

Российская академия наук
Польская академия наук

Rosyjskiej Akademii Nauk
Polskiej Akademii Nauk

**НАУЧНОЕ СОТРУДНИЧЕСТВО
МЕЖДУ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИЕЙ НАУК
И ПОЛЬСКОЙ АКАДЕМИЕЙ НАУК
В ОБЛАСТИ ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ
КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

**WSPÓŁPRACA NAUKOWA
MIĘDZY ROSYJSKĄ AKADEMIAŃ NAUK
A POLSKĄ AKADEMIAŃ NAUK
W DZIEDZINIE PODSTAWOWYCH
BADAŃ KOSMICZNYCH**

**РЕЗУЛЬТАТЫ СОВМЕСТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

WYNIKI WSPÓLNYCH BADAŃ**

**МОСКВА
2011**

В рамках Соглашения
о научном сотрудничестве
между Российской академией наук (РАН)
и Польской академией наук (ПАН)
в области фундаментальных
космических исследований (ФКИ)
в 2005 году был утвержден перечень
совместных российско-польских
космических проектов.
В данном издании приведены
результаты исследований,
полученные за период 2006–2009 годы

Составитель: Романцова Т. В.
Редактор: Корниленко В. С.
Компьютерная верстка: Комарова Н. Ю.
Дизайн обложки: Давыдов В. М., Захаров А. Н.

Издание подготовлено
Институтом космических исследований
Российской академии наук, 2011

ПРЕДИСЛОВИЕ

Л. Зеленый, М. Банашкевич

WSTĘP

L. Zelenyi, M. Banaszkiwicz..... 5

**1 РЕНТГЕНОВСКАЯ СПЕКТРОФОТОМЕТРИЯ СОЛНЦА
(РЕСИК/КОРОНАС-Ф)**

В. Кузнецов, Я. Сильвестер

SPEKTROSKOPIA RENTGENOWSKA SŁOŃCA (RESIK/KORONAS-F)

V. Kuznetsov, J. Sylwester..... 11

**2 СПЕКТРОСКОПИЯ ДАЛЬНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО
И РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА**

С. Кузин, Я. Сильвестер

**SPEKTROSKOPIA Z ZAKRESU DALEKIEGO ULTRAFIOLETU
I RENTGENOWSKIEGO PROMIENIOWANIA SŁOŃCA**

S. Kuzin, J. Sylwester 23

3 СФИНКС

С. Кузин, Я. Сильвестер

SPHINX

S. Kuzin, J. Sylwester 32

4 НЕЙТРАЛ

В. Измоденов, М. Бзовски

NEUTRAŁ

V. Izmodenov, M. Bzowski 45

5 ИЗЛУЧЕНИЕ

М. Могилевский, Я. Ханаш

PROMIENIOWANIE

M. Mogilewsky, J. Hanasz..... 54

6 СТРУКТУРА

С. Савин, Я. Бленцки

STRUKTURA

S. Savin, J. Włęccki 64

**7 ИОНОСФЕРА: МОДЕЛИРОВАНИЕ ИОНОСФЕРНОЙ ПОГОДЫ
ДЛЯ РАДИОСВЯЗИ**

Т. Гуляева, И. Станиславска

**JONOSFERA: MODELOWANIE POGODY JONOSFERYCZNEJ
DLA ŁĄCZNOŚCI RADIOWEJ**

T. Gulyaeva, I. Stanisławska 73

8	ДИАГНОСТИКА ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМ ГЛОБАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ И. Шагимурастов, А. Кранковский DIAGNOSTYKA JONOSFERY PRZY UŻYCIU OBSERWACJI GNSS I. Shagimuratov, A. Krankowski	82
9	ИНЖЕКЦИЯ Ю. Михайлов, З. Клос INIEKCJA Y. Mikhailov, Z. Kłos	98
10	ПВО — ПЛАЗМЕННО-ВОЛНОВАЯ ОБСТАНОВКА С. Климов, Х. Ротхель PWO — ŚRODOWISKO PLAZMOWO-FALOWE S. Klimow, H. Rothkaehl	104
11	ФОБОС О. Козлов, Ю. Григорчук FOBOS O. Kozlov, J. Grygorczuk	114
12	ТУРБУЛЕНТНОСТЬ А. Волокитин, Б. Атаманюк TURBULENCJA A. Volokitin, B. Atamaniuk	117
13	ПЫЛЕВАЯ ПЛАЗМА С. Попель, Б. Атаманюк PLAZMA PYŁOWA S. Popel, B. Atamaniuk	128
	ОСНОВНЫЕ ИСПОЛНИТЕЛИ GŁÓWNI AKTORZY	144

Исследования космоса в рамках сотрудничества Российской и Польской академий наук имеют долгую и славную историю. Первая польская аппаратура, работавшая непосредственно в составе космического аппарата, была установлена на спутнике «Интеркосмос-Коперник-500», запущенном 19 апреля 1973 года. Это был радиоспектрограф, с помощью которого наблюдалось спорадическое радиоизлучение Солнца.

Еще до запуска первых спутников серии «Интеркосмос» польские ученые принимали активное участие в экспериментах на высотных, «солнечных» по назначению, ракетах «Вертикаль».

Одной из заметных вех в программе совместных работ в космосе стал полет польского космонавта Мирослава Гермашевского на орбитальной станции «Салют-6». Им была выполнена серия технологических экспериментов, а также изучалось поведение вещества в условиях космического полета, проводились медицинские исследования. Помимо работ на станции «Салют-6» польские специалисты принимали участие в подготовке и проведении исследований на биоспутниках «Космос-782, -936 и -1192».

Сотрудничество в «дальнем» космосе началось с совместного волнового эксперимента на спутнике «Прогноз-8». Затем последовала серия экспериментов на аппарате «Прогноз-10», межпланетных станциях «Вега» и «Фобос».

Российско-польское сотрудничество в космосе не прекращалось и в трудные для российской науки — 1990-е и первые 2000-е годы. Конечно, российская программа научных исследований в космосе в эти годы оказалась сильно «съездившейся» по сравнению с советскими временами, но примечательно, что в тех немногих реализованных тогда проектах (ИНТЕРБОЛ, КОРОНАС-И,

Badania kosmosu będące obszarem współpracy Polskiej i Rosyjskiej Akademii Nauk mają długą i wspaniałą historię. Pierwsza polska aparatura działająca bezpośrednio na pokładzie aparatu kosmicznego była zastosowana w sputniku „Interkosmos-Kopernik-500”, wyniesionym w kosmos 19 kwietnia 1973 roku. Był to radiospektrograf, dzięki któremu można było zaobserwować sporadyczne promieniowanie radiowe Słońca.

Do momentu wystrzelenia pierwszych sputników „Interkosmos” polscy naukowcy brali aktywny udział w eksperymentach na wysokościowych rakietach „Wertikal” przeznaczonych do badań Słońca.

Jednym ze znaczących wydarzeń w czasie wspólnych działań w kosmosie był lot polskiego kosmonauty Mirosława Hermaszewskiego na stacji orbitalnej „Salut-6”. Przygotowano serię technologicznych eksperymentów oraz badano zachowanie materii w warunkach lotu kosmicznego, przeprowadzano również badania medyczne. Oprócz misji „Salut-6” polscy specjaliści wzięli udział w przygotowaniach i prowadzeniu badań na biosputnikach „Kosmos-782, -936 i -1192”.

Współpraca w „dalekim” kosmosie zaczęła się od wspólnego eksperymentu na sputniku „Prognoz-8”. Następnie pracowano nad serią eksperymentów na sputniku „Prognoz-10”, międzyplanetarnych stacjach „Wega” i „Fobos”.

Polsko-rosyjska współpraca w kosmosie nie zakończyła się nawet w trudnych dla rosyjskiej nauki latach 1990’ i 2000’. Oczywiście rosyjski program badań naukowych w kosmosie w tych latach okazał się „uszczerplony” w porównaniu z czasami sowieckimi, jednak i wtedy, mimo niewielu realizowanych projektów (INTERBOL, KORONAS-I, KORONAS-F, KORONAS-Foton) polsko-rosyjski składnik był

КОРОНАС-Ф, КОРОНАС-Фотон) российско-польская компонента присутствовала всегда и в большинстве случаев была одним из ключевых элементов.

Хочется вспомнить самыми добрыми словами и безвременно ушедшего от нас доктора Юзефа Юхневича, все эти годы (и советские, и российские) находившегося в «эпицентре» наших совместных проектов.

В проекте ИНТЕРБОЛ польские ученые участвовали в волновом комплексе АСПИ на «Хвостовом зонде» и в исследованиях километрового радиолучения Земли с помощью прибора ПОЛЬРАД. Их результаты и сейчас продолжают изучаться в рамках российско-польской рабочей группы по космической физике.

Знаковыми для российско-польского сотрудничества стали 2000-е годы. В двух основных российских научных миссиях этого десятилетия — КОРОНАС-Ф и КОРОНАС-ФОТОН — проводились уникальные российско-польские эксперименты по наблюдению спектров рентгеновского излучения Солнца. В проекте КОРОНАС-Ф приборами ДИАГЕНЕСС и РЕСИК изучены атомные процессы в солнечных вспышках и выполнена спектроскопическая диагностика вспышечной плазмы: впервые измерены и изучены полнопрофильные спектральные линии от самых мощных вспышек, обнаружены новые спектральные линии в солнечном спектре и исследована зависимость спектров ионов солнечной плазмы от температуры, отвечающей разным уровням солнечной активности, определено абсолютное содержание ряда химических элементов в короне Солнца.

Многие результаты, полученные в ходе этих исследований, изложены (по необходимости кратко) в представленном буклете.

По данным совместно разработанных радиоспектрометров на спутниках АПЭКС («Интеркосмос-24 и -25») и

obecny zawsze i w większości przypadków był jednym z ich kluczowych elementów.

Pragniemy wspomnieć w samych superlatywach i ciepłych słowach, o doktorze Józefie Juchniewiczu, który przedwcześnie od nas odszedł i który w latach (i sowieckich i rosyjskich) działał w „epicentrum” wspólnych projektów.

W projekcie INTERBOL polscy uczeni brali udział w kompleksie falowym ASPI na sondzie „ogonowej” i w badaniach kilometrowego promieniowania radiowego Ziemi przy pomocy przyrządu POLRAD. Rezultaty badań są nadal opracowywane w ramach współpracy rosyjsko-polskiej grupy roboczej zajmującej się fizyką kosmiczną.

Lata od 2000' były istotne dla współpracy polsko-rosyjskiej. Dwie zasadnicze rosyjskie misje naukowe tego dziesięciolecia KORONAS-F i KORONAS-Foton dały podstawę do unikalnych rosyjsko-polskich eksperymentów polegających na obserwacji pasm promieniowania rentgenowskiego Słońca. W projekcie KORONAS-F przy pomocy przyrządów DIAGENESS i RESIK badane były procesy atomowe w rozbłyskach słonecznych oraz wykonano spektroskopową diagnostykę rozbłysków plazmy: po raz pierwszy wykonano pomiary i zbadano pełno-profilowe linie widmowe w najpotężniejszych rozbłyskach, wykryto nowe linie spektralne w widmie słonecznym oraz zbadano zależność widm jonów plazmy słonecznej od temperatury, odpowiadające różnym poziomom aktywności słonecznej, określono bezwzględną zawartość niektórych pierwiastków chemicznych w koronie Słońca.

Wiele wyników otrzymanych w rezultacie niniejszych badań przedstawiono (z konieczności w skrócie) w prezentowanej książce.

Na podstawie wspólnych danych z radiospektrometrów na sputnikach АРЕКС („Interkosmos-24” i „Interkosmos-25”) i

«Коронас-И» изучены морфологические особенности радиочастотных шумов во внешней ионосфере, выявлены особенности глобального распределения наблюдаемых спектров широкополосных излучений, обнаружены особенности в спектрах, связанные с различными плазменными эффектами.

Успех российско-польского сотрудничества в фундаментальных космических исследованиях отмечен и премиями, и правительственными наградами: премия правительства Российской Федерации за успешную научную реализацию проекта КОРОНАС-Ф (2009); престижная совместная премия РАН и ПАН за лучшую научную работу (2011), выполненную в ходе российско-польского сотрудничества; правительственные награды директоров ЦБК ПАН и ИКИ РАН, врученные соответственно президентами России и Польши.

Важно, что импульс взаимодействия, набранный в предыдущие годы, не только не ослаб, но и усилился в наступившем десятилетии. Завершаются последние приготовления к запуску межпланетной станции «Фобос-Грунт», на борту которой будут выполнены два российско-польских эксперимента: ТЕРМОФОБ и СНОМИК.

Особенно интересна история эксперимента СНОМИК, наглядно доказывающая, что двустороннее российско-польское сотрудничество идет также на пользу взаимодействию наших стран с Европейским и другими космическими агентствами. Уникальное польское устройство для забора и размельчения грунта, первоначально разрабатывавшееся для использования при анализе вещества кометы Чурюмова–Герасименко (проект РОЗЕТТА ЕКА) недавно нашло свое место и в российском проекте ФОБОС-ГРУНТ, для обеспечения диверсификации методов забора грунта одним из пенетраторов.

Задача эксперимента ТЕРМОФОБ — выяснение термофизических свойств грунта марсианского спутника.

„Koronas-I” zbadano morfologiczne właściwości szumów częstotliwości radiowych w zewnętrznej jonosferze, wykryto właściwości globalnego rozkładu obserwowanych widm promieniowania szerokopasmowego, znaleziono własności widm związane z różnymi efektami plazmowymi.

Sukces polsko-rosyjskiej współpracy w podstawowych badaniach kosmicznych wyróżniono, również nagrodami rządowymi: nagroda rządowa Federacji Rosyjskiej za pomyślną naukową realizację projektu KORONAS-F (2009), prestiżowa nagroda PAN i RAN za najlepszą pracę naukową (2011 r.) wykonaną w ramach rosyjsko-polskiej współpracy; rządowe nagrody dla dyrektorów CBK PAN oraz IKI RAN wręczone odpowiednio przez prezydentów Polski i Rosji.

Istotne jest to, że chęć współdziałania przyjęta w ubiegłych latach nie tylko nie osłabła, ale wzmocniła się w nadchodzącym dziesięcioleciu. Dobiają końca ostatnie przygotowania do wystrzelenia międzyplanetarnej stacji „Fobos-Grunt”, na pokładzie której będą przeprowadzone dwa rosyjsko-polskie eksperymenty: TERMOFOB i SNOMIK.

Szczególnie interesująca jest historia eksperymentu „Chomik”, bezpośrednio dowodząca, że obustronna współpraca rosyjsko-polska zmierza także do współdziałania naszych krajów z europejskimi i innymi agencjami kosmicznymi. Unikalne polskie urządzenie służące do pobierania i rozdrabniania gruntu pierwotnie miało służyć do analizy substancji w komecie Czuriu-mowa-Gierasimienko (projekt ROSETTA), znaleziono jednak jego zastosowanie w rosyjskim projekcie FOBOS-GRUNT, aby zapewnić zróżnicowanie metod pobierania próbek gruntu za pomocą jednego z penetratorów.

