИЯ**

Павлов И.А.<sup>1,2</sup>, Падохин А.М.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк, Россия

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

Работа посвящена исследованию двух подходов к региональной коррекции модели NeQuick2. Первый основан на использовании данных ГНСС ТЕС и подборе соответствующего регионального распределения эффективного индекса F10.7, являющегося драйвером модели. Интерполяция значений эффективного параметра модели при этом происходит методом универсального кригинга. Второй подход основан на одноточечной коррекции одновременно по данным ГНСС и вертикального зондирования, при этом определяются оптимальные параметры высотного профиля электронной концентрации  $g$  и  $g$  выше максимума слоя F2, обеспечивающие согласие модельных оценок как параметров слоя F2 так и ТЕС с экспериментальными данными. В исследовании используются данные ГНСС сети EUREF и европейских ионозондов, входящих в сеть GYRO за весь 2018 год, характерный низкой солнечной активностью и слабовозмущенными геомагнитными условиями. Показано, что первый подход приводит к систематической переоценке критической частоты  $f_oF2$  в скорректированной модели, хотя и с уменьшением дисперсии относительно нескорректированной модели. Это происходит из-за недостатков параметризации высотного профиля электронной концентрации выше максимума F2-слоя, который вносит основной вклад в наблюдаемые значения ТЕС. С использованием совместных данных ГНСС и ионозондов показано, что оптимальные параметры  $g$  и  $g$ , описывающие эту область в модели NeQuick2, имеют ярко выраженный суточный и сезонный ход, в отличие от своих постоянных значений, используемых в модели по умолчанию.

### **Восстановление параметров ионосферы по сигналам передатчиков точного времени ВЕТА.**

Ю.В. Поклад, Б.Г. Гаврилов, В.М. Ермак, В.С. Лобанова, И.А. Ряховский, А.И. Сапунова. (ФГБУН Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, г. Москва, Россия, [poklad@mail.ru](mailto:poklad@mail.ru), [boris.gavrilov34@gmail.com](mailto:boris.gavrilov34@gmail.com), [ryakhovskiy88@yandex.ru](mailto:ryakhovskiy88@yandex.ru))

В европейской части России и Беларуси работают 4 передатчика системы передачи сигналов точного времени ВЕТА. Они расположены около Нижнего Новгорода, Молодечно, Архангельска и Краснодара. Каждый передатчик работает 1 час в сутки и последовательно излучает сигнал на частотах 25, 25.1, 25.5, 23 и 20.5 кГц. В передаваемых сигналах есть сигналы без модуляции, т.е. чистый синус. При этом его фаза передаваемых сигналов привязана к нулевой секунде.

В данной работе представляется методика восстановления высотного профиля электронной концентрации в D-слое ионосферы в рамках двухпараметрической модели Уайта (параметры  $h'$  и  $\beta$ ) по фазовым измерениям принятых сигналов от этих передатчиков, при условии отсутствия рентгеновских вспышек. Полученные результаты сравниваются с результатами восстановления параметров ионосферы по ранее опубликованной методике на двухчастотной трассе распространения сигналов от передатчиков GQD и GBZ и принятых в ГФО «Михнево».

Комбинация этих двух методик позволит восстанавливать параметры нижней ионосферы вне зависимости от наличия рентгеновских вспышек.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 122032900175-6 с использованием данных полученных на среднеширотном комплексе геофизических наблюдений «Михнево».

Тезисы Апатиты 2026

## **Долгопериодные вариации F-рассеяния и критической частоты слоя F2 в зависимости от солнечной активности.**

Рождественский Д.Б., Рождественская В.И., Телегин В.А. (*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Москва, г.Троицк*)

Причиной F-рассеяния является неоднородности электронной концентрации ионосферного слоя F2. Задача определения электронной концентрации и ее вариации относится к классу обратных задач, являющихся наиболее сложными в части разработки адекватных методов и алгоритмов обработки. Для успешного решения обратных задач требуются эффективные методы анализа и обработки результатов наблюдений. К одному из известных способов наблюдения относится метод измерения ширины следа отраженного сигнала в результате вертикального зондирования ионосферной плазмы. Принято считать, что флуктуация ширины следа связана с изменением электронной концентрации F слоя. Для определения параметра изменчивости целесообразно измерение ширины следа, представленного в виде дискретного ряда равноудаленных отсчетов с интервалом дискретизации, равным 15 минутам. Ряд с такой временной дискретизацией позволяет предавать информацию в виде суммы гармонических составляющих с периодом не менее 30 минут.

Анализ данных F-рассеяния (dfs) проводился методом спектрального анализа, позволяющим с помощью цифровой фильтрации проводить разложение сигнала на отдельные спектральные полосы и выделять гармонические составляющие для оценки энергетических и интегральных спектров исследуемого набора данных foF2 и dfs. С этой целью был разработан метод синтеза Чебышевского цифрового фильтра с коэффициентом подавления в полосе среза не менее 400 Дб. В целях получения детального анализа явления F – рассеяния, по данным вертикального зондирования foF2, проводилось исследование динамических характеристик в различных диапазонах, начиная с постоянной составляющей до частоты Найквиста. Разбиение на спектральные диапазоны осуществлялось на основе гармонического (спектрального) анализа, с помощью блока цифровых фильтров. Спектры исследуемых процессов рассчитывались для выборок длиной в 288 отсчетов, что составляло при интервале зондирования ионосферы, равном 15 минутам, трое суток.

Для каждого из диапазонов получены спектральные характеристики foF2 и dfs, и проведено сравнение с характеристиками солнечной активности (СА) (числа Вольфа) в периоды максимумов (2915, 2024 гг.) и минимума (2021 г.) СА.

Для получения динамического поведения F-рассеяния во времени, использовался способ определения изменения энергии дискретного процесса. Энергию процесса на интервале 3 суток можно получить путем определения интеграла по частоте от энергетического спектра процесса, рассчитанного на этом интервале. Для получения изменения энергии процесса на всем интервале измерения, достаточно рассчитать энергетические спектры для выборок, сдвинутых относительно исходной выборки на один, или более отсчетов. Назовем результат описанной процедуры интегральным энергетическим спектром.

Для расчета спектра анализируемого процесса проводилась оценка вклада отдельного дискретного отсчета в спектр процесса. Для оценки энергии флуктуирующего процесса использовались гармонические составляющие и их интеграл по частоте.

С помощью такого алгоритма появилась возможность получить кривую изменения во времени энергии процесса. Такой алгоритм позволяет проводить сравнение во времени энергии разных геофизических процессов на фиксированных интервалах времени.

В результате обработки данных для 2015, 2021 и 2024 годов получено, что в периоды максимумов солнечной активности (2015 и 2024гг.) интегральные спектры foF2 находились в хорошем согласии. Они близки по амплитуде. Амплитуда интегрального спектра 2021 года, который относится к минимуму СА, была в два раза ниже. Отметим, что средние значения foF2 в год минимума СА (2021) на 2-6 МГц также ниже. Спектры dfs для трех исследуемых лет не обнаруживают четкой зависимости от солнечной активности. Однако, по спектрам dfs видно, что явление F-рассеяния проявляется во время магнитных бурь. Этот результат получен по данным 2015 года.

Во временных энергетических спектрах хорошо прослеживаются сезонные вариации.

Таким образом, гармонические составляющие позволяют проводить более детальный и наглядный анализ данных foF2 и dfs.

## **Пространственно-распределенная система регистрации сигналов ОНЧ диапазона**

Ряховский И.А., Поклад Ю.В., Лесников Г.А., Ермак В.М. (*Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, г. Москва, Россия*)

На сегодняшний день электромагнитное излучение ОНЧ-диапазона является одним из наиболее эффективных инструментов для исследования состояния и динамики нижней ионосферы. Именно для этих целей был создан высокочувствительный комплекс, позволяющий регистрировать и анализировать вариации электромагнитных сигналов ОНЧ диапазона естественного и антропогенного происхождения.

Основой комплекса служит разработанный в лаборатории литосферно-ионосферных связей высокочастотный регистратор «Вектор-4». Это устройство обеспечивает прецизионную синхронизацию измерений по ГНСС и непрерывную запись данных с частотой дискретизации до 130 кГц на каждый из четырёх каналов. Высокая чувствительность комплекса в ОНЧ-диапазоне достигается благодаря использованию широкополосных магнитных антенн «Плутон» (800 Гц – 50 кГц), разработанных в ИДГ РАН. Сочетание точной временной привязки регистратора и чувствительности антенн открывает возможность создания пространственно-распределённых сетей синхронной регистрации. Такие сети позволяют детектировать широкий спектр сигналов — от молниевых разрядов до СДВ станций, а на основе специальных методик — реконструировать параметры и отслеживать динамику нижней ионосферы в реальном времени.

Важным преимуществом комплекса является его реализация на доступной отечественной компонентной базе, что обеспечивает относительно низкую стоимость по сравнению с зарубежными аналогами и делает экономически целесообразным развертывание масштабируемых измерительных сетей для фундаментальных и прикладных геофизических исследований.

Исследование выполнено при поддержке министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект номер рег.№122032900175-6.

