

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

Polar Geophysical Institute

PGI-25-01-145

PHYSICS OF AURORAL PHENOMENA

48th Annual Seminar

Abstracts

10 – 14 March 2025

Apatity
2025

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

<https://seminar.pgia.ru>

© Polar Geophysical Institute, 2025

CONTENTS

SESSION 1. GEOMAGNETIC STORMS AND SUBSTORMS

M.A. Abunina, E.A. Mauricev, N.S. Shlyk, A.V. Belov, A.A. Abunin	Changes of geomagnetic activity for the period from 1932 to 2023	14
C.M. Anoruo, P.R. Fagundes, V.G. Pillat	Global observations of ionospheric irregularities by May 2024 superstorm	14
E.E. Antonova, M.V. Stepanova, I.P. Kirpichev, V.G. Vorobjev, O.I. Yagodkina, I.L. Ovchinnikov, D.Yu. Naiko	Location of substorm onset and mechanism of first auroral arc brightening	15
G.I. Antonyuk, V.V. Benghin, I.A. Zolotarev <i>Г.И. Антонюк, В.В. Бенгин, И.А. Золотарев</i>	Charged particle flux dynamics in 2023 according to the data of the KODIZ instrument <i>Динамика потоков заряженных частиц в 2023 году по данным прибора КОДИЗ</i>	16
A.V. Artemyev	Acceleration and losses of energetic electrons during substorm injections	17
V.B. Belakhovsky	The relativistic electron precipitation during CME and CIR geomagnetic storms	17
V.B. Belakhovsky, V.A. Pilipenko	On the contribution of poloidal Pc4 waves to the acceleration of electrons of the outer radiation belt to relativistic energies	18
V.B. Belakhovsky, A.V. Roldugin, V.N. Selivanov, Y.A. Sakharov	Auroral portrait of the extreme GICs events	19
N.V. Bobrov, I.A. Mironova	Energetic Particle Precipitation during the 2024 Geomagnetic Disturbances Associated with the Sudden Onset	19
I.V. Despirak, N.G. Kleimenova, A.A. Lubchich, P.V. Setsko, L.M. Malysheva	“Polar” substorms in the intervals of extremely slow solar wind	20
Lake Endeshaw	The Atmospheric Oxygen, Hydrogen and Helium Responses for the Extreme Geomagnetic Storm of 11 May 2024 over Different Regions	20
L.I. Gromova, N.G. Kleimenova, L.M. Malysheva, S.V. Gromov	Some peculiarities of the eastward electrojet distribution in the extreme magnetic storm on 10-11 May 2024	21
V. Guineva, R. Werner, R. Bojilova, L. Raykova, A. Atanassov	MPB at the Bulgarian station Panagyurishte related to substorms during highly disturbed conditions in 2024	21
V.S. Ismagilov, Yu.A. Kopytenko	Study of geomagnetic variations of Ps6 on a two-dimensional network of stations	22

*В.С. Исмагилов,
Ю.А. Копытенко*

*Исследование геомагнитных вариаций P_{sb} на двумерной
сети станций*

A.R. Ivanova, V.V. Kalegaev, A.G. Demekhov, T.A. Yahnina	Differences in electron precipitation events from the ORBE during different types of geomagnetic disturbances as an indicator of different magnetospheric processes	23
N.G. Kleimenova, L.I. Gromova, L.M. Malysheva, S.V. Gromov	Planetary features of westward and eastward electrojets during the very strong magnetic storm on 10-11 October 2024	24
G.A. Makarov	Manifestation of the strongest geomagnetic storm on May 10-16, 2024 in magnetometer data on the Yakut meridian	24
R.A. Marchuk, V.V. Mishin, V.A. Parkhomov, Yu. V. Penskiikh	Bursts of broadband pulsations during the passage of diamagnetic structures in the solar wind	25
V.V. Mishin, S.B. Lunyushkin, Yu. Karavaev, M. Kurikalova, Yu. Penskiikh, V. Kapustin	Dawn–dusk asymmetry dynamics in the electric fields and currents distribution in the polar ionospheres of two hemispheres – Some results of the ISTP SB RAS modified magnetogram inversion technique	25
L. Raykova, V. Guineva, R. Werner, R. Bojilova, A. Atanassov	Midlatitude positive bays related to magnetospheric substorms at Panagyurishte station in 2012 – case study	26
P.V. Setsko, I.V. Despirak, A.A. Lubchich, Y.A. Sakharov, V.N. Selivanov	Study of GIC’s Geophysical Sources During Extreme Geomagnetic Storm on 10–12 May 2024	26
D.G. Sibeck	Global Observations of the 10 May 2024 Geomagnetic Storm	27
V.G. Vorobjev, O.I. Yagodkina, E.E. Antonova	Comparative characteristics of nighttime auroral precipitation under extreme levels of magnetic activity	27
Yu.V. Yasyukevich	ISTP SB RAS experimental facilities: current state and future of the study of space weather extreme events on the Earth’s ionosphere	28
К.Ж. Азра-Горская, В.В. Калегаяев, Н.А. Власова	Связь динамики потоков частиц кольцевого тока и внешнего радиационного пояса Земли во время двух магнитных бурь 2015 года	28
Н.А. Бархатов, С.Е. Ревунов, О.М. Бархатова, В.Г. Воробьев, Е.А. Ревунова, О.И. Ягодкина	Статистический анализ возможных триггерных механизмов для возникновения геомагнитных суббурь	29
В.В. Вахнина, А.А. Кувшинов, А.Н. Черненко, Р.Н. Пудовинников, О.В. Федяй	Определение требований к системе мониторинга геоиндуцированных токов в электрических сетях	30
Я.А. Сахаров, Н.В. Ягова, В.А. Пилипенко, О.И. Ягодкина, А.М. Мерзлый	Пространственное распределение авроральных высыпаний и сбоев в работе железнодорожной автоматики	30

А.В. Суворова	Анализ потоков энергичных протонов под РПЗ на ранней фазе развития кольцевого тока	31
Е.О. Учайкин, А.Ю. Гвоздарев, П.Б. Бородин	Повышение точности измерений геоиндуцированных токов в высоковольтных линиях электропередач на примере энергетической сети Республики Алтай	32
И.И. Шагимуратов, И.И. Ефишов, М.В. Филатов	Проявление флуктуаций навигационных сигналов ассоциированных с полярными сияниями: событие 9 декабря 2020 года	33
И.И. Шагимуратов, Г.А. Якимова, И.И. Ефишов, М.В. Филатов	Проявление поляризационного джета и ассоциированные с ним неоднородности по ТЕС измерениям во время магнитной бури 18 марта 2018 года	33
А.О. Ширяев, К.Ж. Азра-Горская, А.А. Вахрушева, К.Б. Капорцева, А.С. Лаврухин, Д.В. Невский, С.А. Оганов	Мульти-спутниковые исследования межпланетных ударных волн 10 мая 2024 года и магнитосферного отклика на них	34

SESSION 2. FIELDS, CURRENTS, PARTICLES IN THE MAGNETOSPHERE

А.А. Chibranov, A.G. Berezutskiy, Yu.P. Zakharov, I.B. Miroshnichenko, V.G. Posukh, M.A. Rumenskikh, I.F. Shaikhislamov, A.E. Ivanov, M.V. Loginov	Study of plasma jets formation in a transverse magnetic field on the laser-plasma facility KI-1	35
D.V. Chugunin, G.A. Kotova, M.V. Klimenko, V.V. Klimenko	Statistical model of the plasmasphere electron density taking into account the discrepancy between the magnetic and geographic poles	35
A.V. Divin, V.S. Semenov, S.V. Apatenkov, I.P. Paramonik, D. Zhong, A. Mao, X. He, S. Liu, X. Wang	Numerical simulations of magnetic reconnection in SPERF-AREX device (Harbin Institute of Technology)	36
S.R. Kamaletdinov, A.V. Artemyev	Energetic Electron Transport Driven by Drift-Orbit Bifurcation	36
G.R. Kokhan, S.V. Apatenkov, V.A. Sergeev	Inner magnetosphere field line curvature estimates. First results	37
A.S. Lavrukhin, I.I. Alexeev	Jovian magnetopause boundary layer according to Galileo and Juno data	37
V.V. Malakhov, A.A. Leonov, A.G. Mayorov, S.A. Rodenko	A new approach to data analysis of trapped radiation in the inner radiation belt	38
V.A. Sergeev, M.V. Kubyshkina, A.V. Artemyev	Magnetospheric Structure and Dynamics Inferred from Low-Altitude Spacecraft Observations	38

Mohammad Reza Shafizadeh, Behnam Babaeian	Investigating Large-Scale Electric Structures During Geomagnetic Storms in Earth's Radiation Belts Using Electric Field and Potential Difference Data from RBSP Satellites	39
I.A. Zolotarev, V.V. Begenin, G.I. Antonyuk, A.M. Sadikov, S.I. Svertilov, V.V. Bogomolov, V.I. Osedlo	Research of radiation conditions using KODIZ and KODIZ-2 spectrometers for cubesats	39
<i>И.А. Золотарев, В.В. Бенгин, Г.И. Антоюк, А.М. Садыков, С.И. Свертилов, В.В. Богомолов, В.И. Оседло</i>	<i>Исследования радиационных условий с помощью спектрометров КОДИЗ и КОДИЗ-2 для малых космических аппаратов</i>	
Ю.А. Кропотина, А.М. Быков	Глобальная гибридная модель магнитосферы Земли	41
П.А. Кручинин, С.А. Прошин, В.В. Малахов	Определение области применимости траекторных расчетов в околоземном пространстве	41
О.В. Мингалев, П.В. Сецко, М.Н. Мельник, И.В. Мингалев, Х.В. Малова, Е.Е. Григоренко, Л.М. Зеленый	Численная модель сверхтонкого электронного токового слоя в ближней части магнитосферного хвоста	42
И.П. Парамоник, А.В. Дивин, И.В. Зайцев, Д. Чжун, В.С. Семенов	Иерархический подход к определению числа кластеров и параметров GMM для функции распределения ионов	43
И.П. Парамоник, А.В. Дивин, А.А. Чибранов, М.С. Руменских, И.Ф. Шайхисламов, В.С. Семенов	Трассирование тестовых частиц в электромагнитных полях диамагнитной каверны	44
Т.А. Попова, Т.А. Яхнина, А.Г. Демехов	Влияние солнечной активности на свойства высыпаний релятивистских электронов	45
В.В. Сафаргалеев	Сценарий модуляции неструктурированных пульсаций герцового диапазона вариациями ММП	46
D. Zhong, И.П. Парамоник, А.В. Дивин, В.С. Семенов	Формирование пучков ионов в ходе ускорения магнитным бесстолкновительным пересоединением	46
Н.В. Ягова, Я.А. Сахаров, О.В. Козырева, В.А. Пилипенко, С.Л. Гаранин	Особенности применения индексов геомагнитной активности в прикладных задачах мониторинга и прогноза космической погоды	47
Т.А. Яхнина, Т.А. Попова, А.Г. Демехов	Сравнительный анализ условий в межпланетной среде и геомагнитной активности при высыпаниях релятивистских электронов, обусловленных разными механизмами	48

SESSION 3. WAVES, WAVE-PARTICLE INTERACTION

V.B. Belakhovsky, V.A. Pilipenko	Foreshock ULF waves observed by the MMS satellites and its magnetosphere response	49
----------------------------------	---	----

V.B. Belakhovsky, D.V. Kostarev, V.A. Pilipenko	The geomagnetic pulsations with a period about 30-minute observed on the dayside of the magnetosphere by the GOES satellites	49
V.B. Belakhovsky, V.A. Pilipenko, Y.A. Sakharov, V.N. Selivanov	About contribution of the Pg pulsations to the GICs growth	50
A.G. Berezutsky, V.N. Tishchenko, S.S. Sharipov, I.B. Miroshnichenko, A.A. Chibrarov, I.F. Shaikhislamov	Numerical simulation of the generation of Alfvén waves by laser plasma in a magnetized background plasma with neutrals at Alfvén-Mach numbers less than one	50
P.A. Bespalov, O.N. Savina, G.M. Neshchetkin	Prospects for quantitative analysis of short-period VLF emissions in the magnetosphere	51
A.A. Chernyshov, D.A. Dorofeev, M.M. Mogilevsky, V.E. Shaposhnikov, D.V. Chugunin	Features in the generation and observation of the hectometric continuum in the near-Earth plasma	51
D.Yu. Klimushkin, P.N. Mager	Drift-compressional mode in the magnetosphere	52
V.I. Kolpak, M.M. Mogilevsky, D.V. Chugunin, A.A. Chernyshov, I.L. Moiseenko	Spatial and Temporal Long-Period Trends in AKR Detection in the Solar Wind	52
D.V. Kostarev, V.B. Belakhovsky, P.N. Mager, D.Yu. Klimushkin, V.A. Pilipenko	Theoretical models for describing ultra-low-frequency oscillations with periods of about 30 min on the dayside of the magnetosphere	53
D.L. Pasmanik, A.G. Demekhov	VLF chorus emissions modeling using EPOCH PIC code: analysis of the fine structure of chorus elements	53
P.D. Shkareva, G.M. Neshchetkin, P.A. Bespalov, O.N. Savina	Indications of the impact of the influence of large-scale atmospheric disturbances on quasi-periodic VLF emissions inside the plasmasphere	54
D.A. Shubin, A.V. Rubtsov, P.N. Mager, D.Yu. Klimushkin	Statistical study of the frozen-in condition of magnetic field based on satellite data from the THEMIS mission	54
E.S. Smirnova, S.Yu. Dobrokhotov	On the problem of modeling of the 3D evolution of atmospheric disturbance initiated by an impulse at the ground	55
E.E. Smotrova, O.S. Mikhailova, P.N. Mager, A.V. Rubtsov	Oppositely directed poloidal Alfvén waves generated by a proton cloud	55
D.S. Tonoian, X.-J. Zhang, A.V. Artemyev	Fractional resonance of sub-MeV electrons with oblique EMIC waves	55
Н. Айдакина, М. Гущин, И. Зудин, С. Коробков, А. Стриковский	Экспериментальное исследование нестационарных возмущений плазмы и магнитного поля, возбуждаемых короткоимпульсной высокочастотной накачкой в режиме электронной магнитной гидродинамики на крупномасштабном плазменном стенде «Крот»	56
A.B. Ларченко, А.Г. Демехов	Усовершенствованный подход к выделению дискретных элементов хоровых ОНЧ излучений	57

О.С. Михайлова, Д.Д. Позднякова, В.А. Пилипенко	ЭМИЦ неустойчивость в магнитосфере: Необходимость смены парадигмы?	58
А.С. Никитенко, О.М. Лебедь, Ю.В. Федоренко, А.В. Ларченко	Наземные наблюдения авроральных шипений во время роста риометрического поглощения	58
А.С. Никитенко, С.В. Пильгаев, А.В. Ларченко, Ю.В. Федоренко, Н.Ф. Благовещенская, А.С. Калишин, Т.Д. Борисова, О.Ю. Стрибный, М.В. Филатов, М.В. Кузнецова, О.М. Лебедь	Наблюдения естественных СНЧ/ОНЧ сигналов во время экспедиции «Северный Полюс—41»	59
М.С. Петрищев, Ю.А. Копытенко, В.С. Исмагилов, А.Л. Ткачѳв, П.А. Сергушин	Исследование геоэлектрического строения земной коры методом фазово-градиентного зондирования	59
В.А. Пилипенко, Е.Н. Федоров, Н.Г. Мазур, Д.Д. Позднякова, А.В. Рябов, А.С. Потапов, Р.А. Марчук, Е.Н. Ермакова, В.В. Колобов, С.В. Анисимов	Возбуждение искусственных сигналов диапазона Pc1 в эксперименте FENICS-2024: наблюдения и моделирование	60
Н.В. Савельева, Д.Д. Позднякова, В.А. Пилипенко	Pi2 пульсации: один тип, разные механизмы	60
В.А. Французов, А.В. Артемьев, А.А. Петрукович	Глобальный дисперсионный анализ системы на основе эмпирической функции распределения	61

SESSION 4. THE SUN, SOLAR WIND, COSMIC RAYS

S.M. Belov, A.V. Belov, M.A. Abunina, N.S. Shlyk	Interplanetary disturbances database: on determining the solar sources	62
I.A. Dukanov, E.V. Yushkov, D.D. Sokoloff	Transformation of turbulent solar wind spectra within shell-model approach	63
К.В. Капортсева	Towards a Standard for CME Modeling and Forecasting	64
I.A. Lagoida, I.I. Astapov, P.S. Kuzmenkova	Calibration of ground-based neutron monitors using machine learning approach. Prospects and disadvantages	64
G.G. Motorina	Energy budget of cold solar flares	65
A.I. Podgorny, I.M. Podgorny	Position of the primordial release of solar flare energy at the extended surface of magnetic lines with increased current density: Results of MHD simulation	66
L. Raykova, R. Werner, V. Guineva	Study of the temperatures response to the solar cycle activity for some caves in Bulgaria	67

N.S. Shlyk, M.A. Abunina	Comparison and adjustment of CME velocities according to various catalogs data	67
S.A. Siruk, A.G. Mayorov, R.F. Yulbarisov	Opportunities to expand neutron monitors network in order to increase its sensitivity to low-energy cosmic rays	68
D.K. Sondhiya, P. Gupta	Analysis of variations in Solar and Geomagnetic Parameters for Solar Cycle 24 using Analysis of variance (ANOVA) method	68
A.A. Vakhrusheva, Y.S. Shugay, K.B. Kaportseva, V.E. Ereemeev, V.V. Kalegaev	Influence of the Drag-Based Model input parameters choice on the CME forecast results in the 24th solar cycle	69
Ю.В. Балабин, А.В. Германенко, Б.Б. Гвоздецкий	Выявление слабых вариаций потоков космических лучей из области полюса мира с помощью пары мюонных телескопов	70
Ю.В. Балабин, А.В. Германенко, Е.А. Михалко, Л.И. Щур, Б.Б. Гвоздецкий	Анализ крупных форбуш-эффектов 25-го цикла по данным нейтронных мониторов и мюонных телескопов в Апатитах и Баренцбурге	71
Б.В. Козелов	Нейросетевое определение параметров солнечного ветра по наблюдениям распределения магнитных полей на Солнце	71
М.Б. Крайнев, Г.А. Базилевская, М.С. Калинин, А.Н. Квашнин, В.С. Махмутов, А.К. Свиржевская, Н.С. Свиржецкий	Интенсивность ГКЛ по данным эксперимента Регулярного Баллонного Мониторинга космических лучей и ситуация в минимумах и максимумах солнечного цикла	72
Е.А. Маурчев, К.А. Диденко, М.А. Абунина, Н.С. Шлык	Оценка скорости ионизации атмосферы Земли во время солнечных протонных событий	73

SESSION 5. IONOSPHERE AND UPPER ATMOSPHERE

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	Small satellite "Scorpion" payload for the study of atmospheric gamma-ray flashes and transient phenomena	74
<i>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</i>	<i>Полезная нагрузка малого спутника «Скорпион» для исследования атмосферных гамма вспышек и транзиентных явлений</i>	
O.P. Borchevkina, A.V. Timchenko, F.S. Bessarab, Y.A. Kurdyeva, I.V. Karpov, G.A. Yakimova, M.V. Klimentko	Meteorological storm influence on regional TEC disturbance	76

E.I. Danilchuk, Yu.V. Yasyukevich, A.M. Vesnin, A.V. Klusilov, B. Zhang	Ionospheric response and GPS positioning errors during the main phase of the 10-11 May 2024 geomagnetic storm	77
A.V. Divin, E. Gordeev, M.V. Klimenko, F.S. Bessarab, K.V. Belyuchenko, V.V. Klimenko, E.V. Rozanov, V.G. Merkin, K.A. Sorathia	The two-way coupling of the global MHD model and the thermosphere/ionosphere model	77
M.V. Klimenko, K.V. Belyuchenko, F.S. Bessarab, A.V. Divin, V.V. Klimenko, K.G. Ratovsky, A.V. Timchenko, E.V. Rozanov	Influence of atmosphere-ionosphere and magnetosphere-ionosphere coupling on upper atmosphere response to geomagnetic storm: First-principle model's results	78
E.I. Malkin, N.V. Cherneva, E.A. Kazakov, B.M. Shevtsov	Recording of whistlers and high-altitude discharges during Bezymyanni and Shiveluch volcano eruptions	78
A. Padokhin, Yu. Yasyukevich, V. Demyanov, C. Chen, I. Pavlov, A. Vesnin, E. Danilchuk	GNSS AltBOC Signals and Their Perspectives for Ionospheric TEC Studies	79
K.G. Ratovsky, V.V. Klimenko, M.V. Klimenko, A.M. Vesnin, K.V. Belyuchenko	Ionospheric responses to isolated and strong geomagnetic events identified by AE-index: statistical analysis and modeling	80
A.A. Sinevich, A.A. Chernyshov, D.V. Chugunin, M.M. Mogilevsky	Polarization Jet/SAID behavior during extreme geomagnetic disturbances	80
S.I. Svertilov from Ionosphere collaboration <i>С.И. Свертилов от имени коллаборации «Ионосфера»</i>	Some experiments onboard Ionosphere satellites №1, 2: First results and perspectives <i>Некоторые эксперименты на спутниках Ионосфера-М №1, 2: первые результаты и перспективы</i>	81
Team of the Russian project «Ionosphere»	Russian project «Ionosphere»	83
M.A. Volkov, A.D. Gomonov, A.V. Gurin, M.V. Shvets <i>М.А. Волков, А.Д. Гомонов, А.В. Гурин, М.В. Швец</i>	Using navigation systems to study wave processes in the ionosphere <i>Использование навигационных систем для исследования волновых процессов в ионосфере</i>	84
Yu.V. Yasyukevich, E. Astafyeva, Y.I. Egorov, A.V. Kiselev, V.P. Lebedev, B.M. Maletckii, A.M. Padokhin, B.G. Salimov, A.M. Vesnin	Global Navigation Satellite Systems to study the Earth's ionosphere	85
O.B. Антоненко, A.C. Кириллов	Различия интенсивностей свечения молекулярного кислорода в условиях планет с преобладающей концентрацией CO ₂ и в земных условиях с малым содержанием углекислого газа	85
K.B. Бельюченко, M.B. Клименко, B.B. Клименко, K.G. Ратовский	Исследование отклика ионосферы на геомагнитные бури разной интенсивности	86

Ф.И. Выборнов, О.А. Шейнер	Анализ вариаций диапазона частот прохождения коротковолновых сигналов на европейских трассах России во время магнитно-ионосферной возмущенности в конце 2024 – начале 2025 годов	86
А.Д. Гомонов, О.В. Мингалев, И.В. Мингалев	Поведение полярной ионосферы во время сильных магнитных бурь в 2024 году по данным радиотрассы наклонного зондирования Мурманск-Туманный	87
О.В. Золотов, Б.Е. Прохоров, Ю.В. Романовская, А.А. Татарников, Ю.А. Шаповалова	О разработке Python-пакета для расчёта солнечного КУФ/ДУФ излучения согласно модели А. Нусинова	87
Н.В. Иванов, А.Д. Гомонов	Расчет импеданса ионосферы для волн КНЧ-диапазона обобщенным методом ВКБ	88
В.Е. Иванов, Ж.В. Дашкевич	Оценка энергии авроральных электронов по фотометрическим данным интенсивности эмиссии 427.8 нм	88
А.С. Кириллов, В.Ф. Тарасенко, Н.П. Виноградов, В.А. Кириллов	Исследование кинетики электронно-возбужденного молекулярного азота в спрайтах и разрядной камере	89
П.А. Климов, А.А. Белов, М.Ю. Зотов, Б.В. Козелов, А.С. Мурашов, В.Д. Николаева, А.В. Ролдугин, Р.Е. Сараев, К.Ф. Сигаева, Д.А. Трофимов, С.А. Шаракин, К.Д. Щелканов	Изображающие фотометры ближнего УФ-диапазона как эффективный инструмент физики высоких энергий атмосферы, магнитосферы и космических лучей	90
Б.В. Козелов	Фрактальные структуры в авроральном овале, статистика по камерам в Апатитах и Верхнетуломском	91
В.С. Лобанова, И.А. Ряховский, Ю.В. Поклад	Методика оценки приращения ПЭС, вызванного солнечными вспышками	92
И.В. Мингалев, З.В. Суворова, А.М. Мерзлый, А.Т. Янаков, И.А. Моисеев	Методы определения пространственных распределений ионосферных параметров по данным возвратно-наклонного зондирования	92
И.А. Павлов, А.М. Падохин	Оценка корреляционных масштабов в ионосфере по данным полного электронного содержания в европейском регионе	93
А.М. Падохин, И.А. Павлов	Локальная коррекция модели NeQuick2 по одиночным пролетам низкоорбитальных спутниковых радиомаяков	93
Ю.В. Поклад, Б.Г. Гаврилов, В.М. Ермак, В.С. Лобанова, И.А. Ряховский	Параметры ночной ионосферы во время магнитной бури 10-11 мая 2024 года на различных трассах распространения СДВ радиосигналов	94
И.А. Ряховский, Ю.В. Поклад, Б.Г. Гаврилов, С.З. Беккер	Эмпирическая модель воздействия солнечных вспышек различного класса на состояние и динамику нижней ионосферы	94

А.И. Сапунова, И.А. Ряховский	Экспериментальные исследования динамики ПЭС полярной ионосферы на НИС «Профессор Молчанов»	95
К.Ф. Сигаева, А.А. Белов, П.А. Климов, Б.В. Козелов, В.Д. Николаева, А.В. Ролдугин, Р.Е. Сараев, К.Д. Щелканов	Комплексное исследование пульсирующих полярных сияний 6 декабря 2023 года по данным эксперимента RAIPS	96
К.Ф. Сигаева, П.А. Климов	Проект RAIPS: оценка высот пульсирующих полярных сияний по данным стереонаблюдений	97
А.В. Тертышников	15 лет функционирования ионозондов ФГБУ «ИППГ» на солнечно-синхронной орбите	97
В.М. Уваров	Основные результаты численного моделирования полярной ионосферы	99
В.Л. Халипов, А.Е. Степанов	Развитие поляризационного джета во время больших мировых магнитных бурь и во время рекуррентных магнитных возмущений	100
К.Д. Щелканов, П.А. Климов, В.Д. Николаева	Оценка высоты аврорального свечения по данным спектрометрических измерений	100

SESSION 6. LOW ATMOSPHERE, OZONE

В.А. Bikbulatov, К.А. Didenko, Т.С. Ermakova, А.С. Fadeev	The response of the polar tropopause to the events of major and minor sudden stratospheric warmings	101
К.А. Didenko, Е.А. Bezotcheskaya, Е.А. Maurchev	Wave processes in the middle atmosphere during the minor SSW development in winter 2014-2015	101
А.С. Fadeev, Е.Н. Savenkova, А.В. Koval	Analysis of changes in wave activity flows before and after the weakening of the stratospheric polar vortex in the middle of the winter season from 1981 to 2023	102
Y.Y. Kulikov, V.I. Demin, V.M. Demkin, А.С. Kirillov, V.G. Ryskin	Long-term microwave measurements of the middle atmosphere ozone above Apatity (67N, 33E) in winter-spring seasons	102
А. Poroshenko, M. Toohey	Simulated Changes in Large-scale Atmospheric Circulation Energetics from Volcanic Aerosol Forcing	103
D.B. Rozhdestvensky, V.I. Rozhdestvenkaya, V.A. Telegin, V.M. Mikhailov	Long-term forecast for surface temperature in some circumpolar cities in the Russian Federation	104
S.V. Veretenenko, P.B. Dmitriev, V.N. Obridko	Solar Hale cycle manifestations in geophysical and climatic characteristics	105
R. Werner, V. Guineva, D. Valev, R. Bojilova, А.С. Kirillov	10 Years Ozone Measurements at Stara Zagora – Basic Properties of the Daily Time Series	105

Ю.В. Балабин, А.В. Германенко, Е.А. Михалко, Б.Б. Гвоздевский	Мониторинг дифференциального спектра естественного гамма-излучения 0.2-8 МэВ на Шпицбергене	106
В.И. Демин, Б.В. Козелов	Исследование инверсий температуры воздуха в пограничном слое атмосферы в Апатитах	106
В.И. Демин, Ю.В. Меньшов	О микроклиматической изменчивости температуры воздуха в районе Мурманска	107
Ю.А. Копытенко, М.С. Петрищев, В.С. Исмагилов, Е.С. Вернова	Электромагнитное поле грозового разряда	107
Ю.Н. Куликов, А.С. Кириллов	Моделирование кинетики синглетного кислорода $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ в полярной ионосфере и на высотах ночного свечения	108
И.В. Мингалев, Е.А. Федотова, А.И. Мингалев, К.Г. Орлов	Подходы к построению моделей взаимодействия атмосферы с различными типами поверхности Земли	108
Е.А. Михалко, Ю.В. Балабин, А.В. Германенко, Б.Б. Гвоздевский	Расширение системы регистрации гамма-излучения при осадках на Шпицбергене	109
К.Г. Орлов, И.В. Мингалев, Е.А. Федотова, В.С. Мингалев	Моделирования циркуляции нижней и средней атмосферы Земли с учетом образования облаков и выпадения осадков	109

SESSION 7. HELIOBIOSPHERE

П.А. Кашулин, Н.В. Калачёва	Синхронные реакции оранжерейных растений и неживых систем на солнечную активность	110
Э.Г. Мирмович	Арктика как междисциплинарная научная экспериментальная и практическая образовательная лаборатория изучения геосферных возмущений гелиогеофизического характера	110
Author index		112

Changes of geomagnetic activity for the period from 1932 to 2023

M.A. Abunina, E.A. Mauricev, N.S. Shlyk, A.V. Belov, A.A. Abunin

IZMIRAN, Moscow, Troitsk, Russia; e-mail: abunina@izmiran.ru

Some parameters of geomagnetic activity (Ap and Kp indices) were studied for the long period (1932 – 2023). General statistical changes in the number of geomagnetic storm intervals for the entire observation period, as well as for individual solar cycles, were considered. It was shown that about 46% of time the geomagnetic activity remains quiet, and only 7% of time magnetic storm intervals are observed. The largest number of three-hour intervals of geomagnetic storms was recorded in the 18th solar cycle, and the smallest one - in the 24th. Also an algorithm for automatic selection of geomagnetic storms was developed. And the duration (in hours) of magnetic storms for the entire study period is considered.

Global observations of ionospheric irregularities by May 2024 superstorm

C.M. Anoruo*, P.R. Fagundes, V.G. Pillat

*Laboratorio de Fisica e Astronomia, Universidade do Vale do Paraiba (UNIVAP),
Av. Shishima Hifumi, 2911, Urbanova, Sao Jose Dos Campos, SP, Brazil*

*E-mail: *anoruochukwuma@gmail.com*

In this study, we employ ionospheric vertical electron content (VTEC) and rate of TEC index (ROTI) and contextualized with space weather monitoring variables to study May 2024 superstorm. Space-time evolution VTEC of Madrigal GNSS over 8000 stations and ROTI of 9300 stations from ISEE GNSS Japan for May 10-12 were mapped every 5-mins to study global response of the ionosphere and irregularities during the superstorm. We employed ROTI as functions of latitude and time (keogram) and meridional cross section of zonally averaged VTEC to diagnose the interhemispheric/auroral substorms related to irregularities. Results showed several ionospheric absorptions caused by this storm and mostly in the south.

Keywords: Global analysis, GNSS, May 2024 superstorm

Location of substorm onset and mechanism of first auroral arc brightening

E.E. Antonova^{1,3}, M.V. Stepanova², I.P. Kirpichev³, V.G. Vorobjev⁴,
O.I. Yagodkina⁴, I.L. Ovchinnikov¹, D.Yu. Naiko¹

¹*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow, 119991, Russia;*
e-mail: *elizaveta.antonova@gmail.com*

²*Department of Physics, University of Santiago de Chile, Santiago, Chile*

³*Space Research Institute (IKI) Russian Academy of Science, Moscow, Russia*

⁴*Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia*

One of the main widely discussed unresolved problems of magnetospheric dynamics is the mechanism of formation of magnetospheric substorms, including the localization of the onset of a substorm and the properties of the first brightening of the nearest to the equator auroral arc. We have summarized numerous results from ground-based, low-altitude and near-equatorial observations. The main attention was focused on the results demonstrating the localization of the onset of an isolated substorm deep inside the ring current region and its connection with the processes of IMF penetration into the magnetosphere modulating magnetospheric current systems. We took into account the results demonstrating the inapplicability of the frozen-in condition for the analysis of substorm dynamics, the high level of turbulence in the plasma sheet, and the inability to explain the absorption of energy within the magnetosphere by a source in the tail. An important part of this problem is the brightening of the aurora arc near to the equator during a substorm onset or the formation of a new arc. We consider that a cold electron beam is formed as a result of the penetration of ionospheric plasma into the region of field-aligned potential drop, and a substorm onset is formed as a result of the development of instability of large-scale field-aligned currents. It is shown that this approach can explain the results of experimental observations without assumptions about reconnection in the tail or disruption of the tail current.

Charged particle flux dynamics in 2023 according to the data of the KODIZ instrument

G.I. Antonyuk^{1,2}, V.V. Benghin^{1,3}, I.A. Zolotarev¹

¹*SINP MSU, Moscow, Russia*

²*Faculty of Physics MSU, Moscow, Russia*

³*IBMP, Moscow, Russia*

The study presents an analysis of charged particle fluxes in near-Earth space in 2023 using data from the KODIZ instrument onboard the Monitor-1 satellite. The research is aimed at the analysis of variations in the intensity and spectral characteristics of electron and proton fluxes within normal and perturbed geomagnetic environment. The geomagnetic and solar activity indices were used to evaluate the impact of geomagnetic disturbance.

The KODIZ (Combined Radiation Detector) instrument was developed as a new generation of ultra-small instruments designed for radiation monitoring and spectrometric measurements in low-Earth orbit. Such instruments make it possible to promptly obtain up-to-date data.

A comparative analysis of the particle flux characteristics during the periods of quiet and perturbed geomagnetic conditions was carried out. The obtained data may contribute to the improvement of near-Earth region models, increase the accuracy of space weather forecasting and radiation safety estimation.

Динамика потоков заряженных частиц в 2023 году по данным прибора КОДИЗ

Г.И. Антонюк^{1,2}, В.В. Бенгин^{1,3}, И.А. Золотарев¹

¹*НИИЯФ МГУ, Москва, Россия*

²*Физический факультет МГУ, Москва, Россия*

³*ГНЦ ИМБП РАН, Москва, Россия*

В работе представлен анализ потоков заряженных частиц в околоземном пространстве в 2023 году по данным спутника прибора КОДИЗ на спутнике "Монитор-1". Исследование направлено на анализ изменения интенсивности и спектральных характеристик потоков электронов и протонов в условиях спокойной и возмущенной геомагнитной обстановки. Для оценки влияния геомагнитных возмущений были использованы индексы геомагнитной и солнечной активности.

Прибор КОДИЗ (КОмбинированный Детектор ИЗлучений) разработан как новое поколение сверхмалых приборов, предназначенных для радиационного мониторинга и спектрометрических измерений на низкой околоземной орбите. Использование подобных приборов позволяет оперативно получать актуальные данные.

Проведен сравнительный анализ характеристик потоков частиц в периоды спокойной и возмущенной геомагнитной обстановки. Полученные данные могут способствовать улучшению моделей околоземного пространства, повышению точности прогнозирования космической погоды и оценки радиационной безопасности.

Acceleration and losses of energetic electrons during substorm injections

A.V. Artemyev^{1,2}

¹*Space Research Institute, RAS, Moscow, Russia*

²*University of California, Los Angeles, USA*

Substorm time injections of energetic electrons are characterized by various adiabatic and non-adiabatic processes contributing to electron acceleration and losses. One of the main acceleration processes is the adiabatic electron heating. Such heating, however, shapes quite unstable electron distributions driving generation of a wide range of electromagnetic and electrostatic waves. These wave modes largely contribute to electron scattering and losses via precipitation into the Earth's ionosphere. This presentation combines recent results from low-altitude and equatorial spacecraft observations and numerical simulations with the focus on quantification of adiabatic and non-adiabatic effects in dynamics of electron injections.

The relativistic electron precipitation during CME and CIR geomagnetic storms

V.B. Belakhovsky

Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia

The work compares the fluxes of relativistic (>0.6 MeV) precipitating electrons from the Earth's outer radiation belt during magnetic storms caused by a coronal mass ejection (CME) and a high-speed flow of solar wind from coronal holes (CIR). Data from NOAA/POES series satellites were used to register relativistic electron precipitation (REP). REP for corrected geomagnetic latitudes $|\text{CGLat}| > 60^\circ$ are considered in order to exclude the contribution of the South Atlantic Anomaly. The superposition of REP based on data from 5 satellites (NOAA-15, 18, 19, Metop-1, 2) over several days allows us to obtain an average picture of REP in the entire magnetosphere. Magnetic storms on October 10-13, 2021 (CIR) and November 3-4, 2021 (CME) were considered as reference events. The analysis shows that the level of REP during CME storms is noticeably higher than the level of REP during CIR storms. Apparently, this is due to the fact that the main contribution to the precipitation of MeV electrons is made by ion cyclotron waves (Pc1 pulsations). The generation of Pc1 pulsations occurs more efficiently during CME magnetic storms, which are characterized by a higher intensity of the ring current.