Zadaniem eksperymentu TERMOFOB jest ustalenie termofizycznych właściwości gruntu marsjańskiego sputnika.

Продолжением этого направления сотрудничества может стать и участие польских ученых в российской программе исследования и освоения Луны.

Проект РЕЗОНАНС (четыре спутника на магнитосинхронных орбитах) фактически продолжит линию многоспутниковых исследований околоземного космоса, начатого в наших странах многоспутниковым комплексом ИНТЕРБОЛ. На этот раз будет изучаться внутренняя магнитосфера, которую иногда называют «кухней космической погоды», где происходит интенсивное взаимодействие холодной и горячей компоненты магнитосферной плазмы, возбуждение широкого спектра электромагнитных и электростатических колебаний и генерация токов, создающих магнитные бури. В проекте РЕЗОНАНС польские ученые принимают участие в волновом консорциуме, объединяющем несколько волновых экспериментов, — подготавливают эксперимент **ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ВОЛНОВОЙ АНАЛИЗАТОР (HFA)**. Этот эксперимент сочетает как традиционные подходы, апробированные на предыдущих космических аппаратах, так и новые элементы. Основное направление исследований эксперимента HFA — изучение циклотронной мазерной неустойчивости в авроральной области магнитосферы Земли. Ярким проявлением этой неустойчивости является авроральное километровое радиоизлучение (АКР) — наиболее интенсивное излучение магнитосферы, характерное для всех планет с магнитным полем. Начатые на спутнике «Авроральный зонд» совместные исследования АКР будут продолжены с использованием более совершенного прибора с высоким временным и частотным разрешением.

Новым элементом эксперимента HFA является совместная работа с прибором РИК для высокоточного измерения плотности плазмы радиофизическими методами. Такие измерения

Kontynuacją tego kierunku współpracy może być udział polskich naukowców w rosyjskim programie badań i eksploracji Księżyca.

Projekt RESONANCE (4 satelity na magneto-synchronicznych orbitach) praktycznie przedłuży serię wielosputnikowych okołoziemskich, badań kosmosu rozpoczętych w naszych krajach wielosputnikowym kompleksem INTERBOL. Planowane są wspólne badania w wewnętrznej magnetosferze, która nazywana jest „kuchnią pogody kosmicznej”, zachodzi tam intensywne współdziałanie zimnego i gorącego składnika magnetosferycznej plazmy, wzbudzenie szerokiego spektrum drgań elektromagnetycznych i elektrostatycznych oraz generacja prądów mogących wywoływać burze magnetyczne. W projekcie REZONANS polscy naukowcy działają w konsorcjum łączącym kilka długofalowych eksperymentów, przygotowują eksperyment **WYSOKOCZĘSTOTLIWOŚCIOWY ANALIZATOR FALOWY (HFA)**. Ten eksperyment to połączenie tradycyjnego podejścia testowanego na poprzednich statkach kosmicznych i nowych elementów. Podstawowym zadaniem eksperymentu HFA jest zbadanie cyklotronowej maserowej niestabilności w obszarze zorzy polarnej magnetosfery Ziemi. Charakterystyczną manifestacją tej niestabilności jest zorzowe kilometryczne promieniowanie radiowe (AKR) — najbardziej intensywne promieniowanie magnetosfery, charakterystyczne dla wszystkich planet z polem magnetycznym. Rozpoczęte na satelicie „Zorza polarna” wspólne badania AKR będą kontynuowane przy użyciu bardziej zaawansowanego przyrządu o wyższej rozdzielczości czasowej i częstotliwościowej.

Nowym elementem eksperymentu HFA jest wspólna praca z przyrządem RIK służącym do precyzyjnego pomiaru gęstości plazmy metodami radiofizycznymi. Takie pomiary są szczególnie ważne dla obsza-

особенно важны для авроральной области, где плазма сильно неоднородна и не стационарна, а традиционные методы ее измерения не применимы из-за низкой концентрации. Измерения электромагнитных полей в широком диапазоне частот вместе с точными измерениями плотности плазмы с высоким временным разрешением позволит получить качественно новые результаты в области физики магнитосферы, которые будут применимы и к другим областям физики плазмы.

Российско-польское сотрудничество не осталось в стороне и от исследований на борту Международной космической станции. В настоящее время ученые ИКИ РАН и ЦБК ПАН завершают испытания комплекса научной аппаратуры для выполнения на Российском сегменте станции эксперимента ПЛАЗМЕННО-ВОЛНОВАЯ ОБСТАНОВКА ВОКРУГ МКС (ОБСТАНОВКА, 1-й этап), одна из целей которого — длительные исследования плазменно-волновых процессов в земной ионосфере, создаваемых как внешними ионосферными токами, так и процессами, происходящими на борту станции.

Рабочая группа по российско-польскому сотрудничеству в фундаментальных космических исследованиях формально создана в 2005 году постановлением РАН и ПАН (хотя, как сказано выше, наше реальное сотрудничество фактически и не прекращалось все эти годы).

В представленном буклете собраны результаты совместных научных проектов. Это фактически второе поколение совместных проектов в фундаментальных космических исследованиях, выполненных в рамках совместной рабочей группы.

В буклет вошли работы, посвященные исследованиям Солнца в рентгеновском и ультрафиолетовом диапазонах спектра, в которых обсуждаются результаты, полученные в экспериментах на спутниках серии «Корона».

рów zorzy polarnej, gdzie plazma jest niejednorodna i niestacjonarna, a tradycyjne metody pomiarowe ze względu na niską koncentrację nie mogą być stosowane. Pomiarы pól elektromagnetycznych w szerokim paśmie częstotliwości razem z dokładnymi pomiarami gęstości plazmy z wysoką rozdzielczością czasową pozwolą otrzymać jakościowo nowe wyniki w dziedzinie fizyki magnetosfery, które będą miały zastosowanie również w innych obszarach fizyki plazmy.

Rosyjsko-polska współpraca nie kończy się na aspekcie badań dotyczących Międzynarodowej stacji kosmicznej. Naukowcy IKI RAN i CBK PAN są obecnie w fazie końcowej prac nad kompleksem aparatury naukowej przeznaczonej do zastosowanie na Rosyjskim segmencie stacji eksperymentu PLAZMOWO-FALOWE UWARUNKOWANIA WOKÓŁ MKS (OBSTANOVKA, 1 etap), której jednym z celów są długotrwałe badania plazmowo-falowych procesów w jonosferze ziemskiej tworzonych zarówno przez wewnętrzne prądy jonosferyczne, jak i procesy zachodzące na pokładzie samej stacji.

Grupa robocza w ramach współpracy polsko-rosyjskiej w zakresie podstawowych badań kosmicznych została formalnie utworzona w 2005 roku postanowieniem PAN i RAN (mimo, że jak wspomniano wyżej, nasza realna współpraca nie ustawała w ciągu wszystkich ubiegłych lat).

W prezentowanej książce zostały zebrane wyniki wszystkich wspólnych projektów. To jest praktycznie drugie pokolenie wspólnych projektów w zakresie fundamentalnych badań kosmicznych podejmowanych w ramach wspólnej grupy roboczej.

W folderze znalazły się publikacje poświęcone badaniom Słońca w rentgenowskich i ultrafioletowych pasmach widma, w których opracowane są wyniki otrzymane dzięki eksperymentom na sputnikach serii „Koronas”.

Несколько материалов посвящено научным задачам и методической подготовке новых совместных экспериментов в будущих миссиях: РЕЗОНАНС, ФОБОС и комплексе ОБСТАНОВКА на борту МКС — материалы базируются на научных данных, полученных в ходе реализации проектов АПЭКС и КОРОНАС-И.

Многочисленные спутники глобальных навигационных систем (GPS и ГЛОНАСС) предоставляют (как побочный результат) очень интересные возможности для глобального мониторинга ионосферы Земли. Результаты исследований российских и польских специалистов в этой довольно молодой области также можно найти в данном буклете.

И наконец, традиционно сильное сотрудничество в области теории (турбулентность и когерентные структуры в горячей космической плазме, пылевая плазма, многокомпонентная гидродинамика взаимодействия солнечной и межзвездной плазмы) — самые «горячие» темы космической физики не могли остаться без внимания российских и польских ученых. Совместные результаты таких проектов, полученные в последние годы, также можно найти в предложенном вниманию читателя буклете.

Нам кажется, что потенциал российско-польского сотрудничества в фундаментальных космических исследованиях еще не достиг своего насыщения. Хотелось бы поблагодарить Совет по космосу РАН (и лично А. В. Алферова), Президиум ПАН и всех тех, кто помог сохранению и развитию наших как научных, так и просто товарищеских отношений.

Л. ЗЕЛЕНЬИЙ
М. БАНАШКЕВИЧ

Kilka publikacji poświęcono zadaniom naukowym i metodycznym przygotowaniom do nowych wspólnych eksperymentów w przyszłych misjach: REZONANS, FOBOS i kompleksowi OBSTANOVKA na pokładzie MKS; publikacje bazują na naukowych danych uzyskanych w trakcie realizacji projektów APEKS i KORONAS-I.

Liczne spутniki globalnych systemów nawigacyjnych (GPS i GLONASS) przedstawiają (jako uboczny rezultat) bardzo interesujące możliwości dla globalnego monitoringu jonosfery Ziemi. Rezultaty badań rosyjskich i polskich specjalistów w tej stosunkowo młodej dziedzinie można również znaleźć w niniejszym folderze.

Na koniec, tradycyjnie silna współpraca w obszarze teorii (turbulencja i spójne struktury w gorącej plazmie kosmicznej, plazma pyłowa, wieloskładnikowa hydrodynamika oddziaływania słonecznej i międzygwiazdnych plazm) — „najgorętsze” tematy fizyki kosmicznej nie mogły znaleźć się poza zainteresowaniem rosyjskich i polskich uczonych. Wspólne wyniki takich projektów otrzymane w ostatnich latach również można znaleźć w prezentowanym folderze.

Naszym zdaniem, potencjał polsko-rosyjskiej współpracy w dziedzinie badań kosmicznych nie osiągnął jeszcze nasycenia. Pragniemy podziękować Prezydium PAN, Radzie ds. Przestrzeni Kosmicznej PAN (szczególnie A. V. Alfierowowi), oraz wszystkim tym, którzy pomogli zachować i rozwijać nasze zarówno naukowe, jak i także towarzyskie, stosunki.

L. ZELENYI
M. BANASZKIEWICZ

1 РЕНТГЕНОВСКАЯ СПЕКТРОФОТОМЕТРИЯ СОЛНЦА (РЕСИК/КОРОНАС-Ф)

Руководитель проекта
с российской стороны:

В. КУЗНЕЦОВ

Руководитель проекта
с польской стороны:

Я. СИЛЬВЕСТЕР

Приведены основные результаты измерения рентгеновских спектров солнечной короны, полученные спектрометром РЕСИК на борту спутника «Коронас-Ф». Измеренные спектры перекрывают диапазон длин волн от 3,3 до 6,1 Å, в котором сосредоточено много эмиссионных линий элементов K, Ar, S, Si и Cl, относительные и абсолютные интенсивности которых несут информацию о физических параметрах корональной плазмы. Выполнен анализ более чем 3000 спектров солнечных вспышек. Для двадцати вспышечных событий определены абсолютные содержания K, Ar, S и Si, а также их временные вариации. По данным имеющихся измерений подтверждены теоретические расчеты излучения континуума. Для различных фаз развития вспышечного события определен температурный состав плазмы (так называемая дифференциальная мера эмиссии DME).

Исследования в этой области солнечной физики проводились Центром космической исследований ПАН совместно с ИЗМИРАН с использованием спектров, полученных в рентгеновском диапазоне прибором РЕСИК на спутнике «Коронас-Ф» в период 2001–2003 годы.

Прибор РЕСИК является брэгговским кристаллическим спектрометром, с полем зрения, охватывающим все Солнце. Так как кристаллы имеют изогнутую форму, рентгеновские спектры горячей плазмы короны, активных областей и вспышек регистрировались одновременно во всех длинах волн. Активное время наблюдений продолжалось со второй половины августа 2001 до половины мая 2003 года. Спектры регистрировались в четырех каналах, перекрывая область длин волн 3,3...6,1 Å.

1 SPEKTROSKOPIA RENTGENOWSKA SŁOŃCA (RESIK/KORONAS-F)

Kierownik projektu
ze strony Rosji:

V. KUZNETSOV

Kierownik projektu
ze strony Polski:

J. SYLWESTER

Представлено главные задания научные для спектрометра рентгеновского RESIK dokonуяcego obserwacji korony Słonce z pokładu satelity „Koronas-F” oraz wyniki analizy ponad 3000 widm rozblyskowych uzyskanych za pomocą tego przyrządu. Widma obejmowały przedział dł. fal 3,3...6,1 Å, który zawiera szereg ważnych dla diagnostyki plazmy linii następujących pierwiastków: K, Ar, S, Si oraz Cl. W wyniku analizy widm wyznaczono absolutne obfitości pierwiastków K, Ar, S, Si dla 20 rozblysków oraz ich zmiany z czasem. Zweryfikowano również obserwacyjnie realność teoretycznych wyliczeń poziomu kontinuum uzyskanych metodami fizyki atomowej. Na podstawie analizy strumieni w kilkunastu przedziałach widmowych wyznaczono rozkłady plazmy z temperaturą (tzw. rozkłady różniczkowej miary emisji DEM) dla indywidualnych zjawisk w poszczególnych fazach ich rozwoju.

Badania w tej dziedzinie fizyki Słonce prowadzone były w Centrum Badań Kosmicznych PAN wspólnie z IZMIRAN, przy wykorzystaniu widm uzyskanych w zakresie rentgenowskiego promieniowania za pomocą przyrządu RESIK, funkcjonującego na pokładzie satelity „Koronas-F” w latach 2001–2003.

Przyrząd RESIK jest niekolimowanym rentgenowskim spektrometrem krystalicznym, w którego polu widzenia znajduje się całe Słonce. Spektrometr posiada wygięte kryształy, działające jak siatki dyfrakcyjne, umożliwiające obserwacje widm gorącej plazmy rozblysków i Obszarów aktywnych na Słonce. Czas aktywnych obserwacji obejmował okres od połowy sierpnia 2001 do połowy maja 2003. Widma zarejestrowane za pomocą przyrządu RESIK obejmowały przedział długości fal 3,3 Å...6,1 Å, widoczny w czterech

Детальное описание принципа работы и конструкции прибора приведены в работе [Sylwester et al., 2005].