## **Исследование влияния Луны на ионосферу Земли**

Сапунова А. И., Ряховский И.А., Поклад Ю.В., Лобанова В.С. (*Институт динамики геосферы российской академии наук, г. Москва*)

В данной работе представлены результаты комплексного анализа многолетней динамики абсолютного значения ПЭС и характеристик ОНЧ-сигналов. Непрерывная регистрация сигналов ГНСС и амплитудно-фазовых характеристик сигналов СДВ-радиостанций в ГФО «Михнево» с 2014 года позволила получить 11-ти летний ряд непрерывных наблюдений.

На основе спектрального анализа многолетних данных были выделены доминирующие периодичности и оценены амплитудно-фазовые характеристики соответствующих гармоник. В ходе анализа идентифицированы известные периодические вариации — такие как полусуточные (обусловленные приливным взаимодействием с Луной), суточные (связанные с терминатором), а также гармоника, связанная с дифференциальным вращением Солнца. Особый интерес представляет обнаруженная гармоника с периодом 29.5 суток, совпадающим с синодическим лунным месяцем, причём смена её фаз синхронна с фазами Луны (максимум соответствует полнолунию, минимум — новолунию).

Совместный анализ рядов абсолютного значения ПЭС и изменений амплитудно-фазовых характеристик сигналов СДВ-радиостанций позволил не только установить физические причины, лежащие в основе этих циклических изменений, но и оценить степень воздействия лунно-приливных механизмов на состояние ионосферы.

Исследование выполнено при поддержке министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект номер рег.№122032900175-6.

**Электромагнитные КНЧ шумы в области аврорального овала по данным спутников «ИОНОСФЕРА-М»**

Савельева Н.В.<sup>1,2</sup>, Пилипенко В.А.<sup>1,3</sup>, Пулинец С.М.<sup>3</sup>, Ягодкина О.И.<sup>4</sup>, Позднякова Д.Д.<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> *Геофизический Центр РАН, Москва, Россия*

<sup>1</sup> *Институт космических исследований РАН, Москва, Россия*

<sup>4</sup> *Полярный Геофизический Институт, Апатиты, Россия*

*E-mail: [nasa2000@yandex.ru](mailto:nasa2000@yandex.ru)*

Широта экваториальной границы овала полярных сияний является одним из ключевых параметров космической погоды, поэтому космическое сообщество прикладывает немало усилий для построения моделей, позволяющих предсказать положение аврорального овала. С запуском семейства российских спутников Ионосфера-М появилась возможность детально исследовать данную область, так как орбиты всех четырех спутников пересекают ее по нескольку раз в день. В данной работе апробирована возможность определения текущего положения границ аврорального овала по данным регистрации электрической компоненты шумов на низкоорбитальных спутниках Ионосфера-М. Уровень ионизации и турбулентность ионосферной плазмы в авроральной области кратно увеличиваются во время магнитных бурь и суббурь. При переходе спутника из средних широт в авроральные наблюдается резкий всплеск электрических шумов, что позволяет определить границы области, где происходит переход от невозмущенной ионосферы средних широт к возмущенной авроральной. В докладе представлены результаты анализа данных спутников семейства Ионосфера-М, собранные при пролетах над Северным полушарием во время магнитной бури 14-15 сентября 2025 г. с умеренной интенсивностью ( $Dst \sim -75$  нТл) и слабой суббуревой активностью ( $AL < -1000$  нТл). Результаты определения границ аврорального овала по данным спутников семейства Ионосфера-М сравниваются с данными по продольным токам на спутниках семейства SWARM. Также проводится сравнение границ аврорального овала, полученных по спутниковым данным, с границами, рассчитанными по модели OvationPrime и моделей APM/APM\_GEO, разработанных в Полярном Геофизическом Институте. Тем самым, проведена взаимная апробация разных методов определения положения аврорального овала. Работа частично поддержана грантом РФФ [21-77-30010-П](#).

## **Исследование поляризационного джета по измерениям спутников Ионосфера-М**

Синеви́ч А.А.<sup>1,2</sup>, Чернышов А.А.<sup>1</sup>, Пулинец С.А.<sup>1</sup>, Чугунин Д.В.<sup>1</sup>, Могилевский М.М.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИКИ РАН, г. Москва, Россия, [sinevich.aa@gmail.com](mailto:sinevich.aa@gmail.com)

<sup>2</sup>ИЗМИРАН, г. Троицк, г. Москва, Россия

Поляризационный джет (Polarization Jet, PJ), в англоязычной литературе известный как субавроральный ионный дрейф (SubAuroral Ion Drift, SAID), формируется в субавроральной области ионосферы (геомагнитные широты 70°-50°) и представляет собой узкую по широте (1°-2° широты) полосу сильного ионного дрейфа на запад на высотах F-слоя вблизи границы проекции плазмопаузы. Скорость дрейфа ионов в такой полосе может достигать нескольких километров в секунду, а неоднородности плазменных параметров внутри могут иметь масштабы вплоть до десятков-сотен метров. Такие высокие скорости и такая структурированность плазмы влияют на прохождение радиосигнала и проявляются на ионограммах, полученных наземными ионозондами. Однако исследование параметров PJ/SAID наземными ионозондами затруднено, поскольку для этого необходимо, чтобы географическое расположение PJ/SAID совпало с направлением зондирования ионозонда, что бывает достаточно редко. Кроме того, зондирование с Земли ограничено высотой главного ионосферного максимума, что не позволяет исследовать PJ/SAID в верхней части F-слоя – на высоте измерений ионосферных спутников (450-800 км). Зондирование, осуществленное бортовым ионозондом с высоты орбиты космических аппаратов «Ионосфера-М» (800 км), позволяет получить ионограммы верхней части F-слоя ионосферы в полосе PJ/SAID над любой географической точкой (в том числе над океаном) и сравнить их с данными измерений других спутников, оборудованных дрейфметрами и зондами Ленгмюра. Кроме того, это дает возможность одновременного зондирования PJ/SAID наземным и бортовым ионозондом. В данной работе впервые использованы измерения ионозонда ЛАЭРТ на борту спутника «Ионосфера-М» для исследования структуры ПД. Кроме того, было проведено сравнение как с данными измерений других приборов на различных спутниках, так и с измерениями наземных ионозондов.

Работа поддержана грантом РФФ (№ 25-12-00059).

## Наклонное зондирование субавроральной ионосферы по данным дигизондов на радиотрассе Якутск – Жиганск

А.Е. Степанов<sup>1</sup>, В.Л. Халипов<sup>2</sup>, К.Г. Ратовский<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН, г. Якутск, Россия*

<sup>2</sup> *Добровольный исследователь, г. Якутск, Россия*

<sup>3</sup> *Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск, Россия*

Рассматривается прохождение радиоволн коротковолнового диапазона на субавроральной односкачковой трассе наклонного зондирования Якутск – Жиганск (~ 620 км) с применением дигизондов *DPS-4*. Показано, что наряду с типичными следами отражений на ионограммах вертикального зондирования регистрируются дополнительные характерные следы наклонного радиозондирования ионосферы. Анализ таких дополнительных следов отражений показал, что наклонные сигналы наблюдаются почти круглосуточно, за исключением периодов ионосферных возмущений. Также проведено сопоставление наклонных следов на ионограммах с расчетами распространения радиоволн на простой модели параболического слоя, но без учета геомагнитного поля Земли. В основу численных расчетов положены реальные параметры субавроральной ионосферы. Показано, что наиболее близкое соответствие с наклонными радиоотражениями на ионограммах наблюдается при горизонтально-стратифицированной ионосфере между оконечными пунктами.

## О разработке модели крайнего ультрафиолетового излучения Солнца MEUVM – Murmansk Extra-Ultraviolet Model

А.А. Татарников<sup>1,2</sup>, О.В. Золотов<sup>1</sup>, Б.Е. Прохоров<sup>2</sup>, Ю.В. Романовская<sup>1</sup>, Ю.А. Шаповалова<sup>3,2</sup>

<sup>1</sup> *Кафедра информационных технологий, Мурманский арктический университет, г. Мурманск, Россия*

<sup>2</sup> *Научно-исследовательская лаборатория «Компьютерное моделирование физических процессов в околоземной среде», Мурманский арктический университет, г. Мурманск, Россия*

<sup>3</sup> *Лаборатория радиопросвечивания и изучения ионосферы, Полярный геофизический институт, г. Мурманск, Россия*

В работе представлена реализация модели крайнего ультрафиолетового (КУФ) солнечного радиоизлучения MEUVM, оформленной в виде Python3-пакета, включающего в себя три модели: MEUVM-BA (Murmansk Extra-Ultraviolet Model – Bin Averaged), MEUVM-BR (Murmansk Extra-Ultraviolet Model – Bin Regression) и MEUVM-R (Murmansk Extra-Ultraviolet Model – Regression).

Модель MEUVM рассчитывает поток солнечного КУФ излучения (0-190 нм) для 190 спектральных интервалов с шагом 1 нм, построена по данным спутниковой миссии TIMED за период 08.02.2002 по 31.12.2024, и использует в качестве входного параметра индекс  $F_{10.7}$ . Качество каждой модели оценивалось коэффициентом детерминации  $R^2$  на каждом из 190 интервалов.