On the contribution of poloidal Pc4 waves to the acceleration of electrons of the outer radiation belt to relativistic energies

V.B. Belakhovsky^{1,2}, V.A. Pilipenko³

¹*Polar Geophysical Institute, Apatity*

²*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk*

³*Institute of Space Research RAS, Moscow*

An increase in electron fluxes to relativistic energies (~1 MeV) in the Earth's outer radiation belt is one of the most important factors in space weather, since electrons of these energies can damage equipment on satellites. However, the mechanism of electron acceleration is still a matter of debate in scientific circles. Most researchers associate the acceleration of electrons either with their interaction with toroidal waves of the Pc5 range [1] or with VLF chorus emissions [2]. However, the growth of ULF and VLF activity in the magnetosphere ends, as a rule, more than a day before the start of the growth of relativistic electrons [3], and their flux reaches a maximum after a magnetic storm. Therefore, the question arises as to what mechanisms are responsible for the relativistic electron fluxes continuing to increase after the decline in Pc5 and VLF activity. Tverskoy's betatron mechanism, associated with the restoration of the magnetospheric magnetic field [4], cannot be a universal explanation, because an increase in relativistic electron fluxes occurs frequently and during very weak magnetic storms.

In our opinion, poloidal Pc4 pulsations can be a quite likely candidate for the role of an electron accelerator up to MeV energies. These waves are observed only under calm geomagnetic conditions; they can last for several days. The report presents cases where Pc4 pulsations were recorded by the GOES satellites during a period of increasing relativistic electron fluxes. Observations show that the rise and fall of MeV electron fluxes in geostationary orbit occurs almost simultaneously with the rise and fall of energetic proton fluxes (95 keV). Thus, Pc4 pulsations turn out to be an agent that transfers energy from energetic protons to electrons of MeV energies. The mechanism of excitation of Pc4 waves and subsequent acceleration of electrons is associated with the resonant bounce-drift interaction of waves and particles.

The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 24-77-10012.

1. Elkington S.R., Hudson M.K., Chan A.A. Acceleration of relativistic electrons via drift-resonant interaction with toroidal-mode Pc-5 ULF oscillations. *Geophys. Res. Lett.* 26:3273–3276. 1999.
2. Thorne R.M., W. Li et al. Rapid local acceleration of relativistic radiation-belt electrons by magnetospheric chorus, *Nature*, 504, 411. 2013.
3. Belakhovsky V.B., Pilipenko V.A., Antonova E.E., Miyoshi Y., Kasahara Y. et al. Relativistic electron flux growth during storm and non-storm periods as observed by ARASE and GOES satellites // *Earth, Planets and Space*, 2023, Vol.75, Article number:189.
4. Tverskoy B.A., Formation mechanism of the ring current structure of magnetic storms, *Geomagn. Aeronomy*, 37, N5, 29-34, 1997 (in Russian).

Auroral portrait of the extreme GICs events

V.B. Belakhovsky¹, A.V. Roldugin¹, V.N. Selivanov², Y.A. Sakharov¹

¹*Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia*

²*Northern Energetics Research Centre, Kola Science Centre of the RAS, Apatity, Russia*

The work analyzes the forms of auroras during the period of recording extreme values of geomagnetically induced currents (GICs) in power lines at Vykhodnoy station (VKH), Kola Peninsula. Analysis of aurora forms provides information about the structure of ionospheric current systems during the period of GIC growth. We used a database of extreme GICs values ($I > 20$ A) for 11 years of observations (2012-2022) at the VKH station, including 92 events [Belakhovsky et al., 2024]. To record auroras, data from the camera at the observatory of the Polar Geophysical Institute "Lovozero" (LOZ) was used. 12 cases of extreme GIC values accompanied by auroras were found. The analysis shows that all GIC jumps were accompanied only by discrete forms of auroras in green line (557.7 nm). As a rule, vortex current structures are observed. A number of events were accompanied by the development of auroral bulge.

Belakhovsky V.B., Pilipenko V.A., Selivanov V.N., Sakharov Y.A. Events of extreme growth of geomagnetic-induced currents on the Kola Peninsula over 11 years of observations // *Physics of Auroral Phenomena*, pp. 36-39, doi: 10.51981/2588-0039.2024.47.008. 2024.

Energetic Particle Precipitation during the 2024 Geomagnetic Disturbances Associated with the Sudden Onset

N.V. Bobrov and I.A. Mironova

St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

Over the past two decades, the strongest geomagnetic storms occurred in the fall of 2003. However, in 2024, a series of solar eruptive events occurred that resulted in a series of geomagnetic disturbances, such as those in May and October 2024. An extreme geomagnetic storm was recorded in May 2024 and was classified as a G5 geomagnetic storm by NOAA ($K_p = 9$), making this event the most powerful storm since the 2003 geomagnetic storm.

This report presents the latest results on the study of energetic particle precipitation, which is important for the ionospheric response during the 2024 geomagnetic disturbances. Cases associated with eruptive events on the Sun were selected for detailed analysis. This paper studies in detail the precipitation of electrons and protons in different periods of geomagnetic activity and different intensities of solar eruptive events. The analyzed particle precipitation fluxes obtained from the POES satellite (METOP01, METOP03, NOAA15, NOAA18 and NOAA1 instruments) from March to October 2024 will be shown.

The study of electron particle precipitation into the Earth's ionosphere was carried out within the framework of the grant of St. Petersburg State University No. 116234986.

The selection and study of energetic particle precipitation associated with a sudden onset was carried out within the framework of the grant of the Russian Science Foundation No. 22-62-00048.

“Polar” substorms in the intervals of extremely slow solar wind

I.V. Despirak¹, N.G. Kleimenova², A.A. Lubchich¹, P.V. Setsko¹, L.M. Malysheva²

¹*Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia*

²*Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow, Russia*

“Polar” substorms observed at high geomagnetic latitudes ($>70^\circ$ MLAT) in the absence of substorm-like disturbances at lower latitudes. The question remains open whether “polar” substorms can develop under extremely quiet conditions, when the geoeffective parameters of the space weather are extremely small. We studied the possible “polar” substorm appearance during the intervals of extremely slow solar wind (ESSWs, $V < 300$ km/s) from 2010 to 2020 by applying the data from the IMAGE network of magnetometers across the Svalbard archipelago within the longitudinal sector of (~ 108 - 114° Mlong), as well as the data from the simultaneous records from 66 LEO satellites of the AMPERE project. It was found that “polar” substorms can occur during ESSWs, but only under the presence of a negative IMF Bz component. The “polar” substorms observed during the ESSW events exhibited the main typical features of the ordinary substorms, namely they accompanied by Pi1B geomagnetic pulsations, positive subauroral or mid-latitude magnetic bays, a poleward moving of the westward electrojet and auroras during its expansion phase. Additionally, it was found that substorm-like disturbances during ESSWs could be attributed to different types: isolated “polar” substorms; disturbances like WTS (westward travelling surge) expanded to the polar evening-side latitudes from after-midnight ordinary substorms; very small polar-latitude disturbances like pseudo breakups etc. Several “polar” substorm events have been examined in detail.

The Atmospheric Oxygen, Hydrogen and Helium Responses for the Extreme Geomagnetic Storm of 11 May 2024 over Different Regions

Lake Endeshaw^{1,2}

¹*Department of Physics Werabe University, Werabe, Ethiopia*

²*Department of Space and Planetary Science, Ethiopian Space Science and Geospatial Institute (ESSGI), Addis Ababa University, Addis Ababa, Ethiopia*

Geomagnetic storms occur when the Earth’s magnetic field interacts with the magnetic fields of the solar wind. Geomagnetic storms have effects on the atmosphere, ionosphere, and magnetosphere. This study analyzes the response of the atmospheric parameters of atomic oxygen, hydrogen, and helium during the extreme magnetic storm of 11 May 2024. The present storm is the most powerful, with a minimum value of Dst -412 nT. The atmospheric oxygen, hydrogen and helium responses during the 11 May 2024 storm are studied by using the empirical atmospheric model of Naval Research Laboratory Mass Spectrometer Incoherent Scatter Extension 2002 (NRLMSISE 2.0) data measurements. To observe the atmospheric parameter responses for the storm, some days before and after the extreme storm day are used with latitudinal variability considerations. The results show that there were anomalies of atmospheric oxygen, hydrogen and helium that occurred some days before, after, and during the storm day of 11 May 2024. The atomic oxygen and helium are increased during the storm day, while the hydrogen is decreased during the main phase of the storm day. The atmospheric model of the NRLMSISE 2.0 accurately captures the anomalies of atmospheric oxygen, hydrogen and helium during the extreme magnetic storm of 11 May 2024.

Keywords: Atomic oxygen, Hydrogen, Helium, Geomagnetic storms, NRLMSISE model

Some peculiarities of the eastward electrojet distribution in the extreme magnetic storm on 10-11 May 2024

L.I. Gromova¹, N.G. Kleimenova², L.M. Malysheva², S.V. Gromov¹

¹*IZMIRAN, RAS, Troitsk, Moscow, Russia*

²*Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow, Russia*

The magnetic storm on 10-12 May 2024 ($Dst_{min} = -403$ nT) was the strongest storm in the current 25th solar cycle to date. The magnetic storm developed under strong and rapid changes in the structure of the interplanetary magnetic field (IMF): the IMF components changed from negative to positive values (IMF B_y from -40 up to +70 nT, IMF B_z from -40 up to +50 nT) under the high speed V (~750 km/s), and dynamic pressure P_{sw} (~30-35 nPa) of the solar wind. Here we studied some effects of these IMF changes on the planetary configuration of the ionospheric electrojets and field-aligned currents based on the global maps derived from the magnetic measurements on 66 low orbital satellites of the AMPERE project. An unpredicted large eastward current expansion was found under the strong positive IMF B_y ($> +20$ nT) values associated with the appearance of the local very intense upward field-aligned current in the afternoon sector. The details of new electrojet configurations are discussed.

MPB at the Bulgarian station Panagyurishte related to substorms during highly disturbed conditions in 2024

V. Guineva¹, R. Werner¹, R. Bojilova², L. Raykova¹, A. Atanassov¹

¹*Space Research and Technology Institute (SRTI) – Bulgarian Academy of Sciences, Stara Zagora Department, Bulgaria*

²*National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography (NIGGG) - Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria*

Substorms originated over Europe are often accompanied by midlatitude positive bays (MPB) which can be registered at the midlatitude Bulgarian station Panagyurishte (PAG, GMLAT~ 37°N). In previous studies, it was found out, that the most intense MPB at PAG were related to substorms, originated during geomagnetic storms, under disturbed interplanetary conditions. 2024 is full of high-activity events resulting from the conditions in the solar wind and the interplanetary magnetic field. On 10-11 May 2024 developed a superstorm, the second largest geomagnetic storm in the space era, which influenced a lot the Geosphere. In addition, many more geomagnetic storms were observed during the year. The purpose of this work is to verify the MPB at PAG during such events. We studied the MPB's during the superstorm on 10-11 May 2024, during the severe storm on 10 October 2024, and during the strong storms on 19 April 2024, 12 September 2024, 06 October 2024, 8 November 2024.

In 2024, 144 MPB were detected. It was ascertained, that the distribution of MPB's by intensity in 2024 differ from the previous years. The number of MPB's with higher maxima is higher: the number of cases with $X_{max} > 20$ nT is 6.94%, and with $X_{max} > 30$ nT – 5.56%. The highest maximal MPB values were over 60 nT and were observed during the geomagnetic superstorm.

Study of geomagnetic variations of Ps6 on a two-dimensional network of stations

V.S. Ismagilov, Yu.A. Kopytenko

SPbF IZMIRAN, St. Petersburg, Russia; e-mail: ivs@izmiran.spb.ru

The study of geomagnetic variations of Ps6 that arose in the post-midnight sector was conducted. The data of the two-dimensional IMAGE network and magnetic stations located in Russia were used. Ps6 variations with an amplitude of up to 600 nT and a duration of ~20 min were observed during a small global magnetic storm. It was shown that geomagnetic variations of Ps6 arose against the background of small substorms at the same corrected geomagnetic longitude $\Lambda \sim 95^\circ$ E and latitude $\Phi \sim 65^\circ$ N and moved by $\sim 20^\circ$ in longitude to the east, with a new variation occurring when the previous one moved by $\sim 10^\circ$. It is shown that the ionospheric source of these variations is a pair of Hall current eddies, each of which has an elliptical shape with a major axis in the south-north direction. The estimated size of the ionospheric source is ~940 km in the west-east direction (each Hall current eddy is ~470 km) and ~1000 km in the south-north direction. The centers of the ionospheric sources of these variations moved eastward with a velocity of ~0.8 km/s. It is shown that each geomagnetic variation is accompanied by a burst of Pi1-2 geomagnetic pulsations. A comparison of the features of the Ps6 geomagnetic variations and microsubstorms, which have many coinciding features, is carried out.

Исследование геомагнитных вариаций Ps6 на двумерной сети станций

В.С. Исмагилов, Ю.А. Копытенко

СПбФ ИЗМИРАН, С.-Петербург, Россия; e-mail: ivs@izmiran.spb.ru

Проведено исследование геомагнитных вариаций Ps6 возникших в послеполуночном секторе. Используются данные двумерной сети IMAGE и магнитных станций, расположенных на территории России. Вариации Ps6 с амплитудой до 600 нТл и длительностью ~20 мин наблюдались в период небольшой мировой магнитной бури. Показано, что геомагнитные вариации Ps6 возникали на фоне небольших суббурь на одной и той же исправленной геомагнитной долготе $\Lambda \sim 95^\circ$ E и широте $\Phi \sim 65^\circ$ N и перемещались на $\sim 20^\circ$ по долготе на восток, причем новая вариация возникала, когда предыдущая переместилась на $\sim 10^\circ$. Показано, что ионосферный источник этих вариаций - пара холловских токовых вихрей, каждый из которых имеет эллиптическую форму с большей осью в направлении юг-север. Оценка размеров ионосферного источника составляет ~940 км в направлении запад - восток (каждый холловский токовый вихрь ~470 км) и ~1000 км в направлении юг-север. Центры ионосферных источников этих вариаций перемещались в восточном направлении со скоростью ~0.8 км/с. Показано, что каждая геомагнитная вариация сопровождается всплеском геомагнитных пульсаций Pi1-2. Проведено сравнение особенностей геомагнитных вариаций Ps6 и микросуббурь, имеющих много совпадающих признаков.

Differences in electron precipitation events from the ORBE during different types of geomagnetic disturbances as an indicator of different magnetospheric processes

A.R. Ivanova^{1,3}, V.V. Kalegaev^{1,3}, A.G. Demekhov², T.A. Yahnina²

¹*Skobel'syn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University*

²*Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia*

³*Faculty of physics, Lomonosov Moscow State University*

According to the NOAA POES/METOP satellites, statistics of energetic electrons precipitation from the Earth's outer radiation belt during various geomagnetic disturbances were collected. Two different magnetic storms are being considered: a weak but prolonged storm including the HILDCAA event on October 11-16, 2017, and a powerful but rapidly fading storm on March 23-30, 2023. The parameter under study was the slope of the energy spectrum (a measure of the ratio of different energies particle fluxes) of the precipitation caused by different scattering mechanisms. The analysis of the energy spectrum slope shows different dynamics of the ORBE fluxes and the development of wave activity during different types of geomagnetic activity. Also, such a study allows us to try to determine the number of "pure" (caused by one mechanism of electron scattering) and "mixed" (caused by several scattering mechanisms at once) precipitation events.

It was found that in storms with prolonged substorm activity, approximately 50% of the precipitation caused by interaction with EMIC waves are "mixed". And in powerful storms without prolonged substorm activity, all such precipitation events were "pure". Probably, the "mixing" of mechanisms occurs due to the powerful VLF activity during prolonged substorms. It was also found that the dynamics of the slope of the precipitation spectra caused by scattering on the curvature of the magnetic line is very different for the two magnetic storms. Apparently, during the HILDCAA event, two processes balance each other: injection of energetic electrons and acceleration of electrons by consecutive substorms to relativistic energies. In the absence of such prolonged substorm activity, only the injection of energetic electrons remains.

This research is supported by RScF grant No. 22-62-00048.

Planetary features of westward and eastward electrojets during the very strong magnetic storm on 10-11 October 2024

N.G. Kleimenova¹, L.I. Gromova², L.M. Malysheva¹, S.V. Gromov²

¹*Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow, Russia*

²*IZMIRAN, RAS, Troitsk, Moscow, Russia*

The magnetic storm on 10-11 October 2024 ($Dst_{min} = -333$ nT) was one of the strongest storms in the present 25th solar cycle. Large variations in the intensity of the IMF B_y and B_z (from +40 nT to -40 nT) were observed during the main phase of the storm at the very high solar wind dynamic pressure (P_{sw}) up to ~ 40 nPa. The storm recovery phase developed under the unusual strong (up to -40 nT) and long lasting (~12 h) IMF B_z . This led to high substorm activity in the storm recovery phase as well. Thus, at least 8 substorms with AL -index ~-1500 nT and higher were recorded during the storm main phase and 7 substorms in the recovery phase. In addition, during the main phase of the storm, 7 positive magnetic bays with an amplitude of 500-1000 nT in AU -index were observed, the maximum of which did not coincide with the minimum in AL -index. There were no intense positive magnetic bays (in AU -index) during the storm recovery phase. The planetary features of the configuration of the ionosphere electrojets and field-aligned currents (FAC) were studied by applying the global maps based on the magnetic measurements on 66 LEO satellites of the AMPERE project. The results of our study demonstrated the strong dependence of the electrojet and FAC features on the sign and values on the IMF B_y and B_z as well as on the P_{sw} level. It was shown that the sign of the IMF B_y controls not only the direction of the dayside polar electrojet but also affects the eastward current and the width of the region where it is observed. Rapid simultaneous variations in the IMF components and P_{sw} led to the abrupt changes in the planetary distributions of the electrojets and FACs. This makes it difficult to identify specific effects of each individual component. Further detailed studies are required to understand the observed features.

Manifestation of the strongest geomagnetic storm on May 10-16, 2024 in magnetometer data on the Yakut meridian

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.

Magnetic variations are considered based on the data from magnetometers of the Yakut meridional chain of geophysical stations during the strongest geomagnetic storm on May 10-16, 2024. The sudden onset of the storm was observed at 17:06 UT, the duration of the storm main phase was ~ 9 hours, while the peak negative value of the Dst index reached -412 nT on May 11 at 02:00 UT, the recovery phase lasted more than 5 days. As a result of the analysis of magnetic data from 3 stations of the meridional chain, it became possible to obtain information on the distribution of equivalent current systems at ionospheric altitudes in the region. It was established that on May 10 in the early morning sector 01-05 MLT an extended system of intense westerly currents with an electrojet developed above the stations, which was located at a latitude of $55^\circ < \Phi' < 61^\circ$. Subsequently, the electrojet moved south. It was found that on May 11 in the sector 13-19 MLT the Yakutsk and Zhigansk stations were located south of the system of eastern currents, the Tixie station at 13-16 MLT was south of the western currents. In the sector 20-06 MLT all three stations were located north of the system of western currents, and Yakutsk was almost under the concentration of these currents. Interplanetary conditions during the period of magnetic storm occurrence are considered.

Bursts of broadband pulsations during the passage of diamagnetic structures in the solar wind

R.A. Marchuk¹, V.V. Mishin¹, V.A. Parkhomov², Yu.V. Pensikh¹

¹*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia*

²*Baikal State University of Economics and Law, Irkutsk, Russia*

The paper presents an analysis of the development of geomagnetic activity on August 18, 2012, caused by the passage of two diamagnetic structures (DS) of a coronal mass ejection (CME) in the solar wind, as recorded by the WIND spacecraft. The passage of the DS triggered disturbances in the magnetic field in the magnetotail, observed by the Van Allen Probes satellites: A, D, and E, leading to the development of a substorm and bursts of geomagnetic pulsations.

The study examines the dynamics of geomagnetic pulsations based on data from the Mondy (mid-latitude: 51.62° E, 100.92° N) and Norilsk (high-latitude: 88.36° E, 69.36° N) stations, as well as on maps of field-aligned currents distribution in the polar ionosphere obtained using the magnetogram inversion technique at the Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS.

It is shown that the generation of PiB-type pulsations associated with DS can occur during both the substorm's growth and explosive phases, as well as before and after its development.

Dawn–dusk asymmetry dynamics in the electric fields and currents distribution in the polar ionospheres of two hemispheres – Some results of the ISTP SB RAS modified magnetogram inversion technique

V.V. Mishin, S.B. Lunyushkin, Yu. Karavaev, M. Kurikalova, Yu. Pensikh, V. Kapustin

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS

A summary of the main results of the open magnetosphere model predicting the quadrant asymmetry in the distributions of ionospheric convection and field-aligned currents under the influence of the IMF azimuthal component is given. Based on the data from the worldwide network of ground-based magnetic stations of the SuperMAG project, the dynamics of the dawn–dusk asymmetry in the distributions of electric fields and currents in the high-latitude ionosphere in two hemispheres is studied using the magnetogram inversion method during changes in geomagnetic activity during long intervals of stationary magnetospheric convection. Possible reasons for the obtained examples of non-fulfillment of quadrant asymmetry in two hemispheres are discussed. It is shown that along with the usually discussed external factors (the effects of IMF, the solar wind dynamic pressure and the illumination of the polar ionosphere), internal factors can have a significant influence - the effects of rotation of the substorm current system and the ring current amplification even during weak magnetic storms.

Midlatitude positive bays related to magnetospheric substorms at Panagyurishte station in 2012 – case study

L. Raykova¹, V. Guineva¹, R. Werner¹, R. Bojilova², A. Atanassov¹

¹*Space Research and Technology Institute (SRTI) – Bulgarian Academy of Sciences, Stara Zagora Department, Bulgaria*

²*National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography (NIGGG) - Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria*

The positive bays in the X magnetic component at midlatitudes, known as midlatitude positive bays (MPB) are the effect of substorms at midlatitudes. The mechanisms that lead to the occurrence of substorms remain a subject of ongoing scientific debate. In this study, the registered MPB at the Bulgarian magnetic station Panagyurishte (PAG) during 2012 are examined. 2012 is about at the middle of the ascending phase of SC24, and a maximum of the number of detected MPB (a total of 182), related to magnetic substorms, was observed at this year. 18 of the MPB's, with maximal value greater than 20 nT, are taken as strong. The interplanetary and geomagnetic conditions during these events have been examined. It was found out that all cases with strong MPB happened during geomagnetic storms. The effect of two consecutive substorms on 15 July 2012 at PAG has been studied in detail.

Study of GIC's Geophysical Sources During Extreme Geomagnetic Storm on 10–12 May 2024

Pavel Setsko¹, Irina Despirak¹, Andris Lubchich¹, Yaroslav Sakharov¹, Vasiliy Selivanov²

¹*Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia*

²*Northern Energetic Research Centre, Kola Science Center RAS, Apatity, Russia*

Geomagnetically induced currents (GICs) in power lines in northwest Russia were studied during one of the most intense geomagnetic storms of the space age (10–12 May 2024). The analysis spanned from 17 UT on 10 May to 06 UT on 12 May. During the main phase (~17:15 UT on 10 May to ~04:30 UT on 11 May), GICs were strongest at the southern station (KND), while during the recovery phase (after ~04:30 UT on 11 May), the northern station (VKH) experienced higher GICs. This reflects the auroral oval's expansion and southward displacement during the main phase, followed by its return during recovery. Evening and night sector GICs (~15–30 A) were driven by westward electrojet intensifications during substorms and supersubstorms, while morning sector GICs (~01–04 UT) were induced by Pc5/Pi3 pulsations during substorm recovery. Two supersubstorms (SSSs) revealed distinct GIC origins: night-sector GICs during the first SSS were linked to its polar edge, while day-sector GICs during the second SSS were caused by eastward electrojet intensifications tied to SSS development in the night sector. The largest GIC peaks (~50–62 A) resulted from the superposition of multiple sources, including substorms, Pc5/Pi3 pulsations, and local magnetic disturbance caused by solar wind pressure jumps. This study highlights the complicity of geomagnetic sources of GICs, showing that GIC intensity does not scale linearly with substorm strength. However, intense substorms, such as SSSs, can enhance GICs even in the daytime MLT sector.

Global Observations of the 10 May 2024 Geomagnetic Storm

D.G. Sibeck

Heliophysics Division, NASA/GSFC, Greenbelt, MD

The 10 May 2024 geomagnetic storm was the most intense to have occurred since 2003. High solar wind pressures and strong southward interplanetary magnetic field orientations moved the dayside magnetopause earthward to a location within 4.3 R_E from Earth. In this presentation, we examine the capability of global magnetohydrodynamic models to predict the location of the magnetopause, and the strength of field-aligned currents. Next we examine sluggish reconnection outflow events at the dayside magnetopause, the occurrence of substorm onsets deep within the near-Earth nightside magnetotail, the occurrence of a new third energetic electron radiation belt in the slot region, enhanced orbital drag on low-altitude spacecraft, an abrupt increase in the total electron content, aurora, and enhanced ionospheric convection over the eastern United States, and the appearance of aurora over Mexico.

Comparative characteristics of nighttime auroral precipitation under extreme levels of magnetic activity

V.G. Vorobjev¹, O.I. Yagodkina¹, E.E. Antonova^{2,3}

¹*Polar Geophysical Institute, Apatity, Murmansk Region, Russia*

²*Skobel'syn Institute of Nuclear Physics, Moscow State University, Moscow, Russia*

³*Space Research Institute Russian Academy of Science, Moscow, Russia*

Observations from DMSP F9 spacecraft in the pre-midnight MLT sector were used to examine latitudinal profiles of auroral ion and electron precipitation during magnetic calm and in the time of giant magnetic storm on March 13-14, 1989. To compare the characteristics of the precipitation, the position of the maximum energy flux (F_i) of precipitating ions was used. The latitude of the maximum F_i is considered as the equatorial boundary of isotropic auroral precipitation (BIP). The characteristics of both ion and electron precipitation were analyzed in terms of the ion pressure (P_i) and the intensity of 557.7 nm emission (I_{5577}) correspondingly. The average energy of precipitating particles in the area of auroral precipitation changed insignificantly, so latitudinal profiles of P_i and I_{5577} are similar to the that of F_i and F_e , respectively. The maximum of P_i almost exactly coincides with the position of the BIP. Under calm geomagnetic conditions, BIP is usually observed at corrected geomagnetic latitudes of $65^\circ \pm 1^\circ$ CGL, and the P_i -max value is approximately 0.5 - 1.0 nPa. With increasing magnetic activity, the BIP shifted equatorward and about at the maximum of the magnetic storm on March 14, 1989 ($Dst = -583$ nT, $AL = -551$ nT) was observed at the latitude $\Phi'_{BIP} = 50.2^\circ$ CGL with a level of P_i -max = 20.0 nPa. The latitudinal position of the P_i -max with correlation coefficient $r = 0.81$ described by the regression equation $\Phi'_{BIP} = 66.46 - 0.0055|AL| - 5.43 \cdot 10^{-7} AL^2 + 0.026 Dst$. The value of P_i -max shows a distinct tendency to increase with decreasing of latitude.

The method of epoch superposition relative to the BIP was used to construct average latitudinal profiles of ion and electron precipitation for the F9 spacecraft passes in which the BIP position was observed at latitudes $\Phi'_{BIP} < 55.0^\circ$ CGL (10 passes). For these passes the average level of magnetic activity was: $Dst = -320$ nT, $AL = -790$ nT; average latitude $\Phi'_{BIP} = 52.9^\circ$ CGL, $MLT = 22.0$, average P_i -max = 10.0 nPa. The position of the poleward boundary of auroral precipitation in these passes experienced significant variations in the range of about $64^\circ - 80^\circ$ CGL with an average value of $\Phi'_{BIP} = 71.0^\circ$ CGL. Electron precipitation exhibit several maxima in 557.7 nm intensity of about 10-12 kR in the latitude range from BIP to about 60° CGL, in the region of negative ion pressure gradient maximum.

ISTP SB RAS experimental facilities: current state and future of the study of space weather extreme events on the Earth's ionosphere

Yu.V. Yasyukevich

Institute of solar-terrestrial physics SB RAS, Irkutsk, Russia

Space weather significantly impacts on human technological infrastructure: the more we domesticate near-Earth space, the more we need accurate information about it. Institute of Solar-terrestrial Physics SB RAS (ISTP SB RAS) has set up a multi-instrument complex to study near-Earth space and is deploying unique project of the National Helio-geophysical Complex of the Russian Academy of Sciences. The talk will show (on behalf of the large ISTP SB RAS collaboration) new facilities of the complex and its potential to study the effects of space weather events using the example of the May 2024 magnetic storm.

Связь динамики потоков частиц кольцевого тока и внешнего радиационного пояса Земли во время двух магнитных бурь 2015 года

К.Ж. Азра-Горская^{1,2*}, В.В. Калегав^{1,2}, Н.А. Власова¹

¹НИИЯФ МГУ, г. Москва, Россия

²Физический факультет МГУ

*E-mail: clemenceanastasia@gmail.com

Представлены результаты исследования динамики частиц кольцевого тока и внешнего радиационного пояса Земли. Анализ проведен на примере двух магнитных бурь 17-18 марта 2015 г. и 22-23 июня 2015 г., которые близки по интенсивности и по длительности, но вызваны разными условиями в солнечном ветре. Событие 17-18 марта вызвано плавным возрастанием импульса давления солнечного ветра и развивалась на главной фазе преимущественно при южном направлении межпланетного магнитного поля, что привело к традиционному развитию магнитной бури с мощными суббуревыми инжекциями. Буря 22-23 июня вызвана внезапным экстремально-сильным воздействием солнечного ветра, преимущественно при северном направлении ММП. Разные условия в межпланетной среде привели к разной динамике магнитосферных токовых систем во время рассматриваемых геомагнитных возмущений.

Экспериментальные данные измерений получены на борту космических аппаратов Van Allen Probes на основе приборов REPT, HOPE и EMFISIS. По спутниковым данным восстановлены вариации магнитосферного магнитного поля путем вычитания внутриземного магнитного поля из данных измерений.

Временное развитие пространственных профилей потоков низкоэнергичных протонов с энергиями ~50 кэВ в разных секторах магнитосферы показало два разных механизма формирования кольцевого тока: за счет суббуревых инжекций, ведущих к постепенному формированию кольцевого тока, и за счет сжатия магнитосферы под действием экстремального импульса давления солнечного ветра.

Сопоставление профилей магнитосферного магнитного поля, инжектированных потоков протонов и электронов показали согласованную динамику кольцевого тока и электронов внешнего радиационного пояса Земли во время обеих магнитных бурь. Вариации магнитного поля, вызванные развитием кольцевого тока, привели к изменениям в потоках электронов радиационного пояса.

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

Статистический анализ возможных триггерных механизмов для возникновения геомагнитных суббурь

Н.А. Бархатов¹, С.Е. Ревунов¹, О.М. Бархатова², В.Г. Воробьев³, Е.А. Ревунова², О.И. Ягодкина³

¹*Нижегородский государственный педагогический университет им. К. Минина, Нижний Новгород, Россия*

²*Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, Нижний Новгород, Россия*

³*Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия*

Работа посвящена статистическому анализу факторов, влияющих на возникновение изолированных геомагнитных суббурь в магнитосфере Земли, вызванных воздействием солнечного ветра. При этом выявляются триггерные механизмы, запускающие геомагнитные суббури. Результаты такого исследования важны для прогнозирования в области безопасности КА, навигационных систем и наземных коммуникаций.

Материалом для исследования послужили изолированные суббури, отобранные по вариациям минутных значений индекса AL за зимние сезоны с 1995 г. по 2012 г. Отбор суббурь проводился визуально по суточным вариациям AL индекса. Было использовано 106 изолированных суббуревых событий различной интенсивности, каталог которых представлен на страницах (<http://pgia.ru/lang/en/data/>). Данные по индексам магнитной активности и по параметрам межпланетной среды с разрешением в 1 мин взяты на портале OMNI Web (<http://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>).

Оценка эффективности возможных триггеров выполнена по распределению значений коэффициентов корреляции между конкретным параметром (B_x , B_y , B_z , E_{kl} , F_{mp} , N , P , PC , SYM/H , V) и AL-индексом для отобранных событий. Интервал расчета корреляции выбран по данным [Воробьев и др., 2016] и соответствует фазе зарождения суббури. Выяснилось, что для большинства параметров статистическое распределение наблюдается вблизи нуля, но для некоторых имеет место отклонение, что свидетельствует о значимости этих параметров для фазы развития суббури. Например, для индекса PC наблюдается заметная группировка в зоне высокой антикорреляции, для SYM-H – группировка в зоне высокой корреляции.

Действительно, известно, что суббури начинаются с перераспределения токов и плазмы в магнитосфере и PC-индекс фиксирует эти изменения в электродинамических процессах в полярных областях. В связи с этим, он может быть использован в качестве предиктора суббури. Увеличение значений PC-индекса перед суббурей может указывать на начальную фазу накопления энергии в магнитосфере перед её разрядкой в виде суббури [Бархатов и др., 2017]. SYM-H, в отличие от PC-индекса, лучше отражает глобальные изменения в магнитосфере. Установлено, что во время суббурь SYM-H может демонстрировать незначительные колебания, но сильные отклонения обычно связаны с крупными бурями, когда энергия перераспределяется по всей магнитосфере.

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

2. Бархатов Н.А., Воробьев В.Г., Ревунов С.Е., Ягодкина О.И. Проявление динамики параметров солнечного ветра на формирование суббуревой активности // *Геомагнетизм и аэрономия*. Т. 57. №3. С. 273–279. 2017.

Определение требований к системе мониторинга геоиндуцированных токов в электрических сетях

В.В. Вахнина, А.А. Кувшинов, А.Н. Черненко, Р.Н. Пудовинников, О.В. Федяй

Тольяттинский государственный университет, Тольятти, Россия

Показано, что для оценки устойчивости электрической сети к воздействию геомагнитных бурь достаточно осуществлять мониторинг геоиндуцированных токов в критических узлах, количество которых определяется топологией электрической сети и наличием в этих узлах силовых трансформаторов с броневой или бронестержневой магнитной системой. Для мониторинга геоиндуцированных токов в нейтрали силового трансформатора необходимо использовать измерительный преобразователь прямого усиления с элементом Холла, допустимая перегрузка которого достаточна для безопасного протекания тока однофазного короткого замыкания. Допустимая перегрузка измерительного преобразователя тока должна допускать возможность протекания токов однофазного короткого замыкания в течение $4\div 5$ периодов сетевого напряжения, предельная величина которого определяется паспортными параметрами силового трансформатора. Обоснован выбор предела преобразования измерительного преобразователя с элементом Холла, который должен осуществляться не только с учетом ожидаемой величины геоиндуцированных токов, но и токов гармонических составляющих нулевой последовательности, определяемых степенью несимметрии и несинусоидальности фазных напряжений в узле включения силового трансформатора.

Пространственное распределение авроральных высыпаний и сбоев в работе железнодорожной автоматики

Я.А. Сахаров¹, Н.В. Ягова², В.А. Пилипенко², О.И. Ягодкина¹, А.М. Мерзлый³

¹*Полярный геофизический институт, Мурманск, Россия*

²*Геофизический центр РАН, Москва, Россия*

³*ИКИ РАН, г. Москва, Россия*

Исследована связь между возмущениями космической погоды и пространственным распределением сбоев в работе железнодорожной автоматики на участках Северной и Октябрьской железных дорог в 2001–2006 гг. Во время наиболее сильных магнитных бурь, вызвавших сбои в работе железнодорожной автоматики, рассматриваются широтное распределение потока энергии авроральных электронов и локальная геомагнитная возмущенность. Показано, что смещение к югу экваториальной границы аврорального овала коррелирует с ростом доли сбоев на более низкоширотных участках железных дорог.

Сахаров Я.А., Ягова Н.В., Пилипенко В.А., Ягодкина О.И., Гаранин С.Л. Пространственное распределение авроральных высыпаний и сбоев в работе железнодорожной автоматики на севере европейской части России. *Солнечно-земная физика*. 2024. Т. 10, № 4. стр. 114–121. DOI: 10.12737/szf-104202412.

Анализ потоков энергичных протонов под РПЗ на ранней фазе развития кольцевого тока

А.В. Суворова

Научно-исследовательский институт ядерной физики МГУ, г. Москва, Россия

Интенсивность потоков захваченных частиц внутреннего радиационного пояса Земли (РПЗ) резко падает на его внутренней кромке, которая расположена на дрейфовой оболочке $L \sim 1.2$. Фоновые потоки энергичных (до нескольких сотен кэВ) электронов и протонов под внутренней кромкой РПЗ ($L < 1.2$) не превышают в спокойных геомагнитных условиях 10^2 частиц на ($\text{см}^2 \text{ с ср}$). Внутренняя кромка РПЗ формируется на высотах, где становятся существенны потери частиц из-за эффективного рассеяния в плотной атмосфере, а также из-за наличия области слабого магнитного поля в Южно-Атлантической аномалии. Постоянные измерения (с 1998 г.) потоков энергичных частиц на низкоорбитальных спутниках NOAA/POES позволили обнаружить внезапные возрастания потоков энергичных (30-300 кэВ) электронов под РПЗ. Время существования частиц на низких L (т.е. $L < 1.2$) ограничено временем, не превышающим один период азимутального дрейфа, который зависит от энергий частиц (для кэВ-ных энергий составляет часы). В работе [Suvorova et al., 2012] для объяснения этого явления был предложен механизм быстрого радиального транспорта, суть которого заключается в электрическом дрейфе, не зависящем от знака заряда частицы. Опуская пока вопросы, связанные с природой и проникновением электрического поля на столь низкие L оболочки, следует отметить, что обнаружить однозначные признаки возрастания потоков энергичных протонов не удавалось. На неудачи предыдущих поисков могли повлиять ряд факторов: протоны с электронами дрейфуют по азимуту в противоположных направлениях и маловероятно зарегистрировать их на одном спутнике одновременно, относительно низкий поток кэВ-ных протонов в спокойном РПЗ и высокий поток, связанный с развитым кольцевым током, широкий локальный сектор ЮАА также мог влиять на результат. В данной работе проводится анализ пространственно-временных характеристик возрастаний интенсивностей потоков протонов на ранних стадиях магнитных бурь в тех событиях, когда наблюдались возрастания энергичных электронов. На основе анализа делаются оценки времени начала быстрого транспорта энергичных частиц и секторов локального времени, где он происходит.