Основные научные задачи, решаемые прибором РЕСИК:

- Исследование содержания элементов плазмы короны, эмиссионные линии которых присутствуют на измеряемых спектрах, например, аргона и калия. При этом важно было определить, насколько оно отличается от стандартных широко используемых фотосферных или корональных составов. В предыдущих экспериментах спектры этих ионов детально не регистрировались. Очень важно было выяснить, насколько эти составы меняются между различными структурами короны, отдельными вспышками, активными областями или областями спокойной короны. Для астрофизики особенно существенно исследование временных изменений содержания различных элементов, имеющих сильно различающиеся потенциалы первой ионизации (FIP).
- Определение структуры тепловой плазмы в горячих источниках короны. Наблюдения спектров, на которых видны многие эмиссионные линии, несут информацию об условиях в отдельных температурных диапазонах. Относительная интенсивность спектральных структур дает информацию о соотношении количества плазмы, имеющей заданные температуры, что удобно описывается распределением дифференциальной меры эмиссии.

В проведенных исследованиях для анализа использовалось около 3000 спектров вспышек, которые наблюдались в 2002 и 2003 годах. Они относились к 20 явлениям разного класса

независимых каналов. System pracy przyrządu, szczegółowy opis jego konstrukcji oraz kalibracji opisane są w pracy [Sylwester et al., 2005].

Główne zadania badawcze, które miały być realizowane za pomocą obserwacji wykonywanych przy użyciu przyrządu RESIK, to:

- Sprawdzenie, czy obfitości pierwiastków, których linie obecne są na obserwowanych widmach, np. Ar, lub K, różnią się od akceptowanych najczęściej obfitości fotosferycznych lub koronalnych. Widma obejmujące linie tych pierwiastków nie były przedtem wyczerpująco badane. Sprawdzenie hipotezy, że obfitości te są jednakowe dla indywidualnych struktur, np. poszczególnych rozbłysków, obszarów aktywnych lub korony spokojnej, oraz czy obserwuje się zmiany obfitości z czasem w tych strukturach, to wyzwanie współczesnej astrofizyki, szczególnie w kontekście zależności od tzw. pierwszego potencjału jonizacji FIP.
- Wyznaczenie struktury temperaturowej dla plazmy obszarów emitujących. Obserwacje widm obejmują szereg linii i przedziałów kontinuum formujących się w odrębnych temperaturowo obszarach. Analiza wzajemnych proporcji gęstości widmowej wybranych przedziałów, obejmujących zarówno linie emisyjne, jak i kontinuum, umożliwia zbadanie proporcji plazmy pozostającej w poszczególnych zakresach temperatur, czyli rozkładu tzw. różniczkowej miary emisji z temperaturą.

W celu przeprowadzenia analizy wybrano około 3000 widm rozbłyskowych obejmujących 20 zjawisk o różnych klasach GOES, czasach trwania oraz położeniach na tarczy słonecznej z obserwacji prze-

GOES, разной продолжительности и различных расположений на поверхности Солнца. Дополнительно исследовались 312 спектров, полученных в отсутствие вспышек (январь-март 2003 года), когда активность Солнца менялась между классами GOES A9-B5.

Перед отождествлением всех линий и анализом их интенсивностей выполнялась полная абсолютная калибровка прибора. Отождествление проводилось для спектральных структур, наблюдаемых в промежутке длин волн 3,2...6,1 Å. На рис. 1 представлен средний спектр, вычисленный путем суммирования данных 1163 отдельных регистраций

prorowadzonych w 2002 i 2003 r. Zbadano również 312 widm uzyskanych z pomiarów prowadzonych w okresach bez-rozbyłskowych (styczeń-marzec 2003), kiedy aktywność słoneczna była w przedziale A9-B5 wg klasyfikacji GOES. Najważniejsze wyniki zawarte w tych pracach przedstawiono poniżej.

Dokonano absolutnej kalibracji przyrządu, co pozwoliło na przeprowadzenie szczegółowej identyfikacji obserwowanych struktur widmowych w przedziale długości fal 3,2...6,1 Å. Rys. 1 przedstawia uśrednione widmo (obejmujące 1163 widma indywidualne), które było podstawą do identyfikacji [Sylwester et al., 2006]. Widoczne są silne linie odpowiadające przejściom w

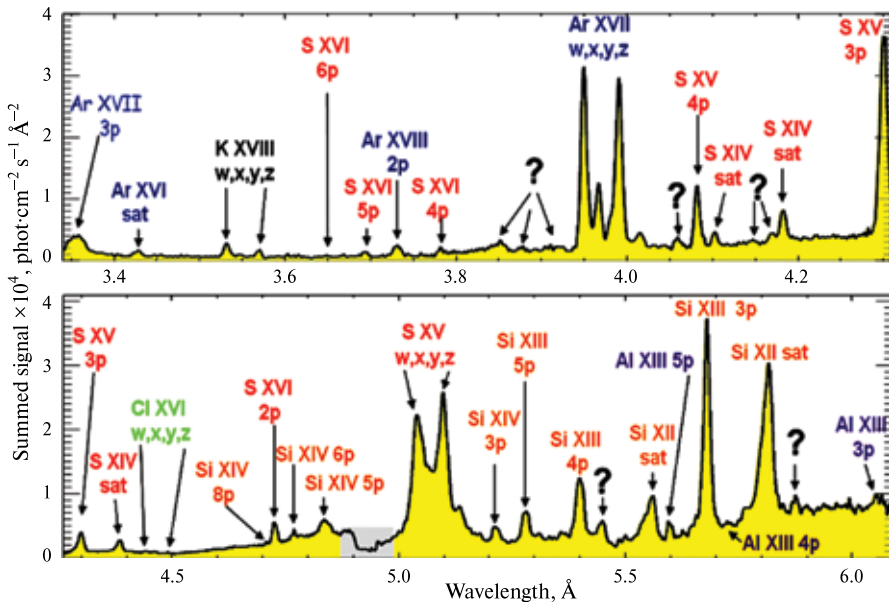


Рис. 1. Средние по времени спектры, полученные прибором РЕСИК в течение 388,2 часа в начале 2003 года. В верхней части указаны спектры, полученные двумя коротковолновыми каналами прибора, где использовался кристалл кварца, внизу — спектры в двух остальных каналах (здесь применялся кристалл кремния). Для лучшего выделения линий удален континуум, рассчитанный с использованием кода CHIANTI. Рисунок взят из работы [Sylwester et al., 2006]

Рис. 1. Uśrednione po czasie obserwacji (388.2 godz.) widmo uzyskane za pomocą spektrometru RESIK z identyfikacją najsilniejszych linii. Górny panel: kanał 1 i 2; dolny panel: kanał 3 i 4. Odjęty poziom kontynuuum został wyliczony w oparciu o parametry temperatury T oraz miary emisji EM (kod CHIANTI) (rysunek pochodzi z pracy [Sylwester et al., 2006])

[Sylwester et al., 2006], на котором видно множество эмиссионных линий. Исследования показали, что они принадлежат водородо- и гелиеподобным ионам K, Ar, S, а также Si. Некоторые линии связаны с резонансными, некоторые — с сателлитными переходами, которые наблюдались ранее. Детальный анализ интенсивностей отдельных линий выявил сильную зависимость от температуры. Часть линий, например, триплет калия K XVIII в диапазоне 3,5...3,6 Å, линия Ar XVIII $1s-2p$ на длине волны 3,73 Å, а также линия S XVI на длине волны 4,72 Å, становятся сильными при больших температурах. Отдельные сателлитные линии становятся наиболее сильными, когда температура плазмы падает. Это касается диэлектронных линий литиеподобного иона Si XII на длинах волн 5,565 и 5,818 Å. К спектральным особенностям, которые до прибора РЕСИК не наблюдались, относятся линии, соответствующие переходам $1s-np$ и $1s^2-1snp$ для больших значений главного квантового числа $n \leq 10$ [Kepa et al., 2006]. Впервые на среднем спектре в канале № 3 отождествлен триплет хлора Cl XVI в диапазоне длин волн 4,43...4,45 Å. Другая линия хлора Cl XVII $Ly\alpha$ приходится на длину волны 4,182 Å, где находится сильный сателлит $d4$, принадлежащий иону S XIV.

Впервые в спектроскопии и вообще для солнечной плазмы по спектрам РЕСИК определено содержание аргона с регистрацией сильных линий Ar XVII и Ar XVIII (см. рис. 1). Получено среднее значение $\log A_{Ar} = 6,45$. Аргон принадлежит к группе элементов с довольно большим значением потенциала первой ионизации ($FIP \approx 15,6$ эВ). На рис. 2 (см. с. 15) [Sylwester et al., 2010b] приводится изображение спектров в зависимости от температуры T_{GOES} (МК). Вверху приводится суммарный спектр и отождествлены важнейшие линии. Это — Ar XVII $w, x + y, z$ (соответственно 3,95; 3,97; 3,99 Å), S XV

jonach wodoro- oraz helopodobnych K, Ar, S oraz Si. Niektóre z linii odpowiadają przejściom rezonancyjnym oraz stowarzyszonym z nimi satelitom, znanym z wcześniejszych eksperymentów. Szczegółowa analiza natężeń widmowych wykazała, że niektóre linie są względnie silne w wyższych temperaturach (np. linie trypletu potasu K XVIII w przedziale 3,5...3,6 Å, linie argonu Ar XVIII $1s-2p$ na długości fali 3,73 Å oraz S XVI o długości fali 4,72 Å). Z kolei niektóre linie są silne, kiedy temperatura emitującej plazmy jest niska (np. tzw. satelity dielektronowe jonu litopodobnego Si XII na długości fali 5,565 Å oraz 5,818 Å). RESIK zaobserwował również linie, które nigdy wcześniej nie były obserwowane w widmach słonecznych. Należą do nich linie odpowiadające przejściom $1s-np$ oraz $1s^2-1snp$, dla tzw. wysokich przejść z $n \leq 10$ [Kepa et al., 2006]. Po raz pierwszy, na uśrednionym widmie kanału Nr 3 zidentyfikowano tryplet chloru (Cl XVI) obecny w przedziale 4,43...4,45 Å. Na długości fali 4,182 Å spodziewana była linia odpowiadająca przejściu Cl XVII $Ly\alpha$, okazało się jednak, że jest ona blendowana z linią satelitarną, tzw. $d4$ jonu S XIV.

Po raz pierwszy bezpośrednio wyznaczono dla plazmy słonecznej obfitość argonu metodą spektroskopową (rys. 1), wykorzystując w tym celu obserwowane natężenia linii Ar XVII oraz Ar XVIII. Otrzymano wartość średnią $\log A_{Ar} = 6,45$. Argon należy do grupy pierwiastków z wysokim pierwszym potencjałem jonizacji ($FIP \approx 15,6$ eV). Na rys. 2 [Sylwester et al., 2010b] przedstawiono widma RESIK w drugim kanale, uszeregowane ze wzrostem temperatury T_{GOES} (МК), wyznaczonej dla momentów obserwacji. Na górnych rysunkach przedstawiono widmo całkowite ze wskazanymi głównymi liniami. Są to: Ar XVII $w, x14+y, z$ (odpowiednio 3.95;

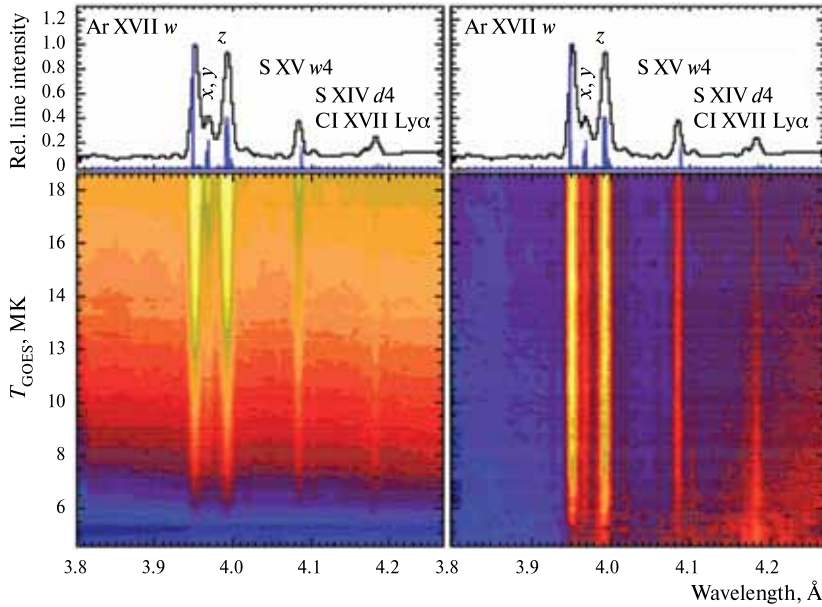


Рис. 2. Зависимость наблюдаемого характера спектров прибора РЕСИК, полученных во втором спектральном канале. Слева все спектры нормированы на единичную меру эмиссии по данным GOES (T_{GOES} и EM_{GOES}). Справа спектры нормированы относительно полного количества фотонов в данной спектральной записи. Вверху приведены усредненные профили спектров с отождествлением важнейших линий. Рисунок взят из работы [Sylwester et al., 2010]

Rys. 2. Widma RESIK w kanale 2 z podaną identyfikacją linii, uszeregowane względem temperatury T_{GOES} . Z lewej strony nienormalizowane, z prawej normalizowane względem całkowitej ilości fotonów w każdym widmie. Na górze widmo całkowite z podaną identyfikacją (histogram) oraz syntetyczne, wyliczone w oparciu o T_{GOES} oraz EM_{GOES} . Rysunek pochodzi z pracy [Sylwester et al., 2010]

$w4$ (4,09 Å), а также вышеупомянутая линия на длине волны 4,18 Å, являющаяся блендой сателлитной линии $d4$ иона S XIV и основной резонансной линии хлора Cl XVII Ly α . Правая и левая части рисунка представляют одни и те же спектры, но спектры в правой части нормированы относительно общего количества фотонов в отдельных спектрах. Используя величины T_{GOES} и EM_{GOES} , известные для любого момента регистрации спектров, можно определить поток излучения в линии иона Ar XVII, нормированный на единицу меры эмиссии. Зависимость нормированных потоков от температуры приведена на рис. 3 (см. с. 16) (черные точки

3,97; 3,99 Å), S XV $w4$ (4,09 Å) oraz linia na długości fali 4,18 Å, stanowiąca blendę linii satelitarnej $d4$ jonu S XIV oraz głównej linii rezonansowej chloru Cl XVII Ly α . Prawy panel na rysunku przedstawia te same widma, co lewy, lecz unormowane względem całkowitej ilości fotonów w każdym widmie. Na podstawie wartości T_{GOES} oraz EM_{GOES} , znanej dla każdego momentu obserwacji, dla każdego z widm RESIK obliczono spodziewany strumień w linii w jonu Ar XVII dla jednostkowej miary emisji. Przedstawiono go w lewej części rys. 3 (czarne punkty reprezentujące indywidualne widma) wraz z wartościami uśrednionymi po przedziałach temperatury o szerokościach 1 MK (żółte kółka).