Python-пакет meuvm рассчитывает спектры, а не отдельные спектральные интервалы, позволяет проводить вычисления как для одного, так и для нескольких значений параметра  $F_{10.7}$ . Пакет размещён в стандартном репозитории Python пакетов PYPI и может быть установлен с использованием стандартной утилиты PIP/PIP3. Пакет распространяется под свободной лицензией Apache 2.0, допускающей как коммерческое, так и некоммерческое использование.

## **Морфология поля иона $H^+$ у нижней границы экзосферы вблизи терминатора в январе 2025г.**

А.В. Тертышников (*Институт прикладной геофизики имени Академика Е. К. Федорова (ИПГ), Москва, Россия*)

С 2010 г. масс-спектрометрами КА "Метеор" измеряется газовый состав атмосферы. С 2023 г. масс-спектрометры по техническому решению [1] используются в качестве ионозондов [2].

Для анализа инструментальных измерений разработана технология восстановления среднесуточного поля плотности ионов по результатам повитковых измерений. Для интерполяции данных в узлы регулярной географической сетки используется разложение в ряд по сферическим функциям по всем измерениям плотности каждого иона за сутки и алгоритм LSQR (Least Squares, QR разложение). Итерационный численный метод расчета основан на процессе bidiagonalization Голуба-Кахана с генерированием последовательности приближенных решений с постепенным улучшением нижней bidiagonal матрицы. Использование такого подхода обусловлено, в частности, высокой чувствительностью аналогово-цифрового преобразователя масс-спектрометра.

Приведены примеры восстановленных карт для плотности иона  $H^+$  в зоне терминатора. В их морфологии выявлены структуры планетарного и регионального масштаба. Прослеживается межсуточная эволюция поля плотности  $H^+$  над Южно-Атлантической магнитной аномалией, зона магнитного экватора, потенциальные зоны формирования плазменных пузырей («Bubbles») в экваториальной ионосфере.

Обсуждаются влияние гелиогеофизических условий [3] на морфологию восстановленных карт. Отмечена седловина в среднесуточном поле плотности иона  $H^+$  над Тихим океаном, над регионом с сильным землетрясением на юго-западе Китая около Эвереста (7.01.2025 г. с магнитудой до 7,1).

Восстановленные карты поля плотности иона  $H^+$  у нижней границы экзосферы полезны для уточнения ионосферной ошибки позиционирования по сигналам ГНСС, баллистического обеспечения и полезны для анализа снимков слабого ультрафиолетового свечения водородного пояса Земли (геокороны) с «Обсерватории геокороны Каррутерса», запущенной NASA 24.09.2025 г. в точку L1 с двумя ультрафиолетовыми тепловизорами.

Отмечена необходимость разработки показателей возмущенности диагностируемого поля иона  $H^+$ .

### **Литература:**

1. Тертышников А.В. Масс-спектрометр космический. Патент № 2726186 по заявке № 2019121111/20(041262) в реестре ФИПС от 05.07.2019.
2. Tertyshnikov A.V. The Beginning of the 25th Cycle of Solar Activity in Variations of the Oxygen Ion Density in the Orbit of the Meteor Spacecraft//Cosmic Res. 63, 276–283 (2025). <https://doi.org/10.1134/S0010952525601380>.
3. Тертышников А.В. Способ определения начала цикла солнечной активности. Патент. Заявка: 2023135791, 27.12.2023. Дата регистрации: 23.07.2024. Бюл. № 21.

## **Поляризационный джет и ТЕС вариации во время возмущения 7-8 апреля 2017 г.**

И.И. Шагимурагов<sup>1</sup>, И.И. Ефишов<sup>1</sup>, Н.Ю. Тепеницына<sup>1</sup>, Г.А. Якимова<sup>1</sup>, М.В. Филатов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Калининградский филиал ИЗМИРАН, г. Калининград, Россия,

<sup>2</sup>Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Россия

e-mail: [shagimuratov@mail.ru](mailto:shagimuratov@mail.ru)

Эффекты поляризационного джета (ПД) в ТЕС могут влиять на распространение радиоволн, функционирование навигационных систем и соответственно приводить к ошибкам позиционирования. Это обуславливает важность исследования ПД для многих практических приложений. Для детектирования ПД использовались измерения спутников DMSP. Данные базы Мадригал использовались для формирования карт ТЕС. Для выявления ионосферных неоднородностей, ассоциированных с джетом, использовались наблюдения GPS станций, расположенных в области ПД.

Во время существования ПД на картах ТЕС наблюдался узкий по широте, вытянутый по долготе глубокий провал. Провал регистрировался на субавроральных широтах экваториальнее области высыпаний. Провал располагался на географических широтах  $45^{\circ}$ - $52^{\circ}$ N около  $57^{\circ}$ - $62^{\circ}$  магнитной широты. В период 7-8 апреля 2017 г. ПД регистрировался при различных MLT. Это позволило выявить особенности проявления поляризационного джета в ТЕС вариациях в зависимости от MLT.

## **Эффекты январской бури 2026 года в вариациях ТЕС**

И.И. Шагимуратов, Г.А. Якимова, И.И. Ефишов, Н.Ю. Тепеницына (*Калининградский филиал ИЗМИРАН, e-mail: shagimuratov@mail.ru*)

В работе представлены предварительные результаты по эффектам магнитной бури 19-21 января в ТЕС вариациях и флуктуациях GPS сигналов в европейском регионе. Показана широтная картина поведения ТЕС в авроральной, субавроральной и среднеширотной ионосфере. Буря характеризовалась как интенсивная, величина Dst превышала -2000 нТ. Одной из особенностей бури явилось аномально высокая величина SSC (+68 нТ), которая проявилась 19 января около 20 UT.

В вечернее время 19 января около 22 UT регистрировался исключительно большой всплеск ТЕС, который превышал дневную величину на авроральных, субавроральных и средних широтах. Интенсивность всплеска падала с широтой, однако была заметной на широтах около 40°N.

Положительное возмущение наблюдалось в дневной ионосфере 20 января. Эффект ярко выражен на средних широтах, где превышение было более чем 2 раза относительно спокойного дня 18 января. Отрицательная фаза бури проявилась 21 января, которая более выражена на широтах выше 60°N.

Экстремально высокий всплеск авроральной активности (AE более 2000 нТ) регистрировался 19 января в 20-21 UT. На этом интервале экваториальная граница флуктуаций GPS сигналов опускалась до широт 36°N (30°MLAT), что является экстраординарным событием. Общеизвестно, что флуктуации навигационных сигналов являются главным фактором, определяющим ошибки позиционирования. Наиболее сильные по интенсивности флуктуации наблюдаются на авроральных широтах. Анализ бури свидетельствуют, что во время экстремальных событий можно ожидать увеличение ошибок на широтах ниже 40°N.

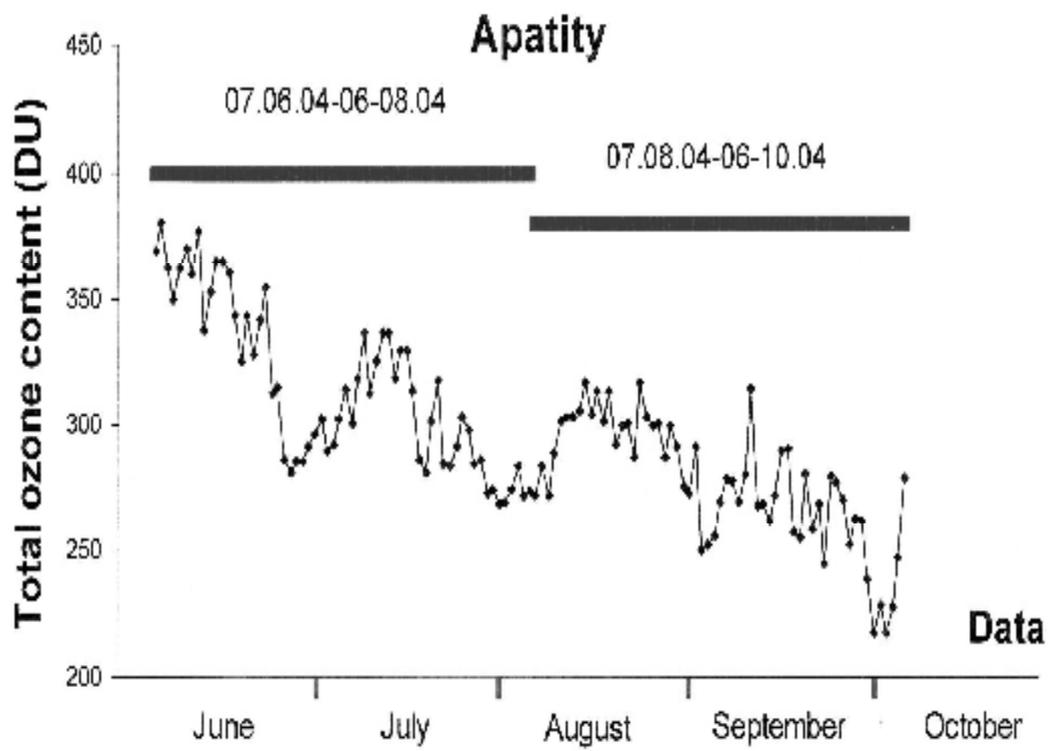
## **Проект STARVISOR: Развитие сети оптических наблюдений и автоматизация обработки данных с применением технологий компьютерного зрения**

И.С. Янковский, М.В. Клименко, И.А. Носиков, А.В. Тимченко (*Калининградский филиал ИЗМИРАН*)

Целью данной работы является представление результатов сотрудничества гражданской науки и академических организаций в области оптического мониторинга явлений верхней атмосферы в рамках проекта STARVISOR. В докладе рассматриваются этапы развёртывания собственной сети камер всего неба КФ ИЗМИРАН и их интеграция в инфраструктуру проекта STARVISOR, а также представлены данные, полученные сетью в ходе ключевых геомагнитных событий в период с 2024 по 2026 годы.