Повышение точности измерений геоиндуцированных токов в высоковольтных линиях электропередач на примере энергетической сети Республики Алтай

Е.О. Учайкин¹, А.Ю. Гвоздарев², П.Б. Бородин³

¹*Горно-Алтайский государственный университет, Горно-Алтайск, Россия*

²*Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН,
с. Паратунка Камчатского края, Россия*

³*Институт геофизики им. Ю.П. Булашевича УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия*

Для измерений геоиндуцированных токов в заземленной нейтрали трансформатора энергосистемы 110 кВ Республике Алтай был разработан датчик тока на основе клещей с разрешением 1мА, что позволило зарегистрировать ГИТ не только во время сильных магнитных бурь 2024 года, но и в спокойных геомагнитных условиях.

За основу измерительного комплекса были взяты стандартные токовые клещи минимального диаметра D-338 и в них были заменены холловские датчики магнитного поля на SS495 с аналоговым выходом. Оси датчиков направлены в одном направлении, чтобы при вычитании сигнала компенсировался температурный дрейф и внешние магнитные поля. Такой подход очень важен, так как измерения проводились в полевых условиях, среди большого количества металлоконструкций подстанции. Следует отметить, что и сам заземляющий проводник нейтрали, на котором проводились измерения, выполнен из стали. Также в токовые клещи был встроен прецизионный термометр ТС1047, для выполнения последующей термокоррекции измерений путем вычитания температурной зависимости из данных. На практике наличие гистерезиса в температурной зависимости показаний датчика тока и сильное изменение температуры в течение суток потребовало обработки данных в 15-минутных окнах с компенсацией тренда полиномом второго порядка.

Аналоговые выходы датчиков подключены к разработанному регистратору напряжения на основе прецизионного 24х битного АЦП AD7734. Привязка к времени UTC измерений производится с помощью GPS модема. Запись данных производилась на SD флэш карту. Клещи устанавливались на шину заземления силового трансформатора 110/10 кВ 2.5 МВА на подстанции «Ининская».

Мониторинг осуществлялся с 15 апреля по декабрь 2024 г. Максимальный ток, который был зафиксирован во время экстремальной бури 10 мая 2024, составил 1А. Типичный ток в время средних бурь с индексом $K_p=6$ имеет значение порядка 100 мА. Такие небольшие токи обусловлены тем, что система высоковольтного электроснабжения (110 кВ) Республики Алтай находится в средних широтах, кроме того, активное сопротивление ЛЭП и первичных обмоток силовых трансформаторов достаточно велико. С другой стороны, удельное сопротивление подстилающих пород также достаточно велико, так местность, где проходят ЛЭП, гористая, и это в целом понижает величину ГИТ.

Благодаря высокому разрешению измерений удалось верифицировать математическую модель, которая предсказывает величину ГИТ на основе данных магнитной станции «Байгазан», находящейся на территории Алтайского заповедника. Кроме того, за счёт высокого разрешения в составе ГИТ были обнаружены переменные составляющие, наведённые от микропульсаций $P_{с3}$ и P_{i2} , наблюдавшиеся даже в относительно спокойных геомагнитных условиях.

Данная работа посвящена одному подходу разработки высокоточного амперметра на базе токовых клещей для измерения ГИТ в нейтралах силовых трансформаторов.

Ключевые слова: магнитные бури, геоиндуцированные токи, датчик тока, прецизионные измерения.

Проявление флуктуаций навигационных сигналов ассоциированных с полярными сияниями: событие 9 декабря 2020 года

И.И. Шагимуратов^{1*}, И.И. Ефишов¹, М.В. Филатов²

¹*Калининградский филиал ИЗМИРАН, г. Калининград, Россия*

²*Полярный Геофизический Институт, г. Апатиты, Россия*

*E-mail: *shagimuratov@mail.ru*

Проведён анализ сцинтилляций GPS сигналов, связанных с полярными сияниями, которые наблюдались на обсерватории Ловозеро 9 декабря 2020 года. Показана прямая связь сцинтилляций с дискретными формами полярных сияний. В качестве индикатора сцинтилляций использованы индексы ROT/ROT_I. Выявлено пространственно-временное соответствие кратковременных всплесков в вариациях ROT при прохождении GPS сигналов через дискретные формы полярных сияний. Результаты свидетельствуют, что индексы ROT/ROT_I, полученные из стандартных 30 сек. GPS наблюдений могут быть использованы в качестве индикатора наличия сияний, в случаях, невозможности их регистрации оптическими средствами.

Проявление поляризационного джета и ассоциированные с ним неоднородности по ТЕС измерениям во время магнитной бури 18 марта 2018 года

И.И. Шагимуратов^{1*}, Г.А. Якимова¹, И.И. Ефишов¹, М.В. Филатов²

¹*Калининградский филиал ИЗМИРАН, г. Калининград, Россия*

²*Полярный Геофизический Институт, г. Апатиты, Россия*

*E-mail: *shagimuratov@mail.ru*

Поляризационный джет (ПД) или Subauroral Ion Drift (SAID) проявляется как узкая по широте область быстрого ионного дрейфа направленного в западном направлении на высотах F области. ПД располагается на экваториальной границе диффузных высыпаний в субавроральной ионосфере и связан с среднеширотным провалом. В большей части ПД выявлен по спутниковым наблюдениям. В работе впервые показано проявление ПД в вариациях ТЕС. Поляризационный джет выявлен во время слабой бури 18 марта 2018 года ($Dst \sim 45nT$). Джет был ассоциирован с глубоким провалом, который проявился на картах ТЕС в европейском секторе. Ширина провала по широте составляла менее 5 градусов, величина ТЕС в провале составляла 1.0-1.5 TECU. Провал регистрировался в интервале 22-02 MLT на широтах 55-57°MLAT. Впервые в структуре ПД выявлены неоднородности ТЕС, которые проявились в усилении интенсивности сцинтилляций GPS сигналов.

Мульти-спутниковые исследования межпланетных ударных волн 10 мая 2024 года и магнитосферного отклика на них

А.О. Ширяев¹, К.Ж. Азра-Горская^{1,2}, А.А. Вахрушева^{1,2}, К.Б. Капорцева^{1,2},
А.С. Лаврухин¹, Д.В. Невский^{1,2}, С.А. Оганов²

¹*НИИЯФ МГУ*

²*Физический факультет МГУ*

В работе произведено исследование распространения межпланетных ударных волн, которые привели к значительным геомагнитным возмущениям 10 мая 2024 года ($Dst_{min} = -406$ нТл), а также ассоциированных с ними солнечных источников. Произведён анализ угла распространения и скорости фронта ударной волны с учётом положений спутников, на которых она была зарегистрирована, и приведены данные параметров межпланетной среды в этих точках. В работе использованы данные спутников ACE, WIND, CLUSTER, STEREO, THEMIS. Рассмотрена динамика магнитопаузы по данным пересечений КА и ее отклонения от модельной поверхности. Рассмотрены вклады кольцевого тока и токового слоя хвоста магнитосферы в измеряемый во время бури SYM-H индекс при помощи параболической модели магнитосферы Земли.

Study of plasma jets formation in a transverse magnetic field on the laser-plasma facility KI-1

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

ILP SB RAS, Novosibirsk, Russia; e-mail: chibranov2013@yandex.ru

A series of experiments on the formation of collimated plasma jets into a transverse magnetic field, including in a counter configuration, were conducted on the KI-1 setup [1, 2]. For this purpose, flat polyethylene targets located at a distance of $L \approx 1$ m from each other were irradiated with CO₂ laser pulses with an energy of $E = 100$ J and a duration of $\tau = 100$ ns, generating laser plasma flows with an initial energy of $E_0 \approx 32$ J, a velocity of $V_0 = 250$ km/s and a total number of particles of $N \approx 1.3 \cdot 10^{18}$, expanding into a transverse magnetic field of $B_0 = 340$ G. The measurements were carried out using a system of combined magnetic and electric probes, as well as using photo recording systems. The obtained data demonstrated that when a plasma flow expands from a target into a transverse magnetic field, the plasma forms a collimated "sheet" structure with plasma spreading along the field and collimation across the field, which was also detected from the ultra-high-speed photography data. The flow extends over a distance of more than 1 meter, which is much greater than the ion gyroradius $R_L \approx 18$ cm in this experiment. When two plasma flows expand in a magnetic field, an interaction of two jets is observed in plasma glow photographs and probe measurements. The formation of a sharp compression front of the magnetic field with a high concentration and high-frequency oscillations ($\nu \approx 1$ MHz) of the main component of the magnetic field were also detected. Thus, the experiments made it possible to determine the features of the dynamics of directed plasma flows in a transverse magnetic field, including in the case of a counter configuration.

The work was supported by the Russian Science Foundation grant № 24-62-00032, <https://rscf.ru/project/24-62-00032/>.

1. Y.P. Zakharov et al. // *AIP Conference Proceedings*. – *American Institute of Physics*, **369**, № 1, p. 357-362, (1996).
2. I.F. Shaikhislamov et al. // *Plasma Physics and Controlled Fusion*, **56**, № 12, p. 125007, (2014).

Statistical model of the plasmasphere electron density taking into account the discrepancy between the magnetic and geographic poles

D.V. Chugunin¹, G.A. Kotova¹, M.V. Klimenko² and V.V. Klimenko²

¹*Space Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radiowave Propagation, West Department, Russian Academy of Sciences, Kaliningrad, Russia*

The work is devoted to the creation of a statistical model of plasma density in the plasmasphere for L-shells in the range from 2 to 4. The model takes into account the dependence on geographic longitude, which is caused by the mismatch of geographic and magnetic poles. Despite the fact that the magnetosphere is mainly described by magnetic coordinates, its filling with ionospheric plasma is also affected by the difference in the illumination of the base of the magnetic field lines. This model uses measurements of the electron density on the ERG satellite. Only long quiet periods were selected for the study, during which the magnetic tubes had time to fill with plasma to diffusion equilibrium. It is shown that for the same geomagnetic coordinates, the plasma density in the plasmasphere depends on geographic longitude. This dependence is also studied for different seasons.

Numerical simulations of magnetic reconnection in SPERF-AREX device (Harbin Institute of Technology)

A.V. Divin¹, V.S. Semenov¹, S.V. Apatenkov¹, I.P. Paramonik¹, D. Zhong¹, A. Mao², X. He², S. Liu², X. Wang²

¹*Saint-Petersburg University, 199034, Russian Federation; e-mail: a.divin@spbu.ru*

²*Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001, People's Republic of China*

In this study we present results of three-dimensional PIC simulations of the laboratory magnetosphere dynamics in the Space Plasma Environment Research Facility (SPERF, Harbin, China). Magnetosheath plasma is formed by ionization of background gas and moves when the magnetic flux is pumped by large, 2m-diameter MS coils. This approach allows setting the required magnetic field and plasma drift velocity. The calculations are performed by the parallel code iPIC3D, which implements a semi-implicit Particle-in-Cell method. The main improvement in the presented model of the AREX (Asymmetric REConnection) experiment was the addition of a new module with an internal boundary condition; the plasma in the computational domain moves self-consistently by changing the current in the main MS coils. The study analyzes the signatures of magnetic reconnection on kinetic scales of the order of the electron gyroradius, with parameters typical for the asymmetric dayside reconnection in the AREX-SPERF experiment. The configuration of the current sheet in the diffusion region is studied; appearance of a region with electron jets and significant non-gyrotropy and a magnetic Hall field is shown. We apply the **FOTE** (First-Order Taylor Expansion) method to analyze the magnetic topology and detect an X-line on the dayside. It is shown that the **FOTE** method will allow us to isolate the passage of the null points and reconnection region vicinity in the experimental data.

The work was supported by the Russian Science Foundation, project No. 23-47-00084 "Magnetic Reconnection in Space and Laboratory Plasmas: Computer Simulations and Empirical Modeling".

Energetic Electron Transport Driven by Drift-Orbit Bifurcation

S.R. Kamaletdinov, A.V. Artemyev

Space Research Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;

Department of Earth, Planetary, and Space Sciences, University of California, Los Angeles, USA

Radial transport of energetic electrons is an important process responsible for the global variability of the outer radiation belt, resulting from a violation of the third adiabatic invariant and allowing electron motion between different drift orbits. Classical models typically invoke interactions with Ultra-Low Frequency (ULF) waves, which scatter electrons in the third adiabatic invariant, leading to their slow radial diffusion. While this classical diffusive framework captures key aspects of radiation belt dynamics, event-specific modeling often necessitates going beyond classical diffusion. The Drift-Orbit Bifurcation mechanism, also referred to as the Shabansky effect, has recently gained attention as a prospective driver of electron transport in the outer radiation belt and near the dayside magnetopause. It arises from the compression of dayside magnetic field lines by the impinging solar wind, leading to the formation of an equatorial maximum in the magnetic field strength. Electrons with sufficiently small equatorial pitch angles cannot overcome this maximum and become trapped northward or southward of the magnetic equator, violating the second adiabatic invariant and rendering the third adiabatic invariant undefined, thus opening the drift orbit and allowing for radial transport. The classical picture of drift-orbit bifurcation assumes a North-South and East-West symmetric magnetic field configuration; however, recent studies have shown that breaking these symmetries—through a nonzero dipole tilt and a nonzero IMF B_y —allows for much more efficient scattering and transport. In this work, an event study observed by NASA's THEMIS spacecraft is performed, where the formation of an isolated energetic (>30 keV) electron peak is observed near the magnetopause. Test-particle simulation in the guiding center approximation demonstrates that drift-orbit bifurcation under asymmetric magnetospheric conditions—i.e., a nonzero dipole tilt and significant IMF B_y —can result in the formation of isolated maxima in the radial profiles of >30 keV electrons, providing valuable insight into the longstanding problem of energetic electron enhancement events observed near the magnetopause.

Inner magnetosphere field line curvature estimates. First results

G.R. Kokhan, S.V. Apatenkov, V.A. Sergeev

Earth Physics Department, Saint Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

An important mechanism for energetic electron losses in the outer radiation belts is the field line curvature scattering. A particle magnetic moment is not conserved in the areas where the gyroradius is comparable with field line curvature. This causes pitch angle chaotic transformations and a particle may reach loss cone. So to estimate the field line curvature in the equatorial regions of the outer magnetosphere is an important task.

Based on CLUSTER magnetic field data we select the intervals when the pairs of spacecraft cross the neutral sheet (NS). To get the NS location and local coordinates we use TAG-14 model of NS. We test the two-dimensional approach using only two observation points and linear gradient estimates. The four Cluster spacecraft provide us three subsequent passes through NS so we can investigate the evolution of the field line curvature as well as apply some test of the method. We present the first results, discuss the method applicability and compare the observed curvature radius with relativistic electron gyroradii.

Jovian magnetopause boundary layer according to Galileo and Juno data

A.S. Lavrukhin, I.I. Alexeev

Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics M.V. Lomonosov Moscow State University (SINP MSU),
Moscow, Russian Federation

Using magnetic field, plasma waves and charged particles data from Galileo and Juno data we investigate properties of Jovian magnetopause boundary layer at dawn, dusk and dayside magnetosphere. We compare its properties with magnetosheath and nearby magnetosphere regions and compare magnetometer measurements with magnetic field model of magnetosphere and magnetosheath with a magnetopause of finite thickness (Alexeev, 1986; Alexeev et al., 2003).

1. Alexeev, I.I. (1986), The penetration of interplanetary magnetic and electric fields into the magnetosphere, *J. Geomagn. Geoelectr.*, 38, 1199–1221.
2. Alexeev, I.I., E.S. Belenkaya, S.Yu. Bobrovnikov, and V.V. Kalegaev (2003), Modelling of the electromagnetic field in the interplanetary space and in the Earth's magnetosphere, *Space Sci. Rev.*, 107, 7–26.

A new approach to data analysis of trapped radiation in the inner radiation belt

V.V. Malakhov¹, A.A. Leonov^{1,2}, A.G. Mayorov¹, S.A. Rodenko¹

¹*National Research Nuclear University "MEPhI", Moscow, Russia*

²*Lebedev Physical Institute, Moscow, Russia*

One of the everlasting problems of data analysis in the Earth inner radiation belt is quite large discrepancies between different measurements of trapped fluxes, as a result different models based on those measurements also give different results. At some geomagnetic areas the discrepancies reach up to two orders of magnitude. The most affected regions are low drift shell ($L < 1.2$) and high particles' energies (for protons $E > 400$ MeV). Qualitatively it is usually explained by a high gradient of fluxes at low drift shells, temporal variation of magnetic field, that instruments took measurements in different periods of time and the simplicity of many old instruments. But there is a lack of quantitative analyses of these factors.

We suppose that the main reason why these factors affect the data analysis is in simplified definition of geomagnetic parameters (mostly L-parameter). The point is that a value of L attributing to registered particles is usually calculated at the point of registration, while strictly speaking it should be taken the particles gyrocenter. In the latter case, particles of different energies and coming to the instrument from different directions should be attributed with different values of L. At the region of high gradient of fluxes ($L < 1.20$) and high particle energies ($E > 100$ MeV) it results in the fact that an instrument in such regions actually registers a mixture of different geomagnetic areas (with different fluxes), and the real composition depends on the instrument position and orientation in space and instrument's field of view (FoV).

In the report, we will present such an analysis made for the PAMELA spectrometer for protons with energy range from 65 MeV to 3 GeV covering the part of its orbit with local drift-shells $L < 3.0$. Our analysis showed that even for limited region of the inner radiation belt available for the spectrometer, the mixture of different geomagnetic regions within its FoV vary significantly as for different orbit as along one orbit. Such analysis if made for other instruments can not only explain the observed discrepancies in the measurements in these areas but provide a tool for their calibration.

Magnetospheric Structure and Dynamics Inferred from Low-Altitude Spacecraft Observations

V.A. Sergeev¹, M.V. Kubyshkina¹ and A.V. Artemyev²

¹*Institute of Physics, University of St-Petersburg, St-Petersburg, Russia*

²*Space Research Institute, RAS, Moscow, Russia*

Understanding of Magnetosphere-Ionosphere coupling is difficult because the (magnetospheric) cause and (ionospheric) consequence should be individually observed by spacecraft in each region, but mapping between these regions is rather uncertain. Using remote sensing of the magnetosphere from ionosphere (based on isotropic precipitation due to curvature-scattering in the magnetospheric current sheet, FLCS) together with measurements of auroras, particle spectra and FACs in the ionosphere made on each of nine nano-satellites of CINEMA project (now in preparation) provides a great chance to advance in solving these problems. In this talk we briefly show some results obtained as a preparation for this project based on energetic particle observations from ELFIN and POES missions. Particularly we show how the remote sensing can be tested, which different categories of the Isotropy Boundary patterns can be expected (and are observed) in the magnetosphere/ionosphere from existing magnetospheric models, and also discuss some processes which can make difficult to infer true FLCS boundaries. The observations suggest an abundance of non-trivial tail current sheet structures or a mixed contribution of two different mechanisms in the vicinity of IBe in these cases.

Investigating Large-Scale Electric Structures During Geomagnetic Storms in Earth's Radiation Belts Using Electric Field and Potential Difference Data from RBSP Satellites

Mohammad Reza Shafizadeh¹, Behnam Babaeian²

¹*M.Sc. Formerly at University of Zanjan, Physics Faculty, Iran*

²*Friedrich-Alexander-Universität-Erlangen-Nürnberg, Germany*

This study investigates large-scale electric structures within Earth's radiation belts during geomagnetic storms. The primary objective is to identify and characterize large-scale electric double layers in the near-Earth space environment. We hypothesize that such structures may persistently exist around Earth, and this research serves as a critical step toward understanding their formation and behavior under extreme solar activity. Using electric field and potential difference data from the EFW (Electric Field and Waves) instrument aboard the RBSP (Van Allen Probes) satellites, we analyzed periods of intense geomagnetic storms. The data were processed using Fast Fourier Transform (FFT) techniques to reduce noise and identify large-scale double-layer structures. Our results demonstrate the presence of large-scale electric double layers in the radiation belts during geomagnetic storms. These findings provide a foundation for future investigations, where we aim to explore whether these structures exist consistently in the near-Earth space environment, even during quiet periods. This research contributes to a deeper understanding of electric structures in space and their implications for space weather dynamics.

Research of radiation conditions using KODIZ and KODIZ-2 spectrometers for cubesats

I.A. Zolotarev¹, V.V. Benghin^{1,2}, G.I. Antonyuk^{1,3}, A.M. Sadikov^{1,3}, S.I. Svertilov³, V.V. Bogomolov³, V.I. Osedlo³

¹*SINP MSU, Moscow, Russia*

²*IBMP, Moscow, Russia*

³*MSU, Moscow, Russia*

The SINP MSU has been conducting radiation research using spectrometers on small spacecraft since 2022. The KODIZ device, a combined radiation detector, was launched in 2022 on the Monitor-1 satellite and contained a detector telescope, which made it possible to assess the possibility of creating ultra-small spectrometers. In 2024, the SUP – a universal proton spectrometer was launched as part of the Altair satellite and is currently undergoing flight tests. The KODIZ-2 instrument, which consists of three detector telescopes and a Cherenkov detector, is being prepared for future research on the Scorpion satellite. The sensitivity directions of the detector telescopes are directed orthogonally, which will make it possible to obtain information about the flux of trapped particles in the radiation belts and flux of precipitating particles. The semiconductor detectors in the telescopes are supplemented with a scintillation CsI detector, which made it possible to expand the energy range of registered protons to 80 MeV. The presence of a network of satellites with spectrometers in low Earth orbit will make it possible to create a system for operational monitoring of radiation conditions in low Earth orbit.

Исследования радиационных условий с помощью спектрометров КОДИЗ и КОДИЗ-2 для малых космических аппаратов

И.А. Золотарев¹, В.В. Бенгин^{1,2}, Г.И. Антонюк^{1,3}, А.М. Садыков^{1,3},
С.И. Свертилов³, В.В. Богомолов³, В.И. Оседло¹

¹НИИЯФ МГУ, Москва, Россия

²ГНЦ ИМБП РАН, Москва, Россия

³Физический факультет МГУ, Москва, Россия

В НИИЯФ МГУ на малых космических аппаратах проводятся исследования радиационной обстановки с использованием спектрометров начиная с 2022 года. Прибор КОДИЗ - комбинированный детектор излучения был запущен в 2022 г. на спутнике Монитор-1 и содержал телескоп детекторов, который позволил провести оценку возможности создания спектрометров сверхмалого размера. В 2024 году в составе спутника Альтаир был запущен прибор СУП спектрометр универсальный протонов и в данный момент прибор проходит летные испытания. Для будущих исследований на спутнике Скорпион подготавливается прибор КОДИЗ-2, который состоит из трех телескопов детекторов и черенковского детектора. Области чувствительности телескопов детекторов направлены ортогонально, что позволит получать информацию о потоках захваченных частиц в радиационных поясах и о потоках высыпающихся частицах. Полупроводниковые детекторы в телескопах дополнены сцинтилляционным CsI детектором, что позволило расширить энергетический диапазон регистрации протонов до 80 МэВ. Наличие на околоземной орбите сети спутников с спектрометрами позволит создать систему оперативного мониторинга радиационных условий на низкой околоземной орбите.

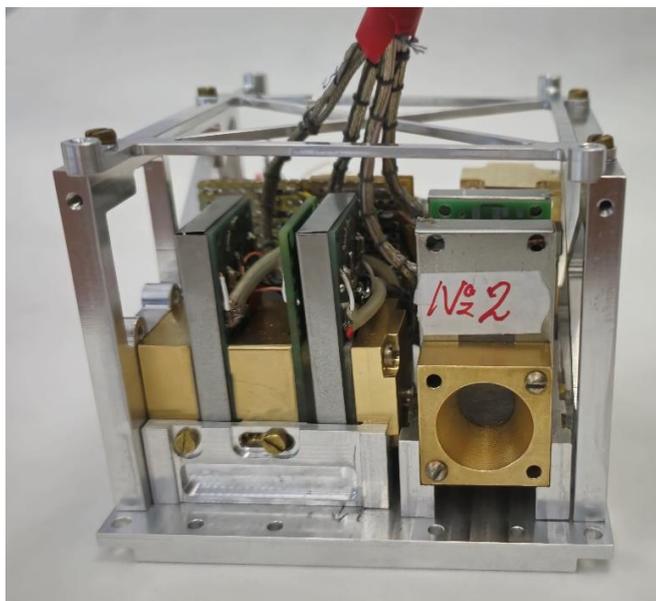


Figure 1. Detector telescopes of the KODIZ-2 device.

Рисунок 1. Телескопы детекторов прибора КОДИЗ-2.

Глобальная гибридная модель магнитосферы Земли

Ю.А. Кропотина, А.М. Быков

ФТИ им. А.Ф. Иоффе, г. Санкт-Петербург, Россия; e-mail: juliett.k@gmail.com

В настоящей работе представлена гибридная модель магнитосферы Земли реалистичного размера. Исследован процесс инжекции и ускорения протонов по механизму Ферми 1 порядка, выделены области ускорения для случая межпланетного магнитного поля, сонаправленного с потоком солнечного ветра. Показано, что результирующий спектр надтепловых частиц жестче, чем предсказывает классическая теория диффузионного ускорения. Исследованы траектории и пространственные распределения надтепловых частиц, выявлен диффузионный характер их распространения и оценены коэффициенты диффузии вдоль и поперек магнитного поля. Последние оказываются сопоставимы с бомовскими, а первые – примерно на порядок больше.

Определение области применимости траекторных расчетов в околоземном пространстве

П.А. Кручинин, С.А. Прошин, В.В. Малахов

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Решение уравнений движения заряженных частиц в моделях магнитного поля является стандартным методом решения для большого количества задач в околоземном пространстве. Однако всегда существует проблема оценки степени точности восстановленных траекторий. В отдельных областях такие расчеты считаются надежными, например, для частиц с жесткостью заведомо выше жесткости геомагнитного обрезания (ЖГО). В других областях – заведомо ненадежными, например, в зоне полутени геомагнитного обрезания (пенумбры). А в третьем случае (для захваченных в радиационных поясах частиц) точность зависит от продолжительности трейсинга.

В докладе будет предложен метод количественной оценки стабильности траекторных расчётов в разных областях пространства и жесткостей. Для этого проводилась трассировка частиц из разных областей пространства по 100 траекторий с одинаковыми исходными параметрами кроме начальных координат. Начальные координаты равномерно распределены в шаре радиусом 100 м вокруг установленной точки. Характеристикой стабильности траекторий мы считаем величину разброса траекторий через определённое число итераций.

Расчёты проводились для следующих областей: Пространство первичных космических лучей (разрешённая область полутени), область альбеда (запрещённая область полутени), центральная часть пенумбры, главная полоса пенумбры, а также зона захваченных частиц. Восстановление траекторий осуществлялось с помощью алгоритма трассировки частиц, реализованного в методе частица-в-ячейке по схеме Бунемана-Бориса.

В докладе будет представлен анализ полученных величин стабильности рассматриваемых областей.

Численная модель сверхтонкого электронного токового слоя в ближней части магнитосферного хвоста

О.В. Мингалев^{1,2}, П.В. Сецко¹, М.Н. Мельник¹, И.В. Мингалев¹,
Х.В. Малова^{3,4}, Е.Е. Григоренко⁴, Л.М. Зеленый⁴

¹Полярный геофизический институт, г. Апатиты (Мурманская обл.)

²Мурманский арктический университет, филиал в г. Апатиты (Мурманская обл.)

³Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына МГУ, Россия

⁴Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

Космические аппараты миссии MMS во время предварительной фазы магнитосферных суббурь регулярно обнаруживают в ближней части хвоста земной магнитосферы потоки электронов и создаваемый ими сверхтонкий токовый слой (СТС) с толщиной порядка десяти тепловых гирорадиусов электронов в долях хвоста выше и ниже слоя, и с максимумом электронного тока в пределах примерно 30 – 100 нА/м². Такие электронные СТС вложены в более толстый ионный тонкий токовый слой (ТТС), для которого максимальное значение плотности тока ионов обычно лежит в пределах 10 – 30 нА/м², а толщина по порядку равна нескольким тепловым гирорадиусам ионов на краю слоя.

В работе рассматривается численная самосогласованная численная модель стационарного токового слоя (ТС) с заданной нормальной компонентой магнитного поля, который состоит из ионного ТТС и вложенного в него еще более тонкого электронного СТС, с комбинированным описанием электронов, при котором в модели с помощью численного решения соответствующего стационарного уравнения Власова учитываются популяция пролетных протонов и популяция пролетных электронов, а популяция фоновых электронов с изотропным давлением и электростатические эффекты учитываются аналитически с помощью дрейфовой теории аналогично тому, как это сделано в аналитических моделях ТТС.

С помощью указанной модели получен набор самосогласованных по электронам стационарных конфигураций СТС, в которых профили ионных плотности тока и концентрации фиксированы и взяты из конфигурации чисто ионного ТТС с изотропными электронами. Полученные стационарные конфигурации сверхтонких электронных токовых слоев качественно и количественно хорошо соответствуют СТС, наблюдаемым по данным миссии MMS.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 23-12-00031.

Иерархический подход к определению числа кластеров и параметров GMM для функции распределения ионов

И.П. Парамоник¹, А.В. Дивин¹, И.В. Зайцев², Д. Чжун¹, В.С. Семенов¹

¹СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия; e-mail: igorparamonik@gmail.com

²Университет Хельсинки, г. Хельсинки, Финляндия

Функция распределение ионов по скоростям может иметь сложную структуру, содержащую ускоренные холодные пучки, сильно тепловые популяция (гало), тяжелые хвосты, особенности вида "полумесяц" и другие. Для задачи автоматического определения особенностей функции распределения, полученных в результате кинетического PIC-моделирования [1], себя хорошо показал метод Gaussian Mixture Model (GMM) [2], являющийся алгоритмом кластеризации. Однако, как и для многих других алгоритмов этого класса методов машинного обучение без учителя, отдельной проблемой остается определение оптимального числа кластеров. Слишком малое число компонент смеси может скрыть локальные особенности функции распределения, а слишком большое – найдет избыточное число структур, чтобы лучшим образом описать начальное распределение.

Для определения оптимального числа кластеров принято проводить несколько расчетов модели, варьируя количество компонент, а наилучшая модель из них выбирается с помощью метода локтя или информационного критерия Акаике (AIC) или Байеса (BIC). Однако не всегда результаты выбора модели этими методами дают приемлемое для нас разбиение, поскольку они не учитывают параметры найденных кластеров, а опираются лишь на значение функции логарифма правдоподобия, которая может сходиться к локальному экстремуму из-за наличия элемента случайности при инициализации итерационного алгоритма.

Поскольку мы имеем ряд моделей GMM с разным количеством кластеров для одного распределения, то можем обобщить информацию для всех компонент смеси из такой серии моделей, используя иерархический метод. Сравнивая отдельные компоненты друг с другом, объединяя их по мере уменьшения количества заданных кластеров, возможно визуализировать дерево связей и сказать, где разделение становится избыточным, тем самым упростить анализ функции распределения и подобрать оптимальное разложение. Результаты совмещения иерархического подхода и GMM, мы исследуем на примере синтетического тестового распределения и функции распределения ионов из PIC-моделирования.

1. Markidis S. and Lapenta G. "Multi-scale simulations of plasma with iPIC3D." *Mathematics and Computers in Simulation* 80.7 (2010): 1509-1519.
2. Dupuis R. et al. "Characterizing magnetic reconnection regions using Gaussian mixture models on particle velocity distributions." *The Astrophysical Journal* 889.1 (2020): 22.

Трассирование тестовых частиц в электромагнитных полях диамагнитной каверны

И.П. Парамоник¹, А.В. Дивин¹, А.А. Чибранов², М.С. Руменских², И.Ф. Шайхисламов², В.С. Семенов¹

¹СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия; e-mail: igorparamonik@gmail.com

²ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Диамагнитные каверны, создаваемые при сферическом расширении плазмы во внешнее магнитное поле остаются актуальными объектами для исследований, в том числе и в экспериментах с лабораторной плазмой [1]. Для сопровождения таких экспериментов на стенде КИ-1 [2] в Институте лазерной физики СО РАН (г. Новосибирск) была проведена серия 2D и 3D моделирований разлета облака плазмы со суб-альфвеновской скоростью в режиме слабо замагниченных ионов с помощью кинетического кода iPIC3D [3]. Результаты моделирования показали, что движение разных ионов облака (углерода C^+ / C^{4+} и водорода H^+) отличается, а сами компоненты разделены в пространстве. Для подробного исследования особенностей движения плазмы с различными ионными компонентами мы используем метод тестовых частиц и воспроизводим траектории в самосогласованных электрических и магнитных полях, полученных в PIC-моделировании.

1. Winske, D., Huba, J.D., Niemann, C., & Le, A. 2019 *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 51(5) 1-14
2. Zakharov Y.P. et al. // *Quantum Electronics*. – 2022. – Т. 52. – №. 2. – С. 155.
3. Markidis S. and Lapenta G. "Multi-scale simulations of plasma with iPIC3D." *Mathematics and Computers in Simulation* 80.7 (2010): 1509-1519.

Влияние солнечной активности на свойства высыпаний релятивистских электронов

Т.А. Попова, Т.А. Яхнина, А.Г. Демехов

ПГИ, г. Анапты, Россия

E-mail: tarkada@yandex.ru

Непрерывное многолетнее измерение серий спутников NOAA/POES (высота орбиты ~850 км) потоков заряженных частиц позволяет проанализировать влияние на их свойства геомагнитной и солнечной активности. Для исследования потоков релятивистских (> 700 кэВ) электронов были выбраны два периода - с низкой (2017 год) и высокой (2023 год) солнечной активностью. В качестве индекса солнечной активности взято полное месячное число солнечных пятен, усредненное за год по кривой, сглаженной с окном 13 месяцев (<https://www.spaceweatherlive.com/en/solar-activity/solar-cycle/historical-solar-cycles.html>) - 21 для 2017 и 125 для 2023. Регистрация высыпаний релятивистских электронов (ВРЭ) в окрестности обсерватории Ловозеро (68° с.ш., 35° в.д.) и сопряженной с ней области в Южном полушарии соответствует авроральной и субавроральной зоне, которая наиболее интересна проявлениями геомагнитной возмущенности. Окрестностью обсерватории считалась полоса шириной 75 градусов по магнитной долготе; эта область выбрана для сопоставления высыпаний с наземными наблюдениями ОНЧ волн и геомагнитных пульсаций Pc1. В полученных каталогах была проведена классификация событий по трем группам согласно критерию, представленному в работах [1, 2]. Высыпания каждой группы, в соответствии с этим критерием, имеют свой механизм формирования. Высыпания 1й группы связаны с нарушением 1го адиабатического инварианта вследствие малого радиуса кривизны силовых линий в ночном секторе [3]. Эти высыпания наблюдаются вблизи границы изотропии потоков энергичных электронов. ВРЭ 2й группы всегда наблюдаются одновременно с интенсивными высыпаниями энергичных (40-200 кэВ) электронов. По-видимому, они связаны с возбуждением ОНЧ волн. ВРЭ 3й группы, сопровождаемые высыпаниями энергичных (> 30 кэВ) протонов, связаны с ЭМИЦ волнами. Обсуждаются особенности плотности вероятности наблюдения ВРЭ и потоков захваченных и высыпающихся энергичных электронов в каждой из групп событий в зависимости от параметров солнечного ветра и геомагнитных условий (индексы Kp, Dst, AE) во время высокой и низкой солнечной активности.

1. Yahnin A.G., Yahnina T.A., Semenova N.V., Pashin A.B. Relativistic electron precipitation as seen by NOAA POES // *J. Geophys. Res. Space Physics*. 2016. V. 121, No.9. P. 8286-8299. <https://doi.org/10.1002/2016JA022765>
2. Yahnin A.G., Yahnina T.A., Raita T., Manninen J. Ground pulsation magnetometer observations conjugated with relativistic electron precipitation // *J. Geophys. Res. Space Physics*. 2017. V. 122, No.9. P. 9169-9182. <https://doi.org/10.1002/2017JA024249>
3. Sergeev V.A., Tsyganenko N.A. Energetic particle losses and trapping boundaries as deduced from calculations with a realistic magnetic field model // *Planet. Space Sci.* 1982. V. 30, No. 10 P. 999-1006. [https://doi.org/10.1016/0032-0633\(82\)90149-0](https://doi.org/10.1016/0032-0633(82)90149-0)

Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 22-62-00048).

Сценарий модуляции неструктурированных пульсаций герцового диапазона вариациями ММП

В.В. Сафаргалеев

Санкт-Петербургский филиал института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН, г. Санкт-Петербург, Россия.

Структурированные пульсации герцового диапазона типа «жемчужин» являются частым явлением и поэтому хорошо изучены. На магнитограммах «жемчужины» имеют вид серии волновых пакетов. Несмотря на изученность, вопрос о причинах такой модуляции остается дискуссионным. Менее изучен другой тип модулированных Pc1, представляющих на сонограммах последовательность бесформенных облаков без выраженной внутренней структуры (неструктурированные Pc1). На ранней стадии исследований неструктурированные Pc1 рассматривались, главным образом, в контексте реакции магнитосферы на удар по магнитопаузе фронта медленной ударной волны (sudden impulse, SI). В дальнейшем было показано, что SI не является необходимым условием генерации этого подкласса Pc1. В данной работе исследованы неструктурированные модулированные Pc1, наблюдаемые как до, так и после SI. Используя благоприятное положение спутников GEOTAIL и THEMIS, показано, что на спутнике внутри магнитосферы имеют место вариации давления, с которыми синхронизованы регистрируемые на земной поверхности «облака» неструктурированных Pc1 с периодом следования 12 минут. Вариации давления отсутствуют на спутниках в солнечном ветре. Вместо этого, спутники регистрируют вариации ММП того же периода. На основе наблюдений предложен сценарий явления.