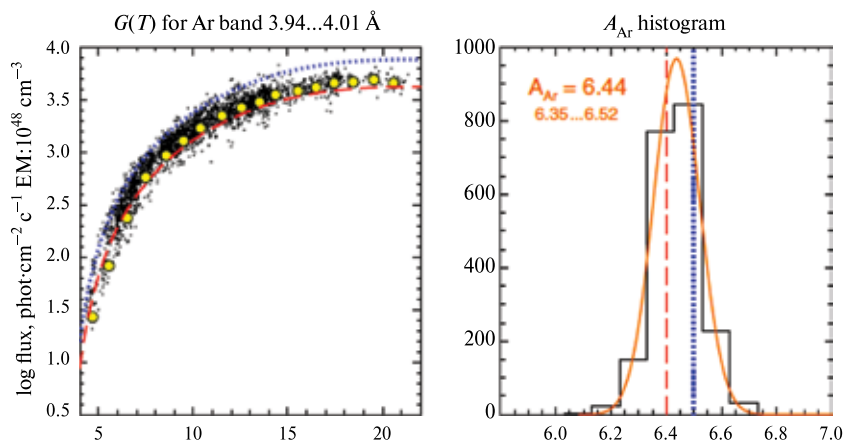


Рис. 3. Слева: температурная зависимость интенсивности группы линий безвысипечных активных областей (черные точки). Интенсивности нормированы на единицу меры эмиссии. Среднее величины в интервалах шириной в 1 МК указаны желтым цветом. Красной и голубой линией показан теоретический ход зависимости, рассчитанный по коду CHIANTI, соответственно, с использованием данных из работ [Lodders, 2008; Asplund et al., 2009]. Справа: гистограмма распределения полученных абсолютных содержаний аргона по отдельным спектрам с шагом $A_{Ar} = 0,1$ (черные точки на левом рисунке). Максимум распределения соответствует $A_{Ar} = 6,44$, а его ширина (FWHM) определяет достоверные значения (6,35...6,52)

Рис. 3. Z lewej: strumienie w linii w Ar XVII wyliczone dla jednostkowej miary emisji w funkcji T_{GOES} (czarne punkty), żółte kółka przedstawiają wartości uśrednione po 1 МК. Linia niebieska kropkowana i czerwona przerywana przedstawiają teoretyczne funkcje emisji tej linii wyliczone w oparciu o kod CHIANTI dla dwóch zestawów obfitości argonu (odpowiednio z pracy [Lodders, 2008; Asplund et al., 2009]). Z prawej: histogram otrzymanych zawartości argonu w przedziałach $A_{Ar} = 0.1$ wraz z dopasowaną krzywą Gaussa. Pík rozkładu daje wartość $A_{Ar} = 6.44$ zaś jego szerokość (FWHM) definiuje przedział niepewności (6.35...6.52)

для отдельных спектров и желтые точки для усредненных по интервалу температур в 1 МК). Результаты теоретических расчетов, полученные с использованием кода CHIANTI, показаны сплошными линиями для двух широко принимаемых содержаний Ar, фотосферного и коронального [Lodders, 2008; Asplund et al., 2009].

Сравнение измеренных и теоретически рассчитанных потоков излучения позволяет построить гистограмму содержаний Ar по отдельным спектрам прибора РЕСИК (приведена в правой части рис. 3) и получить среднее значение его содержания ($\log A_{Ar} = 6,44$) вместе с границами достоверности линии Ar XVIII Ly α . В результате сред-

На observacje naniesiono wyliczone przebiegi funkcji emisji dla odpowiednich linii, wyznaczone z wykorzystaniem kodu CHIANTI dla dwóch przyjmowanych szeroko zestawów wartości tzw. fotosferycznych i koronalnych obfitości Ar [Lodders, 2008; Asplund et al., 2009].

Такое porównanie pozwoliło na odтворение histogramu obfitości Ar uzyskanych na podstawie obserwowanych widm RESIK (prawy panel na rys. 3) oraz wyznaczenie optymalnej wartości średniej ($\log A_{Ar} = 6.44$) wraz z odpowiednim przedziałem niepewności (6.35...6.52). Podobną procedurę zastosowano do wyznaczenia obfitości argonu w oparciu o obserwacje linii Ar XVIII Ly α . Otrzymano wartość

нее значение содержания составляет $\log A_{\text{Ar}} = 6,49$ в пределах 6,30...6,68, что полностью совпадает с предыдущими оценками точности измерений. Более детальные выводы приведены в работе [Sylwester et al., 2010b].

Аналогичная методика была использована для определения содержания калия [Sylwester et al., 2010a]. В этом случае анализу подлежала интенсивность группы линий w, x, y, z триплета гелие-подобного иона К XVIII, находящегося в первом спектральном канале прибора РЕСИК на длинах волн $\sim 3,53...3,55 \text{ \AA}$. Полученное среднее содержание калия $\log A_{\text{K}} = 5,86$ (5,63...6,09), что в пять раз больше содержания калия в фотосфере. Границы достоверности здесь больше, чем для Ar, поскольку статистика счетов в линиях калия значительно хуже. Анализ спектров, зарегистрированных в первом канале прибора РЕСИК, проводился также в работе [Sylwester et al., 2006], где использовалось только 1163 спектра, полученных в 2003 году. В результате обработки установлено, что содержание калия в четыре раза превышает фотосферное значение. Это подтверждает, что содержание элемента с небольшим первым потенциалом ионизации (для калия FIP = 4,34 эВ) существенно выше в короне, чем в фотосфере.

Совсем другой, также не применявшийся ранее, метод определения содержания элементов использовался в работе [Sylwester et al., 2008] при анализе 7 вспышек. Этот метод, названный локально-однотемпературным, использует для анализа небольшие участки спектров в окрестности сильных эмиссионных линий. На основе измеряемого полного потока излучения, принимаемого содержания элемента и заданной температуры с использованием кода CHIANTI определяется соответствующая мера эмиссии и синтезируется спектр в избранном диапазоне. Вычисляется характеристика χ^2 , описывающая расхождение расчетного

średnią $\log A_{\text{Ar}} = 6,49$ oraz przedział niepewności 6,30...6,68, co w granicach błędów jest zgodne z wartością otrzymaną na podstawie analizy linii rezonancyjnej w Ar XVII. Wyniki przedstawiono w pracy [Sylwester et al., 2010b].

Podobną procedurę wykorzystano do wyznaczenia obfitości potasu [Sylwester et al., 2010a]. Analizowano natężenia linii helopodobnego jonu potasu K XVIII w, x, y, z o długościach fali $\sim 3,53...3,55 \text{ \AA}$, obserwowanych w kanale 1 RESIK. Analiza doprowadziła do wyznaczenia absolutnej obfitości K jako $\log A_{\text{K}} = 5,86$ (5,63...6,09), co stanowi wartość zdecydowanie (ponad 5 razy) większą od wartości fotsferycznej. Przedział niepewności jest szerszy, niż w wypadku analizy widm Ar, co jest związane ze znacznie niższą statystyką zliczeń w liniach potasu. Analiza widm obserwowanych w pierwszym kanale RESIK prowadzona była również w pracy [Sylwester et al., 2006], gdzie wykorzystano jedynie 1163 widm z 2003 roku. Otrzymana podczas tej analizy średnia wartość obfitości potasu jest 4 razy większa od wartości fotsferycznej. Potas należy do pierwiastków o wyjątkowo niskim FIP (4.34 eV).

Nieco inną, innowacyjną metodę badania obfitości pierwiastków opracowano i zastosowano do analizy 7 rozbłysków w pracy [Sylwester et al., 2008]. Jest to tzw. podejście lokalnie jedno-temperaturowe. Polega ono na analizie obserwowanych natężeń widmowych dla zadanej temperatury i ich porównywaniu z odpowiednimi wielkościami znanymi z teorii (kod CHIANTI) dla szeregu wartości obfitości pierwiastka dającego zasadniczy wkład do wybranego przedziału widmowego. Metoda jest iteracyjna. W każdym kroku badana jest normalizowana wartość parametru χ^2 mierzącego różnicę pomiędzy obserwowanymi i wyliczonymi widmami. Za wartość optymalną przyjmuje się te wartości, które

и наблюдаемого спектров. Положение минимума χ^2 определяет содержание элемента по отдельным спектрам, полученным в разных стадиях развития вспышки. На рис. 4 приведен пример временного хода содержания элементов K, Ar, S и Si во вспышке 9 января 2003 года, полученный таким способом. Из данных видно, что во время этого явления изменения содержаний небольшие. В связи с чрезвычайно ма-

ответствующим наблюдаемому минимуму χ^2 . Примером изменчивости в течение так выделенных обфтои K, Ar, S oraz Si dla rozbłytku z 9 stycznia 2003 przedstawiono na rys. 4. Widać, że w trakcie tego zjawiska zmiany obfтои są nieznaczne. W związku z niezwykle niskim tłem instrumentalnym w przyrządzie RESIK, po raz pierwszy można było zbadać również emisję rentgenowską w pięciu przedziałach kontinuum pomiędzy 3,495 Å oraz 4,20 Å [Phillips

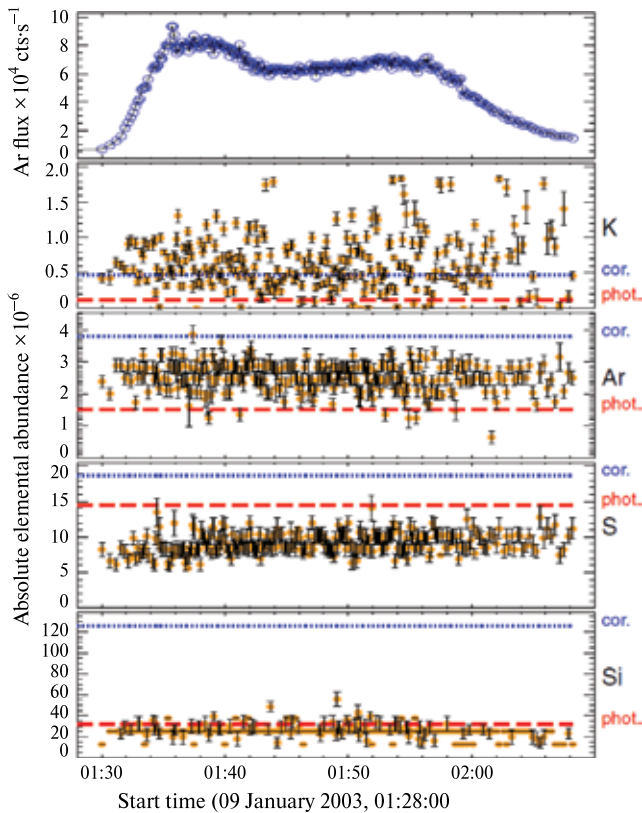


Рис. 4. Временной ход содержания элементов во время двойной вспышки 9 января 2003 года. Вверху указан временной ход потока излучения в группе линий Ar (3,9...4,15 Å). Ниже приведены полученные величины содержания для отдельных элементов. Для сравнения красным и голубым цветами показаны уровни содержаний, характерные для фотосферы и короны

Rys. 4. Czasowa zależność obfтои K, Ar, S oraz Si dla „podwójnego” rozbłytku 9 stycznia 2003. Górna część przedstawia strumień RESIK w przedziale widmowym zawierającym linie Ar (3,9...4,15 Å). Poziomy odpowiadające wartościom obfтои koronalnej i fotosferycznej poszczególnych pierwiastków przedstawiono odpowiednio liniami: czarną kropkowaną i czerwoną przerywaną

лым инструментальным фоном в приборе РЕСИК впервые было возможным изучать временной ход континуума на основе наблюдений. Для этой цели было выбрано пять промежутков спектра между длинами волн 3,495 и 4,20 Å [Phillips et al., 2010], где не наблюдаются линии и они не должны существовать, согласно теории. Эти участки анализировались с использованием кода CHIANTI. Результаты анализа показали, что современная теория хорошо описывает непрерывную эмиссию короны в мягком рентгеновском диапазоне для обычно используемого коронального состава содержаний элементов.

Анализ спектров дает также возможность анализа основных термодинамических характеристик излучающей плазмы. В этом плане проводилось изучение девяти вспышек разных рентгеновских баллов (от B6 до M4,0 по классификации GOES). Детально рассматривалось поведение во времени потока излучения в отдельных эмиссионных линиях [Sylwester et al., 2006b], на основе которого получены траектории эволюции плазмы на диаграммах $\log T \dots \log(EM)^{1/2}$. Распределения DEM вычислялись по данным о 15 потоках излучения, выбранных в спектральных интервалах прибора РЕСИК [Kepa et al., 2006a]. Для расчетов принимался корональный состав содержаний элементов. Расчеты велись с использованием алгоритма максимальной вероятности Withbroe–Sylwester (W-S). Примеры рассчитанных распределений DEM, полученные для двух вспышек, приведены на рис. 5 (см. с. 20). Одна из этих вспышек балла M1,9 произошла на краю Солнца 21 января 2003 года, имела максимум в 15:26 UT, была долговременной, длительностью 240 минут. Вторая вспышка балла C5,8 произошла на диске 22 февраля 2003 года, имела максимум в 09:29 UT, была довольно кратковременной, длительностью 12 минут. Видно, что во всех фазах

et al., 2010], gdzie ani teoria, ani obserwacje nie wskazują na możliwość występowania linii. Ta analiza wykazała, że w ramach przybliżenia izotermicznego mierzony poziom kontinuum zgodny jest z poziomem wyliczonym za pomocą kodu CHIANTI w granicach 25% dla przyjętego koronalnego zestawu obfitości pierwiastków, pozostając w niezgodzie z obserwacjami dla fotosferycznego zestawu obfitości.