Особое внимание в работе уделено проблеме автоматизации обработки больших массивов оптических данных. Описывается методология применения компьютерного зрения, а также процесс обучения и внедрения свёрточных нейронных сетей (CNN) на базе открытой программной библиотеки от Google TensorFlow для автоматического распознавания и классификации снимков с камер всего неба. Обсуждается эффективность предложенных алгоритмов машинного обучения для задач оперативного мониторинга космической погоды и разработки систем оперативного оповещения о прохождении различных оптических явлений в верхней атмосфере.

*Low Atmosphere, Ozone*



## Distortion of the atmospheric electric field by the measuring system

V.V. Denisenko<sup>1</sup>, S.E. Smirnov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Computational Modelling SB RAS, Krasnoyarsk, Russia*

<sup>2</sup> *Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, Paratunka, Russia*

Measuring of the atmospheric electric field is a problem because it is distorted by the measuring system and other objects located near the sensor. Therefore, after calibration in the laboratory, the sensors need additional calibration to compensate for such distortions. We study this effect for the measuring system of the geophysical observatory in Paratunka. The tower on which the sensor is installed, the forest nearby and the snow cover are considered. We analyze only quasi-stationary measurements. Therefore, the distribution of electric fields and currents in the atmosphere can be found by solving problems for the equation of electrical conductivity.

The main result is to find the calibration coefficient  $K$ , by which the sensor readings should be multiplied in order to obtain the vertical component of the electric field strength in the air, which is not distorted by the surrounding forest and tower. The calculations of the electric field were carried out with high accuracy, but the initial data describing the upper boundaries of the forest and shrub were determined with low accuracy. A value  $K$  close to unity was obtained. This is not a trivial result, since individually the tower gives  $K \approx 0.5$ , and the clearing separately gives  $K \approx 3$ . When processing winter measurements, it is advisable to take into account the correction of up to 20% due to snow cover in the clearing.

The result of the turbulent electrode effect using a simplified model of effective air conduction is an approximate doubling of the model field strength while maintaining its spatial distribution on the scale of the clearing and the tower. It is not possible to construct a quantitative model of this effect for specific conditions of electric field measurement.

## A model of the electric fields and currents generated by an electrified cloud

V.V. Denisenko (*Institute of Computational Modelling SB RAS, Krasnoyarsk, Russia*)

A mathematical model of an electrified cloud is constructed. A stationary model of electric current continuity is used in a domain that includes the cloud, ambient air, and the ionosphere. An external current is set as the electric generator. It exists due to the gravitational settling of charged water droplets or ice floes. The components of the conductivity tensor above 90 km are calculated using empirical models of ionospheric parameters IRI-2016, MSIS 1990 E and IGRF. They give ionospheric Pedersen and Hall conductances both about 0.2 S. The adjoint ionosphere is assumed to be identical to the main one. The conductivity of air below 50 km is set in accordance with an empirical model, which is some kind of averaging of known models [1]. In the 50-90 km layer, the conductivity is obtained using smooth interpolation. Inside the cloud, the conductivity is set to be an order of magnitude lower than in the ambient air at the same altitude.

A cloud having the shape of an ellipsoid of rotation with a vertical axis of 10 km and horizontal axes of 20 km, centered at an altitude of 10 km, is considered under conditions characteristic of the Gulf of Mexico at 6 o'clock UT in June. According to the Carnegie diagram [1], an electric field with strength of 100 V/m is set at sea level. With the conductivity model used in this simulation, the conductivity is  $3.4 \cdot 10^{-14}$  S/m near the sea surface and the fair-weather current density is 3.4 pA/m<sup>2</sup>. The result is a sea-ionosphere voltage of 195 kV, an atmospheric column conductance of  $1.7 \cdot 10^{-17}$  S/m<sup>2</sup>, and the homogeneous atmospheric conductor thickness of 2 km. A vertical external current with density of 2600 pA/m<sup>2</sup> is set inside the cloud in purpose to obtain 40 MV voltage between the lower and upper boundaries of the cloud. We solve the electrical current continuity equation numerically using the multigrid finite element method.

As a result, spatial distributions of electric fields and currents are designed, and charge density is also found. A current of 0.2 A goes from the cloud to the ionosphere, and the same current comes to the cloud from the sea surface. In addition to the charges which always present in the fair-weather air due to the increase in conductivity with altitude, charges of +14 C and -24 C are formed at the upper and lower boundaries of the cloud, as well as additional charges in the air and on the sea surface under the cloud. The electric field with strength up to 2.7 mV/m is obtained in the ionosphere.

1. Denisenko V.V., Rozanov E.V. Influence of clouds on spatial distribution of conductivity in the atmosphere. Sol.-Terr. Phys. 2025, vol. 11, iss. 4, pp. 72-82. DOI: 10.12737/stp-114202508

## Features of wave processes in different modes of the stratosphere polar vortex

K.A. Didenko<sup>1</sup>, A.V. Koval<sup>2</sup>, T.S. Ermakova<sup>2,3,4</sup>, E.A. Maurchev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation (IZMIRAN), Russian Academy of Sciences, Troitsk, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

<sup>3</sup> Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia

<sup>4</sup> The Federal State Budgetary Institution "Voeikov Main Geophysical Observatory" (FGBI "MGO"), St. Petersburg, Russia

The stratosphere polar vortex plays a key role in the distribution of ozone at high latitudes during the boreal winter. Its structure, stability and strength influence not only the degree of isolation of the polar air allowing the processes of ozone loss to proceed without interference, but also the conditions of polar stratosphere polar clouds formation contributing to the destruction of ozone. There is significant interannual and intraseasonal variability in the state of the stratosphere polar vortex associated with the propagation and influence of planetary scale atmospheric waves (PW).

The aim of the work is to analyze wave processes under different regimes of the stratosphere polar vortex (extreme and strong vortex, periods of sudden stratospheric warming). Using the MERRA2 reanalysis data for winters from 1980 to 2025, years with typical polar vortex states were selected. For the selected periods wave activity variations of individual PWs, nonlinear wave-wave interaction processes, and exchanges of momentum and energy between the wave and the mean flow were calculated and analyzed. The results showed that during the period of extreme intensification of the polar vortex, there are increases in the positive values of the terms responsible for the interaction of PW1 and PW2 with the mean flow. Such a coupled effect of PW can lead to an acceleration of the polar vortex. At the same time, the impact of individual PW on the mean flow may not be so significant if the wave energy is spent on the generation of secondary PW as well.

## The study of the kinetics of electronically excited N<sub>2</sub> in atmospheres of planets of Solar system

A.S. Kirillov<sup>1</sup>, R. Werner<sup>2</sup>, V. Guineva<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Polar Geophysical Institute of Russian Academy of Sciences, Apatity, Murmansk region, Russia

<sup>2</sup> Space Research and Technology Institute of Bulgarian Academy of Sciences, Stara Zagora Department, Stara Zagora, Bulgaria

Molecular nitrogen N<sub>2</sub> is the main molecular gas in the atmospheres of the Earth, Titan (a moon of Saturn), Triton (a moon of Neptune) and Pluto. In the atmosphere of the Earth, the second gas in total concentration is molecular oxygen O<sub>2</sub>, in the atmospheres of the other planets it is methane CH<sub>4</sub>.

The kinetics of triplet states A<sup>3</sup>Σ<sub>u</sub><sup>+</sup>, B<sup>3</sup>Π<sub>g</sub>, W<sup>3</sup>Δ<sub>u</sub>, B<sup>3</sup>Σ<sub>u</sub><sup>-</sup>, C<sup>3</sup>Π<sub>u</sub> of molecular nitrogen in the atmospheres of Titan, Triton, and Pluto was studied during interaction with photoelectrons and during precipitation of cosmic rays into the atmosphere. The calculations took into account intramolecular and intermolecular electron energy transfer during inelastic collisions of electronically excited molecular nitrogen with N<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and CO molecules. The interaction constants of electronically excited molecular N<sub>2</sub>(A<sup>3</sup>Σ<sub>u</sub><sup>+</sup>) with N<sub>2</sub> and CO molecules were calculated using quantum-chemical approximations and showed good agreement with the available experimental data. The processes of electron excitation transfer from metastable molecular nitrogen to CO molecules in the upper atmospheres of Titan, Triton, and Pluto were considered. The interaction of electronically excited N<sub>2</sub> molecules with methane CH<sub>4</sub>, acetylene C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, ethylene C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, and ethane C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> molecules in the middle atmosphere of Titan at altitudes of 50-250 km was also studied. The dominance of reactions with metastable molecular nitrogen N<sub>2</sub>(A<sup>3</sup>Σ<sub>u</sub><sup>+</sup>) in the formation of radicals at these altitudes was shown for the first time.