Формирование пучков ионов в ходе ускорения магнитным бесстолкновительным пересоединением

D. Zhong, И.П. Парамоник, А.В. Дивин, В.С. Семенов

СПбГУ, г. Санкт-Петербург, Россия; e-mail: zdh97@outlook.com

В данной работе приведены результаты численного моделирования магнитного пересоединения с холодными ионами, а также исследуется характер ускорения частиц в ионной диффузионной области. Известно, что на сепаратрисах ионы эффективно ускоряются электрическим потенциалом перпендикулярно магнитному полю. При этом, толщина активных сепаратрис такова, что ионы размагничиваются и набирают энергию, обусловленную разностью потенциала. Рассмотрена модельная задача об изменении функции распределения ионов в том случае, если каждой частице при переходе сепаратрисы передается одинаковая энергия в заданном направлении. Изучено изменение формы функции распределения и её моментов (массовая скорость, температура) в зависимости от величины ускоряющего потенциала и параметров начального распределения. Предполагается, что такое преобразование приводит к уменьшению теплового разброса в ускоренном пучке и усложнению формы распределения и её разделению на несколько отдельных структур. Функции распределения в области вытекания проанализированы алгоритмом Gaussian Mixture Model (GMM) и показано, что такое простое преобразование способно формировать несколько гауссовых компонент из единого максвеллового начального распределения.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 23-47-00084 «Магнитное пересоединение в космической и лабораторной плазме: компьютерные симуляции и эмпирическое моделирование».

Особенности применения индексов геомагнитной активности в прикладных задачах мониторинга и прогноза космической погоды

Н.В. Ягова^{1,2}, Я.А. Сахаров^{2,3}, О.В. Козырева^{1,2}, В.А. Пилипенко^{1,2}, С.Л. Гаранин⁴

¹*ИФЗ РАН, Москва, Россия*

²*ГЦ РАН, Москва, Россия*

³*ПГИ, Апатиты, Россия*

⁴*ГЕОХИ РАН, Москва, Россия*

В прикладных задачах космической погоды традиционно, кроме внешних по отношению к магнитосфере параметров, прежде всего межпланетного магнитного поля и солнечного ветра, измеренных перед ударной волной, используются и индексы геомагнитной активности. Хотя физически эти параметры скорее должны относиться к выходным, но их использование оправдано наличием многолетних рядов данных и тем, что магнитосфера не полностью описывается набором внешних параметров.

Задачи мониторинга и основанного на нем краткосрочного прогноза таких потенциально опасных явлений как возбуждение геоиндуцированных токов (ГИТ) в наземных проводниках и возрастания потока быстрых электронов в магнитосфере, важна устойчивость исследуемых параметров к пропускам данных, заменой одних станций на другие, или изменение методики вычисления индексов.

Настоящая работа посвящена анализу использования в прикладных задачах индексов авроральной активности и волнового УНЧ индекса [1]. Исследуется чувствительность индексов к количеству и расположению использованных станций, последствия использования SME индекса как замены AE при разных условиях космической погоды. Полученные результаты тестируются на задаче аппроксимации максимального часового значения измеренного ГИТ построенным на основе исследованных индексов регрессионным соотношением.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФЗ РАН (Н.Я. О.К., В.П.), ГЦ РАН (Н.Я., О.К., Я.С.) и ПГИ (Я.С.).

1. Kozyreva, O., V. Pilipenko, M.J. Engebretson, K. Yumoto, J. Watermann, N. Romanova (2007), In search of a new ULF wave index: Comparison of Pc5 power with dynamics of geostationary relativistic electrons, *Planetary Space Science*, 55, 755–769, doi:10.1016/j.pss.2006.03.013

Сравнительный анализ условий в межпланетной среде и геомагнитной активности при высыпаниях релятивистских электронов, обусловленных разными механизмами

Т.А. Яхнина, Т.А. Попова, А.Г. Демехов

Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

Проанализирована вероятность наблюдения высыпаний релятивистских (~800 кэВ) электронов (ВРЭ) для двух интервалов: 8-18 октября 2017 г. и за весь 2017 г. Первый интервал включает умеренную геомагнитную бурю ($SUM-H_{min} = -67$ нТл) с интенсивной авроральной активностью, которая подтверждается ростом величины АЕ-индекса до значений $AE=1916$ нТл и средней величиной АЕ-индекса 256 нТл. Второй интервал охватывает весь 2017 г. Этот год близок к минимуму солнечной активности между 24 и 25 циклами и приходится на спад самого слабого цикла за столетие. Средняя величина АЕ-индекса для второго интервала составляет 189 нТл. Рассматриваются ВРЭ, обусловленные разными механизмами, согласно критерию, представленному в работах [1, 2]. ВРЭ 1й группы связаны с геометрией силовых линий в ночном секторе. Эти высыпания наблюдаются вблизи границы изотропии потоков электронов. ВРЭ 2й группы всегда наблюдаются одновременно с интенсивными высыпаниями энергичных (> 40 кэВ) электронов. По-видимому, они обусловлены взаимодействием с ОНЧ-волнами. ВРЭ 3й группы, сопровождаемые протонными высыпаниями (> 39 кэВ), связаны с ЭМИЦ волнами. Механизм ВРЭ 4й группы связан с попаданием энергичных частиц в дрейфовый конус потерь в искаженном магнитном поле [3] в районе Южно-Атлантической магнитной аномалии. Обсуждается, при каких условиях в межпланетной среде и при какой геомагнитной активности тот или иной механизм генерации ВРЭ является наиболее эффективным.

1. Yahnin A.G., Yahnina T.A., Semenova N.V., Gvozdevsky B.B., Pashin A.B. Relativistic electron precipitation as seen by NOAA POES // *J. Geophys. Res. Space Physics*. 2016. V.121, No.9. P.8286-8299. <https://doi.org/10.1002/2016JA022765>
2. Yahnin A.G., Yahnina T.A., Raita T., Manninen J. Ground pulsation magnetometer observations conjugated with relativistic electron precipitation // *J. Geophys. Res. Space Physics*. 2017. V.122, No.9. P.9169-9182. <https://doi.org/10.1002/2017JA024249>
3. Blake J.B., Inan U.S., Walt M., Bell T.F., Bortnik J., Chenette D.L., Christian H.J. Lightning-induced energetic electron flux enhancements in the drift loss cone // *J. Geophys. Res.* 2001. V.106, No.A12. P.29733-29744. <https://doi.org/10.1029/2001JA000067>

Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 22-62-00048).

Foreshock ULF waves observed by the MMS satellites and its magnetosphere response

V.B. Belakhovsky¹, V.A. Pilipenko²

¹*Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia*

²*Institute of the Physics of the Earth, Moscow, Russia*

In this work, the physical nature of geomagnetic Pc3-4 pulsations is investigated. On the one hand, many features of Pc3-4 pulsations are already well known from the works of such famous researchers as Troitskaya V.A., Guglielmi A.V. and others. But the launch of new satellite missions, such as MMS (Magnetospheric Multiscale Mission), allows us to take a more detailed look at the nature of this phenomenon.

Cases of observation of Pc3-4 pulsations using data from magnetometers of the CARISMA network (Canada, USA) are considered. For Pc3-4 pulsations, a resonance structure (FLR - field line resonance) was observed: an increase in the period with increasing geomagnetic latitude. Ground-based Pc3-4 pulsations are clearly visible in the toroidal component on the GOES-13 geostationary satellite located near the conjugate point. During the period of registration of Pc3-4 pulsations, the cone angle of the interplanetary magnetic field was less than 45°, which led to the formation of a quasi-parallel bow shock.

At this time, the MMS series satellites recorded monochromatic ULF waves in the foreshock region. Moreover, during the period when the MMS satellites moved from the foreshock region to the magnetosheath, this type of ULF waves was not clearly seen against the background of broadband variations of the magnetic field in the turbulent magnetosheath. Therefore, the magnetosheath is not a source of ULF waves that excite Pc3-4 pulsations. Apparently, there are transparency windows in the magnetosheath for the passage of ULF foreshock waves. When passing through a turbulent magnetosheath, the spectrum of ULF waves becomes more broadband, which leads to the formation of a resonant structure of Pc3-4 pulsations.

The geomagnetic pulsations with a period about 30-minute observed on the dayside of the magnetosphere by the GOES satellites

V.B. Belakhovsky^{1,2}, D.V. Kostarev², V.A. Pilipenko³

¹*Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia*

²*Institute of Solar-Terrestrial Physics of the Siberian Branch of the RAS, Irkutsk, Russia*

³*Institute of the Physics of the Earth, Moscow, Russia*

For the first time, geomagnetic pulsations with a period of ~30 minutes were discovered on the dayside of the magnetosphere at geostationary orbit. The pulsations were recorded during the recovery phase of the magnetic storm on January 7, 2015, according to data from the GOES-13 (MLT=UT-5), GOES-14 (MLT=UT-7) satellites. The pulsations are most pronounced in the radial (br) and field-aligned (b||) components of the geomagnetic field. The pulsations modulate the flows of electrons and protons in a wide range of energies, while anti-phase geomagnetic pulsations and pulsations in the flows of charged particles are observed. Analysis of data from ground-based magnetometers shows that these oscillations are not visible on the earth's surface. This indicates the small-scale nature of these oscillations and their attenuation as they pass through the ionosphere. There are no similar fluctuations in the parameters of the solar wind and IMF according to the ACE satellite data. These properties indicate that the source of these oscillations is located inside the magnetosphere, and not in the solar wind.

In terms of their characteristics, the recorded oscillations are very similar to compression Pc5 pulsations (storm-time Pc5), except for a very long period and not a very regular shape. These long-period pulsations cannot be Alfvén waves due to the limited length of the magnetic field line on the dayside of the magnetosphere. The antiphase of pulsations in the magnetic field and in particle flows suggests that these pulsations represent slow magnetosonic waves. An increase in energetic proton fluxes (95 keV) was detected according to GOES satellite data during the period of pulsation appearance. It is assumed that the excitation of pulsations is caused by kinetic instabilities of energetic protons.

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

About contribution of the Pg pulsations to the GICs growth

V.B. Belakhovsky¹, V.A. Pilipenko², Y.A. Sakharov¹, V.N. Selivanov³

¹*Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia*

²*Institute of the Physics of the Earth, Moscow, Russia*

³*Northern Energetics Research Centre, Kola Science Centre of the RAS, Apatity, Russia*

A number of recent studies have established that geomagnetic pulsations (Pi3/Ps6) can make a significant contribution to the growth of geomagnetic-induced currents in power lines [1, 2]. The class of pulsations Pg (pulsations giant) stands somewhat apart, since they are not often observed on the Earth's surface. These are very monochromatic variations; they belong to the Pc4 frequency range. On the Earth's surface, they are visible mainly in the D-component of the magnetic field, and therefore can make a noticeable contribution to the growth of GIC for power lines oriented in the north-south direction. This paper examines the question of how effectively Pg pulsations can lead to an increase in geomagnetic-induced currents in power lines on the Kola Peninsula. For this purpose, data from the Vykhodnoy substation (VKH) and data from PGI magnetometers at the Lovozero and Loparskaya PGI observatories were used. Also the question of how the pulsation frequency affects the amplitude of the GIC is analyzed.

1. Belakhovsky V., Pilipenko V., Engebretson M., Sakharov Ya. and Selivanov V. Impulsive disturbances of the geomagnetic field as a cause of induced currents of electric power lines // *Journal of Space Weather and Space Climate*. 9. A18. 2019.
2. Pilipenko V.A. Space weather impact on ground-based technological systems. *Solar-Terrestrial Physics*. 2021. V.7, No.3, 68-104.

Numerical simulation of the generation of Alfvén waves by laser plasma in a magnetized background plasma with neutrals at Alfvén-Mach numbers less than one

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 results of numerical simulation of the generation of extended Alfvén waves (AW) by a periodic sequence of laser plasma bunches at Alfvén-Mach numbers of 0.2 in plasma with neutrals.

The simulation results showed that when the density of neutrals exceeds the density of the background plasma by 10 or more times, the velocity and amplitude of the Alfvén wave decreases. As a result of collisions of neutrals with the rotating plasma of bunches, the neutrals acquire an azimuthal velocity component and are displaced to the periphery of the AW. When the concentration of neutrals is $n_N=1$ and lower, the velocity and amplitude of the AW are the same as in a plasma without neutrals.

This work was supported by the Russian Science Foundation (project No. 24-22-00106).

Prospects for quantitative analysis of short-period VLF emissions in the magnetosphere

P.A. Bespalov¹, O.N. Savina^{1,2}, G.M. Neshchetkin^{1,2}

¹*A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia*

²*HSE University, Nizhny Novgorod, Russia*

In the morning and daytime sectors of the subauroral magnetosphere, short-period VLF emissions (PE emissions) with a repetition period of dynamic spectrum elements of 2-6 seconds are observed from time to time. Individual spectral elements of these emissions resemble fragments of whistles from lightning discharges, but unlike multi-hop whistles, they are repeated without visible change in spectral shape. The studies of the Poynting vector direction, the wave normal angle and the Hausdorff dimension for short-period radiation seem promising. All these characteristics are important for study short periodic emission excitation in different space eigen modes, for example, in one side mode. The obtained results are important for the passive mod sync confirmation, for a quantitative comparison of the analytical results and numerical simulations with experimental data, and for automatic separation of different types of electromagnetic emissions.

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation (Project no. 25-22-00237).

Features in the generation and observation of the hectometric continuum in the near-Earth plasma

A.A. Chernyshov¹, D.A. Dorofeev^{1,2}, M.M. Mogilevsky¹, V.E. Shaposhnikov^{3,4} and D.V. Chuginin¹

¹*Space Research Institute of the Russian Academy of Science, Moscow, Russia*

²*HSE University, Moscow, Russia*

³*Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Science, Nizhny Novgorod, Russia*

⁴*HSE University, Nizhny Novgorod Branch, Nizhny Novgorod, Russia*

The ERG (Arase) satellite recently discovered a non-thermal hectometric continuum with a narrowband frequency structure. The mechanism behind the generation of this type of emission in the near-Earth plasma is still unknown. This study examines the potential use of electron cyclotron harmonics instability to explain the line structure of hectometric radio emissions for the first time. By analyzing the case of the non-thermal hectometric continuum, a proposed mechanism for the creation of a quasi-harmonic frequency structure resulting in quasi-parallel emission bands is discussed. The double plasma resonance effect is suggested as a possible explanation for the observed emission bands in the dynamic spectrum of hectometric radio waves. It is shown that the double plasma resonance mechanism could account for existing measurements of hectometric radiation and explain the presence of the non-thermal hectometric continuum in the near-Earth plasma. Also, this study analyzes data from the ERG (Arase) satellite over a period of nearly 7 years (2017-2023). During this time, about 1000 cases of hectometric continuum (HMC) radiation in the near-Earth space were detected, which made it possible to identify characteristic features on different time scales. On a daily scale, it was established that HMC is observed at night and is completely absent during the day. There is also an asymmetric shift of 1-3 hours relative to sunrise and sunset. On larger scales, seasonal and annual variations in HMC were detected. A predominance of HMC cases was observed during the summer months, with the fewest cases occurring during the autumn and spring equinoxes. Besides, starting from the second half of 2022, the hectometric continuum ceased to be observed, which may be associated with the approach to the peak of the 25th solar activity cycle, as indicated by the increase in the F10.7 index, Wolf numbers and Lyman-alpha radiation, which traditionally characterize solar activity.

Drift-compressional mode in the magnetosphere

D.Yu. Klimushkin, P.N. Mager

Institute of Solar-Terrestrial Physics, Irkutsk, Russia

The drift-compressional mode is the most common branch of ultra low frequency oscillations of the inhomogeneous finite-pressure plasma. This mode is influenced by the interaction with high-energy particles through the drift resonance and coupling with the Alfvén mode. In the magnetosphere it can be responsible for the compressional storm time Pc5 geomagnetic pulsations. This report outlines main theoretical properties of the drift-compressional mode and its possible observational manifestations.

This study was supported by the Russian Science Foundation under Grant No. 22-77-10032.

Spatial and Temporal Long-Period Trends in AKR Detection in the Solar Wind

V.I. Kolpak^{1,2,3}, M.M. Mogilevsky¹, D.V. Chugunin¹, A.A. Chernyshov¹, I.L. Moiseenko¹

¹*Space Research Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia; e-mail: lera.kolpak@yandex.ru*

²*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences, Troitsk, Moscow, Russia*

³*Higher School of Economics, Moscow, Russia*

Over the past 50 years, accumulated data on the characteristics of auroral kilometric radiation (AKR) have revealed their potential for studying the medium through which they propagate. This work presents the results of a statistical analysis of AKR measurements conducted by the WIND satellite near the L1 libration point. The analysis identified long-period variations in the frequency of AKR detection:

1. An asymmetry in distribution along the Y-axis: during periods of minimum solar activity, AKR is more frequently detected when the satellite is located in the range of Y from +50 R_E to +100 R_E than in the range from -50 R_E to -100 R_E.

2. As solar activity increases, the frequency of AKR detection decreases, while a decline in solar activity leads to its increase. This contradicts the classical view of a direct dependence of AKR frequency on solar activity. It is hypothesized that such variations in AKR detection frequency may be related not to the conditions of AKR generation but to the peculiarities of radio wave propagation in the inhomogeneous plasma of the solar wind.

Theoretical models for describing ultra-low-frequency oscillations with periods of about 30 min on the dayside of the magnetosphere

D.V. Kostarev¹, V.B. Belakhovsky^{1,2}, P.N. Mager¹, D.Yu. Klimushkin¹, V.A. Pilipenko³

¹*Institute of Solar-Terrestrial Physics of the Siberian Branch of the RAS, Irkutsk, Russia*

²*Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia*

³*Institute of the Physics of the Earth, Moscow, Russia*

The issue of the nature of ultra-low-frequency oscillations with periods of about 30 minutes on the dayside of the magnetosphere during the recovery phase of a geomagnetic storm is considered. Such pulsations were recorded by the GOES geostationary satellites on January 7, 2015. Various theoretical models are considered that can explain such long periods of observed oscillations. Since these oscillations were not recorded by ground-based magnetometers or in the solar wind, only models of intra-magnetospheric generation of oscillations were considered. The simulations were performed using plasma parameters observed by the CCE satellite mission in the geostationary orbit region and under similar geomagnetic conditions, since the GOES satellites have only a limited set of detectors.

Based on the very low frequencies of the observed oscillations, we excluded the interpretation of them by the Alfvén wave from consideration. Three possible interpretations of the observed oscillations were considered: drift-mirror mode, drift-compression mode and ballooning instability. It is shown that the existence of the drift-mirror mode requires a large anisotropy of the transverse and longitudinal pressures, which is not observed on the dayside of the magnetosphere. The existence of the drift-compression mode with the observed periods is possible, but unlikely, since the wave frequency should change following the decrease in the ring current, which is not observed. We assumed that the most likely explanation for the observed oscillations is registration on a geostationary satellite of a stationary azimuthal periodic structure that resulting due to the ballooning instability in the ring current.

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

VLF chorus emissions modeling using EPOCH PIC code: analysis of the fine structure of chorus elements

D.L. Pasmanik¹ and A.G. Demekhov^{1,2}

¹*Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia*

²*Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia*

We present the results of a further study of the generation of chorus VLF emissions in the Earth's magnetosphere with use of a previously proposed new numerical model based on the one-dimensional EPOCH PIC code. The original code was improved for correct implementation of delta-F method, and a mirror force due to the background magnetic field inhomogeneity was taken into account.

The main focus of the present study is on the fine structure of individual chorus elements, which may consist of several subpackets. This structure is seen in experimental data from satellites and confirmed by numerical simulations. We show that the subpackets appear in the very beginning of the formation of the chorus element, which occurs as the whistler mode wave propagates towards the equator and interacts with energetic electrons. As the wave further propagates and interacts with particles, the structure of the subpackets evolves. This occurs in accordance with currently accepted nonlinear mechanism of chorus generation.

For a quantitative analysis of the subpackets properties, we studied the parameter N_{tr} , which quantifies the number of oscillations of the electron velocity caused by the nonlinear trapping of electrons in the wave field over a time equal to the subpacket duration. For the first time, we show that the relationship between the parameter N_{tr} and the maximum wave field amplitude in a subelement is described by a power law dependence.

Indications of the impact of the influence of large-scale atmospheric disturbances on quasi-periodic VLF emissions inside the plasmasphere

P.D. Shkareva¹, G.M. Neshchetkin^{1,2}, P.A. Bespalov¹, O.N. Savina^{1,2}

¹*A.V. Gaponov-Grekhov Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Russia*

²*HSE University, Nizhny Novgorod, Russia*

Some results of observations on board the Van Allen probe A spacecraft of atypical quasi-periodic VLF electromagnetic emissions inside the plasmasphere are discussed. We study in detail two events of the generation of deeply modulated quasi-periodic VLF emissions (QP) in the frequency band below 2 kHz, when separate relatively short (on the order of 20 s and 60 s) bursts of hiss without any notable frequency drift repeated with a period of 90 s and 240 s. The emissions selected for analysis were not accompanied by a hydromagnetic compression wave, which indicates the impossibility of their interpretation in terms of the concept of QP 1 modulated hiss. For the considered events, no clear periodicity of spectral bursts typical for QP 2 emissions take place. The dynamic spectra analysis makes it possible to conclude that the cyclotron generation of electromagnetic emissions occurs in the regions of the electron radiation belts with relatively dense cold plasma. The results of model calculations show that the time course of these emissions can be explained under the assumption of a periodic modification of the conditions for the reflection of whistler wave incident on the ionosphere from above. Based on the available data and calculations, it was concluded that it is possible to interpret the analysed atypical quasi-periodic VLF emissions as a result of the resonant parametric action of ionospheric infrasonic large-scale waves with periods close to the repetition period of spectral bursts in quasi-periodic emissions.

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation (Project no. 25-22-00237).

Statistical study of the frozen-in condition of magnetic field based on satellite data from the THEMIS mission

D.A. Shubin, A.V. Rubtsov, P.N. Mager, D.Yu. Klimushkin

Institute of solar-terrestrial physics of Siberian branch of Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

The frozen-in condition (FIC) is fundamental in magnetic hydrodynamics and space plasma physics and can be expressed as follows: $E = -u \times B$, where E is the electric field, u is the transverse component of the vector of the average mass velocity of the particle flow, and B is the magnetic field. In this paper, we conducted a statistical study of this condition based on data obtained from the THEMIS-A satellite for the period from January 2017 to February 2018. As a result, we developed parameter for evaluating the feasibility of FIC and obtained the spatial distribution of this parameter. It was found that FIC is most often observed in the morning part of the magnetosphere (3-9 MLT), while the opposite result is observed on the evening side (15-21 MLT). This indicates that FIC does not occur uniformly over the entire magnetosphere, and when studying magnetic field disturbances, it is necessary to consider such distributions.

The study was supported by the Russian Science Foundation under Grant 22-77-10032.

On the problem of modeling of the 3D evolution of atmospheric disturbance initiated by an impulse at the ground

E.S. Smirnova^{1,2*}, S.Yu. Dobrokhotov¹

¹*Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

²*Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Kaliningrad Oblast 236041, Russia*

*E-mail: *smirnova.ekaterina.serg@gmail.com*

The problem of propagation of three-dimensional atmospheric disturbance initiated by a source at the lower boundary of the atmosphere is formulated as an initial-boundary value problem for the three-dimensional Klein-Gordon equation. Such a problem follows from the corresponding formulation of the initial-boundary value problem for the 3D hydrodynamics system, which is classically used to describe the dynamics of atmospheric gas. The modeling based on the analytical and asymptotic solutions to the described mathematical problems. These three-dimensional solutions are constructed on the basis of already proven (E. Smirnova, *Math. Notes*, 2023; S. Dobrokhotov and E. Smirnova, *RJMP*, 2024) solutions of similar initial-boundary value problems but for the one-dimensional Klein-Gordon equation.

Oppositely directed poloidal Alfvén waves generated by a proton cloud

E.E. Smotrova, O.S. Mikhailova, P.N. Mager, A.V. Rubtsov

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS

In this study, we present the first direct observation of resonant excitation of two oppositely directed poloidal Alfvén waves by a proton cloud. On 15 February 2014, the Van Allen Probe A detected oscillations with a frequency of 6.8 mHz (Pc4 range) in the dayside magnetosphere. The event was recorded during the recovery phase of the substorm. Simultaneously, modulations in proton fluxes were observed. Detailed analysis revealed two cases of drift-bounce resonance between protons and ULF waves. These waves were identified as the second harmonic of poloidal Alfvén waves at the same frequency, one propagating eastward ($m \sim 155 \pm 5$) and interacted with 200 keV protons and the other propagating westward ($m \sim -250 \pm 5$) and interacted with 150 keV protons. The waves were generated by the gradient instability. The eastward wave was generated due to the upward slope of proton distribution function, and the westward one was due to the downward slope of proton distribution function.

The work was financially supported by the Grant of the Russian Science Foundation (project № 22-77-10032).

Fractional resonance of sub-MeV electrons with oblique EMIC waves

D.S. Tonoian¹, X.-J. Zhang^{1,2} and A.V. Artemyev^{2,3}

¹*University of Texas at Dallas, USA*

²*University of California, Los Angeles, USA*

³*Space Research Institute, RAS, Moscow, Russia*

Relativistic electron losses in the outer radiation belt are largely attributed to electron resonant scattering by electromagnetic ion cyclotron (EMIC) waves. While quasi-linear theory predicts scattering of electrons of >1 MeV, sub-MeV electron precipitation is also present. Leaving aside an important and rapidly developing theories of nonlinear, nonresonant, and bounce-resonant EMIC wave interactions, we will discuss the effect of fractional resonances with oblique EMIC waves, which have minimum resonant energy twice lower than anomalous cyclotron resonance.

Экспериментальное исследование нестационарных возмущений плазмы и магнитного поля, возбуждаемых короткоимпульсной высокочастотной накачкой в режиме электронной магнитной гидродинамики на крупномасштабном плазменном стенде «Крот»

Н. Айдакина*, М. Гушин, И. Зудин, С. Коробков, А. Стриковский

Институт прикладной физики Российской академии наук, Нижний Новгород, Россия

*E-mail: aidakina@ipfran.ru

В большой лабораторной замагниченной плазме стенда «Крот» экспериментально исследована мелко- и крупномасштабная динамика импульсных возмущений плазмы и магнитного поля, вызванных локальным ВЧ нагревом электронов в режиме электронной (холловской) магнитной гидродинамики. В таком режиме эволюция неоднородностей плазмы может происходить в режиме «униполярного» переноса, когда замагниченные электроны дрейфуют вдоль магнитного поля, а ионы, преимущественно, поперек поля. «Униполярный» перенос сопровождается возбуждением системы вихревых электрических токов и обеспечивает на порядки более быстрое перераспределение неоднородной замагниченной плазмы, чем классический механизм амбиполярного переноса. Такой режим может определять времена развития и распада узких неоднородностей плазмы, вытянутых вдоль внешнего магнитного поля, возникающих, например, в импульсных нагревных ионосферных экспериментах, при работе мощных бортовых передатчиков КА и др.

В модельных лабораторных экспериментах с локализованным короткоимпульсным высокочастотным нагревом электронов, проведенных на крупномасштабном плазменном стенде «Крот», демонстрируется динамика т.н. «униполярной ячейки». Под «униполярной ячейкой» понимается самосогласованная плазменно-полевая структура, включающая основное возмущение плотности, вытянутое вдоль магнитного поля, систему вихревых электрических токов и периферийные области обеднения плотности фоновой плазмы [1].

Генерируемые в окрестности «униполярной ячейки» импульсные токи и магнитные поля могут распространяться на большие расстояния от источника в виде низкочастотных волн. Показано, что продольный перенос токов и возмущений магнитного поля происходит со скоростью свистовых волн, которая определяется параметрами плазмы и длительностью ВЧ импульса и его фронтов, т.е. характерным временем нагрева электронов. Поперечная динамика токов и магнитных полей имеет характер диффузии за счет конечной проводимости плазмы, определяемой кулоновскими столкновениями. Возникающие из-за нагрева электронов возмущения плотности демонстрируют более медленную динамику, и распространяются с существенно меньшими (звуковыми) скоростями.

Эксперименты выполнены на Уникальной научной установке «Комплекс крупномасштабных геофизических стендов ИПФ РАН» при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-12-00459).

[1] Aidakina N., Korobkov S., Gushchin M., Zudin I., Strikovskiy A. Experimental demonstration of the “unipolar cell” dynamics in a large laboratory magnetoplasma // *Phys. Plasmas*. V.31. P. 122110. DOI: 10.1063/5.0225468 (2024).

Усовершенствованный подход к выделению дискретных элементов хоровых ОНЧ излучений

А.В. Ларченко^{1,2}, А.Г. Демехов^{1,2}

¹Полярный Геофизический Институт, г. Апатиты, Россия

²ИПФ РАН, г. Нижний Новгород, Россия

Предложен модифицированный алгоритм выделения дискретных элементов хоровых ОНЧ излучений на основе анализа динамических спектрограмм, устраняющий ключевые недостатки предыдущей версии [1]. Исходный метод, использующий морфологическую обработку с набором структурных элементов, демонстрировал высокую частоту ошибок, в основном связанную с ложными срабатываниями из-за вероятности детектирования одного и того же элемента как нескольких. Также к недостаткам метода можно отнести отсутствие возможности определения точных границ найденных элементов.

Усовершенствования метода включают: замену процедуры нерезкого маскирования на морфологическое top-hat преобразование для нормализации фона и лучшего выделения элементов, введение взвешенной нормализованной кросскорреляции и оценки относительного стандартного отклонения яркости пикселей для повышения точности детектирования, постобработку масок детектированных элементов для уточнения их контуров, основанную на расширении границ каждой маски с последующей пороговой бинаризацией (по методу Оцу).

Для увеличения скорости анализа динамических спектров ОНЧ-сигналов с целью детектирования дискретных хоровых элементов была реализована нейронная сеть Mask R-CNN [2], адаптированная для задачи пиксельной сегментации объектов (*instance segmentation*). Маски объектов, полученные применением улучшенного алгоритма к данным спутников Van Allen Probes, служили эталонными данными для обучения нейронной сети.

Сравнение усовершенствованного подхода с исходным алгоритмом и методом прямого анализа волновых форм сигнала показало снижение ошибок детектирования и значительное ускорение процесса анализа данных. Также данный подход дает возможность разделения перекрывающихся элементов во времени и частотных полосах, недоступную для прямого анализа волновых форм сигнала. За счет точного определения границ элементов возможно получить улучшенные оценки их энергий, скоростей частотного дрейфа и амплитуд.

Работа Ларченко А.В. поддержана Российским научным фондом (проект № 23-62-10043).

1. Ларченко А.В., Демехов А.Г., Козелов Б.В. Метод параметризации дискретных элементов хоровых ОНЧ излучений. Известия вузов. Радиофизика. 2019. Т. 62. № 3. С. 177-193.
2. K. He, G. Gkioxari, P. Dollár and R. Girshick, "Mask R-CNN," *2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)*, Venice, Italy, 2017, pp. 2980-2988.

ЭМИЦ неустойчивость в магнитосфере: Необходимость смены парадигмы?

О.С. Михайлова¹, Д.Д. Позднякова^{1,2}, В.А. Пилипенко²

¹*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск*

²*Институт физики Земли РАН, Москва*

Принципиальные вопросы о физической природе и механизме генерации ЭМИЦ волн в диапазоне геомагнитных пульсаций Pc1 (от долей Гц до первых Гц) считаются решенными: эти волны генерируются вблизи экваториальной плоскости магнитосферы в результате резонансного взаимодействия с протонами кольцевого тока. Считается, что ЭМИЦ неустойчивость протонов кольцевого тока конвективная, т.е. область неустойчивости в вершине силовой линии работает как усилитель бегущих волн, при этом сами волновые пакеты осциллируют между отражающими сопряженными ионосферами. В этом обзоре мы собрали результаты различных наблюдений, которые не могут быть поняты (по крайней мере нами) в рамках существующих представлений о механизмах возбуждения Pc1 пульсаций и предлагаем геофизическому сообществу подумать о необходимости смены парадигмы в представлениях о механизмах генерации Pc1 пульсаций.

Работа поддержана грантом РФФ №24-77-10012.

Наземные наблюдения авроральных шипений во время роста риометрического поглощения

А.С. Никитенко, О.М. Лебедь, Ю.В. Федоренко, А.В. Ларченко

ПГИ, г. Анапты, Россия; e-mail: alex.nikitenko91@gmail.com

В работе представлены результаты анализа наземных наблюдений электромагнитных излучений типа авроральные шипения на станции обс. Ловозеро (Кольский Полуостров). Рассматриваются всплески, возникающие одновременно с ростом риометрического поглощения в обс. Ловозеро и расположенной в 100 км к северу от нее обс. Туманный. Используя результаты расчетов поляризации магнитного поля и азимутального угла вектора Пойнтинга анализируемых волн, проведена оценка положения области на земной поверхности, засвеченной всплесками авроральных шипений. С привлечением данных all-sky камеры в обс. Ловозеро и на скандинавских точках наблюдений динамика положения этой области сопоставлена с положением области повышенного риометрического поглощения. На основе проведенного анализа выдвинуто предположение о возможном механизме, обуславливающим одновременные наземные наблюдения шипений и риометрического поглощения.

Работа поддержана грантом РФФ № 24-27-20048 «Оценка состояния ионосферы в арктической зоне по результатам наземных измерений электромагнитного поля авроральных шипений в очень низкочастотном диапазоне и риометрического поглощения».

Наблюдения естественных СНЧ/ОНЧ сигналов во время экспедиции «Северный полюс—41»

А.С. Никитенко¹, С.В. Пильгаев¹, А.В. Ларченко¹, Ю.В. Федоренко¹, Н.Ф. Благовещенская², А.С. Калишин², Т.Д. Борисова², О.Ю. Стрибный², М.В. Филатов¹, М.В. Кузнецова¹, О.М. Лебедь¹

¹*Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Россия*

²*Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург, Россия*

В 2023-2024 гг. на дрейфующей полярной станции «Северный полюс-41», организованной специалистами Арктического и антарктического научно-исследовательского института, были проведены уникальные измерения горизонтальных компонент магнитного поля и вертикальной компоненты электрического поля СНЧ/ОНЧ диапазона (300 Гц - 15 кГц) в приполярной области. Для этого был применен многофункциональный цифровой СНЧ/ОНЧ приемник, обеспечивающий регистрацию двух горизонтальных магнитных и вертикальной электрической компонент поля с прецизионной синхронизацией с мировым временем. Такие же приемники в стационарном варианте использовались для наблюдений в обсерваториях ПГИ Баренцбург (78.09 N, 14.21 E), расположенной также в приполярной области, но к западу от траектории дрейфа, и Ловозеро (67.98 N, 35.082 E), расположенной в авроральной зоне.

В работе обсуждаются результаты анализа наиболее представительных случаев всплесков естественных магнитосферных излучений, зарегистрированных на дрейфующей полярной станции в нейтральных водах. Результаты наблюдений сопоставлены с наблюдениями СНЧ/ОНЧ сигналов в обсерваториях Баренцбург и Ловозеро.

Исследование геоэлектрического строения земной коры методом фазово-градиентного зондирования

М.С. Петрищев*, Ю.А. Копытенко, В.С. Исмагилов, А.Л. Ткачѳв, П.А. Сергушин

¹*СПбФ ИЗМИРАН, Россия, Санкт-Петербург, РФ*

*E-mail: ms_petr@mail.ru

Представлены результаты применения метода фазово-градиентного зондирования для изучения геоэлектрических характеристик земной коры Фенноскандинавского щита. Наблюдения проведены трехкомпонентными вариометрами в условиях сильных техногенных помех. Определение фазовых скоростей распространения электромагнитных волн выполнена по полной горизонтальной и вертикальной магнитным компонентам, по которым определялся набор кажущихся сопротивлений. Верификация построенного геоэлектрического разреза выполнена путем сопоставления с положением гипоцентров землетрясений и геологическими данными.

Возбуждение искусственных сигналов диапазона Pc1 в эксперименте FENICS-2024: наблюдения и моделирование

В.А. Пилипенко¹, Е.Н. Федоров¹, Н.Г. Мазур¹, Д.Д. Позднякова¹, А.В. Рябов²,
А.С. Потапов³, Р.А. Марчук³, В.В. Колобов⁴, С.В. Анисимов⁵, Е.Н. Ермакова⁶

¹*Институт физики Земли РАН, Москва*

²*Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород*

³*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск*

⁴*Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, Апатиты*

⁵*Геофизическая обсерватория «Борок» Института физики Земли РАН, Ярославская обл.*

⁶*Научно-исследовательский радиофизический институт Нижегородского Университета, Н. Новгород*

В ходе активного эксперимента FENICS-2024 на Кольском полуострове с использованием двух выведенных из работы линий электропередач в качестве горизонтальной излучающей антенны были зарегистрированы ультранизкочастотные сигналы диапазона 1-10 Гц на магнитных станциях, удаленных от передающей линии от ~1200 км до ~2100 км с амплитудами, нормированными на величину тока излучателя, от ~0.2 фТл/А до ~3.0 фТл/А. Для теоретической интерпретации результатов эксперимента использована численная модель УНЧ поля в атмосфере и ионосфере, создаваемого горизонтальным приземным током конечной длины. Модель основана на решении системы уравнений Максвелла в вертикально неоднородных атмосфере и ионосфере, и ее принципиальная особенность заключается в учете вклада ионосферного волноводного распространения в возбуждаемое поле на больших удалениях. Численные расчеты сопоставлены с приближенными аналитическими оценками. Расчеты оказались в качественном согласии с результатами наблюдений. Проведенные наблюдения показали перспективность нового типа активных экспериментов для генерации зондирующего сигнала для магнитотеллурического зондирования на большой площади и воздействия искусственными сигналами на околоземную плазму.