Na podstawie widm rejestrowanych za pomocą spektrometru RESIK badano własności termodynamiczne wybranych rozbłysków. Analizowano 9 zjawisk różnych klas widmowych (od B6 do M4.0 wg klasyfikacji GOES). W szczególności analizowano [Sylwester et al., 2006b], przebiegi czasowe krzywych blasku dla wybranych linii, zachowanie się rozbłysków na diagramach diagnostycznych $\log T$ vs. $\log(EM)^{1/2}$ oraz rozkłady plazmy z temperaturą (tzw. rozkłady różniczkowej miary emisji — DEM). Rozkłady DEM wyliczane były na podstawie obserwowanych strumieni w wybranym zestawie linii z kontinuum, widocznych na widmach RESIK na ogół stosowano 15 przedziałów długości fal [Kepa et al., 2006a]. Podczas obliczeń zakładano koronalny skład obfitości poszczególnych pierwiastków plazmy i wykorzystywano iteracyjny algorytm Withbroe–Sylwester (W-S). Przykłady rozkładów DEM otrzymanych dla 2 różnych rozbłysków (długotrwałego, 240 min, rozbłysku brzegowego klasy M1.9 z 21 stycznia 2003 o 15:26 UT oraz krótkotrwałego 12 min., rozbłysku na tarczy słonecznej, klasy C5.8 z dnia 22 lutego 2003 o 09:29 UT) przedstawiono na rys. 5. Obliczeń DEM dokonywano dla wybranych charakterystycznych faz ewolucji rozbłysku. Widać, że w obu przypadkach wyliczone rozkłady są dwuskładnikowe — odpowiadają dwóm wyróżnionym tem-

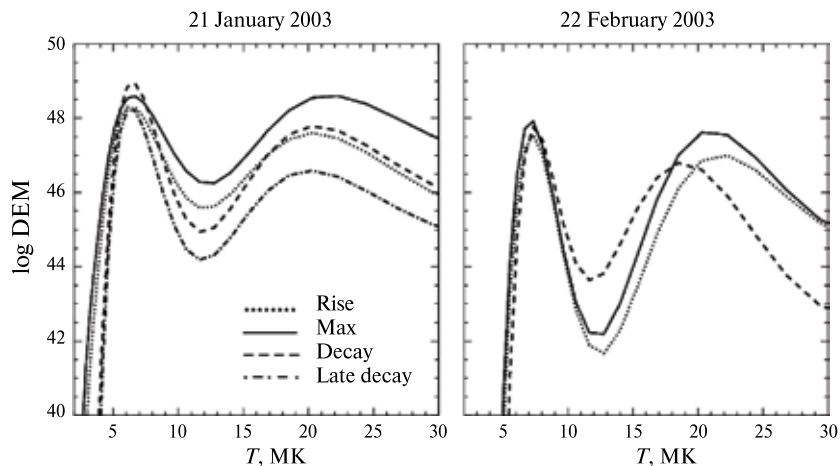


Рис. 5. Примеры температурного распределения дифференциальной меры эмиссии DEM для двух вспышек: слева — для длительной вспышки балла M1.9, произошедшей на краю Солнца 21 января 2003 года, длительностью 240 минут, с максимумом в 15:26 UT; справа — для кратковременной вспышки балла C5.8, произошедшей на диске 22 февраля 2003 года, длительностью 12 минут, с максимумом в 09:29 UT. Отдельные кривые соответствуют характерным фазам развития вспышек

Rys. 5. Przykłady rozkładów różniczkowej miary emisji DEM z temperaturą dla dwóch rozbłysków. Z lewej: dla długotrwałego rozbłysku brzegowego klasy M1.9 z dnia 21 stycznia 2003; z prawej dla krótkotrwałego rozbłysku C5.8 na tarczy słonecznej z dnia 22 lutego 2003 o godz. 02:29 UT. Indywidualne krzywe odnoszą się do poszczególnych faz ewolucji rozbłysku

развития вспышек полученные распределения DEM двухкомпонентные, с холодной составляющей с температурами $T \approx 5...8$ МК и горячей — с температурами 18...25 МК. Температура холодной составляющей не меняется сильно во время развития вспышки, а количество горячей плазмы во время затухания быстро уменьшается, что связано с процессами высвечивания энергии и охлаждением из-за теплопроводности.

По результатам исследований опубликовано свыше 10 статей в ведущих астрофизических журналах. Значительная часть результатов вошла в главу 6 монографии [Кордылевский и др., 2009].

Большой прогресс в солнечной рентгеновской спектрометрии, достигнутый с помощью прибора РЕСИК на спутнике «Коронас-Ф», послужил

пературом плазмы: składnik chłodniejszy ($T \approx 5...8$ МК) oraz gorętszy (18...25 МК). Temperatura chłodniejszego składnika podczas ewolucji jest prawie stała, ale ilość plazmy zmienia się. Podczas fazy zaniku rozbłysków ilość gorącej plazmy systematycznie i stosunkowo silnie maleje, co jest związane z procesami chłodzenia plazmy przez przewodnictwo oraz przez promieniowanie.

Wyniki prac zostały przedstawione w ponad 10 pracach, opublikowanych w znaczących czasopismach astrofizycznych. Większość wyników interpretacji obserwacji wykonanych przyrządem RESIK zawarto w rozdziale 6 monografii [Кордылевский и др., 2009].

Duży postęp w badaniach z zakresu spektrometrii rentgenowskiej Słońca, osiągnięty za pomocą przyrządu RESIK, funkcjonującego na pokładzie sateli-

хорошей основой для дальнейших исследований в последующих солнечных российских космических миссиях. В рамках совместного российско-польского проекта начата разработка прибора CHEMIX (CHEMical composition In X-rays) для проекта ИНТЕР-ГЕЛИОЗОНД, в котором космический аппарат приблизится к Солнцу до 60 солнечных радиусов. Измерения с таких расстояний вследствие заметного увеличения освещенности позволят достичь еще большего прогресса в изучении химического состава солнечной плазмы.

ty „Koronas-F”, dał silne podstawy do prowadzenia dalszych badań podczas kolejnych słonecznych misji kosmicznych, przygotowywanych w Rosji. W ramach wspólnego rosyjsko-polskiego projektu rozpoczęto przygotowywanie przyrządu CHEMIX (CHEMical composition In X-rays), przeznaczonego na obiekt INTERHELIOZOND, który zbliży się do Słońca na odległość 60 średnic Słońca. Dzięki znacznemu zwiększeniu oświetlenia aparatury, przyszłe pomiary, prowadzone z tak niedużej odległości, doprowadzą do jeszcze większego rozwoju badań składu chemicznego plazmy słonecznej.

ЛИТЕРАТУРА

- Кордылевский З., Сильвестр Я., Сильвестр Б., Кепа А., Ковалински М., Тшебински В.* (2009) Исследование физических процессов в плазме солнечных вспышек по наблюдениям спектрометром РЕСИК // Солнечно-земная физика: Результаты экспериментов на спутнике КОРОНАС-Ф / Под ред. В. Д. Кузнецова. М.: Физматлит. 2009. С. 160–177.
- Asplund M., Grevesse N., Sauval A.J., Scott P.* (2009) The Chemical Composition of the Sun // *Annu. Rev. A&A.* 2009. V. 47. P. 481–522.
- Кепа А., Sylwester J., Sylwester B., Siarkowski M., Stepanov A. I.* (2006a) Determination of differential emission measure from X-ray solar spectra registered by RESIK aboard CORONAS-F // *Solar System Research.* 2006. V. 40. N. 4. P. 294–301.
- Кепа А., Sylwester J., Sylwester B., Phillips K.J.H., Kuznetsov V.D.* (2006b) Observations of $1s^2$ - $1snp$ Lines in RESIK Soft X-ray Spectra // *Advances in Space Research.* 2006. V. 38. Iss. 7. P. 1538–1542.
- Lodders K.* (2008) The Solar Argon Abundance // *Astrophysical J.* 2008. V. 674. P. 607–611.
- Phillips K.J.H., Sylwester J., Sylwester B., Kuznetsov V.D.* (2010) The Solar X-ray Continuum Measured by RESIK // *Astrophysical J.* 2010. V. 711. P. 179–184.
- Sylwester J., Gaicki I., Kordylewski Z., Kowaliński M., Nowak S., Płoceniak S., Siarkowski M., Sylwester B., Trzebiński W., Bakala J.* et al. (2005) Resik: A Bent Crystal X-ray Spectrometer for Studies of Solar Coronal Plasma Composition // *Solar Physics.* 2005. V. 226. P. 45–72.
- Sylwester J., Sylwester B., Phillips K.J.H., Culhane J.L., Brown C., Lang J., Stepanov A. I.* (2006a) Analysis of Potassium Abundance Variability in a Large Number of Flares // *Advances in Space Research.* 2006. V. 38. Iss. 7. P. 1490–1493.
- Sylwester B., Sylwester J., Кепа А., Kordylewski Z., Phillips K.J.H., Kuznetsov V.D.* (2006b) Thermodynamics of Selected Solar Flares as Determined from the Analysis of the Spectra Obtained with the RESIK Instrument // *Solar System Research.* 2006. V. 40. N. 2. P. 125–132.
- Sylwester B., Sylwester J., Siarkowski M., Phillips K.J.H., Culhane J.L., Lang J., Brown C., Kuznetsov V.D.* (2006c) Lines in the Range 3.3...6.1 Å Observed in RESIK // *Advances in Space Research.* 2006. V. 38. Iss. 7. P. 1534–1537.
- Sylwester J., Sylwester B., Landi E., Phillips K.J.H., Kuznetsov V.D.* (2008) Determination of K, Ar, Cl, S and Si flare abundances from RESIK soft X-ray spectra // *Advances in Space Research.* 2008. V. 42. P. 838–843.
- Sylwester J., Sylwester B., Phillips K.J.H., Kuznetsov V.D.* (2010a) Highly ionized potassium lines in solar X-ray spectra and the abundance of potassium // *Astrophysical J.* 2010. V. 710. P. 804–809.

[*Sylwester et al., 2010b*] *Sylwester J., Sylwester B., Phillips K. J. H., Kuznetsov V. D.* A solar spectroscopic absolute abundance of argon from RESIK // *Astrophysical J.* 2010. V. 720. P. 1721–1726.

The main scientific objectives for the X-ray spectrometer RESIK are presented. RESIK made extensive observations of the X-ray spectra of the solar corona onboard the Koronas-F satellite. The measured spectra cover the wavelength region between 3.3 Å and 6.1 Å. This spectral region is rich with the emission lines of elements such as: K, Ar, S, Si and Cl. Analysis of relative and absolute intensities of these lines are important for the coronal plasma diagnostic. The analysis of more than 3000 flare spectra obtained has been performed. As the results, the absolute abundances of elements: K, Ar, S, Si and their time variations have been determined for 20 flare events. The theoretical, atomic physics calculations of the continuum level have been verified from the available measurements. The distribution of plasma with temperature (so called differential emission measure) have been determined for various phases of the event evolution.

2 СПЕКТРОСКОПИЯ ДАЛЬНОГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО И РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА

Руководитель проекта
с российской стороны:

С. КУЗИН

Руководитель проекта
с польской стороны:

Я. СИЛЬВЕСТЕР

Измерения потоков дальнего ультрафиолетового и рентгеновского излучения Солнца крайне важны для изучения солнечной активности, физики вспышечных процессов и космической погоды. Температура плазмы солнечной короны составляет 1...50 МК, и поэтому корона излучает преимущественно в мягком рентгеновском (МР) и вакуумном ультрафиолетовом (ВУФ) диапазонах спектра. Спектроскопическая диагностика — наиболее прямой метод получения информации о плазме короны Солнца.

Для получения наиболее полной информации о корональной плазме желательно использовать спектры широкого диапазона — от ВУФ- до МР-диапазона. Такая спектральная информация позволит определить физические условия и параметры плазмы, в частности, — температурный состав (дифференциальную меру эмиссии — ДМЭ) плазмы в диапазоне температур от 1 до 50 МК. Исследования подобного типа, не доступные ранее ввиду отсутствия подходящего набора спектральных наблюдений, теперь могут быть выполнены с использованием одновременных наблюдений приборов РЕСИК и СПИРИТ (спутник «Коронас-Ф»), СФИНКС и ТЕСИС (спутник «Коронас-Фотон»). Подобные исследования позволят проводить спектральные приборы, которые будут разработаны в кооперации для будущих российских и международных орбитальных станций.

2 SPEKTROSKOPIA Z ZAKRESU DALEKIEGO ULTRAFIOLETU I RENTGENOWSKIEGO PROMIENIOWANIA SŁOŃCA

Kierownik projektu
ze strony Rosji:

S. KUZIN

Kierownik projektu
ze strony Polski:

J. SYLWESTER

Pomiary promieniowania Słońca w zakresie dalekiego ultrafioletu i promieniowania rentgenowskiego są szczególnie istotne dla badania aktywności słonecznej, analizy fizyki procesów zachodzących w rozbłyskach, oraz prognozowania pogody kosmicznej. Temperatura plazmy w koronie Słońca zawiera się w granicach od 1 do 50 МК. Dlatego korona promieniuje głównie w zakresach widma: miękkim rentgenowskim (MR) i dalekiego ultrafioletu (EUV). Metody diagnostyki spektroskopowej są najprostszymi narzędziami do otrzymywania informacji o plazmie korony Słońca.

Otrzymanie najpełniejszej informacji o plazmie korony słonecznej jest możliwe w oparciu o badanie widm w szerokim zakresie długości fal — od EUV aż do MR. Pozwala to na określenie fizycznych warunków i parametrów plazmy, a w szczególności daje możliwość wyznaczania rozkładu plazmy z temperaturą (Różniczkowa Miara Emisji, DEM) w szerokim zakresie temperatur od 1 do 50 МК. Tego rodzaju badania były dotychczas niemożliwe z powodu braku odpowiedniego zestawu obserwacji spektroskopowych. Obecnie staje się to możliwe dzięki istnieniu równoczesnych obserwacji wykonanych przy pomocy przyrządów RESIK i SPIRIT (satelita „Koronas-F”) oraz SphinX i TESIS (satelita „Koronas-Photon”). Również aparatura do prowadzenia spektroskopowych obserwacji korony słonecznej, która będzie przygotowywana na przyszłe rosyjskie i międzynarodowe stacje orbitalne, pozwoli na prowadzenie podobnej diagnostyki.

В качестве примера совместно-го анализа можно отметить исследование физических условий в плазме вспышки, наблюдавшейся 15 апреля 2002 года приборами РЕСИК и СПИРИТ. Вспышка с длительным затуханием, получившая рентгеновский класс M1.2, начала свое развитие в 03:08 UT, максимум вспышки пришелся на приблизительно 03:55 UT. Особенностью данной вспышки стало то, что во время ее затухания получены одновременные спектры приборами РЕСИК в МР- и СПИРИТ в ВУФ-диапазоне. В настоящее время проводится совместная интерпретация полученных спектров. Предварительный анализ данных двух приборов свидетельствует о возможности совместной обработки полученных спектров, в частности, определения ДМЭ в широком диапазоне температур. Анализ подобного типа проводится впервые, и мы надеемся, что совместная плодотворная работа будет продолжаться в будущем.

В спектрометре РЕСИК используется оптическая схема с изогнутыми кристаллами, при этом спектры различных структур короны Солнца (в том числе активных областей и вспышек) регистрируются одновременно во всех длинах волн. Подробное описание принципа работы вместе с деталями конструкции приведено в работе [Sylwester et al., 2005]. В спектральный диапазон спектрометра 3,3...6,1 Å попадают линии ионов К, Аг, S и Si высокой степени ионизации. Интенсивности этих линий (измеренные с высокой абсолютной точностью) позволяют детально исследовать горячую плазму с температурой $T_e > 3$ МК, в частности ее температурный состав, обилия отдельных химических элементов. Высокое временное разрешение спектрометра обеспечивает исследование динамических характеристик плазмы. При этом РЕСИК не чувствителен к излучению более холодной плазмы с температурой $T_e < 1$ МК и не имеет пространствен-

Примером проводимой совместно анализу может быть исследование физических условий в плазме разблывающейся вспышки, который был проведен 15 апреля 2002 года с помощью приборов РЕСИК и СПИРИТ. Было это явление долговременное, характеризующееся несколькими часами затухания. Разблывание началось в 03:08 UT, достигнув своего максимума (уровня M1.2) около 03:55 UT. Особенно ценные одновременные наблюдения выполнены с помощью приборов РЕСИК и СПИРИТ в диапазонах МР и EUV на фазе затухания разблывающейся вспышки. В настоящее время проводится совместная интерпретация полученных спектров. Предварительный анализ данных двух приборов подтверждает пригодность совместной обработки полученных результатов. В частности, это дает возможность определения ДМЭ в широком диапазоне температур. Такой вид анализа является впервые проведенным. Полученные результаты побуждают к дальнейшей работе.