Similar kinetic calculations involving triplet electronically excited molecular nitrogen were performed for the middle atmosphere of the Earth at 30-80 km during the precipitation of high-energy relativistic electrons into the atmosphere. The constants of interaction of metastable molecular nitrogen N<sub>2</sub>(A<sup>3</sup>Σ<sub>u</sub><sup>+</sup>) with oxygen molecules O<sub>2</sub> were calculated and compared with the available experimental data. The intensities of the bands of the first and second positive systems of N<sub>2</sub> during the precipitation of high-energy electrons were calculated. It is shown that there is a significant decrease in the intensity of the glow of the bands of the first positive system with decreasing altitude due to the influence of collisional processes on the populations of the vibrational levels of the N<sub>2</sub>(B<sup>3</sup>Π<sub>g</sub>) molecule.

## Results of seven year millimeter measurements of the middle atmosphere ozone in polar latitudes above Apatity (67N, 33E)

Y.Y. Kulikov<sup>1</sup>, V.I. Demin<sup>2</sup>, V.M. Demkin<sup>3</sup>, A.S. Kirillov<sup>2</sup>, V.G. Ryskin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Applied Physics, Nizhny Novgorod, Russia*

<sup>2</sup>*Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia*

<sup>3</sup>*High School of Economy, Nizhny Novgorod, Russia*

*To the memory of V.Yu. Trakhtengerts*

We perform continuous ozone measurements above Apatity, Kola Peninsula with ground-based a mobile ozonemeter (observation frequency 110.8 GHz) in the polar middle atmosphere covering from 2017 to 2025. The instrument allow to measure a spectrum of the emission ozone line for time about 15 min with a precision of ~ 2%. On the measured spectra were appreciated of ozone vertical profiles in the layer of 22-60 km which compared to satellite data MLS/Aura. This work is directed on understanding the possible action of highly altered dynamics of sudden stratospheric warming and polar vortex on ozone variations in the Arctic middle atmosphere. Seasonal (autumn – summer) changes of polar mesospheric ozone concentration (60 km) and its content in a middle atmosphere within seven years are registered. Influence of a planetary geomagnetic storm in March, 2023 and proton events in February – March, 2024 on polar mesospheric ozone is considered. Besides are cited the data of millimeter observations of the mesospheric ozone (50 km) variations during proton events October 28, 2003 at station Ny Alesund (79N, 12E).

The present study improves our representation of influence of solar activity on ozone and, hence, on a climate of the Earth.

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Science (project FFUF-2024-0034).

## Возможность оценки толщины снежного покрова по сезонным вариациям мягких компонентов вторичных космических лучей

Ю.В. Балабин, А.В. Германенко (*Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Полярный геофизический институт" Российской академии наук, Апатиты, Россия.*)  
[germanenko@pgia.ru](mailto:germanenko@pgia.ru)

В Апатитах и Баренцбурге на протяжении полутора десятков лет ведется мониторинг мягких компонентов вторичных космических лучей. К ним относятся нейтроны тепловых и умеренных (до 1 МэВ) энергий, а также рентгеновское излучение 20-400 кэВ. Наблюдаются сезонные вариации в этих компонентах. Одна из них вариаций связана с образованием и накоплением снежного покрова, однако, она маскируется другими вариациями, в том числе космического происхождения. Разработана методика нормирования и выделения вариации, связанной со снежным покровом. Базовым прибором выступает нейтронный монитор, конструкция которого выполнена так, чтобы минимизировать вариации локального происхождения. После внесения соответствующей коррекции вариации мягких компонентов показывают сильную и устойчивую зависимость от толщины снежного покрова. При этом поле излучения мягких компонентов определяется условиями не в одной точке, а интегрально на площади нескольких гектаров, соответственно, толщина снежного покрова также имеет значение интегральной величины по такой же площади. Такой метод не является методом измерениям толщины снежного покрова ad hoc, он требует проведения предварительных наблюдений в бесснежный период и наличия данных нейтронных мониторов, он может быть полезен для корректировки или оценки запасов воды в форме снега.

## **Изэнтропический анализ тропосферных волн холода в периоды расщепления стратосферного полярного вихря**

Фадеев А. С.,<sup>1</sup> Ермакова Т.С.,<sup>2</sup> Коваль А. В.,<sup>3</sup> Бикбулатов Б.А.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Российский Государственный Гидрометеорологический Университет, г. Санкт-Петербург*

<sup>2</sup>*Главная Геофизическая Обсерватория им. А.И. Воейкова, г. Санкт-Петербург*

<sup>3</sup>*Санкт-Петербургский Государственный Университет, г. Санкт-Петербург*

Email: [Fadeew2002@gmail.com](mailto:Fadeew2002@gmail.com)

Волны холода в Северном полушарии являются значимыми экстремальными погодными явлениями, оказывающими существенное влияние на природные и социально-экономические системы. В последние годы особое внимание уделяется роли стратосферно-тропосферного взаимодействия в формировании холодных аномалий, в частности влиянию внезапных стратосферных потеплений, сопровождающихся расщеплением полярного вихря. Однако механизмы переноса холодных воздушных масс в тропосфере остаются недостаточно изученными.

Целью данной работы является исследование формирования и эволюции тропосферных волн холода в периоды расщепления стратосферного полярного вихря с использованием изэнтропического подхода.

Для диагностики холодных воздушных масс применяются изэнтропические характеристики холодной воздушной массы (Cold Air Mass, CAM) и отрицательного теплового содержания (Negative Heat Content, NHC), а также потоки этих величин [1,2]. Вихрь Эртеля, интерполированный на изэнтропические поверхности, используется как индикатор вторжений стратосферного воздуха. Данные характеристики рассчитываются по данным реанализа MERRA2. Полученные характеристики сопоставляются со стационарными наблюдениями приземной температуры воздуха.

Показано, что в периоды расщепления полярного вихря формируются интенсивные изэнтропические потоки холодного воздуха, направленные из полярных областей в средние широты. Максимумы CAM и NHC пространственно согласуются с зонами наиболее сильных отрицательных температурных аномалий у поверхности. Анализ потенциальной завихренности выявляет проникновение стратосферного воздуха в верхнюю тропосферу, сопровождающее развитие холодных вторжений.

Полученные результаты демонстрируют высокую информативность изэнтропических характеристик для описания динамики волн холода и их связи со стратосферными процессами. Показатели CAM и NHC позволяют более полно учитывать процессы переноса холодных воздушных масс по сравнению с традиционным анализом приземной температуры.

### **Список литературы**

1. *Iwasaki T. et al. Isentropic analysis of polar cold air mass streams in the Northern Hemispheric winter //Journal of the Atmospheric Sciences. – 2014. – Т. 71. – №. 6. – С. 2230-2243.*
2. *Liu J. et al. The distinct roles of the Stratospheric Polar Vortex during the initiation and intensification stages of the 2016 East Asian Cold Air Outbreak //Atmospheric Research. – 2024. – Т. 311. – С. 107713.*
3. *Gelaro R. et al. The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2) //Journal of climate. – 2017. – Т. 30. – №. 14. – С. 5419-5454.*

## Исследование кинетики электронно-возбужденного молекулярного азота в спрайтах и разрядной камере

А.С. Кириллов<sup>1</sup>, В.Ф. Тарасенко<sup>1,2</sup>, Б.А. Золотенков<sup>1,2</sup>, В.А. Кириллов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Россия

<sup>2</sup> Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия

Исследование свойств красных спрайтов, включая их спектры излучения, затруднено из-за большой высоты этих разрядов над уровнем моря, сложности спектральных измерений, а также пространственной и временной неопределённости их появления. Предлагается получать предварительную информацию о спектрах излучения красных спрайтов при высоком разрешении в различных диапазонах, используя их лабораторные аналоги – плазменные диффузные струи (ПДС). Для обоснования прогнозов о спектрах излучения красных спрайтов, экспериментально измеренные излучательные характеристики ПДС сравнивались с данными расчётов. При этом использовалась модель, описывающая кинетические процессы с участием электронно-возбужденных триплетных состояний молекулярного азота  $N_2$  и дублетного состояния иона  $N_2^+$  в смеси газов  $N_2$  и  $O_2$ . Проводится сравнение теоретически рассчитанных и экспериментально измеренных отношений спектральных плотностей излучения  $W$  семи полос красного диапазона и шести полос инфракрасного диапазона спектра свечения молекулярного азота (первая положительная система 1PG) к плотностям излучения ультрафиолетовых полос  $N_2$  (вторая положительная система 2PG) и полосы  $N_2^+$  (первая отрицательная система 1NG) при давлениях среды 0.25–1.5 Торр. Показано уменьшение отношения спектральных плотностей энергии  $W_{1PG}/W_{2PG}$  с ростом давления, что объясняется ростом скорости гашения триплетного состояния  $V^3P_g$  с увеличением плотности среды.

Данное исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда за счет гранта № 25-22-00158.