Pi2 пульсации: один тип, разные механизмы

Н.В. Савельева¹, Д.Д. Позднякова^{1,2}, В.А. Пилипенко¹

¹*Институт физики Земли РАН, Москва*

²*МГУ, физический факультет, Москва*

E-mails: d_pozdnyakova@live.ru, pilipenko_va@mail.ru

Волновые возмущения геомагнитного поля типа Pi2 (периоды 1–2 мин) традиционно представляются как транзиентный отклик геомагнитного поля на взрывное начало суббури. На авроральных широтах эти пульсации появляются синхронно с резким началом магнитной бухты и уярчением полярных сияний, что свидетельствует о том, что их механизм возбуждения тесно связан с усилением продольных токов между ночной магнитосферой и ионосферой. Но Pi2 пульсации – глобальное явление, и они прослеживаются вплоть до геомагнитного экватора. Одинаков ли физический механизм возбуждения Pi2 пульсаций на авроральных и на приэкваториальных широтах? Для ответа на этот вопрос нами исследованы Pi2 пульсации, зарегистрированные одновременно магнитометрами на низкоширотных станциях на Дальнем Востоке и низкоорбитальными спутниками SWARM. В ночное время волны Pi2 в верхней ионосфере и на Земле оказались практически идентичны по амплитуде и фазе. На спутнике эти волны проявляются в основном в продольной (вдоль геомагнитного поля) и радиальной магнитных компонентах. Сравнение результатов наблюдений с моделью взаимодействия МГД волн с системой ионосфера – атмосфера – Земля показывает, что ночные низкоширотные сигналы Pi2 создаются магнитосферными быстрыми магнитозвуковыми волнами, распространяющимися через область непрозрачности к Земле. Таким образом, механизм низкоширотных сигналов Pi2 отличен от механизма высокоширотных Pi2 пульсаций.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФЗ РАН.

Глобальный дисперсионный анализ системы на основе эмпирической функции распределения

В.А. Французов, А.В. Артемьев, А.А. Петрукович

ИКИ РАН, г. Москва, Россия; e-mail: vafrantsuzov@yandex.ru

Увеличение объема и качества спутниковых измерений функций распределения заряженных частиц открывает новые возможности в области изучения динамики плазменных систем в рамках анализа волновых процессов в этих системах. Линейные волновые характеристики локально однородной замагниченной плазмы описываются общим дисперсионным уравнением $D(\omega, \mathbf{k})=0$, нелинейность функциональных зависимостей в котором значительно усложняет нахождение численного решения с использованием дискретного (в пространстве скоростей) набора наблюдений: решение может быть неустойчивым и не иметь явного контроля ошибки аппроксимации.

Дискретность экспериментальных данных не позволяет однозначно определить зависимость дисперсионной функции $D(\omega, \mathbf{k})$ от частоты волны ω и волнового вектора \mathbf{k} , что предполагает аппроксимацию измеряемой функции распределения частиц f для последующего интегрирования в пространстве скоростей. В нашем докладе мы рассматриваем кусочно-линейную интерполяцию, которая позволяет не только точно контролировать ошибку аппроксимации, но и разделить, и выразить интегралы дисперсионных соотношений через обобщенную гипергеометрическую функцию ${}_pF_q$, ошибка оценки которой хорошо определена. Получаемая дисперсионная функция $D(\omega, \mathbf{k})$ представляется в виде мероморфной функции в области $\text{Im}(\omega) \geq 0$.

Проблема дальнейшего решения дисперсионного уравнения связана с отсутствием какой-либо информации о локальном поведении решений вследствие неаналитичности используемой (интерполированной) функции распределения f : методы, требующие начальные предположения для решения уравнения, могут сходиться не к тому решению или же вообще быть неустойчивыми. Но мероморфность дисперсионной функции $D(\omega, \mathbf{k})$ в рассматриваемой области позволяет произвести анализ на основе аналитичности функции $\ln D(\omega, \mathbf{k})$ во всей области за исключением дискретного набора точек: нулей и полюсов $D(\omega, \mathbf{k})$. Используя принцип аргумента Коши и анализируя поток градиента функции $\ln|D(\omega, \mathbf{k})|$, возможно определить все нули и полюсы исследуемой функции в заданном регионе по ω .

Таким образом, предлагаемые методы позволяют получить все решения дисперсионного уравнения $D(\omega, \mathbf{k})=0$ в рассматриваемой области, ошибка которых контролируется точностью аппроксимации измеряемой функции распределения f . Глобальность алгоритма позволяет значительно повысить его устойчивость и общность.

Interplanetary disturbances database: on determining the solar sources

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

IZMIRAN, Moscow, Russia

Forbush-effects and Interplanetary Disturbances (FEID) is developed and maintained at IZMIRAN and is currently available to anyone in a form of web application at tools.izmiran.ru/feid. Catalogue of events is constantly worked on by our group for the last decades and currently includes about 8900 events, starting from the year 1957, with a solar source determined for 2000 events. Cosmic rays parameters are obtained using spherical analysis – the Global Survey Method (GSM) on the global neutron monitor network data. Solar wind parameters are obtained from the OMNI database. The program allows users to build various plots for specific events as well as performing statistical analysis.

Determining the onset time and solar source of an interplanetary disturbance are two key components of populating the database. This work requires expertise and can not be easily automated. In this report, we will explain the process of adding new events to the database, including discussion of all available sources of information (CMEs, solar flares and coronal holes catalogues etc.) and current automation capabilities of the FEID program.

Transformation of turbulent solar wind spectra within shell-model approach

I.A. Dukanov^{1,2*}, E.V. Yushkov^{1,3}, D.D. Sokoloff^{1,2}

¹*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, Russia;*

²*IZMIRAN, Troitsk, Russia;*

³*Space Research Institute, Moscow, Russia*

*E-mail: dukanov.ia21@physics.msu.ru

Solar wind is one of the most significant links in the Sun - Earth system, however neither its forming process, nor its evolution physics are clarified yet. This fact served as the main reason for launching the Parker Solar Probe (PSP) spacecraft mission focused on solar wind research. For the first six years, the mission has provided a vast inflow of new data with high temporal resolution and wide variation of heliocentric distances. In particular, it enabled a detailed study of solar wind field fluctuation spectra, i.e. velocity and magnetic fields, and a new look at a turbulent cascade in interplanetary plasma [1].

The PSP data proved the previously detected presence of two spectral breaks in the picture of the spectral density of magnetic field energy fluctuation. The first one is close to subionic scale and the second one is on the left edge of the inertial interval, i.e. in the large vortices area. There isn't a universal opinion about these markers evolution yet, therefore studying these breaks dynamics is still the key one. While the kinetic approach seems to be necessary to describe the near-dissipation break, it is possible to describe the large-scale break evolution within MHD. Besides, the issues of which Reynold's numbers [2] are observed in solar wind plasma and how they influence energy balance, and what role the helicity relation plays are still not solved.

To describe a turbulent cascade, we use a shell or, in other words, cascade model taken from [3]. The shell-model class for hydrodynamic systems [4] is Fourier images of MHD-equations system with non-linear term approximation by the sum of quadratic nonlinearities to follow 3D MHD conservation laws in a dissipation-free case. Meanwhile, the continuous spectral scale is replaced by the sequence of discrete shells and in non-linear terms, energy transition through the adjacent shells only is taken into account. Within such an approach, the PSP data near the Sun are considered initial, and possible spectra evolution and a large-scale break movement dynamics during the process of free turbulent cascade devolution are studied. The obtained results of cascade modelling are compared with the PSP data on the Sun - Earth axis, and, based on the comparison, the conclusion about shell-model analysis and free devolution hypothesis applicability is made.

The authors express their sincere gratitude to P.G. Frick for valuable advice and the given model and also to the PSP and CDAWEB team for the provided spacecraft data.

1. Chen C.H.K. et al. The evolution and role of solar wind turbulence in the inner heliosphere // *The Astrophysical Journal Supplement Series*. – 2020. – vol. 246. – №. 2. – p. 53.
2. Wrench D. et al. What is the Reynolds Number of the Solar Wind? // *The Astrophysical Journal*. – 2024. – vol. 961. – №. 2. – p. 182.
3. Mizeva I., Stepanov R., Frick P. Role of Cross Helicity in Cascade Processes of MHD turbulence // *arXiv preprint arXiv:0904.1666*. – 2009.
4. Frick P. G. *Turbulence: approaches and models*. – 2003.

Towards a Standard for CME Modeling and Forecasting

K.B. Kaportseva^{1,2}

¹*SINP MSU, Moscow, Russia*

²*Physics Department of MSU, Moscow, Russia*

Accurately modeling the propagation of coronal mass ejections (CMEs) in the heliosphere and forecasting their arrival at Earth is critical for space weather prediction. However, the lack of standardized procedures leads to inconsistencies in model performance assessment and forecast accuracy. The International Organization for Standardization (ISO) develops globally recognized standards to unify methodologies across scientific and engineering disciplines. This presentation introduces a draft outline of an ISO standard for CME modeling and forecasting, emphasizing the standardization of validation criteria, data formats, and model performance assessment. The development of universal guidelines will enhance the transparency of data processing, simplify the evaluation of forecasting system performance, facilitate international collaboration, and ultimately improve models for more accurate space weather predictions.

The research was supported by the Russian Science Foundation, grant No. 22-62-00048, <https://rscf.ru/project/22-62-00048/>.

Calibration of ground-based neutron monitors using machine learning approach. Prospects and disadvantages

I.A. Lagoida, I.I. Astapov, P.S. Kuzmenkova

National Research Nuclear University MEPhI

Neutron monitors are located on the Earth's surface. They perform continuous measurements of the secondary component of cosmic rays (CR), formed after the interaction of primary CR with the Earth's atmosphere. Scientific instruments located on space satellites measure the primary flux of cosmic rays. However, outer space is characterized by a high radiation environment, which causes the degradation of electronic components and the efficiency of recording systems. Moreover, the equipment of space satellites may completely fail during solar flares, which can lead to data loss. As a result of all these factors, the calibration of neutron monitors on satellite data is an important task. Such methods will significantly expand the capabilities of the network of neutron monitors and would allow the possibility of restoring lost data due to the degradation of the electronics of the detection systems. Also, studying cosmic ray flows using ground-based detectors is significantly cheaper than satellite experiments. This research provides an overview of current attempts to develop such methods. The study also presents the result of a machine-learning model used to calibrate neutron monitors on primary cosmic ray proton flux with energies > 500 MeV.

The study was provided by a grant of the Russian Science Foundation № 20-72-10170-II, with the support of state scientific tasks № FSWU-2023-0068, № FSWU-2023-0086.

Energy budget of cold solar flares

G.G. Motorina

*Central Astronomical Observatory at Pulkovo of Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia
Space Research Institute of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

Solar flares exhibit significant diversity in the energy distribution between thermal, non-thermal, and kinetic components. The so-called “cold” solar flares, which are characterized by a substantial non-thermal component and practically no thermal component, are particularly well suited for studying the direct effect of non-thermal electrons on plasma heating. Thus, the present work aims to analyze the ratio of thermal and non-thermal energy and their evolution in cold solar flares, in particular, solar flare SOL2017-09-07T184140 (C4.5). This flare is the first cold flare for which there are EOVSAs observations, and hence it is possible to dynamically measure the coronal magnetic field and other parameters at the flare localization site. To estimate the thermal component, we analyzed the differential emission measure based on SDO/AIA data. Using Fermi/GBM data fitting, estimates of the hot plasma component and the non-thermal component were made. To test the hypothesis about the flare morphology, a 3D model was created using a GX simulator based on SDO/HMI, microwave (EOVSA), and X-ray (Fermi/GBM) data. The obtained results suggest that the non-thermal energy released during the microwave burst is sufficient for the thermal response of the flare, similar to other cold flares.

This work was supported by RSF No. 20-72-10158.

Position of the primordial release of solar flare energy at the extended surface of magnetic lines with increased current density: Results of MHD simulation

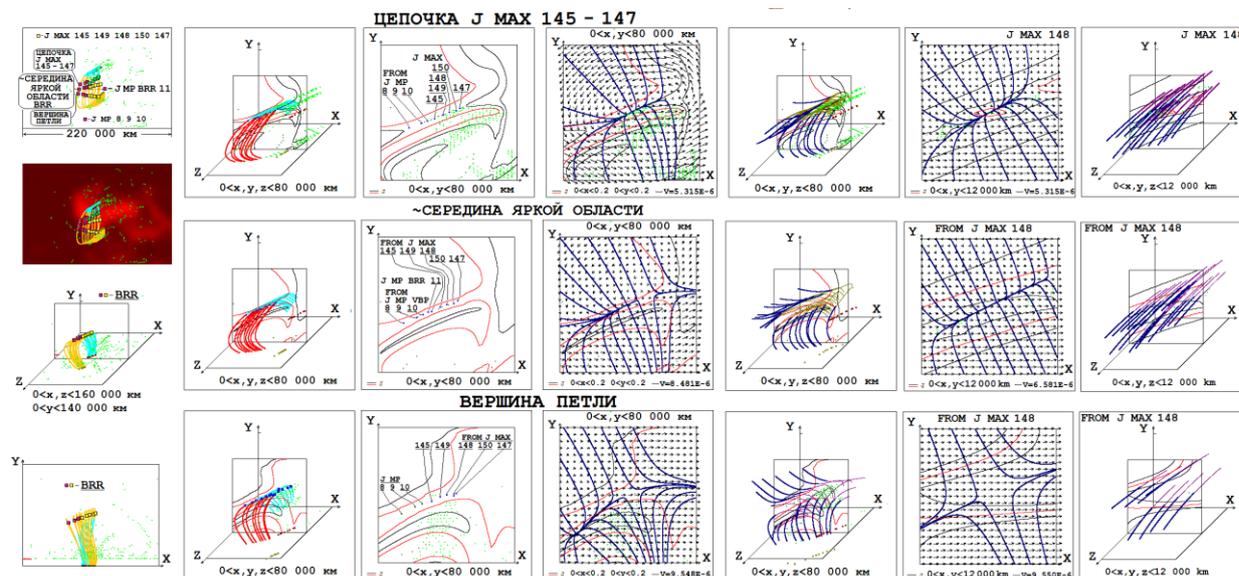
A.I. Podgorny¹, I.M. Podgorny²

¹Lebedev Physical Institute RAS, Moscow, Russia; e-mail: podgorny@lebedev.ru

²Institute of Astronomy RAS, Moscow, Russia; e-mail: podgorny@inasan.ru

The study of the extended surface of magnetic lines with increased current density, having the form of an arcade, is continued. The appearance of such a surface, apparently, can solve the problem of the coincidence of the positions of flares found from the results of MHD simulation with the observed positions of flares, which are bright regions of flare emission.

According to the existing concepts, during a solar flare, the energy of the magnetic field of the current sheet formed as a result of the accumulation of disturbances in the vicinity of a singular line of the X-type magnetic field is released. It is quite difficult to determine the possibility of a flare and its position based on the MHD simulation results due to the complexity of the magnetic field configuration in the corona. The field is highly tangled, a diverging magnetic field can be imposed on the X-type configuration, so it is almost impossible to directly determine the position of the singular line based on the type of magnetic field obtained as a result of MHD simulation, even if a current sheet begins to appear or has already formed in its vicinity. For this purpose, a graphical system for searching for flare positions was created, based on searching for current density maxima and studying magnetic field configurations in their vicinity. It is assumed that the absolute value of the current density reaches a maximum in the center of the current sheet. However, as the analysis of the calculated field showed, this assumption is not always fulfilled. Therefore, although the developed system is useful for analyzing complex magnetic field configurations, its direct use often does not provide an opportunity to correctly determine the positions of flares.



To study the possibility and locations of flare instability, an analysis of magnetic field configurations in areas with centers at different points of the arcade was performed. These configurations, as well as the location of the arcade surface in space and on the solar disk, are shown in the figure. The analysis shows that the conditions determined by the magnetic field configuration are better promoted to the development of flare instability not at the location of the maximum current density, but at the top of the arch, where in a plane configuration the X-type magnetic field dominates over the divergent magnetic field.

Study of the temperatures response to the solar cycle activity for some caves in Bulgaria

L. Raykova, R. Werner, V. Guineva

*Space Research and Technology Institute, Bulgarian Academy of Sciences,
Stara Zagora Department, Stara Zagora, Bulgaria*

Cave speleothemes present archive of climate over the last some 10 ky for the region localised. The isotope concentration and micro luminescence bands depend on the temperature and humidity. Direct temperatures measurements were initiated by the Bulgarian federation of speleology before more than 50 years. The measurements were carried out in the cave zone of constant temperature. The results data show three clear cycles responding to the 11 year solar cycles over a time period of 35 years for some karst caves in Bulgaria. The temperature cycles have different lags to the solar cycles. The aim of the work is to found the cave temperature response to the cave environment temperature. For this propose the annual surface temperatures of cities near the caves were analysed. The cave and the city temperature were analysed for a time period of 55 years. The results of the performed temperature Fourier analyses were a surprise. The time series of the surface temperature do not show any solar cycle. For the surface temperature a clear periodic signal of about 7 years was established, probably a response to the North Atlantic Oscillation. Some studies demonstrate that the temperature response to the solar cycle is much greater at higher altitudes. A maximum of the response is observed in a geographic latitude band of 45 ± 15 deg. N and S at an altitude of about 10 km with an amplitude of the mean zonal temperature of 0.1°C to 0.25°C depending on the used method of investigation. Our hypothesis is that temperature variations caused by the solar cycle are transported to the cave via atmospheric and cave water cycle. Of course a lot of experimental work is needed to confirm or reject the formed hypothesis.

Comparison and adjustment of CME velocities according to various catalogs data

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; e-mail: nshlyk@izmiran.ru*

Coronal mass ejections (CMEs) influence the state of space weather, and the initial CME velocity values are in many cases mandatory input parameters for various forecast models of geomagnetic disturbances or high-energy particle fluxes. We discuss the problem of discrepancy between CME velocities determined automatically in near-real time (CACTUS catalog, <https://www.sidc.be/cactus/catalog.php>) and those calculated with a significant delay after more thorough data processing (LASCO catalog, https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/). In particular, we consider the CMEs that reached the Earth's orbit in the period from 1997 to 2023 (FEID database, <https://tools.izmiran.ru/feid/>), for which a one-to-one correspondence was established between the two catalogs. Preliminary estimates of the relationship between the velocity values for different speed ranges and CME types are obtained, which can be used to make forecasts in near-real time (with the minimum delay provided by CACTUS).

Opportunities to expand neutron monitors network in order to increase its sensitivity to low-energy cosmic rays

S.A. Siruk, A.G. Mayorov, R.F. Yulbarisov

National Research Nuclear University MEPhI, Moscow 115409, Russia

The worldwide neutron monitors (NMs) network is a useful instrument for studying cosmic ray (CR) fluxes in the vicinity of Earth. The minimal energy of CR that still give their contribution to NM's count rate is determined by the Earth's magnetosphere over most of the planet's surface. This geomagnetic cutoff is maximal near the equator and becomes marginal close to the magnetic poles, so in polar regions the particles' minimal energy is mainly defined by the depth of the atmosphere instead. This means that polar NMs are basically more sensitive to low-energy CR and therefore to variations of galactic CR flux and bursts of solar energetic particles (SEP events). Additionally, polar stations are essential to study CR anisotropy, with some of them having very narrow asymptotic cones of acceptance and some being able to detect particles coming from high asymptotic latitudes.

Most polar NMs are located at sea level; however, there are polar regions with mountains or ice sheets, where the atmospheric depth is significantly lower. If stations are located at those places, they are even more sensitive to solar modulation and SEPs, and recent installation of such a detector caused the introduction of a new type of events, called sub-GLE. This study is dedicated to the search for such places and calculation of conditions for CR observations made by potential NMs that might be installed there. We simulated detectors' response to several SEP events and found that some of new NMs located at those places would be even more sensitive to low-energy cosmic rays than currently operating high-altitude polar observatories SOPO/SOPB, DOMC/DOMB and SNAE/SANB. Having 32 locations reviewed in total, we can conclude that there are a lot of perspective variants, so new detectors located there would greatly complement the existing network.

Analysis of variations in Solar and Geomagnetic Parameters for Solar Cycle 24 using Analysis of variance (ANOVA) method

D.K. Sondhiya¹ and Priyanka Gupta²

¹*Govt. Polytechnic College, Sahibganj, India*

²*School of Sciences, SAGE University, Bhopal, India*

The analysis of plagues and spots on the photosphere is critical to understanding the sun's magnetic field. These dynamic processes have an impact on the Earth's and other planets' magnetic fields. To analyze the characteristics of these variations, one must first investigate the appropriate parameter linked with solar activity, which entails examining the time variation in various solar activity metrics as well as their cyclic variation. Solar activity parameters are related with certain solar phenomena and presented in a simple numerical format. Solar activity parameters are separated into two categories: basic physical parameters and derived parameters. Basic parameters or indices are observed and measured directly, and they indicate numerical properties of solar activity such as sunspot number, sunspot area, flare brightness, and so on. On the other hand, derived parameters are derived from basic indices or combinations of them, such as the wolf number, flare indices, fluctuation indices, and so on. In this study, we used the statistical ANOVA method to examine the number of sunspots and their relationship to other solar activity characteristics. The identified anomalies in the link between SSN and other solar activity parameters have also been addressed. Create a suitable regression-based model to describe the many long-term features of solar activity.

Keywords: ANOVA, fluctuation indices and Solar activity

Influence of the Drag-Based Model input parameters choice on the CME forecast results in the 24th solar cycle

A. Vakhrusheva^{1,2}, Y. Shugay¹, K. Kaportseva^{1,2}, V. Ereemeev¹, V. Kalegaev^{1,2}

¹*SINP MSU, Moscow, Russia*

²*Faculty of Physics, MSU, Moscow, Russia*

E-Mail: vakhr.anna@gmail.com

Forecasting of coronal mass ejections (CMEs) propagation is one of important problems of space weather. The drag-based model (DBM) [1] is often used for modeling CMEs heliospheric propagation. DBM is based on the magnetohydrodynamic drag concept – at a certain distance from the Sun motion of CME is influenced by the drag force. MHD drag is determined by the interaction of the CME with ambient solar wind. The input parameters of the DBM are: CME onset time, CME speed, drag parameter γ , and the solar wind speed. The basic one-dimensional version of the DBM can be updated to a two-dimensional version by using, for example, cone model.

In this work, we model time of CME arrival to Earth's orbit and CME speed with three types of geometry: 1) concentric model (all points are at equal distance from the Sun), 2) self-similar model (CME front does not change its shape) and 3) flattening model (each plasma element of the CME front propagates independently) [2]. For this study we selected the CME-ICME events of the 24th solar cycle with a known solar source using the SINP MSU merged ICME catalog (https://swx.sinp.msu.ru/tools/icme_list.php). A total of 54 CMEs were included in the final sample. As the coordinated of the CME source we used the coordinated of the associated coronal dimming from the Solar Demon database (<https://www.sidc.be/solardemon/>) [3]. CME parameters were obtained from the CACTus LASCO catalog (<https://www.sidc.be/cactus/>) [4]. For our sample, the best results for the CME arrival time were obtained using the concentric model. The best results for the CME speed were obtained using the self-similar model. Also we considered influence on the forecast results of the DBM parameters such as CME initial speed, drag parameter, and the solar wind speed.

The research was supported by the Russian Science Foundation, grant № 22-62-00048, <https://rscf.ru/project/22-62-00048/>.

1. Vršnak B., Žic T., Vrbaneck D. et al. // *Solar Phys.* 2013. V. **285**. P. 295.
2. Dumbovic M., Calogovic J., Martinic K. et al. // *Front. Astron. Space Sci.* 2021. V. **8**. P. 639986.
3. Kraaikamp E., Verbeeck C. // *Space Weather Space Clim*, 2015. V. **5**. A18
4. Robbrecht E., Berghmans D. // *A&A.* 2004. V. **425**. P. 1097.

Выявление слабых вариаций потоков космических лучей из области полюса мира с помощью пары мюонных телескопов

Ю.В. Балабин*, А.В. Германенко, Б.Б. Гвоздецкий

Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

*E-mail: balabin@pgia.ru

В Апатитах (Кольский полуостров) и Баренцбурге (арх. Шпицберген) установлены идентичные мюонные телескопы. Минимальная энергия первичной частицы космических лучей для мюонных телескопов составляет ~5 ГэВ, а эффективная энергия регистрируемых частиц находится в диапазоне 50-100 ГэВ. При таких энергиях влияние магнитосферы Земли на частицы космических лучей невелико, можно принять, что поля зрения мюонных телескопов представляют собой геометрические конусы, направленные в зенит. Мюонные телескопы ведут непрерывную регистрацию.

В результате суточного вращения Земли направление приема космических лучей мюонным телескопом описывает широкий конус в пространстве. Из общего потока данных были отобраны периоды, когда ориентация поля зрения мюонного телескопа в межпланетном пространстве соответствовала заданному направлению относительно звезд. Интерес представляет в первую очередь направление на северный полюс мира и окрестности. Указанное направление недоступно большинству установленных на земле детекторов. После внесения стандартных корректирующих поправок, связанных с изменением давления и температуры атмосферы, по разработанной специальной методике проводилось дополнительное устранение вариаций, вызванных активностью Солнца (корональные дыры, форбуш-понижения) и происходящих на паре мюонных телескопов синхронно. После внесения поправок эти вариации существенно уменьшались, что давало возможность выявить слабые вариации, связанные с анизотропией космических лучей в межпланетном пространстве, которая может быть обусловлена широтной зависимостью солнечной активности или различиями в ее проявлении в зависимости от углового расстояния над плоскостью эклиптики.

Обработаны и проанализированы данные пары мюонных телескопов за 2022-24 годы, соответствующие периоду высокой солнечной активности. Анализ показал, что имеются периоды длительностью 15-20 дней, в которые анизотропия космических лучей превосходит флуктуации в 2-3 раза. Учитывая значительную длительность этих периодов, можно уверенно сказать, что такое отклонение от среднего значения не может быть случайным, а отражает реальную анизотропию космических лучей в области полюса эклиптики. Эти периоды, отличающиеся анизотропией потока космических лучей, наступают после мощных проявлений активности Солнца: корональных выбросов или сильных вспышек. Представленные результаты показывают возможность парой одинаковых мюонных телескопов регистрировать слабые эффекты анизотропии космических лучей, создаваемые проявлениями активности Солнца.

Анализ крупных форбуш-эффектов 25-го цикла по данным нейтронных мониторов и мюонных телескопов в Апатитах и Баренцбурге

Ю.В. Балабин*, А.В. Германенко, Е.А. Михалко, Л.И. Щур, Б.Б. Гвоздевский

Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

*E-mail: balabin@pgia.ru

На протяжении 2024 г. Солнце находилось в максимуме активности. За год произошли четыре значительных форбуш-понижения, превысившие 10 %. Случившиеся в 2024 г. форбуш-эффекты являются также самыми сильными за весь 25-й цикл солнечной активности, который начался в 2019 г. и приближается к максимуму. Наиболее сильный форбуш-эффект произошел 24.03.24. Следующий случился 10.05.24 г. Третий форбуш-эффект получился составным: 06.10.24 произошло умеренное понижение космических лучей, затем на фазе восстановления 10.10.24 после очередной вспышки на Солнце случился повторный форбуш-эффект, в сумме вызвавший уменьшение потока космических лучей на ~10 %. Наибольший интерес представляет последнее понижение, начавшееся 26.10.24. Оно имело растянутый фронт, минимум был достигнут 31.10.24. Типичный форбуш-эффект имеет резкое начало и медленное, в течение 5-10 дней восстановление. Форбуш-эффект в космических лучах обусловлен тем, что Земля попадает в большое облако плазмы, выброшенное Солнцем в межпланетное пространство. В этом облаке диффузия космических лучей затруднена из-за повышенного магнитного поля. Распространяясь далее за Землю, облако расширяется, магнитное поле слабеет, и плотность потока космических лучей постепенно восстанавливается. В последнем понижении фазы спада и роста примерно одинаковой длительности, что необычно и указывает на то, что непосредственно Земля не попадала в плазменное облако. Предложено простое объяснение происшедшему.

Нейросетевое определение параметров солнечного ветра по наблюдениям распределения магнитных полей на Солнце

Б.В. Козелов

ФГБНУ Полярный геофизический институт, Апатиты, Мурманская обл., ул. Академгородок, д. 26а.

E-mail: bob-koz@yandex.ru

Данные Кисловодской Горной астрофизической обсерватории и часовые данные базы OMNI использованы для построения набора для тренировки нейросетевой модели определения параметров солнечного ветра около Земли по наблюдениям распределения магнитных полей на Солнце. Обсуждаются нейросети, основанные на структурах свертки и трансформера, результаты тренировки нейросетей для различных геоэффективных параметров солнечного ветра.

Ссылки:

1. Магнитограммы полного диска Солнца, http://solarstation.ru/sun-service/magnetic_field
2. OMNI database, <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>

Интенсивность ГКЛ по данным эксперимента Регулярного Баллонного Мониторинга космических лучей и ситуация в минимумах и максимумах солнечного цикла

М.Б. Крайнев, Г.А. Базилевская, М.С. Калинин, А.Н. Квашнин,
В.С. Махмутов, А.К. Свиржевская, Н.С. Свиржевский

Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

В эксперименте регулярного баллонного мониторинга (РБМ) космических лучей в атмосфере Земли, проводимого ФИАН им. П.Н. Лебедева РАН, получен один из наиболее длинных рядов (с 1957 г. по настоящее время) однородных измерений характеристик, связанных с интенсивностью галактических космических лучей (ГКЛ). Однако, детекторы как РБМ, так и нейтронного мониторинга космических лучей регистрируют смесь первичных (т.е. пришедших в атмосферу из гелиосферы) космических лучей разного типа (в основном, протонов и ядер гелия) и энергии, а также вторичных (рождённых в атмосфере) космических лучей. Поэтому для использования результатов РБМ при исследовании модуляции ГКЛ в гелиосфере их надо откалибровать в терминах интенсивности первичных ГКЛ.

В докладе обсуждается решение этой задачи в первом приближении, а именно определяется связь между среднемесячной скоростью счёта всенаправленного детектора РБМ в максимуме зависимости этой скорости счёта от количества вещества над прибором для высокоширотных (Мурманск и Мирный), N_{max}^{MiMi} , и среднеширотных (Москва), N_{max}^{Mo} , пунктов измерения и интегральной интенсивностью протонов ГКЛ в определённых диапазонах энергии. Для этого N_{max}^{MiMi} и N_{max}^{Mo} сравниваются с результатами экспериментов РАМЕЛА (06.2006-01.2016 г.) и AMS-2 (05.2011- по н. вр.) и некоторых других.

С использованием интенсивности ГКЛ по данным РБМ продолжается начатое несколько лет назад сопоставление для экстремальных моментов СЦ интенсивности ГКЛ и важных для их распространения гелиосферных характеристик с индексами двух соответствующих ветвей активности Солнца (полоидальной для минимумов и тороидальной для максимумов СЦ).

Оценка скорости ионизации атмосферы Земли во время солнечных протонных событий

Е.А. Маурчев^{1,2}, К.А. Диденко¹, М.А. Абунина¹, Н.С. Шлык¹

¹*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Троицк, Россия*

²*Полярный геофизический институт (ПГИ), г. Анатиты, Россия*

Значения потоков протонов в дифференциальном энергетическом спектре галактических космических лучей (ГКЛ) варьируются согласно ярко выраженному 11-летнему циклу, особенно это касается низкоэнергичной части (~10-500 МэВ), где максимальные величины наблюдаются во время минимума солнечной активности. При этом высокоэнергичная часть спектра (здесь будем рассматривать диапазон 0,5-1000 ГэВ) практически неизменна. Наряду с воздействием протонов ГКЛ на атмосферу Земли, можно выделить явления солнечной активности – солнечные протонные события (СПС) и события GLE (ground level enhancement – явление возрастания скорости счета в системах наземных детекторов).

СПС характеризуются довольно мягким дифференциальным энергетическим спектром, при котором первичные частицы слабо участвуют в неупругих соударениях с веществом атмосферы и практически не генерируют каскады, следовательно не оказывают существенного влияния на нижние слои атмосферы (условно от уровня моря до 30 км). Однако такие явления часто характеризуются значительным увеличением потоков первичных протонов от единиц до сотен МэВ (хотя в некоторых событиях диапазон расширяется до энергий в единицы ГэВ), что в значительной мере увеличивает ионизацию верхних слоев атмосферы Земли (условно от 30 км до 100 км) и потенциально влияет на ее химические свойства в высоких широтах и в полярных регионах (в точках, где жесткость геомагнитного обрезания и условия распространения позволяют частицам достигать границы атмосферы на высоте 100 км). В настоящее время высокоширотный регион привлекает большое внимание благодаря использованию альтернативных торговых маршрутов. Следовательно, актуальность исследования влияния СПС на верхние слои атмосферы обусловлена необходимостью развития и поддержания бесперебойной работы навигации и радиосвязи в этом регионе.

Несмотря на большое количество исследований, связанных с вопросом о влиянии частиц ГКЛ и СКЛ на атмосферу Земли, уточнение многих расчетов остается открытым вопросом. Это связано с необходимостью постоянной доработки моделей взаимодействия частиц КЛ с атмосферой Земли, которые сильно зависят от последних открытий в области физики элементарных частиц. Также немаловажными пунктами являются проблемы верификации результатов по экспериментальным данным, а не сверка этих результатов с другими модельными расчетами, как это выполняется в ряде работ некоторых авторов. Не менее важно заметить, что для проведения моделирования требуются большие вычислительные мощности. В нашей работе используется программный комплекс RUSCOSMICS, поддерживаемый постоянными обновлениями GEANT4, а также верифицированный имеющимся в распоряжении научной группы экспериментальными данными. Модель работает на собственных современных серверах, которые не требуют аренды и доступны для использования круглосуточно. Как результат проведенных исследований представлены высотные профили скорости ионизации для нескольких значений жесткости геомагнитного обрезания и условий, соответствующих условиям СПС.

Small satellite "Scorpion" payload for the study of atmospheric gamma-ray flashes and transient phenomena

V.V. Bogomolov^{1,2}, A.A. Belov¹, A.V. Bogomolov¹, E.D. Voskresenskov², A.F. Iyudin¹, P.A. Klimov¹, I.A. Kucherenko², A.S. Murashov¹, S.I. Svertilov^{1,2}

¹*M.V. Lomonosov Moscow State University, D.V. Skobel'tsyn Institute of Nuclear Physics*

²*M.V. Lomonosov Moscow State University, Physical Department*

The Scorpion small satellite in the cubesat 16U format is currently being prepared for launch. It will carry a complex of scientific equipment from the Moscow State University Nuclear Research Institute, designed primarily to study transient phenomena in the upper atmosphere. The payload includes the TGS gamma-ray spectrometer for detecting atmospheric gamma-ray bursts (TGF), the SONENT optical and UV photometer and spectrometer for studying high-altitude discharges, as well as a complex of cosmic radiation detectors and a biocontainer for studying the influence of space factors on microorganisms. The satellite will be launched into a circular polar orbit with a height of ~ 500 km. Thus, observations will be carried out in all areas, including the areas of thunderstorm activity near the equator and the latitudes of the auroral oval.

The TGS instrument is a scintillation gamma-ray spectrometer that performs measurements in the range from 50 keV to 10 MeV. It consists of 4 modules representing position-sensitive detectors based on 64 detecting pixels with size 10 mm x 10 mm x 20 mm, viewed by SiPM semiconductor photodetectors. The device will generate data both in the traditional monitoring format, which contains counting rates in several energy channels, and in the event by event recording format, which allows recording the flash time profile with microsecond accuracy. It is necessary for studying TGFs with a characteristic duration of ~200 microseconds.

SONET scientific equipment is designed to study the spatial and temporal dynamics and spectral composition of radiation from transient atmospheric phenomena and lightning discharges. It includes the AURA-T telescope, being a highly sensitive imaging photometer, a spectrometer whose main purpose is to identify the type and height of the flash, and a limb camera, being a pinhole camera aimed at the limb with an angular resolution of 30 mrad.

The complex of cosmic radiation detectors includes semiconductor telescopes, Cherenkov detectors, neutron detectors and an electrostatic analyzer. Thus, the fluxes of all types of radiation will be measured, including solar and galactic cosmic rays, electrons and protons of radiation belts, as well as the hot plasma of near-Earth space.

The launch of the Scorpion satellite is scheduled for the summer of 2025. The expected daily data volume of ~100 MB will allow detailed information to be transmitted to Earth with simultaneous measurements by all instruments.

Полезная нагрузка малого спутника «Скорпион» для исследования атмосферных гамма вспышек и транзиентных явлений

В.В. Богомолов^{1,2}, А.А. Белов¹, А.В. Богомолов¹, Е.Д. Воскресенсков², А.Ф. Июдин¹,
П.А. Климов¹, И.А. Кучеренко², А.С. Мурашов¹, С.И. Свертилов^{1,2}

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

²*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет*

В настоящее время готовится к запуску малый спутник Скорпион в формате кубсат 16U, на котором будет установлен комплекс научной аппаратуры НИИЯФ МГУ, предназначенный в первую очередь для исследования транзиентных явлений в верхней атмосфере. В состав полезной нагрузки входят гамма-спектрометр ТГС для регистрации атмосферных гамма-вспышек (TGF), оптический и УФ спектрометр-фотометр СОНЭТ для исследования высотных разрядов, а также комплекс детекторов космической радиации и биоконтейнер для исследования влияния факторов космического пространства на микроорганизмы. Спутник будет выведен на круговую полярную орбиту высотой ~500 км. Таким образом, наблюдения будут проводиться во всех районах, в том числе в областях грозовой активности вблизи экватора и на широтах аврорального овала.