В спектрометре РЕСИК использованы кристаллы выгнутые, благодаря чему видны различные структуры короны солнечной (область активных и разблывающейся) были зарегистрированы одновременно во всех длинах волн. Подробное описание принципа действия и конструкции прибора представлено в работе [Sylwester et al., 2005]. Спектрометр РЕСИК наблюдал видны в диапазоне от 3,3 до 6,1 Å. В этом диапазоне длины волн наблюдаются линии высоко ионизированных ионов К, Аг, S и Si. Анализ интенсивности этих линий (измеренных с высокой абсолютной точностью) позволяет исследовать горячую плазму с температурой $T_e > 3$ МК, в частности, определять температуру, параметры эмиссии, а также обилие элементов. Высокая разрешающая способность спектрометра позволяет исследовать динамические характеристики плазмы. К сожалению прибор РЕСИК не чувствителен к излучению более холодной плазмы с температурой $T_e < 1$ МК. Не обеспечивая также пространственной, а тем самым не позволяя анализировать индивидуальные области активных.

ного разрешения, что не позволяет исследовать взаимосвязь горячей вспышечной плазмы и плазмы окружающей активной области.

Спектрогелиограф СПИРИТ построен по бесщелевой схеме с дифракционной решеткой скользящего падения. На детекторе спектрогелиографа строится серия монохроматических изображений Солнца в отдельных линиях диапазона 280...330 Å, сдвинутых друг относительно друга вдоль направления дисперсии. Детальное описание спектрогелиографа СПИРИТ дано в работах [Бейгман и др., 2005; Шестов и др., 2010]. В спектральный диапазон 280...330 Å спектрогелиографа попадают линии ионов Fe VIII-XXII, Si VIII-XI, Mg VII-VIII, Ni XVIII и Ca XVIII, которые формируются при температурах от 0,8 до более чем 20 МК. Относительные интенсивности этих линий, определенные по данным спектрогелиографа, позволяют судить об относительном температурном составе вспышек и активных областей, проводить диагностику плотности плазмы, определять обилия химических элементов. Спектрогелиограммы СПИРИТ обладают пространственным разрешением, сравнимым с разрешением телескопов; однако при этом спектрогелиограф имеет более грубое временное разрешение, а интенсивности спектральных линий известны только в относительных единицах.

Временной профиль (по наблюдениям GOES) совместно исследуемой вспышки приведен на рис. 1 (см. с. 26). Вспышка произошла в активной области AR9906. Изображение короны Солнца в линии 171 Å по данным телескопа EIT/SOHO приведено на рис. 2 (см. с. 26). На рисунке отмечены активная область, в которой произошла вспышка, и направление, вдоль которого в этот момент располагалась ось дисперсии спектрогелиографа СПИРИТ.

Пример спектрогелиограммы, зарегистрированной спектрогелиографом

Spektroheliograf został wykonany jako układ bezszczelinowy z siatką dyfrakcyjną stycznego padania. Układ taki tworzy na detektorze serię monochromatycznych obrazów Słońca, odpowiadających poszczególnym liniom widmowym z zakresu 280...330 Å. Obrazy te są rozsunięte od siebie wzdłuż kierunku dyspersji. Szczegółowy opis spektroheliografu SPIRIT znajduje się w pracach [Бейгман и др., 2005; Шестов и др., 2010]. Zakres długości fal 280-330 Å spektroheliografu obejmuje linie jonów Fe VIII-XXII, Si VIII-XI, Mg VII-VIII, Ni XVIII i Ca XVIII, które emitowane są w zakresie temperatur od 0.8 МК до ponad 20 МК. Względne natężenia tych linii, wyznaczone w oparciu o dane pochodzące ze spektroheliografu, pozwalają na analizę temperaturową rozbłysków i obszarów aktywnych. Umożliwiają także przeprowadzanie diagnostyki gęstości plazmy oraz wyznaczanie zawartości pierwiastków chemicznych. Spektroheliogramy z przyrządu SPIRIT posiadają rozdzielczość przestrzenną, porównywalną z rozdzielczością teleskopów. Niestety spektroheliograf cechowała dość niska rozdzielczość czasowa, a natężenia linii widmowych były wyznaczone tylko w jednostkach względnych.

Na rys. 1 przedstawiono przebieg zmian natężenia promieniowania wspólnie badanego rozbłysku (wg obserwacji GOES). Rozbłysk pojawił się w obszarze aktywnym AR9906. Na rys. 2 pokazano obraz korony Słońca, otrzymany z teleskopu EIT/SOHO w linii 171 Å. Na rysunku zaznaczono obszar aktywny, w którym pojawił się rozbłysk, oraz chwilowy kierunek dyspersji spektroheliografu SPIRIT.

Rysunek 3 przedstawia przykład spektroheliogramu, zarejestrowanego aparaturą

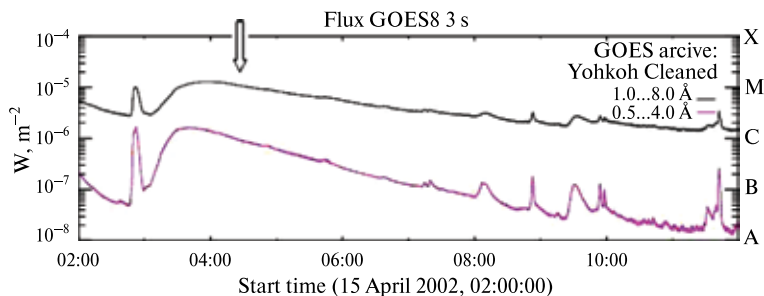


Рис. 1. Поток рентгеновского излучения Солнца в диапазонах 1...8 и 0,5...4 Å по данным мониторов GOES. Стрелкой указан момент времени, в который получена спектрогелиограмма СПИРИТ

Rys. 1. Strumień rentgenowskiego promieniowania Słońca z zakresu 1...8 i 0,5...4 Å, według danych przyrządów GOES. Strzałka wskazuje na moment rejestracji spektroheliogramu SPIRIT

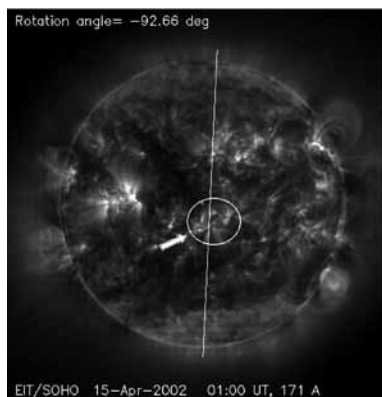


Рис. 2. Изображение короны Солнца вблизи 171 Å (по данным EIT/SOHO), полученное незадолго до начала вспышки. Отмечены активная область, в которой произошла вспышка, и направление, вдоль которого проходила ось дисперсии спектрогелиографа СПИРИТ

Rys. 2. Obraz Słońca w długości fali około 171 Å (według danych z teleskopu EIT/SOHO) wykonany niedługo przed początkiem rozbłysku. Zaznaczony jest obszar aktywny, w którym wystąpił rozbłysk, a linia prosta wskazuje chwilowy kierunek osi dyspersji spektroheliografu SPIRIT

СПИРИТ 15 апреля 2002 года, приведен на рис. 3 (см. с. 27). На спектрогелиограмме подписаны отдельные спектральные изображения, обозначено место вспышки.

Для определения спектра интересующего объекта спектрогелиограмма сканируется в направлении оси дисперсии. Спектр исследуемой вспышки приведен на рис. 4 (черным цветом) (см. с. 27), на этом же рисунке дан спектр близкорасположенной активной области (зеленым цветом).

В обоих спектрах наиболее яркими являются линии He II 303,8 Å и Fe XV 284,16 Å. На этих двух спектрах, соответствующих пространственно

СПИРИТ 15 kwietnia 2002 r. Na spektroheliogramie oznaczono poszczególne widmowe obrazy i wskazano miejsce rozbłysku.

W celu otrzymania widma wybranego obszaru tarczy słonecznej wykonuje się skan spektroheliogramu w kierunku osi dyspersji. Na rys. 4 przedstawiono otrzymane w ten sposób widma: rozbłysku (linia czarna) i obszaru aktywnej (linia zielona).

W obu widmach najsilniejszymi liniami są linie He II 303,8 Å i Fe XV 284,16 Å. Mimo iż oba widma pochodzą z niepokrywających się obszarów Słońca, linie

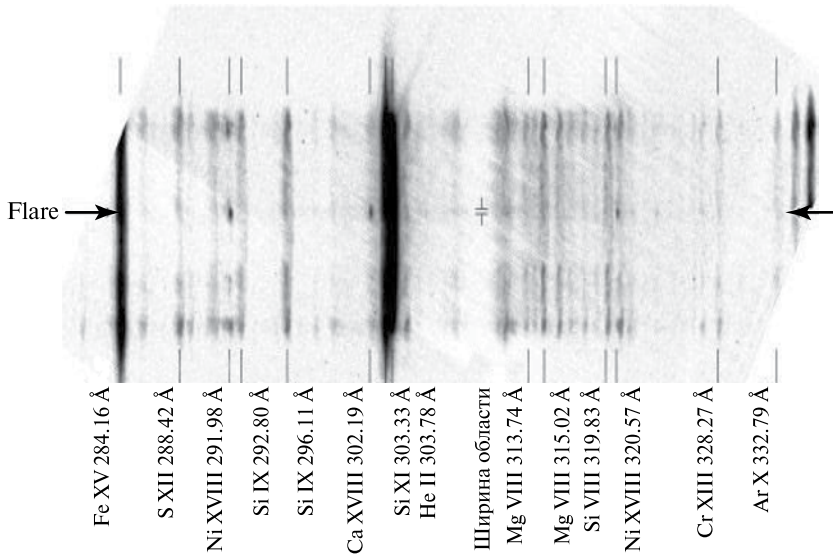


Рис. 3. Спектрогелиограмма диапазона 280...330 Å, полученная спектрогелиографом СПИРИТ 15 апреля 2002 года. На спектрогелиограмме подписаны отдельные спектральные изображения, обозначено место вспышки

Rys. 3. Spektroheliogram z zakresu 280...330 Å, otrzymany za pomocą spektroheliografu SPIRIT w dniu 15 kwietnia 2002 roku. Na spektroheliogramie oznaczono poszczególne widmowe obrazy i wskazano miejsce rozbłysku

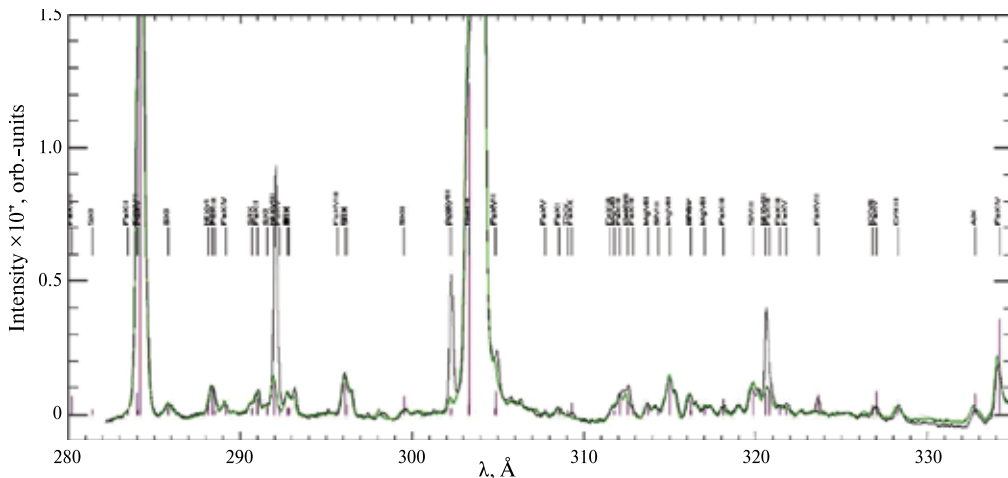


Рис. 4. Спектр вспышечной области (черная кривая), полученный аппаратурой СПИРИТ в диапазоне 280...330 Å 15 апреля 2002 года. Зеленым цветом указан спектр близкорасположенной активной области. Подписаны основные спектральные линии

Rys. 4. Widmo obszaru aktywnego (czarna krzywa) z zakresu 280...330 Å, otrzymane za pomocą przyrządu SPIRIT w dniu 15 kwietnia 2002 roku. Kolorem zielonym pokazano widmo obszaru aktywnego bezpośrednio otaczającego rozbłysk. Oznaczono główne linie widmowe

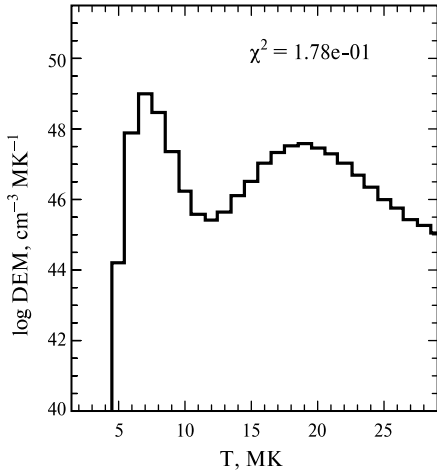


Рис. 6. Распределения ДМЭ, вычисленные для вспышки 15 апреля 2002 года по данным прибора РЕСИК

Rys. 6. Rozkład DEM otrzymany z pomiarów przyrządu RESIK dla rozbłysku z 15 kwietnia 2002 r.