## Проявление циклов солнечной активности в вариациях температуры воздуха в Петербурге и Стокгольме

А.А. Любчик (Полярный геофизический институт, Апатиты)

В статье 1989 года (М.И. Пудовкин и А.А. Любчик, Геомагнетизм и Аэрномия, №3, с.359-363) рассматривался циклический ход температур в Петербурге с 1775 по 1982 годы. Было показано, что в ходе этих температур отчетливо наблюдаются «солнечные» циклы. С 1982 года прошло уже почти 44 года, четыре 11-летних солнечных цикла. А погода, как известно, она капризная. За ней глаз да глаз нужен. Поэтому на основе расширенного ряда данных были проверены полученные ранее закономерности. Для контроля результатов дополнительно использовался ряд архивных температур в Стокгольме (с 1756 по 2017 год), расположенном примерно на той же географической широте. В частности, для зимних месяцев и для Петербурга, и для Стокгольма было подтверждено существование четкого 22-летнего цикла, был уверенно выделен примерно 90-летний цикл. Для 22-летнего цикла ближайший минимум зимних температур можно ожидать около 2030 года, а максимум – около 2040 года, в максимуме, по сравнению с минимумом, зимы будут, в среднем, на один градус теплее.

## **Анализ длинных рядов вариаций рентгеновского излучения в Апатитах и Баренцбурге**

Е.А. Михалко, Ю.В. Балабин, А.В. Германенко (*Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Россия, [mikhalko@pgia.ru](mailto:mikhalko@pgia.ru)*)

Измерения потоков рентгеновского излучения, приходящего из атмосферы, проводятся в Апатитах и Баренцбурге (Шпицберген) на протяжении полутора десятков лет. Они охватывают полностью прошедший 24-й и текущий 25-й циклы солнечной активности. Отмечаются как периодические вариации (суточные и сезонные), так и спорадические. К последним относятся возрастания рентгеновского излучения, связанные с осадками. Эти возрастания регистрируются десятками в год, амплитуда достигает ~100 % в Апатитах и ~40% в Баренцбурге. Сезонная вариация, напротив, больше в Баренцбурге: ~50 % против ~25 % в Апатитах.

Предыдущие исследования показали, что корреляция отсутствует между вариациями рентгеновского излучения и такими сильными проявлениями солнечной активности, как вспышки, корональные выбросы массы, Форбуш-эффекты. В данной работе представлен результат оценки влияния на поток рентгеновского излучения 11-летнего цикла солнечной активности. Используются накопленные данные за интервал 2010-2025 г. В качестве показателя солнечной активности использованы два параметра: интенсивность космических лучей и число солнечных пятен. Анализ не выявил четкой связи между солнечной активностью и возрастаниями рентгеновского излучения при осадках.

## **Моделирование взаимодействия атмосферы с различными типами поверхности Земли при наличии снежного покрова**

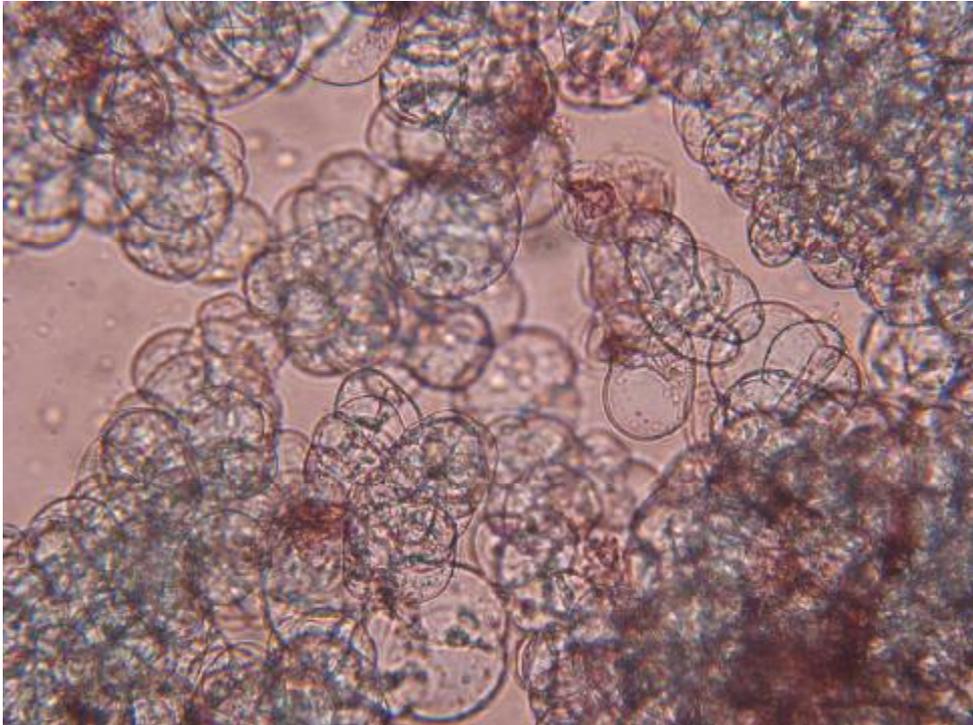
И.В. Мингалев, Е.А. Федотова, А.И. Мингалев, К.Г. Орлов, В.С. Мингалев

*Полярный геофизический институт РАН, 184209, Мурманская обл., г. Апатиты, ул. Академгородок, 26а, e-mail: [mingalev\\_i@pgia.ru](mailto:mingalev_i@pgia.ru); [orlov@pgia.ru](mailto:orlov@pgia.ru); [godograf87@mail.ru](mailto:godograf87@mail.ru); [mingalev@pgia.ru](mailto:mingalev@pgia.ru)*

В докладе обсуждаются численные модели взаимодействия между атмосферой и приповерхностным слоем океана и, а также расположенных на суше водоемов - рек, озер, болот, при наличии ледяного слоя, покрытого слоем снега. Представлены модели, в которых учитывается перенос тепла и влаги в слое снега, а также перенос энергии излучением. В этих моделях используются расчётные сетки, в которых со временем изменяются число узлов или длина шага, в зависимости от таяния или накопления снежного слоя. Обсуждаются системы уравнений, описывающие перенос тепла и влаги в слое снега, а также результаты тестовых расчетов.

Ключевые слова: перенос тепла и влаги в слое снега, взаимодействие атмосферы и поверхности Земли

## Heliobiosphere



## **Реакции растений на высокую солнечную активность в лабораторных и полевых условиях**

П. А. Кашулин, Н.В. Калачёва (*Полярно-Альпийский ботанический сад-институт, РАН, Анатиты, Россия*)

В год текущего максимума солнечной активности проведены многодневные круглогодичные наблюдения физиологической активности метеочувствительных лабораторных растений *Marantha leoconeura* и скорости роста лука репчатого *Allium cepa* в июле-сентябре. Для исключения влияния наземных экологических влияний параллельно с живыми растениями анализировали неживые механические и электронные системы. Основное внимание уделяли реакциям растений на геокосмические события, совпадающие с аномально высокими флуктуациями статистических показателей неживых систем. Неустойчивые системы чувствительны к внешним влияниям, в критические моменты бифуркации траектории последующую динамику могут определить самые слабые воздействия. У растений маранты дважды в сутки измеряли суточный ритм настических движений листовых пластинок. У контрольной и опытной популяций растений лука измеряли скорости роста наземной части. Для усиления возможных влияний магнитосферных возмущений опытные растения были окружены топологически замкнутой медной тороидальной антенной. Параллельно фиксировали результаты генерации случайных чисел на базе калькуляторов, статистики распределения исходов бросания монет и игральных костей, рассматривая их как случайные величины с двоичным и шестизначным выбором, соответственно. Анализ динамики статистических и параметров неживых систем и физиологических индексов растений указывает на присутствие фоновой полунедельной и около недельной цикличности. Обнаружены реакции объектов на значительные усиления СА, сопровождавшихся образованием корональных дыр, выбросами масс (СМЕ), вспышками классов М и X, ориентированных в сторону Земли, в виде усиления амплитуд анализируемых параметров, их отклонений от статистически ожидаемых значений и сбоя суточных ритмов растений. У растений открытого грунта, окруженных тороидальной антенной, обнаружено небольшое, но устойчивое замедление роста наземной части на протяжении всех наблюдений при снижении общей дисперсии выборки. Зафиксированы два синхронных скачка SD роста опытных растений и два снижения контрольных во время флуктуаций солнечной активности 25 июля и 8 августа, после последнего наблюдали «провалы» приростов обеих популяций и последующее снижение SD опытных. Результаты указывают на феномен синхронизации опытных растений под влиянием индуцированного внешними полями излучения тороида. Это согласуется с ранее обнаруженным нами эффектами: снижением дисперсии популяций проростков растений *Avena sativa* и синхронизацией динамики движения листьев растений маранты под влиянием излучения (предположительно векторного потенциала магнитного поля) тороидального соленоида, нагруженного постоянным током.