Прибор ТГС представляет собой сцинтилляционный гамма-спектрометр, осуществляющий измерения в диапазоне от 50 кэВ до 10 МэВ. Он состоит из 4-х модулей, в состав которых входят позиционно-чувствительные детекторы на основе 64 детектирующих пикселей размером 10 мм x 10 мм x 20 мм, просматриваемых полупроводниковыми фотоприемниками SiPM. В приборе будут формироваться данные как в традиционном формате мониторинга, содержащем скорости счета в нескольких каналах, так и в формате событийной записи, позволяющей записать временной профиль вспышки с микросекундной точностью, что необходимо для исследования TGF, имеющих характерную длительность ~200 мкс.

Научная аппаратура СОНЭТ предназначена для исследования пространственно-временной динамики и спектрального состава излучения транзиентных атмосферных явлений и молниевых разрядов. В её состав входят телескоп АУРА-Т – высокочувствительный изображающий фотометр, спектрометр, основное назначение которого – идентификация типа и высоты вспышки, и лимбовая камера – камера обскура, направленная на лимб с угловым разрешением 30 мрад.

В комплекс детекторов космической радиации входят полупроводниковые телескопы, черенковские детекторы, детекторы нейтронов и электростатический анализатор. Таким образом, будут осуществляться измерения потоков всех видов радиации, включая солнечные и галактические космические лучи, электроны и протоны радиационных поясов, а также горячую плазму околоземного пространства.

Запуск спутника «Скорпион» запланирован на лето 2025 года. Ожидаемый суточный объём данных ~100 Мб позволит передать на Землю детальную информацию при одновременных измерениях всеми приборами.

Meteorological storm influence on regional TEC disturbance

O.P. Borchevkina, A.V. Timchenko, F.S. Bessarab, Y.A. Kurdyayeva, I.V. Karpov, G.A. Yakimova, M.V. Klimenko

*West Department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation
Russian Academy of Sciences, 236017 Kaliningrad, Russia*

This study presents a comprehensive analysis of the impact of Storm Laura, which was observed over Europe and the Baltic Sea on March 12, 2020, on the state of thermosphere-ionosphere system. The investigation of ionospheric disturbances caused by the meteorological storm was carried out using a combined modeling approach, incorporating the regional AtmoSym model and the global GSM TIP model. This allowed for the consideration of AWs and IGWs generated by tropospheric convective sources and the investigation of wave-induced effects in both the neutral atmosphere and ionosphere.

The simulation results showed that three hours after the activation of the additional heat source, an area of increased temperature exceeding 100 K above the background level is formed over the meteorological storm region. This temperature change had a significant impact on the meridional component of the thermospheric wind and TEC variations. For example, meridional wind changes reached 80 m/s compared to the meteorologically quiet day, while TEC variations reached 1 TECu.

To analyze the ionospheric state during the meteorological storm, we utilized TEC maps from the CODE, MOSGIM, and the West department IZMIRAN. The difference between TEC values obtained from observations on March 12, 2020 and March 10, 2020 was analyzed.

All maps show a similar negative TEC effect in the European sector, reaching 2–3 TECu in the experimental data and up to 1 TECu in the modeling results. However, the localization of the negative effect differs slightly, likely due to differences in the map generation techniques. Good agreement was obtained with experimental TEC maps from CODE, MOSGIM, and WD IZMIRAN, which revealed a similar negative TEC value effect over the meteorological storm region.

A comparison of numerical modeling results with experimental data suggests that atmospheric gravity waves generated in the meteorological storm region and propagating from the troposphere have a significant impact on the thermosphere-ionosphere system. Moreover, the modeling results show reasonable agreement with the experimental data.

Ionospheric response and GPS positioning errors during the main phase of the 10-11 May 2024 geomagnetic storm

E.I. Danilchuk^{1,2}, Yu.V. Yasyukevich¹, A.M. Vesnin¹, A.V. Klusilov¹, B. Zhang³

¹*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia*

²*Irkutsk State University, Irkutsk, Russia*

³*State Key Laboratory of Geodesy and Earth's Dynamics, Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, China*

Geomagnetic storms are space weather phenomena that are caused by the enhanced solar wind and its interaction with the magnetosphere. Geomagnetic storms significantly affect ionosphere and Global Navigation Satellite Systems (GNSS) positioning accuracy. We analyzed the ionospheric response to the main phase of the extreme geomagnetic storm of the 10-11 May 2024 using GNSS data. Our research focuses on the auroral oval boundary and displacements of the equatorial anomaly crests, as well as GPS precise point positioning (PPP). ROTI and global ionospheric maps showed the ionospheric dynamics. During the main phase the auroral oval extended up to 30°N in the western hemisphere and up to 45°N in the eastern hemisphere. ROTI values peaked at 2 TECU/min at 40°N geomagnetic latitude. At the same time, the crest of equatorial anomaly intensified up to 200 TECU and shifted polarward in the American sector. These processes have led to a unique phenomenon – the intersection of the auroral oval boundary and the equatorial anomaly in North America. In addition, the ROTI correlated with errors in the kinematic PPP. Positioning errors increased 1.5-5 times at the boundary of the auroral oval. The 10-11 May 2024 geomagnetic storm significantly affected the ionosphere and the positioning and, threatening several applications based on navigation and communications, requiring further studies.

The work is financially supported by Russian Science Foundation (project № 23-17-00157, <https://rscf.ru/project/23-17-00157/>).

The two-way coupling of the global MHD model and the thermosphere/ionosphere model

A.V. Divin¹, E. Gordeev, M.V. Klimenko², F.S. Bessarab², K.V. Belyuchenko^{1,2}, V.V. Klimenko², E.V. Rozanov¹, V.G. Merkin³, K.A. Sorathia³

¹*Saint-Petersburg University, 199034, Russian Federation; e-mail: a.divin@spbu.ru*

²*West Department of Pushkov IZMIRAN, Kaliningrad, Russia*

³*JHU/APL, Laurel, MD, USA*

Our study presents first results of the two-way coupling of the global MHD model of magnetosphere GAMERA/MAGE and the thermosphere/ionosphere model GSMTIP. GAMERA is a 3D global MHD model which employs high-order and non-diffusive numerics. The three-dimensional GSMTIP model calculates global evolution of density, velocity, temperature, composition of neutral and ionized species of thermosphere and ionosphere. The global MHD model provides field-aligned current into the ionosphere, as well as an electron precipitation model. Self-consistent ionospheric resistivity computed by the GSMTIP model provides the ionospheric feedback into the magnetosphere. Both models (GAMERA and GSMTIP) contain a separate ionospheric potential solvers and calculate independently the cross polar cap potentials as a diagnostics. Comparison of electron precipitation energy and geometry shows that the MHD model and empirical model of precipitation are reasonably in a good match. However, for the intense magnetic storm of March, the MHD model requires downscaling of electron energies keeping the total energy flux. The distribution of the neutral gas temperature in the ionosphere serves as a benchmark for the coupled model run. The total ionospheric-magnetospheric current in the model appears to be close to empirical values measured by AMPERE project. The success of such a coupled model will allow us to improve our understanding of global processes in those areas of the ionosphere where direct measurements are difficult.

This study is supported by State funding of Saint-Petersburg University, No 116234986.

Influence of atmosphere-ionosphere and magnetosphere-ionosphere coupling on upper atmosphere response to geomagnetic storm: First-principle model's results

M.V. Klimenko¹, K.V. Belyuchenko^{1,2}, F.S. Bessarab¹, A.V. Divin³,
V.V. Klimenko¹, K.G. Ratovsky³, A.V. Timchenko¹, E.V. Rozanov²

¹*West Department of Pushkov IZMIRAN, Kaliningrad, Russia*

²*SPbSU, Sankt-Petersburg, Russia*

³*ISTP SB RAS, Irkutsk, Russia*

The purpose of this work is to briefly review recent model studies and subsequent interpretation of upper atmosphere response to geomagnetic storm. In this report we present some novel aspects in atmosphere-ionosphere and magnetosphere-ionosphere coupling during 2015 March and 2024 May geomagnetic storms that was revealed by the different version of Global Self-consistent Model of Thermosphere, Ionosphere and Protonosphere (GSM TIP). At that GSM TIP model used along and as a part of whole atmosphere model (Entire Atmosphere GLobal model (EAGLE)) and magnetosphere-ionosphere model (GAMERA-GSM TIP). The existence of some modeled ionospheric and upper atmosphere features was validated using different ground-based and satellite measurements. The cross-comparison of different version of GSM TIP model results allow to understand the influence of atmosphere-ionosphere and magnetosphere-ionosphere coupling processes on ionospheric response to geomagnetic storm. Some problem in model reproduction of upper atmosphere response to geomagnetic storms will be discussed.

Recording of whistlers and high-altitude discharges during Bezmyanni and Shiveluch volcano eruptions

E.I. Malkin, N.V. Cherneva, E.A. Kazakov, B.M. Shevtsov

Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation (IKIR FEB RAS), Paratunka, Russia

Continuous monitoring of natural electromagnetic radiation in VLF range by a VLF direction finder, which records signals of electric and magnetic components of the electromagnetic field and determines the direction of radiation arrival in real time, made it possible to create a long-term data base of lightning activity on Kamchatka peninsular. Statistical analysis of the obtained data base was carried out to detect whistler generation sources using the data of the Automatic Whistler Detector and Analyzer Network and the World Wide Lightning Location Network. Different electromagnetic signals were recorded during the analysis of the strongest eruptions of Bezmyanni and Shiveluch volcanoes, observed in 2023, from the corresponding azimuths along the direction to the active volcanoes. The time range, selected for the analysis, is determined by a large number of recorded pulses. For example, the total number of strokes during Shiveluch volcano eruption reached 26101 pulses. In the general data flow, signals of whistler type were detected. Analysis of their disperse characteristics showed the presence of initiating atmospherics that, in its turn, indicates so called long whistlers. Two-hop whistlers were identified by dispersion coefficient, which corresponded to the double passage of the signal from Kamchatka to Australia and back. The heights of the electric discharges were determined by means of interferograms of direct and reflected from the ionosphere radiofrequency atmospherics. The high-altitude distribution of an electric discharge is obtained, the penetration of which into the ionosphere is responsible for the generation of whistlers. The characteristics of volcanic electrical discharges and whistlers can be used to estimate the height of an explosive eruption.

The work was supported by IKIR FEB RAS State Task (subject registration No.124012300245-2).

GNSS AltBOC Signals and Their Perspectives for Ionospheric TEC Studies

A. Padokhin^{1,2,3}, Yu. Yasyukevich³, V. Demyanov³, C. Chen¹, I. Pavlov^{1,2,3}, A. Vesnin³, E. Danilchuk³

¹*Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Russia*

²*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radiowave Propagation RAS, Moscow, Russia*

³*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia*

For decades, GNSS code measurements were much noisier than phase ones, limiting their applicability to ionospheric total electron content (TEC) studies. Ultra-wideband AltBOC signals changed the situation. This study revisits the Galileo E5 and BeiDou B2 AltBOC signals and their potential applications in TEC estimation. We found that TEC noises are comparable for the single-frequency AltBOC phase-code combination and those of the dual-frequency legacy BPSK/QPSK phase combination, while single-frequency BPSK/QPSK TEC noises are much higher. High-rate measurements at the ACRG and SGPO receivers revealed a mean 100 sec TEC RMS (used as the noise proxy) of 0.26 TECU, 0.15 TECU, and 0.09 TECU for the BeiDou B2(a+b) AltBOC signal and satellite elevations 0–30°, 30–60°, and 60–90°, correspondingly, and 0.22 TECU, 0.14 TECU, and 0.09 TECU for the legacy B1/B3 dual-frequency phase combination. The Galileo E5(a+b) AltBOC signal corresponding values were 0.25 TECU, 0.14 TECU, and 0.09 TECU; for the legacy signals' phase combination, the values were 0.19 TECU, 0.13 TECU, and 0.08 TECU. The AltBOC (for both BeiDou and Galileo) SNR exceeds those of BPSK/QPSK by 7.5 dB-Hz in undisturbed conditions. Radio frequency interference (the 28 August 2022 and 9 May 2024 Solar Radio Burst events in our study) decreased the AltBOC SNR 5 dB-Hz more against QPSK SNR, but, due to the higher initial SNR, the threshold for the loss of the lock was never broken. Today, we have enough BeiDou and Galileo satellites that transmit AltBOC signals for a reliable single-frequency ν TEC estimation. This study provides new insights and evidence for using Galileo and BeiDou AltBOC signals in high-precision ionospheric monitoring.

The work was supported by Russian Science Foundation project № 23-17-00157

Ionospheric responses to isolated and strong geomagnetic events identified by AE-index: statistical analysis and modeling

K.G. Ratovsky¹, V.V. Klimenko², M.V. Klimenko², A.M. Vesnin¹, K.V. Belyuchenko²

¹*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia*

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

The paper presents comparison of ionospheric responses to isolated and strong geomagnetic events identified by the AE-index (AE-storms) using statistical analysis and modeling. The statistical analysis includes identification of isolated and strong geomagnetic events based on the AE-index and calculation of the “reference” ionospheric response. The “reference” response is the dynamics of the average ionospheric disturbance obtained by 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 is relative (percentage) deviation of the observed values from the 27-day running average REC. To perform model calculations based on the Global Self-Consistent Model of the Thermosphere, Ionosphere and Protonosphere (GSM TIP), we used “reference” AE-storms, as control parameters, obtained by averaging the variation of the AE- and AL-indices using the superimposed epoch method with key moments corresponding to the maximum of the AE-index.

The comparative analysis of the “reference” responses to strong and isolated AE-storms revealed the following patterns. The response to strong storms is generally more negative: (a) with the exception of one case, the response to strong storms has negative phase; (b) in a number of cases, the response lacks a positive phase, which is present in the responses to isolated storms; and (c) in most cases, the amplitude of the negative response increases. As a rule, the amplitudes of positive responses (when they are present) are close for both types of AE-storms, with the exception of the high-latitude zone of the Southern Hemisphere. In some cases, the amplitudes of both positive and negative responses to strong and isolated AE-storms are close to each other.

Comparison of model calculations with observations showed that the best agreement is observed for high-latitude zones of both hemispheres, where GSM TIP demonstrates qualitative agreement with observations with some quantitative differences. For mid-latitude zones of both hemispheres and the equatorial zone, GSM TIP does not reproduce (or reproduces with a noticeable underestimation) the positive phase of the observed ionospheric response. In the case of a negative phase, GSM TIP agrees well with observations in a number of cases. In general, GSM TIP reproduces an increase in the negative phase of the ionospheric response during the transition from isolated AE storms to strong AE storms.

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

Polarization Jet/SAID behavior during extreme geomagnetic disturbances

A.A. Sinevich^{1,2}, A.A. Chernyshov¹, D.V. Chuginin¹, M.M. Mogilevsky¹

¹*Space Research Institute, Moscow, Russia; e-mail: sinevich.aa@gmail.com*

²*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Troitsk, Moscow, Russia*

Polarization jet (PJ, also known as SubAuroral Ion Drift, SAID) is a phenomenon occurring in the subauroral ionospheric plasma. PJ/SAID is a narrow band of strong westward ion drift at F-layer altitudes near the plasmopause projection boundary. It is well known that the generation of PJ/SAID and its characteristics are closely related to geomagnetic activity. Since during extreme geomagnetic storms the ionosphere undergoes significant changes, it is interesting to investigate the behavior of PJ/SAID during these storms. In this work, we study and compare PJ/SAID occurrences and their characteristics in the subauroral ionosphere during such extreme geomagnetic storms as Halloween Storm 29-31 October 2003, St. Patrick’s Day Storm 17 March 2015, Victory Day Storm 10-12 May 2024, and October Storm 10-12 October 2024.

Some experiments onboard Ionosphere satellites №1, 2: First results and perspectives

S.I. Svertilov^{1,2} from Ionosphere collaboration

¹*M.V. Lomonosov Moscow State University, D.V. Skobel'tsyn Institute of Nuclear Physics*

²*M.V. Lomonosov Moscow State University, Physical Department*

The main goals and objectives of the Ionosphere space mission for monitoring of physical processes in the Earth upper atmosphere, ionosphere and magnetosphere, as well as solar activity are considered.

During Ionosphere mission realization four Ionosphere-M spacecraft should be launched into near-Earth orbit with a set of instruments to monitor the heliogeophysical conditions in the upper atmosphere, ionosphere and near-Earth space. The Ionosphere-M spacecraft should be launched into circular sun-synchronous orbits in two orbital planes (2 spacecraft in each plane), with the satellites spaced apart at an angle of $180\pm 30^\circ$ in each plane. The first pair of spacecraft was launched on the night of November 4-5, 2024, from the Vostochny Cosmodrome. Their orbital parameters are: altitude ~ 820 km; orbital period ~ 101 min; inclination $\sim 98^\circ$; eccentricity ~ 0.001 ; position of the orbital plane relative to the mean Sun right ascension $\sim 135^\circ$; local time of the ascending node of the orbit ~ 21 h. The orbital parameters of the second pair of spacecraft differ in the position of the orbital plane relative to the mean Sun right ascension - $\sim 46^\circ$ and the local time of the ascending node of the orbit ~ 15 h. The launch of the second pair is scheduled for June 2025.

The scientific payload includes instruments for radio tomography of the upper atmosphere and ionosphere, i.e. the LAERT ionosphere probe for the range of 0.1 – 20 MHz with a 137 MHz transmitter, a dual-frequency (150, 400 MHz) Mayak transmitter, and a PES instrument that allows estimation of the electron content density using global navigation system satellite signals. The payload also includes a low-frequency wave complex NVK which ensures control of the electromagnetic wave environment, detectors of hot magnetospheric plasma SPER/1 (electrons and protons with energy of 0.1 – 20.0 keV) and high-energy charged particles (electrons 0.15 – 10.0 MeV, protons 2 - 160 MeV), as well as a hard X-ray and gamma ray spectrometer SG/1 (0.0.2 – 10.0 MeV), a detector of galactic cosmic rays GALS and an ozonometer. The last instrument will be installed only on the second pair of spacecraft.

To the present, the first data have been received from the scientific payload instruments. With the help of the LAERT instrument, spectrograms were obtained both in the active mode and in the monitor measurement mode. Using the NVK instrument, various electromagnetic phenomena were detected, i.e. whistlers, plasmaspheric and auroral hisses, various types of oscillations, etc. The SPER/1 instrument provides information on low-energy electron fluxes in the polar oval region, as well as sub-relativistic and relativistic electrons in the areas of trapped radiation zones and precipitation. With the help of the SG/1 gamma spectrometer, solar flare hard X- and gamma rays were detected, and monitor measurements of the gamma ray background in the near-Earth space are being carried out.

Thus, in case of successful implementation of the Ionosphere missions, control of physical parameters of electromagnetic fields and corpuscular radiation in near-Earth space will be ensured, new information about geophysical processes occurring in the magnetosphere, ionosphere and upper atmosphere in their connection with solar activity will be obtained. In turn, this will allow conclusions about the possible impacts of these processes on the environment, including land, sea, air and orbital means and systems. In the future, joint observations with ground installation among which electromagnetic signal transmitters and heating stands are also planned.

Некоторые эксперименты на спутниках Ионосфера-М №1, 2: первые результаты и перспективы

С.И. Свертилов^{1,2} от имени коллаборации «Ионосфера»

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

²*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет*

Рассматриваются основные цели и задачи космической миссии «Ионосфера» по мониторингу физических процессов в верхней атмосфере, ионосфере и магнитосфере Земли, а также солнечной активности.

В рамках проекта «Ионосфера» предполагается осуществить вывод на околоземную орбиту четырех космических аппаратов (КА) «Ионосфера-М» с комплексом приборов, обеспечивающих контроль гелиогеофизической обстановки в верхней атмосфере, ионосфере и околоземном космическом пространстве. КА «Ионосфера-М» запускаются на круговые солнечно-синхронные орбиты в двух орбитальных плоскостях (по 2 КА в каждой плоскости), при этом в каждой плоскости спутники должны быть разведены на угол $180 \pm 30^\circ$. Первая пара аппаратов была запущена в ночь с 4 на 5 ноября 2024 г. с космодрома «Восточный», параметры их орбит: высота ~ 820 км; период обращения ~ 101 мин; наклонение $\sim 98^\circ$; эксцентриситет ~ 0.001 ; положение плоскости орбиты относительно прямого восхождения среднего Солнца $\sim 135^\circ$; местное время восходящего узла орбиты ~ 21 ч. Параметры орбиты второй пары КА отличаются положением плоскости орбиты относительно прямого восхождения среднего Солнца - $\sim 46^\circ$ и местным временем восходящего узла орбиты ~ 15 ч. Запуск второй пары запланирован на июнь 2025 г..

Научная аппаратура (НА) включает приборы для радио-томографии верхней атмосферы и ионосферы – ионозонд ЛАЭРТ на диапазон 0.1 – 20 МГц с передатчиком 137 МГц, двухчастотный (150, 400 МГц) передатчик «Маяк», прибор ПЭС, позволяющий оценивать плотность электронного содержания по сигналам от спутников глобальных навигационных систем. Также в состав НА входят: низкочастотный волновой комплекс (НВК), обеспечивающий контроль электромагнитно-волновой обстановки, детекторы горячей магнитосферной плазмы СПЭР/1 (электроны и протоны с энергией 0.1 – 20.0 кэВ) и заряженных частиц высоких энергий (электроны 0.15 – 10.0 МэВ, протоны 2 - 160 МэВ), а также спектрометр жесткого рентгеновского и гамма-излучения СГ/1 (0.0.2 – 10.0 МэВ), детектор галактических космических лучей ГАЛС и озонметр. Последний прибор будет установлен только второй паре КА.

На сегодняшний день получены первые данные с приборов комплекса научной аппаратуры. С помощью прибора ЛАЭРТ получены спектрограммы как в активном режиме, так и в режиме мониторинговых измерений. С использованием аппаратуры НВК зарегистрированы различные электромагнитные явления – вистлеры, плазмосферные и авроральные шипения, различные типы колебаний и т.п.. Прибор СПЭР/1 дает информацию о потоках электронов низких энергий в районе полярного овала, а также суб-релятивистских и релятивистских электронов в областях зон захваченной радиации и высыпаний. С помощью гамма-спектрометра СГ/1 зарегистрировано жесткое рентгеновское и гамма излучение солнечных вспышек, осуществляются мониторинговые измерения фоновых потоков гамма-излучения в околоземном пространстве.

Таким образом, в случае успешной реализации программы экспериментов на КА «Ионосфера» будет обеспечен контроль физических параметров электромагнитных полей и корпускулярных излучений в околоземном пространстве, будет получена новая информация о геофизических процессах, протекающих в магнитосфере, ионосфере и верхней атмосфере в их связи с солнечной активностью. В свою очередь, это позволит сделать выводы о возможных воздействиях указанных процессов на окружающую среду, включая наземные, морские, воздушные и орбитальные средства и системы. В перспективе также планируются совместные наблюдения с наземными установками, включая передатчики электромагнитных сигналов и нагревные стенды.

Russian project «Ionosphere»

Team of the Russian project «Ionosphere»

As part of the Russian project "Ionosphere," it is planned to deploy four spacecraft (two pairs of satellites) into near-Earth orbit, equipped with a suite of scientific instruments designed to monitor the heliogeophysical conditions in the near-Earth space. The "Ionosphere" spacecrafts are intended to operate in near-circular, Sun-synchronous orbits across two orbital planes (with two spacecraft in each plane). The first pair of satellites was launched in November 2024 and is already operational in orbit. The scientific payload of the first pair of "Ionosphere" satellites includes instruments for radio tomography of the upper atmosphere and ionosphere—an ionosonde operating in the 0.1–20 MHz range with a 137 MHz transmitter, a dual-frequency (150, 400 MHz) transmitter, instruments for monitoring the magnetospheric wave environment—a low-frequency wave complex, electric and magnetic field sensors, detectors for hot magnetospheric plasma (electrons and protons with energies of 0.1–20.0 keV) and high-energy charged particles (electrons 0.15–10.0 MeV, protons 2–160 MeV), as well as a spectrometer for hard X-ray and gamma radiation (0.02–10.0 MeV), a galactic cosmic ray detector, and a GPS/GLONASS total electron content monitor. This ensures comprehensive monitoring of the physical parameters of electromagnetic fields and corpuscular radiation in the near-Earth space. The second pair of "Ionosphere" spacecrafts is planned for launch in mid-2025. Various scientific and educational institutions of the Russian Federation are participating in the scientific experiments of this mission. Initial results obtained during flight tests in December 2024 and January-February 2025 are presented.

Using navigation systems to study wave processes in the ionosphere

M.A. Volkov¹, A.D. Gomonov², A.V. Gurin¹, M.V. Shvets²

¹*Murmansk Arctic University*

²*Polar Geophysical Institute*

Dual-frequency data from GPS and GLONASS navigation systems are used to reconstruct the electron density distribution in the ionosphere. TEC values calculated from satellite data are used to solve the inverse problem of reconstructing the electron density. The unknown density distribution function above the observation point in the ionosphere is specified as the product $f(z)\varphi(x,y)$, z,x,y are the coordinates directed upward from the observation point for navigation satellites, to the north and to the east. The altitude distribution $f(z)$ is modeled by a parabolic layer, $\varphi(x,y)$ is a two-dimensional expansion of the unknown function in a Taylor series. Integration of the distribution function along the radio beam line from the observation point to the satellite yields the TEC value. When approximating $\varphi(x,y)$ with a third-order polynomial in x,y , we obtain 10 unknown parameters, for the determination of which data from 10 satellites are required. Navigation and observation data are used in the RINEX format. Observations are presented as second-long data. Satellite data allow us to obtain ionospheric concentration distributions over an area of 200 km in the north and east directions. Within the framework of this electron concentration model, it is possible to study wave ionospheric disturbances propagating in the horizontal plane x, y with a period equal to or greater than 400 s. The paper studies temporal changes in electron concentration.

Использование навигационных систем для исследования волновых процессов в ионосфере

М.А. Волков¹, А.Д. Гомонов², А.В. Гурин¹, М.В. Швец²

¹*Мурманский арктический университет*

²*Полярный геофизический институт*

Двухчастотные данные навигационных систем *GPS* и *GLONASS* используются для восстановления распределения электронной концентрации в ионосфере. Значения *TEC*, рассчитанные по данным со спутников, применяются для решения обратной задачи- восстановлению электронной концентрации. Неизвестную функцию распределения концентрации над точкой наблюдения в ионосфере задаем в виде произведения $f(z)\varphi(x,y)$, z,x,y -координаты, направленные вверх от точки наблюдения за навигационными спутниками, на север и на восток. Высотное распределение $f(z)$ моделируется параболическим слоем, $\varphi(x,y)$ -двумерным разложением неизвестной функции в ряд Тейлора. Интегрирование функции распределения вдоль линии радиолуча от точки наблюдения до спутника дает значение *TEC*. При аппроксимации $\varphi(x,y)$ полиномом третьего порядка по x,y получаем 10 неизвестных параметров, для определения которых необходимы данные 10 спутников. Навигационные данные и данные наблюдений используются в *RINEX* формате. Наблюдения представлены секундными данными. Спутниковые данные позволяют получать распределения концентрации в ионосфере на площади с размерами в 200 км в направлении на север и на восток. В рамках данной модели электронной концентрации можно изучать волновые ионосферные возмущения, распространяющиеся в горизонтальной плоскости x, y с периодом равным или большим 400 с. В работе исследуются временные изменения электронной концентрации.

Global Navigation Satellite Systems to study the Earth's ionosphere

Yu.V. Yasyukevich¹, E. Astafyeva², Y.I. Egorov¹, A.V. Kiselev¹, V.P. Lebedev¹,
B.M. Maletckii², A.M. Padokhin^{1,3}, B.G. Salimov¹, A.M. Vesnin¹

¹*Institute of solar-terrestrial physics SB RAS, Irkutsk, Russia*

²*Institute of Earth Physics of Paris (IPGP), Paris, France*

³*Lomonosov Moscow State University, Moscow Russian*

The Global navigation satellite system (GNSS) provides vast data sets to study the Earth's ionosphere and various aspects of space weather impact. The talk will briefly review GNSS-based experimental studies of the ionospheric effects from solar flares, solar terminator, solar eclipses, magnetic storms, etc., mentioning recent events such as the ionospheric effects of the 2023 Turkey earthquake, or the 18 November 2023 Starship explosion. Such researches are based on total electron content variations. Our team developed a free-to-use system to treat GNSS data – SIMuRG (<https://simurg.iszf.irk.ru>). The system could be useful for studying the ionospheric space weather. We have also developed a tool to forecast the TEC and forecast indices to drive ionospheric models.

The work is financially supported by the Russian Science Foundation (project No. 23-17-00157).

Различия интенсивностей свечения молекулярного кислорода в условиях планет с преобладающей концентрацией CO₂ и в земных условиях с малым содержанием углекислого газа

О.В. Антоненко, А.С. Кириллов

ПГИ, г. Анапты, Россия; e-mail: antonenko@pgia.ru

В настоящей работе представлены рассчитанные значения интегральной светимости полос Герцберга II, Чемберлена для условий Земли, Венеры, Марса, планет с различной концентрацией CO₂. Обсуждается корреляция результатов теоретических расчетов интенсивностей свечения возбуждённого молекулярного кислорода с экспериментальными данными по ночному свечению O₂, полученными с космического шаттла на Земле, со спутника на Марсе, со станции на Венере. Обсуждаются также особенности гашения молекулярного кислорода в условиях планет с преобладающей концентрацией CO₂ (Марс, Венера). Наблюдается, что свечение полос Герцберга II на Земле значительно слабее, чем на Венере и на Марсе, что объясняется слабой концентрацией CO₂ по сравнению с концентрацией CO₂ на планетах земной группы.

Исследование отклика ионосферы на геомагнитные бури разной интенсивности

К.В. Белоченко¹, М.В. Клименко¹, В.В. Клименко¹, К.Г. Ратовский²

¹*Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Калининград, Россия*

²*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия*

На основе Глобальной Самосогласованной Модели Термосферы, Ионосферы и Протоносферы (ГСМ ТИП) были проведены расчеты отклика ионосферы на геомагнитные бури разной интенсивности и в разные сезоны. Моделирование было проведено для таких бурь как: 1 октября 2006, 1 ноября 2012, 17 марта 2015, 2 февраля 2022 и 10 мая 2024 года. Возмущения в Dst индексе для этих бурь варьируется от – 50 нТл для октября 2006, до – 400 нТл для мая 2024 года. Было произведено сравнение широтно-временных возмущений в ионосфере для этих событий.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 25-27-00217.

Анализ вариаций диапазона частот прохождения коротковолновых сигналов на европейских трассах России во время магнитно-ионосферной возмущенности в конце 2024 – начале 2025 годов

Ф.И. Выборнов^{1,2}, О.А. Шейнер²

¹*Волжский государственный университет водного транспорта, г. Нижний Новгород, Россия; e-mail: vybornov@nirfi.unn.ru;*

²*НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия; e-mail: rfj@nirfi.unn.ru*

Представлены результаты исследований вариаций ключевых характеристик ионосферного коротковолнового канала: максимальной и наименьшей наблюдаемых частот на среднеширотной и субавроральной трассах в условиях переменной геомагнитной активности в конце 2024 - начале 2025 годов. Для анализа использовались данные наблюдений ионосферы на станциях наклонного и вертикального зондирования ионосферы. Проведено сопоставление изменений наблюдаемых частот F - и E_s -мод распространения. Показана роль солнечной активности в вариациях ключевых параметров, установлены причины геомагнитной активности.

На основании полученных результатов предлагается ряд рекомендаций по разработке аппаратуры зондирования ионосферы и использованию каналов КВ-УКВ связи.

Участие в работе Шейнер О.А. поддержано проектом FSWR-2023-0038 в рамках базовой части Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ.

Поведение полярной ионосферы во время сильных магнитных бурь в 2024 году по данным радиотрассы наклонного зондирования Мурманск-Туманный

А.Д. Гомонов, О.В. Мингалев, И.В. Мингалев

Полярный геофизический институт,

184209, г. Мурманск, ул. Халтурина, 15, Мурманская обл., г. Апатиты, ул. Академгородок, 26а

E-mails: *gomonov@pgi.ru, mingalev_o@pgia.ru, mingalev_i@pgia.ru*

В докладе обсуждаются данные короткой радиотрассы наклонного зондирования ионосферы Мурманск-Туманный в спокойных условиях и во время сильных магнитных бурь в разные сезоны в 2024 году. Обсуждаются ионограммы радиотрассы и параметры слоев ионосферы во время взрывной фазы суббури возмущений, а также во время их восстановительной фазы. Также обсуждаются данные ионозонда вертикального зондирования в обсерватории Лопарская. Оценивается время прохождения овала полярных сияний через радиотрассу.

Ключевые слова: радиотрасса наклонного зондирования, магнитная буря, ионосфера

О разработке Python-пакета для расчёта солнечного КУФ/ДУФ излучения согласно модели А. Нусинова

О.В. Золотов¹, Б.Е. Прохоров², Ю.В. Романовская¹, А.А. Татарников^{1,2}, Ю.А. Шаповалова^{3,2}

¹*Кафедра информационных технологий, Мурманский арктический университет, г. Мурманск, Россия*

²*Научно-исследовательская лаборатория «Компьютерное моделирование физических процессов в околоземной среде», Мурманский арктический университет, г. Мурманск, Россия*

³*Лаборатория радиопросвечивания, Полярный геофизический институт, г. Мурманск, Россия*

В работе описывается Python3-реализация моделей крайнего (КУФ) и дальнего (ДУФ) ультрафиолетового солнечного радиоизлучения, представленных в работах А.А. Нусинова [Nusinov et al., 2021, doi: 10.3390/rs13081454], оформленная в виде Python-пакета `pyNusinov`.

Модель КУФ излучения рассчитывает поток излучения (5-105 нм) для 20 интервалов и 16 дискретных линий. Модель ДУФ излучения рассчитывает поток солнечного радиоизлучения для 127 интервалов с шагом 1 нм для диапазона длин волн 115-242 нм. Обе модели являются функциями индекса L_{α} .

Пакет `pyNusinov` рассчитывает спектры, а не отдельные линии или интервалы, позволяет проводить вычисления как для одного, так и для нескольких значений параметра L_{α} . 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.

Расчет импеданса ионосферы для волн КНЧ-диапазона обобщенным методом ВКБ

Н.В. Иванов^{1,2}, А.Д. Гомонов¹

¹Полярный Геофизический Институт, г. Мурманск

²Научно-исследовательская лаборатория компьютерного моделирования физических процессов в околоземной среде, Мурманский арктический университет, г. Мурманск

Расчёт импеданса ионосферы для нормально падающей волны важная задача исследования распространения волн в волноводе Земля-ионосфера. На частотах ниже 50 Гц ионосфера – плазма с замагниченными ионами, в ней формируется тензор диэлектрической проницаемости типа прозрачного анизотропного диэлектрика, но без трех вещественных главных осей. При нормальном падении в ионосфере распространяются волны двух поляризации. При строго вертикальном магнитном поле Земли, волны обеих поляризации распространяются независимо и являются строго круговыми. Но даже при малых отклонениях внешнего магнитного поля от вертикального, происходит взаимная трансформация волн, которая может оказаться значительной, т.к. обусловлена относительной скоростью изменения коэффициента поляризации по высоте. В общем виде (с учетом трансформации волн) задача решается намного сложнее, чем в случае независимого распространения, что значительно затрудняет расчет. Однако мы полагаем, что модель с независимым распространением волн обеих поляризации можно применять намного шире. Для этого мы предлагаем, как новый способ оценки влияния трансформации, так и новый способ расчета импеданса на основе обобщения метода ВКБ.

Оценка энергии авроральных электронов по фотометрическим данным интенсивности эмиссии 427.8 нм

В.Е. Иванов, Ж.В. Дашкевич*

ФГБНУ Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

*E-mail: zhanna@pgia.ru

Методика оценки средней энергии потока высыпавшихся электронов по измерению интенсивности излучения $\lambda 427.8$ нм основана на экспериментальной зависимости отношения $I_{630.0}/I_{427.8}$ от интенсивности $I_{427.8}$ и модельной зависимости средней энергии потока авроральных электронов от $I_{630.0}/I_{427.8}$. Проанализировано влияние на зависимость средней энергии от отношения интенсивностей авроральных эмиссий формы энергетического спектра авроральных электронов, содержания атомарного кислорода нейтральной атмосферы и концентрации окиси азота NO. Получена зависимость средней энергии потока авроральных электронов от интенсивности эмиссии $\lambda 427.8$ нм и представлена ее аналитическая аппроксимация.