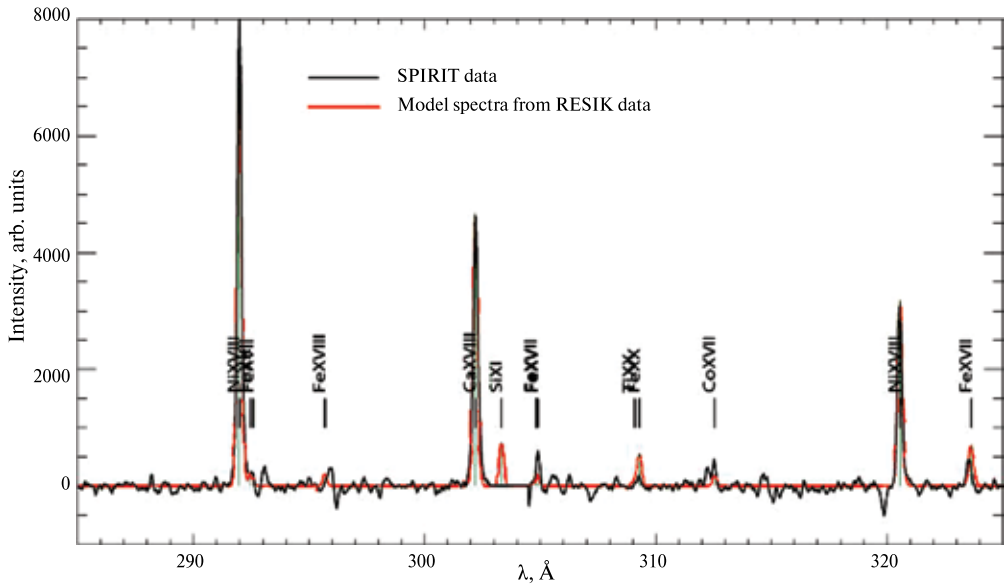


Рис. 7. Спектр вспышки, рассчитанный по данным прибора СПИРИТ (черная кривая), и модельный спектр, рассчитанный на основе ДМЭ, полученной по данным прибора РЕСИК (красная кривая)

Rys. 7. Widmo rozbłysku wyznaczone z danych przyrządu SPIRIT (czarna linia) oraz widmo wyliczone w oparciu o DEM, otrzymane z danych przyrządu RESIK (czerwona linia)

формирующиеся в процессах диэлектронной рекомбинации и внутренних возбуждений.

Анализ спектров, полученных прибором РЕСИК, позволяет определить распределение дифференциальной меры эмиссии (ДМЭ) с изменением температуры. Распределение ДМЭ характеризует количество плазмы в данном промежутке температуры внутри излучающей области. Тем самым форма ДМЭ характеризует физические условия в плазме (в том числе среднюю температуру и полную меру эмиссии). Для расчета дифференциальной меры эмиссии был использован итеративный алгоритм Withbroe—Sylwester (W-S), детальное описание которого можно найти в работе [Sylwester et al., 1980]. Алгоритм основан на теореме Байеса и принципе максимальной вероятности. Функции эмиссии отдельных ионов, необходимые для расчета ДМЭ, были вычислены с использованием кода CHIANTI. Распределение ДМЭ, вычисленное для момента времени, в который получена спектрогелиограмма СПИРИТ, представлено на рис. 6 (см. с. 29). Полученное распределение можно считать двухкомпонентным: одна составляющая соответствует «холодной» плазме с температурой в диапазоне 5...10 МК; вторая компонента состоит из более горячей плазмы с температурами в диапазоне 11...30 МК.

Распределение ДМЭ, полученное на основе данных прибора РЕСИК для вспышки с 15 апреля 2002 года, было использовано для моделирования спектра в диапазоне 280...330 Å, что соответствует диапазону прибора СПИРИТ. Модельный спектр, полученный с использованием кода CHIANTI, приведен на рис. 7 (см. с. 29). Модельный спектр хорошо согласуется с «чистым» спектром вспышки, который получен на основе данных прибора СПИРИТ.

Совместный анализ спектров, зарегистрированных приборами РЕСИК и СПИРИТ, позволит исследовать

повстающих в процессе рекомбинации диэлектронной и возбуждений внутрээрзповлукowych.

Na podstawie widm uzyskanych za pomocą instrumentu RESIK możliwe jest wyznaczanie rozkładów różniczkowej miary emisji (DEM) z temperaturą. Rozkład DEM mówi nam, ile materii znajduje się w danej temperaturze. Tym samym rozkład DEM charakteryzuje warunki fizyczne w plazmie (w tym średnią temperaturę i całkowitą miarę emisji). Do wyznaczenia rozkładu DEM wykorzystana została metoda iteracyjna Withbroe—Sylwestera, której szczegółowy opis można znaleźć w pracy [Sylwester et al., 1980] Algorytm ten oparty jest na metodzie Bayesa i zasadzie maksymalnej wiarygodności. Funkcje emisji niezbędne do wyznaczenia rozkładu DEM zostały obliczone przy użyciu kodu CHIANTI (6.0). Na rys. 6 przedstawiony został rozkład różniczkowej miary emisji, obliczony na podstawie widm RESIKa, zarejestrowanych w tym samym czasie, co obserwacje SPIRIT. Otrzymany rozkład ma dwie wyraźne składowe. Pierwszy składnik odpowiada plazmie chłodniejszej z temperaturami w zakresie od 5 do 10 МК. Drugi składnik to gorętsza plazma z temperaturami pomiędzy 11 a 30 МК.

W ramach wstępnej analizy rozbłysku z 15 kwietnia 2002 r., na podstawie rozkładu DEM, wyliczonego w oparciu o dane RESIKa, wyznaczono widmo syntetyczne w zakresie 280...330 Å. Widmo to porównano następnie z widmem obserwowanym za pomocą instrumentu SPIRIT. Wyniki porównania przedstawiono na rys. 7. Wiadą bardzo dobrą wzajemną zgodność obu widm. Przy obliczeniach korzystano z kodu CHIANTI.

Wspólna analiza widm, zarejestrowanych przyrządami RESIK i SPIRIT, pozwala na badanie plazmy w szerokim zakre-

температурный состав плазмы широкого диапазона температур — от 0,8 до 50 МК, сравнить плазму вспышки и активной области, и таким образом, даст основу для выявления главных механизмов транспорта энергии во вспышках.

się temperaturowym od 0.8 МК do 50 МК. Umożliwia również porównywanie plazmy rozbłysku i obszaru aktywnego oraz daje podstawy do poznania głównych mechanizmów transportu energii w rozbłyskach słonecznych.

ЛИТЕРАТУРА

- Бейгман И. Л., Боженков С. А., Житник И. А. и др. (2005) Солнечные спектры крайнего ВУФ-диапазона, полученные в ходе эксперимента СПИРИТ на борту ОС КОРОНАС-Ф, каталог линий в области 280–330 Å // Письма в Астрон. журн.: астрономия и космическая астрофизика. 2005. Т. 31. № 1. С. 39–58.
- Шестов С. В., Кузин С. В., Урнов А. М. и др. (2010) Диагностика температуры солнечной плазмы во вспышках и активных областях по линиям спектрального диапазона 280–330 Å в эксперименте СПИРИТ/КОРОНАС-Ф // Письма в Астрон. журн.: астрономия и космическая астрофизика. 2010. Т. 36. № 1. С. 46–60.
- Sylwester J., Schrijver J., Mewe R. (1980) Multitemperature analysis of solar X-ray line emission // Solar Physics. 1980. V. 6. P. 285–309.
- Sylwester J., Gaicki I., Kordylewski Z., Kowaliński M., Nowak S., Płoceniak S., Siarkowski M., Sylwester B., Trzebiński W., Bakała J. et al. (2005) Resik: A Bent Crystal X-ray Spectrometer for Studies of Solar Coronal Plasma Composition // Solar Physics. 2005. V. 226. P. 45–72.

Understanding of the coronal energy release processes and coronal heating are among the basic importance problems of contemporary solar physics. In order to best pursue this goal, it is not only enough to study the morphology of the structures seen in the corona, but also to investigate in detail the physical conditions in the hot (0.1...30 МК) plasma including determinations of its chemical composition, ion and electron temperatures or – in general the distribution of plasma with temperature – so called differential emission measure (DEM).

The EUV spectroscopy is very powerful tool for the hot plasma diagnostics and study the short-wavelength solar spectra in order to understand the physical and dynamical processes making the observed plasma structures of the solar corona. We used the coronal EUV and X-ray spectra obtained from RESIK and SPIRIT instruments placed aboard the CORONAS-F space solar observatory. Based on this data we obtain one of the most plasma parameter, the distribution of plasma with temperature – so called differential emission measure (DEM).

BIBLIOGRAFIA

3 СФИНКС

Руководитель проекта
с российской стороны:

С. КУЗИН

Руководитель проекта
с польской стороны:

Я. СИЛЬВЕСТЕР

В рамках выполнения совместного проекта был создан космический солнечный спектрофотометр СФИНКС и проведен эксперимент по прецизионной регистрации потока излучения в диапазоне 0,8...14,5 кэВ на борту спутника «Коронас-Фотон» в 2009 году. В ходе этих исследований получены уникальные данные о вариациях интегрального излучения Солнца в рентгеновском диапазоне в период аномально низкой солнечной активности, а также данные о спектральном составе излучения.

Преыдушие измерения рентгеновского излучения Солнца проводились с помощью спектрометров, чувствительность которых была недостаточна для регистрации флуктуаций излучения в период минимума солнечной активности. Низкое энергетическое и временное разрешение этих приборов не позволяло отслеживать быстрые изменения в спектрах солнечных вспышек в этой важной области спектра, где излучает наиболее горячая часть корональной плазмы. Таким образом, чувствительность предыдущего поколения инструментов была недостаточной для измерений колебаний уровня эмиссии во время минимума солнечной активности (2006–2008). В Лаборатории физики Солнца Центра космических исследований Польской академии наук во Вроцлаве был разработан новый спектрофотометр СФИНКС (Solar Photometer IN X-rays — SPHINX) [Sylwester et al., 2006; Gburek et al., 2011], в котором использованы детекторы новейшего поколения, так называемые ПИН-диоды. ПИН-диоды имеют хорошее спектральное разрешение (~290...490 эВ) и обеспечивают комфортное отношение рентгеновского сигнала к ожидаемому сигналу орби-

3 SPHINX

Kierownik projektu
ze strony Rosji:

S. KUZIN

Kierownik projektu
ze strony Polski:

J. SYLWESTER

W ramach realizacji wspólnego projektu konstruowano kosmiczny słoneczny spektrofotometr SphinX i przeprowadzono w 2009 roku eksperyment na pokładzie satelity „Koronas-Foton”. Eksperyment miał na celu pomiar strumienia promieniowania w zakresie energii 0,8...14,5 keV z niespotykaną rozdzielczością. Podczas trwania misji określono po raz pierwszy zmiany jasności rentgenowskiej Słońca w okresie wyjątkowo niskiej aktywności słonecznej, a także wyznaczono widma promieniowania w tym zakresie energii.

Dotychczasowe pomiary rentgenowskiego promieniowania Słońca były wykonywane przy użyciu spektrometrów o czułości niewystarczającej dla rejestrowania fluktuacji w okresie minimum aktywności słonecznej. Słaba rozdzielczość energetyczna i czasowa tych przyrządów uniemożliwiała śledzenie szybkich zmian w widmach rozbłysków słonecznych w tym zakresie promieniowania, gdzie gromadzi się większość gorącej plazmy koronalnej. Tak więc, czułość przyrządów poprzedniej generacji w okresie minimum aktywności Słońca (lata 2006–2008) byłaby niewystarczająca do pomiaru wahań poziomu emisji. Z tego też powodu w Zakładzie Fizyki Słońca Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk we Wrocławiu opracowano nowy spektrofotometr SphinX (Solar photometer IN X-rays) [Sylwester et al., 2006; Gburek et al., 2011], w którym zastosowano detektory nowszej generacji, tzw. diody PIN, posiadające dobrą rozdzielczość widmową (ok. 290...490 eV) i zapewniające korzystny stosunek sygnału rentgenowskiego do spodziewanego sygnału tła orbitalnego ($S/N \approx 100$). Przyrząd SphinX został wykonany w Polsce w latach 2005–2008 i umieszczony w przestrzeni kosmicznej na satelicie „Koronas-Foton”, jako część rosyjskiej aparatury

тального фона ($S/N \approx 100$). Прибор СФИНКС был разработан и изготовлен в Польше в 2005–2008 годах и выведен в космическое пространство как часть российской аппаратуры ТЕСИС проекта КОРОНАС-Фотон. В период работы прибора (с 20 февраля по 29 ноября 2009 года) спектрофотометер СФИНКС передал на Землю около 20 Гбайт данных, содержавших интенсивности излучения и спектры диапазона 0,8...14,5 кэВ для периода «спокойного Солнца» и для ~700 вспышек [Gburek et al., 2011]. Большинство зарегистрированных явлений — слабые, до сих пор не наблюдаемые из-за низкой чувствительности приборов «предыдущей генерации».

При разработке прибора СФИНКС предполагалось, что он должен обеспечить выполнение следующих научных задач [Sylwester et al., 2008]:

- определение абсолютного уровня мягкого рентгеновского излучения Солнца в 256 каналах из диапазона 0,8...14,5 кэВ;
- проведение анализа изменчивости общего рентгеновского излучения Солнца в указанном диапазоне спектра в масштабах времени от 0,1 до 1000 с;
- определение распределения так называемой дифференциальной меры эмиссии (DEM) для различных состояний солнечной активности — от очень низкой до самой высокой, связанной с возникновением сильных солнечных вспышек класса X30;
- исследование химического состава корональной плазмы и его изменения во время вспышек;
- изучение спектрального профиля в условиях доминирования тепловых и нетепловых процессов;
- изучение флуктуаций узкополосной эмиссии с применением новой концепции проведения измерений, которая использует явление флуоресценции.

TESIS. W okresie swego funkcjonowania (od 20 lutego do 29 listopada 2009) spektrofotometr SphinX przekazał na Ziemię około 20 Gbajtów danych, zawierających natężenia promieniowania i widma z zakresu 0,8–14,5 keV dla okresów tzw. spokojnego Słońca i co najmniej 700 rozbłysków [Gburek et al., 2011]. Większość tych zjawisk stanowiły słabe zjawiska, dotychczas nieobserwowalne ze względu na niską czułość przyrządów „poprzedniej generacji”.

Opracowując przyrząd SphinX założono, że powinien on umożliwić osiągnięcie następujących celów naukowych [Sylwester et al., 2008]:

- określenie absolutnego poziomu miękkiego promieniowania rentgenowskiego Słońca w 256 kanałach z zakresu 0,8...14,5 keV;
- przeprowadzenie analizy zmienności całkowitego promieniowania rentgenowskiego Słońca w skalach czasu od 0,1 do 1000 sekund;
- wyznaczenie rozkładów tzw. Różniczkowej Miary Emisji (DEM) dla różnych stanów aktywności Słońca — od bardzo niskiego do najwyższego, związanego z występowaniem najsilniejszych rozbłysków klasy X30;
- badanie składu chemicznego plazmy koronalnej i jego zmian w rozbłyskach;
- badanie profilu widmowego z energią w warunkach dominacji procesów termicznych i nietermicznych;
- badanie fuktuacji emisji wąskopasmowej przy zastosowaniu nowej koncepcji pomiarowej z wykorzystaniem efektów fluorescencji.