## **Орбитальная биологическая лаборатория БИОЛ 2 на спутнике СКОРПИОН. Первые результаты.**

I.A. Zolotarev, G.K. Garipov, D.I. Tkachenko, G.I. Antonyuk, A.V. Sazonova, M.O. Lebedev, A.N. Efimkin, S.I. Svertilov, V.V. Bogomolov, A.A. Gross, E.V. Silina, L.S. Zolotareva, V.I. Osedlo

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В.Скобельцына (сокращенное название: НИИЯФ МГУ).*

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», факультет космических исследований  
Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова (Сеченовский Университет)  
[zolotarev@sinp.msu.ru](mailto:zolotarev@sinp.msu.ru)*

Эксперимент направлен на изучение влияния условий космоса на микроорганизмы (флуоресценция *E. coli* в 8 контейнерах). Участники: НИИЯФ МГУ, студенты МАИ (конструкция), ФКИ МГУ (программа), школьники из 20+ московских школ.

Космическая погода влияет на живые системы на Земле и в полёте [1]. Ограничения наземных экспериментов для проверки развития биологических объектов в космосе – это невозможность полного воспроизведения условий. Требуется новых подходов: в космосе бактерии подвергаются микрогравитации, радиации и колебаниям магнитного поля. Ограничение космического эксперимента – это короткий жизненный цикл объектов в малом объеме. Представлено планирование наземного параллельного эксперимента и интерпретация первых космических данных. Измеренные во время космического полета интенсивности свечения на треть меньше таковых сразу после загрузки микроорганизмов.

Спутник «Скорпион» («НИИЯФ-МГУ-80») с БИОЛ-2 (фотолуминесцентные штаммы *E. coli*) - запущен 28 декабря 2025 г., в январе 2026 г. проведено 3 включения прибора во время летных испытаний спутника.

Sykilinda N. N., Lukyanova .A.A., Lavrikova V.V., Kutnik I.V., Panin N.V., Staritsyn N.A., Miroshnikov K.A. Applied Biochemistry and Microbiology. 2024, Vol.60, No.5, 908-914. pp. 908-914

## AUTHOR INDEX

<p>A</p> <p>Abunina M.A. 53, 59, 60</p> <p>Aidakina N.A. 36</p> <p>Alekseev V.V. 60</p> <p>Angelopoulos V. 43</p> <p>Anoruo C.M. 70</p> <p>Antonova E.E. 30, 83</p> <p>Antonyuk G.I. 30, 111</p> <p>Artemyev A.V. 17, 21, 38, 43, 46, 74</p> <p>Asfaw Araya 53</p> <p>Azra-Gorskaya K.Zh. 33</p> <p>B</p> <p>Bazilevskaya G.A. 77</p> <p>Belakhovsky V.B. 22, 44, 45, 70</p> <p>Beletsky A. 22</p> <p>Beliuchenko K.V. 18, 71, 75</p> <p>Belov A.A. 71, 76</p> <p>Belov A.V. 59</p> <p>Belov S.M. 53, 59</p> <p>Berezutsky A.G. 30, 45</p> <p>Bespalov P.A. 47, 48</p> <p>Bessarab F.S. 75, 80</p> <p>Bezrukikh V. 34</p> <p>Bilin V. 20</p> <p>Bogomolov A.V. 71</p> <p>Bogomolov V.V. 13, 71, 111</p> <p>Bojilova R. 19</p> <p>Borchevkina O.P. 82</p> <p>Borvenko E. 22</p> <p>Budovkina A.A. 72, 73</p> <p>C</p> <p>Chen W. 19</p> <p>Chernyshov A.A. 13, 22, 34</p> <p>Chibranov A.A. 30, 35, 45</p> <p>Chugunin D.V. 13, 34</p> <p>D</p> <p>Danilchuk E. 22</p> <p>Demekhov A.G. 33</p> <p>Demin V.I. 105</p> <p>Demissie Abbi S. 53</p> <p>Demkin V.M. 105</p> <p>Denisenko V.V. 103</p> <p>Despirak I.V. 14, 19</p> <p>Dibaeva A.R. 31</p> <p>Didenko K.A. 56, 104</p> <p>Divin A.V. 35</p> <p>Dmitriev A.V. 54</p> <p>Dolgacheva S.A. 70</p> <p>E</p> <p>Edemskiy I.K. 72, 73</p> <p>Efimkin A.N. 111</p> <p>Efishov I.I. 20</p> <p>Ermakova T.S. 104</p> <p>F</p> <p>Fagundes P.R. 70</p> <p>Fainshtein V. 22</p>	<p>Fedorov E.N. 47</p> <p>Filatov M.V. 20</p> <p>Frantsuzov V.A. 21, 46</p> <p>G</p> <p>Garipov G.K. 111</p> <p>Gomonov A.D. 83</p> <p>Goncharenko I.A. 78</p> <p>Grigorenko E.E. 34</p> <p>Gromov S.V. 15</p> <p>Gromova L.I. 14, 15</p> <p>Gross A.A. 111</p> <p>Guineva V. 19, 104</p> <p>Gurin A.V. 83</p> <p>Gushchin M.E. 36</p> <p>H</p> <p>Hegy Mostafa 15</p> <p>Hong Gao 74</p> <p>I</p> <p>Ismagilov V.S. 32</p> <p>Ivanov A.E. 30</p> <p>Ivanova A.N. 35</p> <p>Ivanova A.R. 33</p> <p>Ivanova V. 22</p> <p>Iyudin A.F. 71</p> <p>J</p> <p>Jin Y. 70</p> <p>Jiyao Xu 74</p> <p>K</p> <p>Kalegaev V.V. 23, 33, 35, 58, 62</p> <p>Kalishin A.S. 70</p> <p>Kamaletdinov S.R. 74</p> <p>Kaportseva K.B. 34, 54, 59, 62</p> <p>Kapustin V.E. 16</p> <p>Khabituev D. 22</p> <p>Khomutov S.Yu. 17</p> <p>Kirillov A.S. 76, 104, 105</p> <p>Kirpichev I.P. 30</p> <p>Kleimenova N.G. 14, 15</p> <p>Klibanova Yu.Yu. 16</p> <p>Klimenko M.V. 18, 71, 75, 80</p> <p>Klimenko V.V. 18, 71, 75</p> <p>Klimov P.A. 17, 43, 71, 76, 80</p> <p>Knizhin S.I. 77</p> <p>Kochedykov V.V. 36</p> <p>Kochneva E.M. 77</p> <p>Kolesnik S.N. 77</p> <p>Kopytenko Yu.A. 32</p> <p>Korobkov S.V. 36</p> <p>Korsunskaya J.A. 79</p> <p>Kotikov A.L. 76</p> <p>Kotov D.V. 77</p> <p>Kotova G. 34</p> <p>Koval A.V. 104</p> <p>Kozelov B.V. 76</p> <p>Krainev M.B. 56</p> <p>Kravtsova M. 22</p>
---	---

Kucherenko I.A.	71	Podgorny A.I.	57
Kulikov Y.Y.	105	Poklad Y.V.	79
Kupriyanov G.A.	78	Posukh V.G.	30
Kuzminov V.A.	60	Pozdnyakova D.D.	47
	L	Prodan P.E.	77
Lagoida I.A.	61	Proshin S.A.	37
Lavrukhin A.S.	34, 54	Pulatov D.	58
Lebedev M.O.	111	Pulinets S.A.	13
Lebedev V.P.	77		R
Leonenko M.V.	34	Ratovsky K.G.	18, 22, 75
Lobanova V.S.	79	Raykova L.	19
Loginov M.V.	30	Roldugin A.V.	76
Loskutov K.N.	36	Roslavtsev S.V.	58
Lubchich A.A.	14, 19	Rozanov E.V.	77
	M	Rubtsov A.V.	19
Madzhidov A.I.	61	Rumenskikh M.A.	30
Makarov G.A.	16	Ryakhovsky I.A.	79
Makhmutov V.S.	77	Ryskin V.G.	105
Malakhov V.V.	37, 55		S
Malysheva L.M.	15	Sakharov Ya.A.	19, 20, 44
Manina A.N.	35	Sapunova A.I.	79
Marchenko L.S.	46	Saraev R.E.	17, 76
Marchuk R.A.	16, 17, 18	Savina O.N.	47, 48
Maurchev E.A.	56, 104	Sazonova A.V.	111
Maximov I.S.	83	Sdobnov V.	22
Mayorov A.G.	37, 55, 60, 61	Selivanov V.N.	20, 44
Milosh V.	70	Semenov V.S.	35
Mironov A.D.	77	Senyagin E.D.	80
Mironova I.A.	33, 77	Sergeev V.A.	31, 36
Miroshnichenko I.B.	30, 45	Setsko P.V.	19
Mishin V.V.	16, 17, 18	Shagimuratov I.I.	20
Mogilevsky M.	34	Shaikhislamov I.F.	30, 35, 45
Murashov A.S.	71, 76	Sharakin S.A.	76
	N	Sharipov S.S.	45
Neshchetkin G.M.	47	Shchelkanov K.D.	43, 76, 80
Nikolaev V.	20	Shiryaev A.O.	34, 54, 59
Nikolaeva V.D.	17, 43, 76, 80	Shkareva P.D.	48
Nikolaeva V.N.	35	Shlyk N.S.	53, 59, 60
Nikolenko A.S.	36	Shugay Y.S.	54, 59, 62
Nosikov I.A.	71, 82	Shukhtina M.A.	36
Nosikova V.V.	82	Shustov P.I.	21
	O	Sibeck D.G.	21
Oinats A.	22	Sigaeva K.F.	76
Olemskoy S.	22	Silina E.V.	111
Osedlo V.I.	111	Siruk S.A.	60, 61
Ovchinnikov I.L.	30	Skorikova E.A.	61
	P	Smirnov S.E.	103
Padokhin A.M.	13, 22	Smirnova E.S.	48
Paramonik I.P.	35	Stepanova M.V.	30
Parkhomov V.A.	17	Strikovskiy A.V.	36
Parovik R.I.	46	Surkov V.V.	81
Penskikh Yu.V.	17, 18	Surovtsev N.V.	17
Petrishchev M.S.	32	Suvorova A.V.	37, 81
Petrukovich A.A.	21, 46	Svertilov S.I.	13, 71, 111
Pilipenko V.A.	19, 44, 45, 47, 81		T
Pillat V.G.	70	Tadesse Tilaye	53
Pleshkov D.S.	36	Tashchilin A.V.	73
Podgorny I.M.	57	Teneva Desislava	61