Исследование кинетики электронно-возбужденного молекулярного азота в спреях и разрядной камере

А.С. Кириллов¹, В.Ф. Тарасенко^{1,2}, Н.П. Виноградов^{1,2}, В.А. Кириллов^{1,3}

¹*Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Россия*

²*Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск, Россия*

³*Российский экономический университет им. Г.В. Плеханова, г. Москва, Россия*

Для изучения свойств спрейтов разработана модель электронной кинетики молекулярного азота для высот 40-90 км атмосферы Земли в условиях электрического разряда с продолжительностью импульса порядка нескольких микросекунд. Модель включает кинетику триплетных ($A^3\Sigma_u^+$, $V^3\Pi_g$, $W^3\Delta_u$, $V'^3\Sigma_u^-$, $C^3\Pi_u$) электронно-возбужденных состояний N_2 с учетом переноса энергии возбуждения при неупругих молекулярных столкновениях и спонтанных излучательных переходах. Модель позволяет рассчитывать интенсивности свечения полос первой (излучательные переходы $V^3\Pi_g \rightarrow A^3\Sigma_u^+$) и второй (излучательные переходы $C^3\Pi_u \rightarrow V^3\Pi_g$) положительных систем N_2 как в смеси N_2-O_2 , как и в чистом азоте при электрических разрядах. Результаты моделирования спектров излучения азота в полосах первой и второй положительных систем сравниваются с результатами экспериментальных измерений при давлениях, соответствующим высотам над уровнем моря 40-90 км. Теоретически и экспериментально показано, что неупругие молекулярные столкновения с ростом плотности среды приводят к значительному уменьшению населенностей колебательных уровней состояния $V^3\Pi_g$ и уменьшению интенсивностей свечения полос первой положительной системы N_2 .

Для экспериментальных исследований подготовлены две установки на основе разрядных камер из кварцевых трубок, имеющих внутренние диаметры 5 и 8 см. Во второй установке применены три секции, это обеспечивает возбуждение воздуха и азота низкого давления с различной длительностью импульсов тока разряда, в том числе микросекундной и миллисекундной. Также созданы генераторы, работающие при различных частотах следования импульсов. На данных установках проведены предварительные измерения спектров излучения для азота и воздуха в диапазоне 250-1000 нм при давлениях, соответствующим высотам над уровнем моря 40-90 км.

Впервые проведены расчеты констант скоростей “pooling” процессов, при которых взаимодействуют две молекулы метастабильного азота $N_2(A^3\Sigma_u^+, v \geq 0)$ с образованием молекул $N_2(C^3\Pi_u, v=0-4)$. Результаты расчетов сравниваются с экспериментальными данными, имеющимися в научной литературе.

Данное исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда за счет гранта № 25-22-00158.

Изображающие фотометры ближнего УФ-диапазона как эффективный инструмент физики высоких энергий атмосферы, магнитосферы и космических лучей

П.А. Климов^{1,2}, А.А. Белов^{1,2}, М.Ю. Зотов¹, Б.В. Козелов³, А.С. Мурашов¹, В.Д. Николаева¹,
А.В. Ролдугин³, Р.Е. Сараев^{1,2}, К.Ф. Сигаева^{1,2}, Д.А. Трофимов^{1,2}, С.А. Шаракин¹, К.Д. Щелканов^{1,2}

¹*Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

²*Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

³*Полярный геофизический институт, Анатиты, Россия*

Излучение земной атмосферы, в том числе в ближнем УФ-диапазоне (300–400 нм), является важным проявлением различных процессов, происходящих в атмосфере. Эти процессы могут быть сугубо внутриатмосферного происхождения, как, например, грозовые явления: молнии (облако-земля, внутри и межоблачные пробой), высоко атмосферные транзиентные световые явления (спрайты, синие струи, эльфы и пр.), земные гамма-всплески. С другой стороны, они могут быть и результатом внешнего воздействия на атмосферу Земли: проникновения энергичного ионизирующего излучения, космических лучей в широком диапазоне энергий, пролета метеоров и т. д. Наиболее быстрым событием является флуоресцентный трек широкого атмосферного ливня (ШАЛ) от галактических и внегалактических космических лучей высоких энергий. В авроральной зоне оптическое излучение обусловлено высыпанием энергичных частиц из магнитосферы Земли.

Измерения пространственно-временной структуры ближнего УФ-излучения позволяют изучать физические механизмы процессов в атмосфере и источники их возникновения. Таким образом, изображающий фотометр может быть эффективным инструментом исследований в различных областях физики. Пара таких детекторов была разработана в рамках проекта RAIPS и обеспечивает стереоскопические измерения аврорального свечения, в том числе пульсирующих полярных сияний и оптических микровсплесков. Широкоугольные фотометры системы RAIPS работают в составе обсерваторий ПГИ с 2021 года.

Один из таких детекторов был установлен на станции Арагац с июня по сентябрь 2024 года для измерения ближнего УФ-излучения гроз и ШАЛ. Получены интересные результаты о предпробойном свечении во время грозы, ассоциированное с длительным повышением потоков энергичных (вплоть до 100 МэВ) электронов и гамма-квантов (thunderstorm ground enhancements).

В докладе представлены результаты фотометрических измерений в авроральной области, первые данные со станции Арагац, а также применение компактных фотометров для измерения ШАЛ.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-62-00010).

Фрактальные структуры в авроральном овале, статистика по камерам в Апатитах и Верхнетуломском

Б.В. Козелов

Полярный геофизический институт, г. Мурманск, Россия; e-mail: bob-koz@yandex.ru

Получено описание пространственной структуры полярных сияний фрактальной размерностью флуктуаций свечения и ее анизотропией в зависимости от направления [1, 2]. Фрактальная размерность оценивается из наклона в логарифмических осях спектра в диапазоне 1,5-50 км, полученного дискретным вейвлет-преобразованием флуктуаций интенсивности свечения с использованием вейвлетов Добеши 5 порядка. Вариабельность структур характеризуется наклоном спектра вариации анизотропии во времени [3]. Получена статистика этих характеристик по данным наземной камеры всего неба Полярного геофизического института в г. Апатиты за 2013-2020 годы и сделана привязка по положению внутри аврорального овала и значениям геомагнитного поля в обсерватории Ловозеро [4]. Получены значения фрактальных характеристик для групп различных форм полярных сияний и их локализация по положению по местному магнитному времени, что хорошо соответствует ожидаемой морфологии. Аналогичная статистика получена для наблюдений на полигоне «Верхнетуломский». Для сияний с интенсивностью выше 10 килорелей получены схожие характеристики. Показано, что для меньших интенсивностей необходимо вносить коррекции из-за влияния фона неба.

Работа выполнена при поддержке РФФИ и Мурманской области, проект № 22-12-20017 «Пространственно-временные структуры в околоземном космическом пространстве Арктики: от полярных сияний через особенности самоорганизации плазмы к прохождению радиоволн».

1. Козелов Б.В. Пространственно-временные структуры в овале полярных сияний: подходы к моделированию // *Космические исследования*, 2023, №3, № 3, С. 179-188, DOI: 10.31857/S0023420622700054

2. Козелов Б.В., Воробьев В.Г., Титова Е.Е., Попова Т.А. Диагностика высокоширотной ионосферы и пространственно-временная динамика авроральных высыпаний // *Известия РАН. Серия физическая*. 2023, том 88, № 3, с. 466–472.

3. Козелов Б.В. Фрактальные характеристики структуры аврорального овала на основе экспериментальных данных // *Известия РАН. Серия физическая*. 2024.

4. Козелов Б.В. Фрактальные характеристики структуры аврорального овала по данным камеры всего неба в Апатитах за 2013-2020 гг. // *Russ. J. Earth. Sci.*, 2025.

Методика оценки приращения ПЭС, вызванного солнечными вспышками

В.С. Лобанова, И.А. Ряховский, Ю.В. Поклад

ФГБУН Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН

Высокое пространственно-временное разрешение систем ГНСС сделало возможным проведение исследований быстропротекающих процессов в ионосфере, вызванных различными гелиогеофизическими возмущениями (солнечными вспышками, магнитными бурями, землетрясениями, извержениями вулканов и др.). Использование этих систем позволило накопить большой объем уникальных экспериментальных данных о структуре ионосферы – глобальном распределении ионизации, ее суточных, сезонных, климатических вариациях и полном электронном содержании (ПЭС).

Резко возрастание потоков рентгеновского и ультрафиолетового излучения во время солнечных вспышек приводит к существенному повышению концентрации электронов во всех слоях ионосферы и, как следствие, к росту такой интегральной характеристики, как полное электронное содержание (ПЭС). Наличие нелинейных трендов в экспериментальных данных по вариациям ПЭС существенно осложняет процесс оценки интегрального увеличения электронной концентрации ионосферы, вызванного солнечными вспышками.

В работе была предложена новая методика оценки изменения ПЭС ионосферы, вызванного всплеском солнечной активности. Данная методика позволила учесть влияние потоков не только рентгеновского, но и ультрафиолетового излучения, длительность которого может существенно превышать рентген. Использование этой методики в дальнейшем даст возможность определить диапазон длин волн, оказывающих наибольшее влияние на приращения ПЭС, а также прогнозировать изменение ПЭС в зависимости от спектрального состава излучения во время солнечных вспышек.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 122032900175-6.

Методы определения пространственных распределений ионосферных параметров по данным возвратно-наклонного зондирования

И.В. Мингалев¹, З.В. Суворова¹, А.М. Мерзлый², А.Т. Янаков², И.А. Моисеев²

¹*Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Россия*

²*ИКИ РАН, г. Москва, Россия*

E-mails: *mingalev_i@pgia.ru, suvorova@pgia.ru, pinega142@yandex.ru, alexandr.7@mail.ru, dubina05@yandex.ru*

В докладе проводится анализ методов определения пространственного распределения концентрации электронов в ионосфере по данным возвратно-наклонного зондирования с измерением азимутов и углов места лучевых траекторий эхосигналов, входящих в приемную антенну ионозонда. Представлены результаты расчетов лучевых траекторий зондирующих сигналов ионозонда во всем диапазоне рабочих частот для различных дат и геофизических условий при задании распределений ионосферных параметров с использованием разработанной в ИЗМИРАН отечественной эмпирической модели ионосферы GDM1. Обсуждается однозначность и точность определения пространственного распределения концентрации электронов в ионосфере при использовании разных подходов к интерпретации данных возвратно-наклонного зондирования.

Оценка корреляционных масштабов в ионосфере по данным полного электронного содержания в европейском регионе

И.А. Павлов^{1,2}, А.М. Падохин^{1,2}

¹ИЗМИРАН, г. Москва, Россия; e-mail: ipavlov@izmiran.ru

²ИСЗФ СО РАН, Иркутская обл., Россия

В работах по ассимиляции данных в ионосферные модели значимую роль играет построение априорной ковариационной матрицы вектора состояния. Для ее корректного задания необходимо иметь оценки горизонтальных корреляционных масштабов. Основным интерес исследователей сосредоточен на глобальных масштабах, однако региональные исследования данного типа не так широко распространены, хотя являются не менее значимыми для региональных ассимиляционных моделей.

В данной работе производится оценка горизонтальных радиусов корреляции методами вариографии, используемыми при кригинг интерполяции. Используются два типа данных, европейской сети GNSS станций EUREF, пересчитанные в значения вертикального полного электронного содержания, по собственному алгоритму [1], и данные базы Madrigal [2]. Периодом исследования является 2018 год, когда наблюдалась преимущественно спокойная геомагнитная обстановка. Исследуются параметры изотропных и направленных вариограмм в геомагнитной системе координат, производится сравнение полученных оценок при удалении глобального тренда с использованием глобальной ионосферной карты.

В докладе обсуждаются временные ряды полученных параметров вариограмм, их изменчивость, исследовалась с помощью вейвлет анализа. Рассмотрены параметры эллипса анизотропии, его суточный ход. Обсуждается методика получения данных оценок, а также их использование для начального приближения ковариационной матрицы вектора состояния в моделях ассимиляции данных.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 23-17-00157.

1. Chen C. et al. Galileo and BeiDou AltBOC Signals and Their Perspectives for Ionospheric TEC Studies // Sensors. – 2024. – Т. 24. – №. 19. – С. 6472.
2. MIT Haystack Observatory. Madrigal database. <http://millstonehill.haystack.mit.edu/>

Локальная коррекция модели NeQuick2 по одиночным пролетам низкоорбитальных спутниковых радиомаяков

А.М. Падохин^{1,2}, И.А. Павлов^{1,2}

¹ИЗМИРАН, Троицк, Россия

²ИСЗФ СО РАН, Иркутск, Россия

В докладе предложен метод локальной коррекции модели NeQuick2 по данным относительного наклонного ТЕС, полученным в экспериментах по просвечиванию ионосферы сигналами полярных низкоорбитальных спутниковых радиомаяков. Идея метода аналогична применяемой в модели NeQuickG процедуре подбора широтной зависимости эффективного индекса солнечной активности A_z , с той лишь разницей, что вместо данных ТЕС со среднеорбитальных спутников GNSS используются данные ТЕС с одиночного пролета низкоорбитального радиомаяка. Это становится возможным из-за полярной орбиты спутника, это приводит к тому, что в таких данных ТЕС преобладает широтная изменчивость ионосферы, что может быть учтено через соответствующую параметризацию A_z . В результате работы алгоритма можно получить скорректированное высотно-широтное распределение электронной концентрации вдоль меридиана приемной станции или цепочки приемных станций. В докладе рассмотрены результаты применения предложенного метода коррекции к данным приема сигналов 150/400МГц со спутников типа “Парус” на российской РТ-системе МГУ-ПГИ, приводятся сравнения с данными низкоорбитальной радиотомографии и вертикального зондирования.

Работа выполнена при поддержке РФФ, проект № 23-17-00157

Параметры ночной ионосферы во время магнитной бури 10-11 мая 2024 года на различных трассах распространения СДВ радиосигналов

Ю.В. Поклад, Б.Г. Гаврилов, В.М. Ермак, В.С. Лобанова, И.А. Ряховский

ФГБУН Институт динамики геосфер имени академика М.А. Садовского РАН, г. Москва, Россия

E-mails: *poklad@mail.ru, boris.gavrilov34@gmail.com, ryakhovskiy88@yandex.ru*

8-10 мая 2024 г произошла серия Солнечных рентгеновских вспышек М и X классов. В ИДГ РАН ведется непрерывный мониторинг параметров сигналов передатчиков СДВ диапазона в ГФО «Михнево» (Московская область, ИДГ РАН) и обсерватории «Ульяновка» (Калининградская область, филиал ИЗМИРАНа). Для этих вспышек были восстановлены высотные профили электронной концентрации в рамках двухпараметрической модели Фергюссона-Уайта (параметры h' и β) дневной ионосферы. Используя параметры дневной ионосферы в качестве начальных данных, по вариации амплитуды сигналов до и после прохождения терминатора, были определены параметры h' и β для ночной ионосферы.

10 мая, примерно в 17 часов UT на Земле началась магнитная буря класса G5. На восстановленных параметрах ионосферы видно, что в ночь с 10 на 11 мая эффективная высота отражения уменьшилась с примерно 82 км до 74 км. В следующую ночь эффективная высота отражения стала увеличиваться и почти достигла значений, соответствующих состоянию перед магнитной бурей. Высота 74 км примерно соответствует эффективной высоте отражения СДВ радиосигнала в дневное время. Этим можно объяснить то, что эффекты магнитных бурь в большей степени проявляются ночью.

Работа выполнена в рамках Государственного задания № 122032900175-6 с использованием данных полученных на среднеширотном комплексе геофизических наблюдений «Михнево».

Эмпирическая модель воздействия солнечных вспышек различного класса на состояние и динамику нижней ионосферы

И.А. Ряховский, Ю.В. Поклад, Б.Г. Гаврилов, С.З. Беккер

Институт динамики геосфер им. акад. М.А. Садовского РАН

Солнечные вспышки оказывают значительное влияние на состояние и динамику нижней ионосферы и, как следствие, на условия распространения радиоволн в широком диапазоне частот. Изменения, происходящие в D-области ионосферы, в основном определяют вариации амплитуды и фазы ОНЧ (3-30кГц) сигналов. Таким образом, электромагнитное излучение этого диапазона частот является наиболее эффективным инструментом для исследования процессов, происходящих в нижней ионосфере.

В данной работе проводился совместный анализ сигналов СДВ станций и потоков рентгеновского излучения, зафиксированного спутником GOES во время солнечных вспышек, произошедших в июне 2014 года и сентябре 2017 года. Впервые были экспериментально определены скорости ионизации, рекомбинации и спектральные диапазоны солнечного излучения, оказывающие наибольшее влияние на динамику электронной концентрации нижней ионосферы и условия распространения низкочастотных радиосигналов глобальных навигационных, связных и управляющих систем.

Разработанная эмпирическая модель ионизации нижней ионосферы в дальнейшем может быть использована для оценки изменений высотного профиля электронной концентрации и прогноза распространения радиоволн ОНЧ диапазона во время солнечных вспышек различного класса.

Экспериментальные исследования динамики ПЭС полярной ионосферы на НИС «Профессор Молчанов»

Сапунова Александра Ильинична, Ряховский Илья Александрович

Институт динамики геосферы российской академии наук, г. Москва

Одной из важнейших задач современной геофизики является прогнозирование эффектов космической погоды. Наиболее резкие и непредсказуемые изменения, вызванные солнечной активностью, геомагнитными бурями и высыпаниями заряженных частиц происходят в полярной ионосфере. Таким образом, исследование этой области играет ключевую роль в понимании процессов взаимодействия между космической средой и Землей, а также в решении практических задач, радиосвязи и навигации в арктическом регионе.

Сложные климатические условия затрудняют проведение длительных системных измерений в данном регионе. В рамках рейса Плавучего университета 2024 г., в период с 21 июля по 26 августа 2024 на научно-исследовательском судне «Профессор Молчанов» проводились исследования процессов, происходящих в различных слоях полярной ионосферы. Велась непрерывная регистрация сигналов ГНСС (GPS и ГЛОНАСС) и амплитудно-фазовых характеристик сигналов ОНЧ (3-30 кГц) диапазона в акваториях Белого, Баренцева, Лаптевых и Карского морей.

Анализ экспериментальных данных, полученных в ходе рейса, позволил оценить отклики ионосферы на ряд солнечных вспышек M- и X- класса. Так же была экспериментально зарегистрирована взаимосвязь скорости изменения ПЭС с геомагнитной активностью в полярном регионе. Кроме того, во время всего периода наблюдений в полярной ионосфере обнаружилось периодическое пропадание сигналов по всем частотам ГНСС. Причем длительность потери сигналов для некоторых спутников созвездия колебалась от 14 и до 1500 секунд что в свою очередь может критически сказываться на точности позиционирования. Все эти факторы необходимо учитывать для прогноза состояния и динамики ионосферы и решения прикладных задач связи и навигации в полярном регионе.

Авторы благодарят руководителей научно-образовательной программы "Плавучий университет" за организацию рейса.

Исследование выполнено при поддержке министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект номер рег.№122032900175-6.

Комплексное исследование пульсирующих полярных сияний 6 декабря 2023 года по данным эксперимента PAIPS

К.Ф. Сигаева^{1,2}, А.А. Белов^{1,2}, П.А. Климов^{1,2}, Б.В. Козелов³,
В.Д. Николаева¹, А.В. Ролдугин³, Р.Е. Сараев^{1,2}, К.Д. Щелканов^{1,2}

¹*Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

²*Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

³*Полярный геофизический институт, Анатиты, Россия*

Пульсирующие полярные сияния (ППС) представляют собой сложное явление квазипериодической вариации локального свечения на разных частотах, обусловленное проникновением в атмосферу заряженных частиц в широком спектре по энергии. Комплексный подход к анализу событий ППС позволяет детально представить полную феноменологическую картину явления, а также проследить атмосферно-магнитосферные взаимосвязи и причины вариаций оптического сигнала. При этом используются изображения камер всего неба, спектрометрические измерения, спутниковые данные по потокам заряженных частиц и волновой активности в магнитосфере.

В рамках проекта PAIPS (Pulsating Aurora Imaging Photometers) обсерватории Полярного геофизического института «Верхнетуломская» и «Ловозеро» были оснащены высокочувствительными изображающими фотометрами. Фотометры измеряют пространственно-временную структуру атмосферного свечения в ближнем УФ-диапазоне (300–400 нм) с высоким (от 1 мс) временным разрешением. Детекторы содержат спектрометры, как с широкополосными каналами (300–400 и 600–800 нм), так и узкополосными (337±10 нм, 390±10 нм, 430±10 нм), позволяющих оценить вклад различных эмиссий в общую интенсивность полярных сияний.

В докладе представлены результаты исследования пульсирующих полярных сияний, зарегистрированных 6 декабря 2023 года во время продолжительных геомагнитных возмущений, на фазе восстановления суббури. Риометр на станции LOZ, а также риометры скандинавской цепочки (IVA, SOD) зафиксировали наличие аврорального поглощения. По данным камер всего неба и фотометров исследованы пространственно-временная структура события, частотный спектр и его вариации. Проведено сравнение скалограмм оптического излучения и сигнала магнетометра VTL. По данным спектрометра PAIPS и стереометрических измерений VTL–LOZ произведена оценка высоты свечения. Также рассмотрены и проанализированы спутниковые данные по потокам заряженных частиц.

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-62-00010).

Проект RAIPS: оценка высот пульсирующих полярных сияний по данным стереонаблюдений

К.Ф. Сигаева^{1,2}, П.А. Климов^{1,2}

¹Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

С сентября 2023 года на базе обсерваторий Ловозеро (LOZ) и Верхнетуломская (VTL) Полярного геофизического института заработал новый оптический комплекс, состоящий из двух высокочувствительных изображающих фотометров, направленных в одну область атмосферы. Фотометр в VTL направлен в зенит, а в LOZ – под углом 32 градуса к горизонту в направлении на VTL. Такая конфигурация эксперимента позволяет проводить стереометрические наблюдения атмосферного свечения на высотах от 30 до 200 км (расстояние между обсерваториями около 150 км). Оба прибора оснащены оптической системой, позволяющей измерять атмосферное свечение в ближнем УФ-диапазоне (300–400 нм) с высоким (от 1 мс) временным разрешением. Фотоприемником является матрица многоанодных фотоэлектронных умножителей, работающих в режиме счета фотонов, что обеспечивает максимальную чувствительность.

Стереометрические наблюдения позволяют производить измерения высоты свечения. В данной работе предложен и развит метод оценки высоты пульсирующих полярных сияний, основанный на анализе двумерного коэффициента корреляции скалограмм суммарного сигнала фотометра в VTL и построчного сигнала матрицы фотоприемника в LOZ. Зенитный угол, соответствующий максимуму коэффициента корреляции определяет высоту пульсирующего свечения над VTL. Для исследованных событий приведен анализ динамики высоты свечения с течением времени.

Исследование поддержано грантом Российского научного фонда (проект № 22-62-00010).

15 лет функционирования ионозондов ФГБУ «ИПП» на солнечно-синхронной орбите

А.В. Тертышников

ФГБУ «ИПП», Москва, Россия; e-mail: atert@mail.ru

В России с 2009 г. ионный состав верхней атмосферы зондировался ионозондами ФГБУ «Институт прикладной геофизики имени Академика Е.К. Федорова» (ФГБУ ИПП) с КА серии «Метеор» на основе принципов радиочастотной масс-спектрометрии [1]. За 15 лет функционирования на солнечно-синхронной орбите были накоплены огромные массивы измерений [2].

Первым ионозондом на КА серии «Метеор» был прибор РИМС-1. В 2014 г. его заменил РИМС-2 [1]. На смену ему с 2023 г. был запущен масс-спектрометр космический (МСК) [1]. Ионозонды на КА «Ионозонд» также прошли этап внешнего проектирования в ФГБУ ИПП.

Принципы радиочастотной масс-спектрометрии для измерения ионного состава верхней атмосферы были реализованы за рубежом на масс-спектрометрах КА AE-B, Ogo 6, San Marco 3, Eros A и AE-C и др., а с 2005 г. с КА DMSP-6 [3]. Для верификации масс-спектрометрических измерений использовались данные ракетных экспериментов [3] и радары некогерентного рассеяния (Аресибо, Хикамарка, Миллстоун и др.).

В последних вариантах исполнения космических ионозондов ФГБУ ИПП на основе принципов радиочастотной масс-спектрометрии за счет современных микроэлектронных датчиков удалось существенно повысить разрешающую способность регистрации и качество измерений ионного состава верхней атмосферы. Управление элементами ионозонда было организовано через программируемый процессор. Усовершенствованный радиочастотный ионозонд по техническому решению [1] функционирует на КА «Метеор-2-3» и «Метеор-2-4». Масса радиочастотного ионозонда позволяет использовать его на малых КА и для ракетных экспериментов.

Многолетнее зондирование ионной компоненты верхней атмосферы ионозондами ФГБУ ИПП на КА типа «Метеор» соответствует тенденции использования зарубежных масс-спектрометров (прибор «IAP») на КА DEMETER и его аналога – прибора «PAP» на China Seismo-Electromagnetic Satellite. Фактически, зарубежные масс-спектрометры также используются в качестве ионозондов. Калибровка по нейтральной компоненте не

валидирована. Получаемые данные зондирования полезны для верификации моделей ионосферы и данных зондирования ионосферы ионозондами КК «Ионозонд».

Достиженные результаты в создании обновленных ионозондов связаны с д.ф.-м.н. А.Ю. Репиным, под руководством которого в ФГБУ «ИПП» была восстановлена передовая научная школа космической масс-спектрометрии и проектирования ионозондов, в том числе вертикального зондирования для Ионосферно-магнитной службы Росгидромета.

При использовании данных зондирования в ОКП с ионозондов ФГБУ ИПП, функционирующих на принципе масс-спектрометрии, был решен ряд прикладных задач. Получены оценки корреляция измеренных на КА типа «Метеор» концентраций ионов с концентрацией электронов по различным моделям ионосферы (SIMP-2, IRI и др.). Для этого использовался архив данных зондирования концентраций основных ионов за 2010-2022 г.г. Разработаны технологии обработки данных с использованием искусственного интеллекта. Созданы статистические модели основных ионов на высотах орбиты КА типа «Метеор».

Получены уравнения множественной регрессии для оценки концентрации электронной плотности по данным измерений ионного состава на орбите КА «Метеор». Решен ряд задач для климатических исследований ионосферы, диагностики границ одиннадцатилетнего цикла солнечной активности [4], что обеспечило национальную информационную независимость от Бельгийской королевской обсерватории и от Национальной солнечной обсерватории США. Были получены модели морфологии полярных шапок, аврорального овала и полярного ионосферного провала вблизи полюсов Земли [5], экваториальной токовой струи в ионосфере, откликов эффекта переполусовки солнечного магнитного диполя перед максимумом «11-летнего» цикла солнечной активности и др.

Сложная морфология модельного пояса электронов над экваториальными широтами и несоответствие в сотни процентов с результатами измерений суммарной концентрации ионов отмечена также в [6].

Литература:

1. Тертышников А.В. Масс-спектрометр космический. Патент № 2726186 по заявке № 2019121111/20(041262) в реестре ФИПС от 05.07.2019.
2. Пополняемая база спутниковых данных ионного состава верхней атмосферы на высотах 808–835 км от поверхности Земли на 2010–2014 года (часть 1, 2). / Саморуков В.В., Кирюшов Б.М., Репин А.Ю. и др. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2022620207 (часть 1), № 2022621368 (часть 2). ФГБУ ИПП.
3. Berthelier J.J., Godefroy M., Leblanc F., Seran E., Peschard D., Gilbert P., Artru J. IAP, the thermal plasma analyzer on DEMETER // *Planetary and Space Science*, 2006, V. 54, Is. 5, P. 487-501, <https://doi.org/10.1016/j.pss.2005.10.018>
4. Тертышников А.В. Способ определения начала цикла солнечной активности. Патент. Рег. № 2023135791 в реестре ФИПС от 27.06.2024. Заявл. 27.12.2023 г.
5. Тертышников А.В. Способ зондирования границ аврорального овала и состояния магнитного поля Земли. Патент по заявке № 2023111370/28(024305) в реестре ФИПС от 02.05.2023 г.
6. Biyan Chen, Hengrui Cao, Jinyong Wang, Jianping Huang, Zelang Miao, Comparison of electron density measurements from CSES and Swarm satellites with GNSS ionospheric tomography data // *Advances in Space Research*, 2023, V. 71, Is. 6, P. 2818-2832. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.11.040>

Основные результаты численного моделирования полярной ионосферы

В.М. Уваров

Петербургский государственный университет путей сообщения. Санкт-Петербург, Россия

Доклад посвящен истории создания модели полярной ионосферы, начиная с 1977 года, когда автором был написан обзор на тему современного состояния исследований по данной тематике. Рассмотрены следующие вопросы: (а) разработка аналитических моделей распределения электрических полей на основе предложенной автором постановки задачи, учитывающей специфику электродинамического взаимодействия противоположных полушарий, позволившая не только воспроизвести все известные на тот период времени типы распределения электрических полей, но и предсказать несколько новых типов, которые позже были подтверждены экспериментально; (б) разработка блока модели конвекции для расчета дрейфа плазменных трубок в реальном времени с учетом поля коротации, контролируемого мировым временем; (в) разработка собственно модели полярной ионосферы, воспроизводящей трехмерное распределение электронной концентрации в заданный момент мирового времени при заданных гелиогеомагнитных условиях путем интегрирования одномерной задачи для концентраций ионных составляющих вдоль траекторий конвекции; (г) демонстрация двумерных распределений электронной концентрации в максимуме слоя F2 для различных сочетаний параметров межпланетного магнитного поля, наглядно иллюстрирующих отображение различных типов конвекции в структуре полярной ионосферы; (д) влияние дрейфа магнитных полюсов Земли на строение полярной ионосферы; (е) возможность верификации различных моделей нейтральной атмосферы путем сопоставления соответствующих смоделированных распределений электронной концентрации с экспериментальными данными.

Часть доклада посвящена численной модели глобального распределения электрических полей, которая реализует упомянутую выше постановку задачи, при использовании современного вариационно-разностного метода, основанного на концепции обобщенного решения. Это позволило проводить численные расчеты электрического потенциала даже при наличии разрывов первого рода в распределении проводимости (что имеет место на границах полярных сияний), которые обуславливают разрывы коэффициентов при вторых и первых производных в двумерных эллиптических уравнениях для потенциала.

Более чем полувековой опыт контактов в научной среде дает возможность автору доклада, помимо чисто научных вопросов, затронуть ряд вопросов научной этики (плагиат и пр.). В частности, приведены примеры сравнительно недавно опубликованных статей, содержащие результаты, полученные посредством использования чужих программных средств, что, по меньшей мере, является нарушением авторских прав разработчиков этих моделей.

Развитие поляризационного джета во время больших мировых магнитных бурь и во время рекуррентных магнитных возмущений

В.Л. Халипов¹, А.Е. Степанов²

¹*ИКИ РАН, г. Москва, Россия; e-mail: khalipovvictor@mail.ru*

²*ИКФИА ЯНЦ СО РАН, г. Якутск, Россия; e-mail: a_e_stepanov@ikfia.ysn.ru*

Поляризационный джет - узкая полоса быстрого западного дрейфа плазмы вблизи проекции плазмопаузы на высотах области F ионосферы - впервые был зарегистрирован на спутнике КОСМОС-184 Гальпериным и др. (1974). Это явление затем многократно наблюдалось при наземных и спутниковых измерениях. Основная физическая идея, объясняющая механизм формирования поляризационного джета, была предложена Smiddy et al. (1977). Согласно этой модели, поляризационный джет возникает под воздействием электрического поля, направленного на север, которое генерируется зарядами энергичных ионов на экваториальной границе их проникновения во внутреннюю магнитосферу во время развития суббури.

В настоящей работе анализируются измерения скорости дрейфа плазмы, полученные на цифровых ионозондах DPS-4 в Якутске ($L = 3$) и Жиганске ($L = 4$) во время развития мировых магнитных бурь и при развитии рекуррентных магнитных возмущений, и сопоставляются с синхронными дрейфовыми измерениями плазмы и потоков высыпающихся электронов и ионов на спутниках DMSP (высота ~ 850 км). Приводятся новые данные о возникновении поляризационного джета на взрывной фазе суббури.

Оценка высоты аврорального свечения по данным спектрометрических измерений

К.Д. Щелканов^{1,2}, П.А. Климов^{1,2}, В.Д. Николаева¹

¹*Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобелева МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

²*Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

Тонкая пространственно-временная структура аврорального свечения связана с высыпаниями в атмосферу потоков частиц различных энергий, формируемых в околоземном пространстве, в основном в процессах взаимодействия с магнитосферными волнами. Анализ высоты транзитного свечения позволяет оценить энергию высыпающихся частиц для событий разного типа: пульсирующие полярные сияния, микровсплески оптического аврорального излучения и пр.

В рамках проекта RAIPS (Pulsating Aurora Imaging Photometers) в обсерватории «Верхнетуломская» Полярного геофизического института был установлен высокочувствительный изображающий фотометр. Он измеряет пространственно-временную структуру атмосферного свечения в ближнем УФ-диапазоне (300–400 нм) с временным разрешением 1 мс в направлении в зенит. Оценка высоты источника излучения возможна только косвенными методами, например, по данным спектрометрических измерений. Поэтому, в состав фотометра добавлен спектрометр. В широкополосных каналах спектрометра перед фотоэлектронными умножителями установлены стеклянные фильтры УФС1 (300–400 нм) и КС11 (600–800 нм), а в узкополосных – интерференционные 337 ± 10 нм, 390 ± 10 нм, 430 ± 10 нм.

Анализ отношений сигнала в разных каналах спектрометра позволяет сделать оценку высоты свечения поскольку различные возбужденные состояния молекул азота имеют разное время жизни и, следовательно, разный вклад в интенсивность эмиссии. При этом, скорость дезактивации возбужденных состояний без излучения зависит от плотности воздуха, которая значительно меняется с высотой.

В работе проведен расчет отклика детектора на излучение трех систем азота ($N_2 1P$, $N_2 2P$ и $N^+ 1N$) в зависимости от высоты источника с учетом рассеяния и поглощения в атмосфере, спектральных коэффициентов пропускания каналов прибора, квантовой эффективности фотокатода ФЭУ и коэффициента усиления ФЭУ. Получена зависимость отношения сигнала в каналах с фильтрами КС11 (красная часть спектра) и УФС1 (синяя часть спектра) от высоты источника для разных моделей свечения в атмосфере. По полученным зависимостям произведены оценки высоты излучения разных типов транзитного аврорального свечения (ППС, микровсплески).

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-62-00010).

The response of the polar tropopause to the events of major and minor sudden stratospheric warmings

B.A. Bikbulatov¹, K.A. Didenko¹, T.S. Ermakova², A.S. Fadeev²

¹*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation (IZMIRAN), Russian Academy of Sciences, Troitsk, Moscow, Russia;*

²*Russian State Hydrometeorological University, Saint-Petersburg, Russia*

The study was conducted on the response of the polar tropopause to a sudden stratospheric warmings event of major (2009) and minor (2016) type, using atmospheric radiosonde data and reanalysis data. The pressure at tropopause height were analysed before, during and after SSWs. The location of the stations was chosen so that they were located near the same latitude - 70 NH. This was done to consider the time lag of tropopause response to SSW which reveals in tropopause lowering in different hemispheres.

It is shown that during the major sudden stratospheric warming, the tropopause sinks at all stations, and there is a delay of about ten days between the maximum temperature in the stratosphere and the beginning of the tropopause lowering.

During the minor warming in 2016, the tropopause response less evident. There is no apparent lowering at the selected stations. Probably the reason is in the location of the stratospheric polar vortex above.

The research was supported by Russian Science Foundation grant #23-17-00273, <https://rscf.ru/en/project/23-17-00273/>.

Wave processes in the middle atmosphere during the minor SSW development in winter 2014-2015

K.A. Didenko¹, E.A. Bezotecheskaya^{2,3}, E.A. Maurchev¹

¹*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation (IZMIRAN), Russian Academy of Sciences, Troitsk, Moscow, Russia.*

²*Arctic and Antarctic Research Institute, Saint-Petersburg, Russia.*

³*A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia.*

A study of the dynamic regime of the middle atmosphere in the 2014-2015 winter season was carried out using reanalysis data. The variability of the atmosphere as a whole this winter was due to the development of sudden stratospheric warming (SSW). Despite the fact that this SSW is classified as minor, it has had a significant impact on the temperature regime, circulation and chemical composition of the middle atmosphere. The main attention is paid to the study of wave activity variations of stationary planetary waves (SPW) and processes caused by wave activity before, during and after the SSW. The method of perturbed potential enstrophy analysis is used to study wave activity and wave processes. It is shown that variations in wave activity before the development of the SSW are due to wave-wave interactions, and during and after are due to the exchange processes of SPW2 (zonal wave number 2) with the mean flow. The development of the minor SSW in January 2015 had similar characteristics to the development of the major SSW, which likely led to the observed changes in the dynamic regime of the underlying atmospheric layers. The differences in the distribution of upper-tropospheric jet streams (JS) frequency during the month before and after the SSW, for example, have been shown.

The research was supported by Russian Science Foundation grant #23-17-00273, <https://rscf.ru/en/project/23-17-00273/>.

Analysis of changes in wave activity flows before and after the weakening of the stratospheric polar vortex in the middle of the winter season from 1981 to 2023

A.S. Fadeev¹, E.N. Savenkova¹, A.V. Koval²

¹*Russian State Hydrometeorological University, St-Petersburg, Russia*

²*University of St-Petersburg, St-Petersburg, Russia*

The relationship between increased wave activity and weakening of the stratospheric polar vortex in the middle of winter in the Arctic latitudes is investigated. The meteorological conditions are defined by reanalysis data from Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Application 2 (MERRA2). The longitude-mean wind velocity and Eliassen-Palm flow fields is analyzed.

The main patterns in the change of wave activity parameters before and after the weakening of the polar vortex were reflected, and cases when these patterns were not observed were considered.

It is shown that the weakening of the polar vortex is facilitated by increased wave activity and high values of vertical wave flow. In most cases, with some delay after the weakening of the vortex, the vertical upward propagation of waves stops, however, there are cases when this does not happen. Such cases include, for example, January 2019.

The research was supported by Russian Science Foundation grant #25-47-00122, <https://rscf.ru/en/project/25-47-00122/>.