Tepenitsyna N.Ya.		20	Белов А.А.		84
Timchenko A.V.		71, 75, 80, 82	Березуцкий А.Г.		40
Tishchenko V.N.		45	Бикбулатов Б.А.		106
Tkachenko D.I.		111	Билин В.А.		38
Tong Shi		53	Богомолов А.В.		27, 66, 84
Tonoian D.S.		38	Богомолов В.В.		27, 66, 84
Trusov A.A.		76	Будовкина А.А.		72, 73
Tsybulya K.G.		13	Быков А.М.		39
Tutin I.V.		78		В	
Ugolnikov O.S.	U	82	Васильев Н.А.		27, 66
	V		Васильев Р.В.		28, 72, 73, 85
Vakhrusheva A.A.		54, 62	Вахнина В.В.		25
Vasiliev R.V.		72, 73	Власова Н.А.		23, 39
Vasilyev A.E.		70	Воробьев В.Г.		90, 91
Vershinin I.M.		36	Воскресенсков Е.Д.		84
Vesnin A.M.		18, 22		Г	
Vlasov A.A.		19	Гаврилов Б.Г.		94
Vlasova N.A.		23, 33, 35, 58	Гвоздевский Б.Б.		63, 64, 65, 66
Volkov M.A.		83	Германенко А.В.		63, 64, 65, 66, 105, 108
Vorobjev V.G.		22, 30, 83	Гомонов А.Д.		89, 91
Voskresenskov E.D.		71	Гончаренко И.А.		78
	W		Грач С.М.		85, 86
Werner R.		19, 104	Груздов Д.С.		39
Wieser J.		84		Д	
Wojciech J. Miloch		22	Дашкевич Ж.В.		87
	Y		Демехов А.Г.		23, 41, 49
Yagodkina O.I.		22, 30, 83	Диденко К.А.		56
Yahnina T.A.		33	Долгачева С.А.		88
Yajun Zhu		74	Дуканов И.А.		67
Yakimova G.A.		20		Е	
Yankovskiy I.S.		71	Евдокимова М.А.		49, 86, 88
Yankovsky I.S.		75	Егоров И.М.		88
Yaqi Jin		22	Едемский И.К.		72, 73
Yashin I.V.		13	Емельянов В.В.		85, 86
Yasyukevich A.		22	Еремеев В.Е.		27, 66
Yasyukevich Yu.		22	Ермак В.М.		94, 96
Yazev S.		22	Ермакова Т.С.		106
Yuan D.		19	Ефишов И.И.		26, 100, 101
Yulbarisov R.F.		60		Ж	
	Z		Жильцов М.П.		49, 88
Zakharov Yu.P.		30		З	
Zelenyi L.M.		34	Загорский Г.А.		88
Zhang X.-J.		38, 43	Захаров Ю.П.		40
Zhu Y.		19	Золотенков Б.А.		107
Zinkin D.V.		81	Золотов О.В.		99
Zolotarev I.A.		111		И	
Zolotareva L.S.		111	Иванов В.Е.		87
Zotov M.Yu.		76	Исмагилов В.С.		32
Zudin I.Yu.		36	Июдин А.Ф.		27, 66, 84
Zverev M.A.		77		К	
Zykina A.A.		23, 33	Калачёва Н.В.		110
	A		Калегаев В.В.		23, 39
Азра-Горская К.Ж.		23	Калишин А.С.		88, 91
Андреевский С.Е.		49, 88, 93	Капустин В.Э.		26
	B		Кашулин П. А.		110
Балабин Ю.В.		63, 64, 65, 66, 105, 108	Кириллов А.С.		89, 107
Бархагов Н.А.		24	Кириллов В.А.		107
Бархагова О.М.		24	Клименко М.В.		28, 101
Белецкий А.Б.		28, 85, 86	Климов П.А.		84
			Книжин С.И.		93

Коваль А.В.	106	Посух В.Г.	40
Когогин Д.А.	85, 86	Привалов А.В.	89
Козелов Б.В.	89	Продан П.Е.	93
Колобов В.В.	50, 51	Прохоров Б.Е.	99
Колпак В.И.	49, 88	Пудовинников Р.Н.	25
Копытенко Ю.А.	32	Пулинец С.А.	86, 98
Корсунская Ю.А.	79	Пулинец С.М.	97
Крайнев М.Б.	56, 68		P
Кречетов Н.Д.	93	Ратовский К.Г.	99
Кропотина Ю.А.	39	Ревунов С.Е.	24
Кувшинов А.А.	25	Ревунова Е.А.	24
Куликов Ю.Н.	89	Рождественская В.И.	95
Куприянов Г.А.	78	Рождественский Д.Б.	95
Курбатов Г.А.	86, 93	Романова Н.Ю.	89, 91
Кучеренко И.А.	66, 84	Романовская Ю.В.	99
	L	Руменских М.С.	40
Ларченко А.В.	49, 93	Ряховский И.А.	79, 94, 96
Лебедь О.М.	93		C
Легостаева Ю.К.	85, 86	Саакян О.Т.	93
Лесников Г.А.	96	Савельева Н.В.	50, 51, 97
Лобанова В.С.	79, 94, 96	Сапунова А.И.	79, 94, 96
Луныошкин С.Б.	26	Сахаров Я.А.	38, 41
Любчик А.А.	107	Свертилов С.И.	27, 66, 84
	M	Селиванов В.Н.	38, 41
Малкин Е.И.	49, 88	Синевиц А.А.	98
Марченко О.А.	27	Соколов Д.Д.	67
Маурчев Е.А.	56	Степанов А.Е.	27, 99
Мельник М.Н.	90, 91	Стуков Д.А.	51
Мерзлый А.М.	92	Суворова З.В.	92
Мингалев А.И.	108	Сухарев А.Г.	66
Мингалев В.С.	108	Сыренова Т.Е.	28
Мингалев И.В.	89, 91, 92, 108		T
Мингалев О.В.	90, 91	Тарасенко В.Ф.	107
Мирмович Э.Г.	92	Татарников А.А.	99
Мирошниченко И.Б.	40	Тащилин А.В.	73
Михалев А.В.	28	Телегин В.А.	95
Михалко Е.А.	66, 108	Тепеницына Н.Ю.	100, 101
Мишин В.В.	26	Тепляков А.В.	88
Могилевский М.М.	49, 88, 98	Тертышников А.В.	100
Мурашов А.С.	84	Тимченко А.В.	101
Мягкова И.Н.	27	Титова Е.Е.	49, 88
	N	Ткачев И.Д.	85, 86
Насыров И.А.	85, 86	Трушин П.А.	40
Никитенко А.С.	50, 93	Туманова Ю.С.	93
Носиков И.А.	101	Тютин И.В.	78
	O		F
Орлов К.Г.	108	Фадеев А.С.,	106
	P	Федоренко Ю.В.	50, 51, 93
Павлов И.А.	94	Федоров Е.Н.	50, 51
Падохин А.М.	86, 93, 94	Федотова Е.А.	108
Пенских Ю.В.	26	Федяй О.В.	25
Петрищев М.С.	32	Филатов М.В.	26, 100
Пилипенко В.А.	50, 51, 97	Фрик П.Г.	67
Подлесный С.В.	28		X
Позднякова Д.Д.	97	Халипов В.Л.	27, 99
Поклад Ю.В.	79, 94, 96		Ч
Попов А.И.	24	Чернева Н.В.	49, 88
Попова Т.А.	41	Черненко А.Н.	25

Чернышов А.А.	49, 86, 88, 93, 98			
Черняков С.М.	89, 91		Юшков Е.В.	67
Чибранов А.А.	40			
Чугунин Д.В.	49, 86, 88, 98		Я	
		Ш		
Шагимуратов И.И.	26, 100, 101		Ягова Н.В.	41, 51
Шайхисламов И.Ф.	40		Ягодкина О.И.	90, 91, 97
Шаповалова Ю.А.	99		Якимова Г.А.	100, 101
Шиндин А.В.	85, 86		Янаков А.Т.	92
Шлюгаев Ю.В.	49, 88		Янковский И.С.	28, 101
			Яхнина Т.А.	41
			Яшин И.В.	27, 66