Long-term microwave measurements of the middle atmosphere ozone above Apatity (67N, 33E) in winter-spring seasons

Y.Y. Kulikov¹, V.I. Demin², V.M. Demkin³, A.S. Kirillov², V.G. Ryskin¹

¹*Institute of Applied Physics, Nizhny Novgorod, Russia*

²*Polar Geophysical Institute, Apatity, Russia*

³*High School of Economy, Nizhny Novgorod, Russia*

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 2024. 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. 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).

Simulated Changes in Large-scale Atmospheric Circulation Energetics from Volcanic Aerosol Forcing

Anatoly Poroshenko and Matthew Toohey

Institute of Space and Atmospheric Studies, University of Saskatchewan, Saskatoon, Saskatchewan, Canada

Understanding the response of large-scale atmospheric circulation to radiative forcing agents is important for climate prediction. The radiative forcing from volcanic stratospheric aerosol is one of the most important natural climate forcings, with impacts on surface temperature and atmospheric dynamics. In this study, we explore changes in the energetic properties of the Hadley and Ferrel systems under the influence of radiative forcing associated with large volcanic eruptions in multi-model simulations performed as part of the Model Intercomparison Project on the Climatic Response to Volcanic Forcing (VolMIP) within the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6). In the Earth's atmosphere, the Hadley and Ferrel systems are examples of thermally direct (warm air rises and cold air sinks) and indirect (cold air rises and warm air sinks) circulations, respectively. Being the part of Lorenz cycle of energy transformation in the atmosphere, the direct circulation converts zonal-mean available potential energy into zonal-mean kinetic energy. The indirect circulation in the midlatitude, however, converts some of the zonal-mean kinetic energy back into zonal-mean available potential energy. Averaged over the 4 models that provided the required model output from the VolMIP Pinatubo simulations, the mean power associated with the Hadley system in preindustrial simulations is 235.6 TW. The mean decrease of the power in VolMIP simulations of the 1991 Pinatubo eruption is 7.58 TW (3.22%) for the first post-eruption northern-hemisphere (NH) winter and 6.59 TW (2.80%) for the second one. For the Ferrel system, the preindustrial mean DJF power is 326.10 TW, and post-volcanic anomalies are 16.3 TW (5.00%) and 18.3 TW (5.61%) in NH winters 1 and 2, showing a stronger anomaly in the second NH winter than the first one. In additional VolMIP experiments, we also explore the response of the Hadley and Ferrel cells to the relatively strong forcing associated with the 1815 Tambora eruption and find the Hadley system weakening by 15.3 TW (6.48%) and 11.5 TW (4.90%) for the first two NH winters. We explore how post-eruption changes in the meridional atmospheric circulation strength and the cells' location can be explained with simple theoretical models of atmospheric thermodynamics.

Long-term forecast for surface temperature in some circumpolar cities in the Russian Federation

D.B. Rozhdestvensky¹, V.I. Rozhdestvenkaya¹, V.A. Telegin¹, V.M. Mikhailov²

¹*Pushkov, N. V., Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation
at the Russian Academy of Science*

²*MIREA*

The process of how surface temperatures are formed is a complex, multi-component, and dynamic one that is influenced by many factors. These factors are generally well-known, but their interactions are highly variable, making it an important research task to identify their specific characteristics.

One of the most important factors is the solar radiation that reaches the Earth's surface. This radiation plays a crucial role in determining the thermal balance between the surface and the atmosphere. S. P. Khromov highlighted the importance of considering solar activity in long-term forecasts.

Multiyear measurements of temperature provide valuable data for long-range forecasting. The methodological basis for such measurements was established as early as 1975. This work has led to the development of algorithms that can predict long-term temperature trends based solely on data collected over a 10 - 100 year period.

This paper presents the results of a long-term forecast of surface temperature in three cities located in the circumpolar regions of the Russian Federation: Murmansk, Verkhoyansk, and Magadan. The forecast is based on temperature data collected from meteorological stations in these cities over the period from 2013 to 2023.

The extrapolation of the temperature data began in 2018 and continues until 2038. In this paper, we present a forecast for up to 30 years. All three cities show an increasing trend in their long-term components.

The results of the extrapolation of temperature data are in good agreement with the solar activity forecast for the same period. The long-term components of surface temperatures or low-frequency components reflect multidecade or climatic variations. They also determine whether winters and summers are cold or warm, whether there is an ice age, or if there is a period of global warming.

The low-frequency component of temperature fluctuations serves as a sign of unusual temperatures. Although its range is smaller than that of daily and yearly variations, ranging from one to four degrees, it is crucial for long-term forecasting.

This component is currently indicative of climate warming and the unusually warm winters of 2024–2025. It correlates with the peak of solar activity during solar cycle 25. Due to the active cyclonic activity in the Gulf Stream region, temperatures in Murmansk, located on the coast, experience significant variations of the moderate cyclone type. The long-term forecast shows fluctuations around 0°C, with positive temperatures prevailing.

In Verkhoyansk, which is at the same latitude, not only the minimum values are recorded, but also the smallest temperature fluctuations of the anticyclonic continental type. In coastal Magadan, the temperature and its fluctuations increase as you get closer to the ocean. The average temperatures in these two cities, which are located in the permafrost zone, are always below zero. However, in 2025, temperatures are expected to rise everywhere, with a further decrease expected at the beginning of 2026. This is based on the unusually warm winter of 2025.

Solar Hale cycle manifestations in geophysical and climatic characteristics

S.V. Veretenenko¹, P.B. Dmitriev¹, V.N. Obridko²

¹*Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia*

²*IZMIRAN, Troitsk, Russia*

Oscillations with periods of ~22 years close to the magnetic Hale cycle on the Sun are observed in a large number of climatic characteristics, such as occurrence of droughts, occurrence of hurricanes over the Atlantic and Pacific oceans, regional temperatures and pressure etc. The amplitudes of bidecadal oscillations are not only comparable with those of the 11-year ones, but often exceed them. In this work we study the manifestations of the solar magnetic Hale cycle in different geophysical characteristics, which can contribute to the formation of bidecadal oscillations in the Earth's climate. It was found that in even and odd solar cycles (according to the Zurich numbering) there are statistically significant differences in temporal variations of cosmic ray fluxes in the stratosphere, as well as in geoeffective components of solar wind magnetic fields and geomagnetic activity characteristics (aa-index, occurrence of magnetic storms with gradual commencement). The obtained results allow suggesting that bidecadal oscillations in the Earth's climate characteristics may be related to the solar Hale cycle, which contributes to the formation of bidecadal variations in fluxes of energetic charged particles (cosmic rays and auroral electrons) entering the atmosphere of high latitudes and influencing the ionization rate. The ionization rate changes, in turn, influence the chemical composition and the temperature regime of the high-latitude atmosphere, resulting in circulation changes.

10 Years Ozone Measurements at Stara Zagora – Basic Properties of the Daily Time Series

R. Werner¹, V. Guineva¹, D. Valev¹, R. Bojilova², A.S. Kirillov³

¹*Space Research and Technology Institute, Bulgarian Academy of Sciences, Stara Zagora Department, Stara Zagora, Bulgaria*

²*National Institute of Geophysics, Geodesy and Geography, Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria*

³*Polar Geophysical Institute of the Kola Science Centre, Apatity, Russia*

Total ozone time series on day or monthly basis at mid-latitudes show a clear annual cycle caused by the formation of ozone on one hand and dynamic processes on the other hand. To investigate some of the important statistic parameters, the ozone series was detrended and deseasonalised. After that we have determined the central moments of the series. The distributions were analysed by means of histograms and Q-Q plots for different seasons. We have divided in two groups of time intervals – with high and low ozone variations. The group with high variation is December – March (DJFM) and the one with lower variation includes the months May – October (MJJASO) showing standard deviations of 36 DU and 19 DU, respectively. The reason of the high ozone variation is the frequent change of ozone rich polar air masses with pure ozone air masses from mid-latitudes and the tropics. The constructed Q-Q plots demonstrate distributions, close to the normal one. Based on detrended fluctuation analysis the long term persistence's were studied. A Hurst coefficient of 0.7 to 0.75 at the scales of one week to about 2-3 weeks, and a Hurst coefficient of approximately 1 for greater scales up to about three months was found. This means, that the variations at these scales are similar to themselves independently from the location or in other words the ozone variations show fractal properties.

Мониторинг дифференциального спектра естественного гамма-излучения 0.2-8 МэВ на Шпицбергене

Ю.В. Балабин*, А.В. Германенко, Е.А. Михалко, Б.Б. Гвоздецкий

Полярный геофизический институт, Апатиты, Россия

*E-mail: balabin@pgia.ru

Спектрометр гамма-излучения, установленный в 2024 г. в Баренцбурге (арх. Шпицберген), является третьим прибором, выполняющим непрерывные измерения дифференциального спектра гамма-излучения. Ранее аналогичные спектрометры были установлены на Кольском полуострове (Апатиты) и в Ростовской области (Тацинская). Все три спектрометра близки по характеристикам, они калиброваны по известным линиям радионуклидов. Используются кристаллы NaI(Tl). Время сбора одного дифференциального спектра 30 минут, разрешение лучше 5 % по линии 660 кэВ, рабочий энергетический диапазон 0.2-8 МэВ. Детекторы установлены в защитные стаканы из свинца, чтобы отсеять излучение, поступающее от почвы и окружающих предметов. Поле зрения спектрометров составляет ~1.5 ср. Важность данных, получаемых со Шпицбергена, в том, что этот регион находится за тысячу километров от промышленных регионов, минимально подвержен антропогенному воздействию.

Получены первые спектры во время возрастания гамма-излучения при осадках. Пока зарегистрированных событий немного, однако, по ним видно, что спектры гамма-излучения подобны спектрам, измеренным при возрастаниях в Апатитах и Тацинской. Присутствуют несколько линий естественных радионуклидов семейства урана и тория, однако, интенсивность и количество линий однозначно указывают, что линии не формирует весь наблюдаемый спектр, континуальную его часть образует поток гамма-излучения, возникающий в атмосфере от вторичных космических лучей. Верхний энергетический порог для возрастаний в трех пунктах составляет ~2.5 МэВ.

Исследование инверсий температуры воздуха в пограничном слое атмосферы в Апатитах

В.И. Демин, Б.В. Козелов

Полярный геофизический институт, г. Апатиты

Среднемесячные температуры воздуха в регионе зимой возрастают от поверхности до высот примерно 300-400 м, а выше монотонно понижаются. Данная картина следует из данных аэрологического зондирования в Кандалакше, горных наблюдений в Хибинах и микроволновых измерений в Апатитах. В действительности такое инверсионное распределение температуры наблюдается примерно только в 50-60% случаев. Представленный средний вертикальный профиль является в большей степени «статистическим эффектом» и создается, главным образом, за счет эпизодов с очень сильными отрицательными градиентами (до $-18^{\circ}\text{C}/100\text{м}$), в то время как положительные значения градиента физически ограничены десятками долями градуса.

Наиболее часто приземные инверсии наблюдаются в зимний сезон. Весной, летом и осенью повторяемость инверсий снижается за счет их меньшего появления в утренние, дневные и вечерние часы. Повторяемость ночных инверсий практически не меняется даже в период полярного дня (при низкой высоте Солнца), но сильно уменьшается их вертикальная мощность и интенсивность. Наибольшие градиенты до $(-8-10^{\circ}\text{C}/100\text{ м})$ регистрировались при потоках теплого воздуха на небольших высотах над охлажденными в ночные часы поверхностями.

Приземные инверсии являются наиболее частой формой, но на высотах 600-800 м существует вторичный максимум их повторяемости (приподнятые инверсии), выраженный в холодное полугодие.

О микроклиматической изменчивости температуры воздуха в районе Мурманска

В.И. Демин¹, Ю.В. Меньшов²

¹*ФГБНУ Полярный геофизический институт, Апатиты*

²*Территориально-ситуационный центр ФКУ Упрдор «Кола», Петрозаводск*

По данным гидрометеорологических и автоматических дорожных станций проведена оценка микроклиматической изменчивости температуры воздуха в районе Мурманска. Среднемесячные значения температуры меняются довольно слабо и анализировались статистические распределения. Различия в сроки на исследуемой территории составляют в среднем около 4°C зимой и 2°C летом, но в 5% случаев они превышали 10 и 5°C соответственно. Заметим, что указанные различия могли возникать как за счет микроклиматических неоднородностей местности, так и за счет кратковременных вариаций погодных условиях (неравномерное распределение облачности, разные скорости ветра и т.д.).

Зимой весьма заметно понижение нижних перцентилей температуры воздуха в направлении от северных районов города (Роста) к южным (пос. «Молочный»), вызванное отепляющим влиянием Баренцева моря: 1 и 10% перцентили для северных районов соответственно -17° и -14°C, а для южных -27°C -17°C. Для сравнения: в аналогичный период в расположенном ближе к морю Полярном они составляли -15.6°C и -12.7°C. В летнее время обнаруживается небольшое возрастание в южном направлении верхних перцентилей в послеполуденные часы и убывание нижних перцентилей в ночное время. Но эти вариации менее 1°C и нуждаются в уточнении по более продолжительной серии измерений.

Электромагнитное поле грозового разряда

Ю.А. Копытенко, М.С. Петрищев*, В.С. Исмагилов, Е.С. Вернова

СПбФ ИЗМИРАН, Россия, Санкт-Петербург, РФ

*E-mail: ms_petr@mail.ru

Сильные вспышки на Солнце класса X>5 приводят к внезапному усилению потока рентгеновского излучения и электромагнитного поля грозовой активности, а также к появлению вариаций типа «кроше» в магнитном поле, нарушению радиосвязи и появлению молниевых разрядов. В работе представлена модель поглощения рентгеновского излучения в нижней атмосфере в результате рекомбинации молниевых разряда с учетом наличия ионизационных слоев и коррекцией затухания.

Ключевые слова: рекомбинация, ионизация, атмосфера, электромагнитное поле, магнитное кроше, молния.

Моделирование кинетики синглетного кислорода $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ в полярной ионосфере и на высотах ночного свечения

Ю.Н. Куликов, А.С. Кириллов

Полярный геофизический институт, г. Апатиты, Россия

Проведен расчет констант гашения электронно-возбужденного состояния $b^1\Sigma_g^+$ молекулярного кислорода молекулами O_2 и N_2 . Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными. Рассчитанные коэффициенты гашения синглетного кислорода $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ используются для определения населенностей различных колебательных уровней v электронно-возбужденного молекулярного кислорода на высотах ночной мезосферы и нижней термосферы Земли. Выполнены расчёты относительных населенностей синглетного кислорода $O_2(b^1\Sigma_g^+,v)$, образованного в случае высыпания авроральных электронов и в тройных столкновениях с участием двух атомов кислорода. Сравнение рассчитанных населенностей с результатами имеющихся в научной литературе экспериментальных оценок как для полярной ионосферы, так и для ночного свечения Атмосферных полос O_2 дает хорошее согласие. При этом, сравнение рассмотренных двух случаев образования $O_2(b^1\Sigma_g^+,v)$ на высотах ночной мезосферы и нижней термосферы Земли показывает, что колебательные населенности состояния $b^1\Sigma_g^+$ молекулы O_2 в полярной ионосфере и в ночном свечении значительно различаются.

Подходы к построению моделей взаимодействия атмосферы с различными типами поверхности Земли

И.В. Мингалев, Е.А. Федотова, А.И. Мингалев, К.Г. Орлов

Полярный геофизический институт РАН, 184209, Мурманская обл., г. Апатиты, ул. Академгородок, 26а

E-mails: mingalev_i@pgia.ru, orlov@pgia.ru, godograf87@mail.ru, mingalev@pgia.ru

В докладе обсуждаются численные модели взаимодействия между атмосферой и приповерхностным слоем океана и расположенных на суше водоемов - рек, озер, болот, а также приповерхностным слоем поверхности суши разных типов – ледников, пустынь, степей и различных лесов. Представлены разработанные авторами модели, в которых учитывается перенос тепла и влаги в приповерхностном слое литосферы, а также перенос энергии излучением. Обсуждаются системы уравнений, описывающие перенос тепла и влаги, а также результаты тестовых расчетов.

Ключевые слова: перенос тепла и влаги в литосфере, взаимодействие атмосферы и поверхности Земли

Расширение системы регистрации гамма-излучения при осадках на Шпицбергене

Е.А. Михалко*, Ю.В. Балабин, А.В. Германенко, Б.Б. Гвоздевский

Полярный геофизический институт, Анатиты, Россия

*E-mail: mikhalko@pgia.ru

В лаборатории космических лучей ПГИ непрерывно ведется мониторинг электромагнитной компоненты вторичного космического излучения, при котором был обнаружен эффект возрастания гамма-излучения при осадках. В процессе наблюдения за изменениями гамма-фона, была сформирована сеть из сцинтилляционных спектрометров, в различных регионах страны. В 2024 году в Баренцбурге (арх. Шпицберген) для проведения дополнительных измерений фонового гамма-излучения в полярном регионе, к установленному спектрометру были добавлены еще два детектора. Спектрометры собраны на основе кристаллов NaI(Tl), с энергетическим диапазоном 20-600 кэВ. Детекторы были разнесены друг от друга как по расстоянию (до 4-х км), так и по высоте (до 200 метров над уровнем моря). В процессе работы на всех трех детекторах, были зарегистрированы возрастания гамма-излучения при осадках, однако, при сравнительном анализе было выявлено, что данные события одинаковые по амплитуде и длительности имеют сдвиг по времени, вероятно обусловленный орографической особенностью местности и скоростью движения осадков.

Моделирования циркуляции нижней и средней атмосферы Земли с учетом образования облаков и выпадения осадков

К.Г. Орлов, И.В. Мингалев, Е.А. Федотова, В.С. Мингалев

Полярный геофизический институт РАН, 184209, Мурманская обл., г. Анатиты, ул. Академгородок, 26а

E-mails: mingalev_i@pgia.ru; orlov@pgia.ru; godograf87@mail.ru; mingalev@pgia.ru

В докладе обсуждаются влияние учета процессов образования облаков и выпадения осадков на результаты численного моделирования общей циркуляции нижней и средней атмосферы Земли, полученные с помощью нашей модели с пространственным разрешением по горизонту около 26 км. Обсуждаются процессы возникновения и эволюции крупномасштабных вихрей в нижней атмосфере и влияние горных систем на места их образования. Также обсуждаются влияние процессов образования облаков на нагрев атмосферы излучением и на вертикальный перенос.

Ключевые слова: моделирование общей циркуляции атмосферы Земли, атмосферные вихри

Синхронные реакции оранжерейных растений и неживых систем на солнечную активность

П.А. Кашулин, Н.В. Калачёва

Полярно-Альпийский ботанический сад-институт, РАН, Анатиты, Россия

Проведены сравнительные измерения физиологических параметров оранжерейных растений чувствительных к климатическим факторам в месяцы повышенной солнечной активности (СА) 2024 г. Для исключения вклада наземных климатических и экологических влияний параллельно с живыми растениями использовали неживые механические и электронные системы. Основное внимание уделяли реакциям растений на геокосмические события года, совпадающие с «аномальными» флуктуациями статистических показателей неживых систем. Неустойчивые системы чувствительны к внешним влияниям, в критические моменты, пребывания монеты «на ребре», её последующую динамику могут определить самые слабые воздействия. У растений *Marantha leoconeura* ежедневно измеряли суточный ритм настических движений листовых пластинок. Одновременно фиксировали результаты генерации случайных чисел на базе калькулятора SRP-285П «CITIZEN» и др. а также статистику распределения результатов бросания монет и правильных шестигранников, которые рассматривали как «бернуллиевские» случайные величины с двоичным и шестизначным выбором, соответственно. Проводили также анализ серий выпадения одинаковых сторон монет или граней в геофизически спокойные дни и в периоды высокой СА. Анализ многодневной динамики статистических и параметров неживых систем и физиологических индексов растений указывает на присутствие полунедельной и около недельной цикличности. Обнаружены два основных вида реакций изучаемых объектов на значительные усиления СА, сопровождаемые образованием корональных дыр, вспышками: класса X или M. Это значительное усиление амплитуды наблюдаемых параметров и отклонения от статистически ожидаемых значений или сбой суточных ритмов. Такие эффекты наблюдали осенью и в конце 2024 г., а также в начале 2025 г. Солнечные вспышки из региона 3947 класса X, корональные дыры 29 декабря 2024 г. и 16 января 2025 г. вызвали синхронный сбой суточных ритмов движений листьев растений и числа генерации разных цифр у разных калькуляторов на несколько суток. Синхронные реакции живых и неживых систем, ассоциированные с крупномасштабными событиями на Солнце, указывают на их геокосмическую обусловленность.

Арктика как междисциплинарная научная экспериментальная и практическая образовательная лаборатория изучения геосферных возмущений гелиогеофизического характера

Э.Г. Мирмович, к.ф.-м.н., доцент

ГБПОУ МО «Колледж «Подмосковье»»; e-mail: mirmovich1940@mail.ru

В работе рассматривается Арктика как междисциплинарная научная экспериментальная и практическая образовательная лаборатория изучения геосферных возмущений гелиогеофизического характера.

Солнечно-магнитосферно-ионосферные процессы и Арктика:

Исследования магнитосферы и ионосферы как важных геосферных оболочек (ГСО), особенно в полярной шапке и авроральном овале – это альфа и омега всех пространственных и временных асимметрий и нестационарностей этих ГСО. При этом не только сложнейшая «огуречно-кальмарная» конфигурация магнитосферы, но и вся динамика верхней, средней и даже нижней атмосферы обязаны беспокойной жизни этих двух надповерхностных зон Земли – ведь большинство геофизических процессов в средних и даже низких широтах – родом из Арктики (т.е. широт с географической широтой $\varphi > 60^\circ \div 68^\circ$ (N V S) и геомагнитной широтой $\Phi_{\text{ГМ}} > 45^\circ$). А возмущения геомагнитного поля в полярных зонах в десятки раз выше по амплитуде, чем на средних широтах. А по генерируемым магнитными возмущениями теллурическим токам может предсказываться также места крупных месторождений нефти и особенно металлических руд.

Космическая погода и её влияние на человека:

В целях совершенствования системы предупреждения органов государственной власти, Вооруженных Сил Российской Федерации и населения об опасных природных (гидрометеорологических и гелиогеофизических) явлениях, а также гибели людей на земле и в космическом пространстве во время орбитальных полётов и снижения экономического ущерба учёными и специалистами Гидрометеослужбы России были выработаны и введены в действие критерии неблагоприятных и опасных явлений гелиогеофизического характера [1]. Роль космической погоды для средней атмосферы автор отметил ещё в работе [2].

Неполнота данных как научная проблема:

Одной из самых главных задач этой огромной области исследований является сохранение и приумножение непрерывных рядов наземных наблюдений для настоящего и будущего цивилизации и с гуманитарной, и с экономической точек зрения. Прежде всего, это касается разрывов в наблюдениях или их отсутствие «в нужное время в нужном месте».

Так получилось, например, во время эксперимента – американской т.н. операции «Starfish», когда не удалось получить измерение эффектов операции «Морская звезда» – термоядерного взрыва над островом Джонсон в Тихом Океане. И ещё не менее 10 лет во внутреннем радиационном поясе мы были не в состоянии различить естественные электроны от искусственно инжесктированных туда этим взрывом. Да, может, они ещё там и сегодня есть.

Однако еще в большей мере недопустимым является рукотворное уничтожение уникальной информации о нашей окружающей среде, которую никаким образом восполнить нельзя. Это просто уничтожает все подвижнические и не продлённые ряды наблюдений предыдущих энтузиастов и титанов научных исследований Арктики (да и Антарктики), снижает до минимума эффективность космических программ и проектов. А ведь исследованию надлитосферных явлений и процессов в полярных широтах и в том числе этих двух квазиторроидальных “бубликов”, каковыми являются полярная шапка и авроральный овал со своими двумя электроджетами, посвятили свои жизни десятки выдающихся учёных и альтруистически преданных этим широтам исследователей. Разумеется, комплексное исследование арктического пространства осуществляется сегодня системами космических спутников. Однако ни одна серьёзная научная концепция и тем более модель ближнего космоса не могли быть построены без синергетического симбиоза данных, полученных космическими аппаратами (КА), с данными наземных наблюдений. Отсутствие наземных наблюдений во время работы КА и их синхронизации с работой КА уже нанесло большой вред науке и практике.

Зоны вторжений СКЛ и полярных сияний – это уникальный научный полигон фундаментальных исследований, проведение которых невозможно ни в каких других лабораториях; своеобразный «коллайдер» для физиков-экспериментаторов и область природных взаимодействий волна-частица для теоретиков.

И главное – дружба геофизиков всех «арктических стран», не омрачавшаяся даже в самые горячие дни и годы «холодной войны».

1. Мирмович, Э. Г. Потенциальные источники чрезвычайных ситуаций гелиогеофизического происхождения / 16-я Всероссийская открытая научная конференция «Физика плазмы в солнечной системе», М., ИКИ РАН. 2021. С. 279. <https://plasma2021.cosmos.ru/docs/2021/PLASMA-2021-AbstractBook-0202.pdf>
2. Мирмович, Э. Г. Прогноз погоды средней атмосферы / «Человек и стихия», Ежегодник. М.: «Наука». 1986. С. 77–80.

AUTHOR INDEX

- | | |
|--|---|
| <p style="text-align: center;">A</p> <p>Abunin A.A. 14</p> <p>Abunina M.A. 14, 62, 67, 73</p> <p>Aidakina N.A. 56</p> <p>Alexeev I.I. 37</p> <p>Anisimov S.V. 60</p> <p>Anoruo C.M. 14</p> <p>Antonenko O.V. 85</p> <p>Antonova E.E. 15, 27</p> <p>Antonyuk G.I. 16, 39</p> <p>Apatenkov S.V. 36, 37</p> <p>Artemyev A.V. 17, 36, 38, 55, 61</p> <p>Astafyeva E.I. 85</p> <p>Astapov I.I. 64</p> <p>Atanassov A. 21, 26</p> <p>Azra-Gorskaya C.G. 28, 34</p> <p style="text-align: center;">B</p> <p>Babaeian B. 39</p> <p>Balabin Yu.V. 70, 71, 106, 109</p> <p>Barkhatov N.A. 29</p> <p>Barkhatova O.M. 29</p> <p>Bazilevskaya G.A. 72</p> <p>Bekker S.Z. 94</p> <p>Belakhovsky V.B. 17, 18, 19, 49, 50, 53</p> <p>Belov A.A. 74, 90, 96</p> <p>Belov A.V. 14, 62</p> <p>Belov S.M. 62</p> <p>Belyuchenko K.V. 77, 78, 80, 86</p> <p>Benghin V.V. 16, 39</p> <p>Berezutskiy A.G. 35, 50</p> <p>Bespalov P.A. 51, 54</p> <p>Bessarab F.S. 76, 77, 78</p> <p>Bezotecheskaya E.A. 101</p> <p>Bikbulatov B.A. 101</p> <p>Blagoveschenskaya N.F. 59</p> <p>Bobrov N.V. 19</p> <p>Bogomolov A.V. 74</p> <p>Bogomolov V.V. 39, 74</p> <p>Bojilova R. 21, 26, 105</p> <p>Borchevkina O.P. 76</p> <p>Borisova T.D. 59</p> <p>Borodin P.B. 32</p> <p>Bykov A.M. 41</p> <p style="text-align: center;">C</p> <p>Chen C. 79</p> <p>Chernenko A.N. 30</p> <p>Cherneva N.V. 78</p> <p>Chernyshov A.A. 51, 52, 80</p> <p>Chibranov A.A. 35, 44, 50</p> | <p>Chugunin D.V. 35, 51, 52, 80</p> <p style="text-align: center;">D</p> <p>Danilchuk E.I. 77, 79</p> <p>Dashkevich Zh.V. 88</p> <p>Demekhov A.G. 23, 45, 48, 53, 57</p> <p>Demin V.I. 102, 106, 107</p> <p>Demkin V.M. 102</p> <p>Demyanov V.V. 79</p> <p>Despirak I.V. 20, 26</p> <p>Didenko K.A. 73, 101</p> <p>Divin A.V. 36, 43, 44, 46, 77, 78</p> <p>Dmitriev P.B. 105</p> <p>Dobrokhotoy S.Yu. 55</p> <p>Dorofeev D.A. 51</p> <p>Dukanov I.A. 63</p> <p style="text-align: center;">E</p> <p>Efishov I.I. 33</p> <p>Egorov Y.I. 85</p> <p>Endeshaw L. 20</p> <p>Eremeev V.E. 69</p> <p>Ermak V.M. 94</p> <p>Ermakova E.N. 60</p> <p>Ermakova T.S. 101</p> <p style="text-align: center;">F</p> <p>Fadeev A.S. 101, 102</p> <p>Fagundes P.R. 14</p> <p>Fedorenko Yu.V. 58, 59</p> <p>Fedorov E.N. 60</p> <p>Fedotova E.A. 108, 109</p> <p>Fedyai O.V. 30</p> <p>Filatov M.V. 33, 59</p> <p>Frantsuzov V.A. 61</p> <p style="text-align: center;">G</p> <p>Garanin S.L. 47</p> <p>Gavrilov B.G. 94</p> <p>Germanenko A.V. 70, 71, 106, 109</p> <p>Gomonov A.D. 84, 87, 88</p> <p>Gordeev E. 77</p> <p>Grigorenko E.E. 42</p> <p>Gromov S.V. 21, 24</p> <p>Gromova L.I. 21, 24</p> <p>Guineva V. 21, 26, 67, 105</p> <p>Gupta P. 68</p> <p>Gurin A.V. 84</p> <p>Gushchin M.E. 56</p> <p>Gvozdarev A.Yu. 32</p> |
|--|---|

Gvozdevsky B.B.70, 71, 106, 109

H

He X.36

I

Ismagilov V.S.22, 59, 107

Ivanov A.E.35

Ivanov N.V.88

Ivanov V.E.88

Ivanova A.R.23

Iyudin A.F.74

K

Kalacheva N.V.110

Kalegaev V.V.23, 28, 69

Kalinin M.S.72

Kalishin A.S.59

Kamaletdinov S.R.36

Kaportseva K.B.34, 64, 69

Kapustin V.E.25

Karavaev Yu.A.25

Karpov I.V.76

Kashulin P.A.110

Kazakov E.A.78

Khalipov V.L.100

Kirillov A.S.85, 89, 102, 105, 108

Kirillov V.A.89

Kirpichev I.P.15

Kiselev A.V.85

Kleimenova N.G.20, 21, 24

Klimenko M.V.35, 76, 77, 78, 80, 86

Klimenko V.V.35, 77, 78, 80, 86

Klimov P.A.74, 90, 96, 97, 100

Klimushkin D.Yu.52, 53, 54

Klusilov A.V.77

Kokhan G.R.37

Kolobov V.V.60

Kolpak V.I.52

Kopytenko Yu.A.22, 59, 107

Korobkov S.V.56

Kostarev D.V.49, 53

Kotova G.A.35

Koval A.V.102

Kozelov B.V.71, 90, 91, 96, 106

Kozyreva O.V.47

Kraiev M.B.72

Kropotina Yu.A.41

Kruchinin P.A.41

Kubyshkina M.V.38

Kucherenko I.A.74

Kulikov Yu.N.108

Kulikov Y.Y.102

Kurdyayeva Y.A.76

Kurikalova M.A.25

Kuvshinov A.A.30

Kuzmenkova P.S.64

Kuznetsova M.V.59

Kvashnin A.N.72

L

Lagoida I.A.64

Larchenko A.V.57, 58, 59

Lavrukhin A.S.34, 37

Lebed' O.M.58, 59

Lebedev V.P.85

Leonov A.A.38

Liu S.36

Lobanova V.S.92, 94

Loginov M.V.35

Lubchich A.A.20, 26

Lunyushkin S.B.25

M

Mager P.N.52, 53, 54, 55

Makarov G.A.24

Makhmutov V.S.72

Malakhov V.V.38, 41

Maletckii B.M.85

Malkin E.I.78

Malova H.V.42

Malysheva L.M.20, 21, 24

Mao A.36

Marchuk R.A.25, 60

Maurchev E.A.14, 73, 101

Mayorov A.G.38, 68

Mazur N.G.60

Melnik M.N.42

Menshov Yu.V.107

Merkin V.G.77

Merzlyi A.M.30, 92

Mikhailov V.M.104

Mikhailova O.S.55, 58

Mikhalko E.A.71, 106, 109

Mingalev A.I.108

Mingalev I.V.42, 87, 92, 108, 109

Mingalev O.V.42, 87

Mingalev V.S.109

Mirmovich E.G.110

Mironova I.A.19

Miroshnichenko I.B.35, 50

Mishin V.V.25

Mogilevsky M.M.51, 52, 80

Moiseenko I.L.52

Moiseev I.A.92

Motorina G.G.65

Murashov A.S.74, 90

N

Naiko D.Yu.	15
Neshchetkin G.M.	51, 54
Nevsky D.V.	34
Nikitenko A.S.	58, 59
Nikolaeva V.D.	90, 96, 100

O

Obridko V.N.	105
Oganov S.A.	34
Orlov K.G.	108, 109
Osedlo V.I.	39
Ovchinnikov I.L.	15

P

Padokhin A.M.	79, 85, 93
Paramonik I.P.	36, 43, 44, 46
Parkhomov V.A.	25
Pasmanik D.L.	53
Pavlov I.A.	79, 93
Penskikh Yu.V.	25
Petrishchev M.S.	59, 107
Petrukovich A.A.	61
Pilgaev S.V.	59
Pilipenko V.A.	18, 30, 47, 49, 50, 53, 58, 60
Pillat V.G.	14
Podgorny A.I.	66
Podgorny I.M.	66
Poklad Yu.V.	92, 94
Popova T.A.	45, 48
Poroshenko A.G.	103
Posukh V.G.	35
Potapov A.S.	60
Pozdnyakova D.D.	58, 60
Prokhorov B.E.	87
Proshin S.A.	41
Pudovinnikov R.N.	30

R

Ratovsky K.G.	78, 80, 86
Raykova L.	21, 26, 67
Revunov S.E.	29
Revunova E.A.	29
Rodenko S.A.	38
Roldugin A.V.	19, 90, 96
Romanovskaya Yu.V.	87
Rozanov E.V.	77, 78
Rozhdestvenskaya V.I.	104
Rozhdestvensky D.B.	104
Rubtsov A.V.	54, 55
Rumenskikh M.A.	35, 44
Ryabov A.V.	60
Ryakhovskiy I.A.	92, 94, 95

Ryskin V.G.	102
------------------	-----

S

Sadikov A.M.	39
Safargaleev V.V.	46
Sakharov Ya.A.	19, 26, 30, 47, 50
Salimov B.G.	85
Sapunova A.I.	95
Saraev R.E.	90, 96
Savel'eva N.V.	60
Savenkova E.N.	102
Savina O.N.	51, 54
Schur L.I.	71
Selivanov V.N.	19, 26, 50
Semenov V.S.	36, 43, 44, 46
Sergeev V.A.	37, 38
Sergushin P.A.	59
Setsko P.V.	20, 26, 42
Shafizadeh M.R.	39
Shagimuratov I.I.	33
Shaikhislamov I.F.	35, 44, 50
Shaposhnikov V.E.	51
Shapovalova Yu.A.	87
Sharakin S.A.	90
Sharipov S.S.	50
Shchelkanov K.D.	90, 96, 100
Sheiner O.A.	86
Shevtsov B.M.	78
Shiryaev A.O.	34
Shkareva P.D.	54
Shlyk N.S.	14, 62, 67, 73
Shubin D.A.	54
Shugay Y.S.	69
Shvets M.V.	84
Sibeck D.G.	27
Sigaeva K.F.	90, 96, 97
Sinevich A.A.	80
Siruk S.A.	68
Smirnova E.S.	55
Smotrova E.E.	55
Sokoloff D.D.	63
Sondhiya D.K.	68
Sorathia K.A.	77
Stepanov A.E.	100
Stepanova M.V.	15
Stribny O.Y.	59
Strikovskiy A.V.	56
Suvorova A.V.	31
Suvorova Z.V.	92
Svertilov S.I.	39, 74, 81
Svirzhevskaya A.K.	72
Svirzhevsky N.S.	72

T

Tarasenko V.F.	89
Tatarnikov A.A.	87

Team of the Russian project «Ionosphere»	81, 83
Telegin V.A.	104
Tertyshnikov A.V.	97
Timchenko A.V.	76, 78
Tishchenko V.N.	50
Tkachev A.L.	59
Tonoian D.S.	55
Toohy M.	103
Trofimov D.A.	90

U

Uchaikin E.O.	32
Uvarov V.M.	99

V

Vakhnina V.V.	30
Vakhrusheva A.A.	34, 69
Valev D.	105
Veretenenko S.V.	105
Vernova E.S.	107
Vesnin A.M.	77, 79, 80, 85
Vinogradov N.P.	89
Vlasova N.A.	28
Volkov M.A.	84
Vorobjev V.G.	15, 27, 29
Voskresenskov E.D.	74
Vybornov F.I.	86

W

Wang X.	36
Werner R.	21, 26, 67, 105

Y

Yagodkina O.I.	15, 27, 29, 30
Yagova N.V.	30, 47
Yahnina T.A.	23, 45, 48
Yakimova G.A.	33, 76
Yanakov A.T.	92
Yasyukevich Yu.V.	28, 77, 79, 85
Yulbarisov R.F.	68
Yushkov E.V.	63

Z

Zaitsev I.V.	43
Zakharov Yu.P.	35
Zelenyi L.M.	42
Zhang B.	77
Zhang X.-J.	55
Zhong D.	36, 43, 46
Zolotarev I.A.	16, 39
Zolotov O.V.	87
Zotov M.Yu.	90
Zudin I.Yu.	56