Измерения мягкого рентгеновского излучения были проведены спектрофотометром СФИНКС с временным разрешением от 1 с в случае спокойного Солнца до 0,01 с во время вспышек. Применялись два способа:

- прямой метод — окошко детектора освещается непосредственно солнечным излучением;
- так называемый метод Ф-Ф (фильтр-флуоресценция) — окошко детектора освещается флуоресцентным излучением, возбужденным в специально подобранном сочетании материалов (с различными атомными номерами), обладающих резкими краями спектров поглощения и эмиссии рентгеновского излучения в нужном диапазоне длин волн.

Использованные в спектрофотометре детекторы типа ПИН-диод с фильтрами из майлара, алюминия и бериллия позволяют считывать «с нуля» до $5 \cdot 10^4$ фот/с. Чтобы охватить весь наблюдаемый диапазон (при самых мощных вспышках он превышает 10^7 фот/с), прибор СФИНКС снабжен тремя детекторами — D1, D2 и D3, — у которых диаметры входных апертур последовательно снижались в пятьдесят раз. Диапазон измерений отдельных детекторов иллюстрирует рис. 1 (см. с. 35).

Детекторы D1, D2 и D3 работали в трех режимах:

- основным (Basic — B): 256 спектральных каналов (бинов) в каждом детекторе разделялись на четыре канала измерения:
 - теплового шума (Thermal Noise — N);
 - низкоэнергетический (L: 0,8...9 кэВ, наличие спектральных линий);
 - высокоэнергетический (H: 9...14,5 кэВ, наличие континуума);
 - фоновых частиц (последний 255-й бин);

В спектрофотометре SphinX измерения мягкого промиеиования рентгеновского Слнца были докониwane z rozdzielczością czasową od 1 sekundy w przypadku spokojnego Слнца aż do 0,01 sekundy podczas rozbłysków. Prowadzono je na dwa sposoby:

- metodą bezpośrednią, poprzez oświetlanie okienka detektora wprost promieniowaniem słonecznym;
- tzw. metodą FF (filtr-fluorescencja), poprzez oświetlanie okienka detektora promieniowaniem fluorescencyjnym, wzbudzonym w specjalnie dobranych zestawach materiałów, wykorzystując ostre naturalne ukształtowanie progów absorpcji i emisji rentgenowskiej w materiałach o zróżnicowanej liczbie atomowej.

Stosowane w спектрофотометре SphinX detektory PIN, przesłonięte filtrami z mylaru, aluminium i berylu, pozwalały na zliczanie „od zera” do $5 \cdot 10^4$ fotonów/sekundę. Celem objęcia całego zakresu pomiarowego, sięgającego przy najsilniejszych rozbłyskach do ponad 10^7 fotonów/sekundę, zastosowano trzy detektory D1, D2 i D3 z aperturami wejściowymi kolejno malejącymi około pięćdziesięciokrotnie. Zakres pomiarowy poszczególnych detektorów obrazuje rys. 1.

Детекторы D1, D2 и D3 pracowały w trzech trybach:

- podstawowym (Basic — B): 256 spektralnych binów było w każdym detektorze rozdzielane na 4 kanały pomiarowe:
 - szumu termicznego (Thermal Noise — N);
 - pasmaiskoenergetycznego (L: 0.8...9 keV, obecność linii widmowych);
 - pasma wysokoenergetycznego (H: 9...14.5 keV, obecność kontinuum);
 - tła cząstek wysokoenergetycznych (ostatni 255 bin);

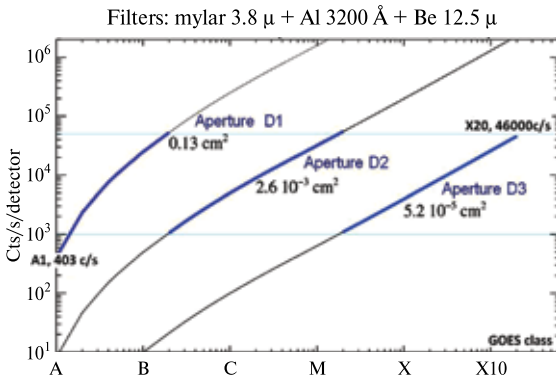


Рис. 1. Пределы измерений детекторов D1, D2 и D3 в различных условиях солнечной активности: от низкой до самой высокой — вспышечной

Рис. 1. Pokrycie przez detektory D1, D2 i D3 dynamicznego przedziału pomiarowego w zakresie od niskiej do najsilniejszej aktywności rozbłyskowej

- спектральный (Spectral — S): весь спектр разделен на 256 спектральных каналов, в каждом из которых собирается информация;
- временной (Time stamping — T): с точностью 0,5 мкс передается время обнаружения детектором отдельного явления (фотон либо заряженная частица) и амплитуда измеренного сигнала; этот режим активируется только тогда, когда число отсчетов в секунду меньше, чем 1000.

- widmowym (Spectral — S): widma są rozdzielone na 256 kanałów widmowych, z których pobierana jest informacja;
- czasowym (Time stamping — T): kiedy z dokładnością 0.5 μs odnotowywany jest czas wykrycia przez detektor pojedynczego zjawiska (fotonu lub naładowanej cząstki) oraz amplituda wywołanego sygnału. Ten tryb jest włączany jedynie w przypadku, gdy ilość zliczeń na sekundę jest mniejsza niż 1000.

В конструкции прибора СФИНКС предусмотрена возможность калибровки детекторов D1, D2 и D3 цинтиляционным излучением, возбужденным в фильтрах из алюминия, титана и меди, которое освещает детекторы, когда специальная заслонка блокирует прямой солнечный свет. На рис. 2 (см. с. 36) указана схема измерительной системы детекторов D1, D2 и D3 (слева) и система калибровки (справа).

Четвертый детектор D4 предназначен для выполнения измерений по оригинальной методике Ф-Ф. Идея метода показана на рис. 3 (см. с. 37). Рентгеновское излучение Солнца, проходя через тонкий фильтр, освещает мишень, на которой возбуждает вторичное флуоресцентное излучение. Порог поглощения материала фильтра отсекает солнечный спектр с коротковолновой стороны, а процесс возбуждения флуо-

W konstrukcji przyrządu SphinX przewidziano możliwość kalibracji detektorów D1, D2 i D3 promieniowaniem scyntylacyjnym, wzbudzonym na filtrach z aluminium, tytanu i miedzi, które oświetla detektory w sytuacji, kiedy specjalna przysłona blokuje bezpośrednie oświetlenie. Rys. 2 przedstawia schemat układu pomiarowego detektorów D1, D2 i D3 (z lewej) i układu kalibracji (z prawej).

Czwarty detektor D4 jest przeznaczony do realizacji pomiarów nowatorską metodą FF. Idea metody jest przedstawiona na rys. 3. Röntgenowskie promieniowanie Słońca, przechodząc przez cienki filtr, oświetla tarczę, wzbudzając w niej wtórne promieniowanie fluorescencyjne. Próg absorpcji materiału filtra obcina widmo słoneczne od strony krótkofalowej, a proces wzbudzania fluorescencji od strony fal dłuższych. Wykonując filtr i tarczę z

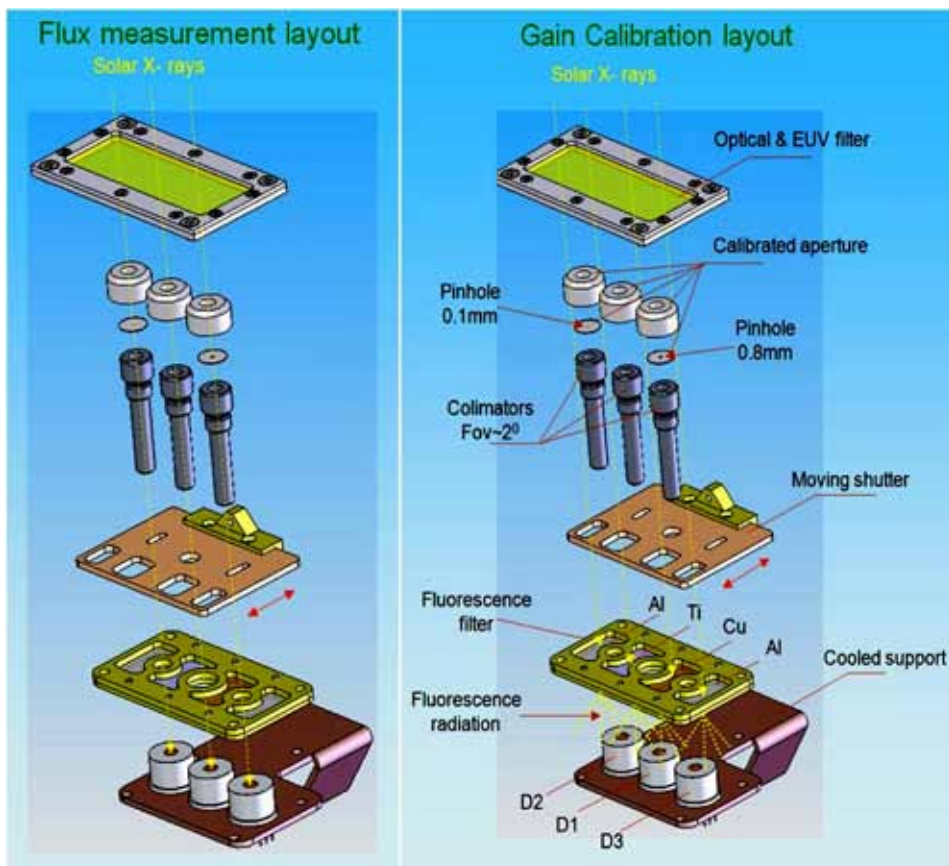


Рис. 2. Схема функционирования детекторов D1, D2 и D3 в режиме «снятия спектров» (слева) и калибровки (справа). Подвижная заслонка (moving shutter) имеет два положения, при которых излучение Солнца попадает либо непосредственно на детекторы, либо на флуоресцентные фильтры

Rys. 2. Schemat układu pomiarowego detektorów D1, D2 i D3 w stanie „zdejmowania widm” (z lewej) i kalibracji (z prawej). Ruchoma przysłona (moving shutter) przepuszcza bezpośrednie promieniowanie na detektory lub odcina je, powodując oświetlenie filtrów fluorescencyjnych w trakcie kalibracji

ресценции отсекает с длинноволновой стороны. Фильтр и мишень изготовлены из двух различных материалов с близкими атомными номерами (атомное число материала фильтра должно быть больше), что позволяет получить систему с узким спектральным окном. Набор трех различных систем, реализованных в приборе СФИНКС (на рис. 3 справа), должен был использовать

двух разных pierwiastków, nieznacznie różniących się liczbą atomową (większą liczbę atomową musi mieć materiał filtru), uzyskuje się układ o wąskim oknie widmowym. Zestaw trzech różnych układów, jaki zastosowano w przyrządzie SphinX (na rys. 3 z prawej), miał być wykorzystany do wielobarwnej fotometrii rentgenowskiej. Niestety, niski poziom promieniowania Słońca w okresie funkcjonowania spektrofotome-

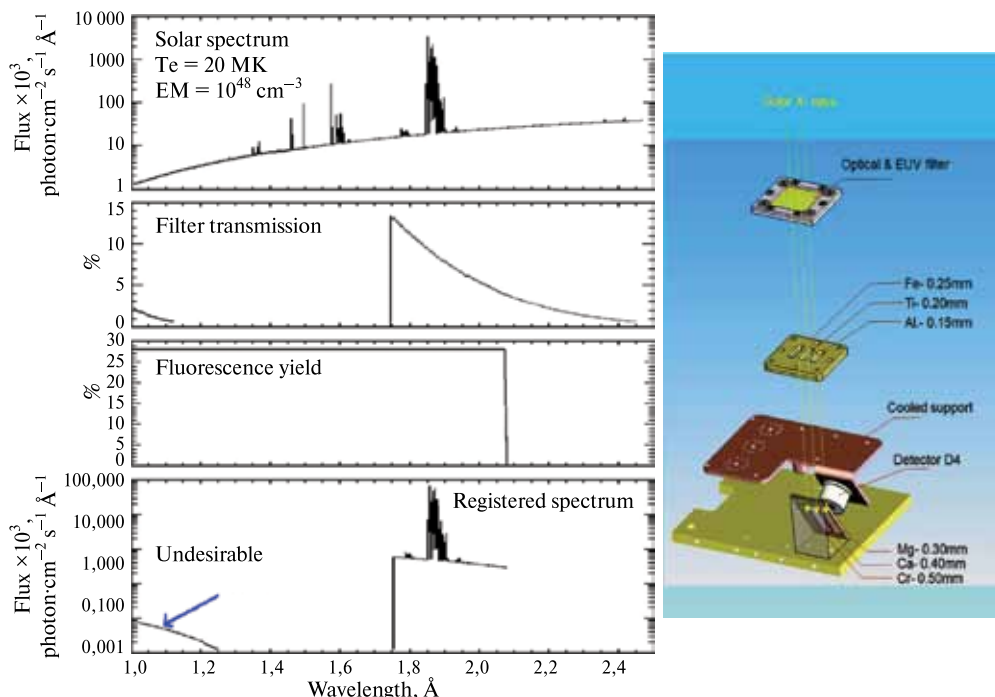


Рис. 3. Слева — пример «вырезания» узкой части солнечного спектра (верхний график) с шириной $0,33 \text{ \AA}$ (нижний график). Излучение, после прохождения через тонкий фильтр из железа, вызывает флуоресценцию в мишени из хрома (центральные графики). Справа — схема трех систем Ф-Ф (фильтр-флуоресценция), использованных в спектрофотометре СФИНКС

Rys. 3. Z lewej — przykład koncepcji „wycięcia” wąskiej części widma słonecznego (górny wykres) o szerokości $0,33 \text{ \AA}$ (dolny wykres) poprzez użycie cienkiego filtra wykonanego z żelaza, po przejściu którego promieniowanie wzбудza fлуоресценcję w chromowej tarczy (wykresy środkowe). Z prawej — schemat konstrukcyjny trzech układów F-F (filtr-fлуоресценция), zastosowanych w спектрофотометrze SphinX

ся для многоцветной рентгеновской фотометрии. К сожалению, низкий уровень солнечной радиации во время работы спектрофотометра СФИНКС оказался недостаточным для получения даже небольшого сигнала с этой части прибора.

Компновочная схема спектрофотометра СФИНКС приведена на рис. 4 (см. с. 38) (в правом верхнем углу фотография летного экземпляра). Прибор представляет собой коробочку с размерами $170 \times 170 \times 70$ мм и общей массой 3,7 кг.

тру SphinX nie był wystarczający do uzyskania znaczących wartości sygnałów w tej części przyrządu.

Спектрофотометр SphinX, którego schemat montażowy pokazano na rys. 4. (w prawym górnym rogu umieszczono zdjęcie egzemplarza lotnego), to niewielka skrzyneczka o wymiarach $170 \times 170 \times 70$ mm i całkowitej masie 3,7 kg.

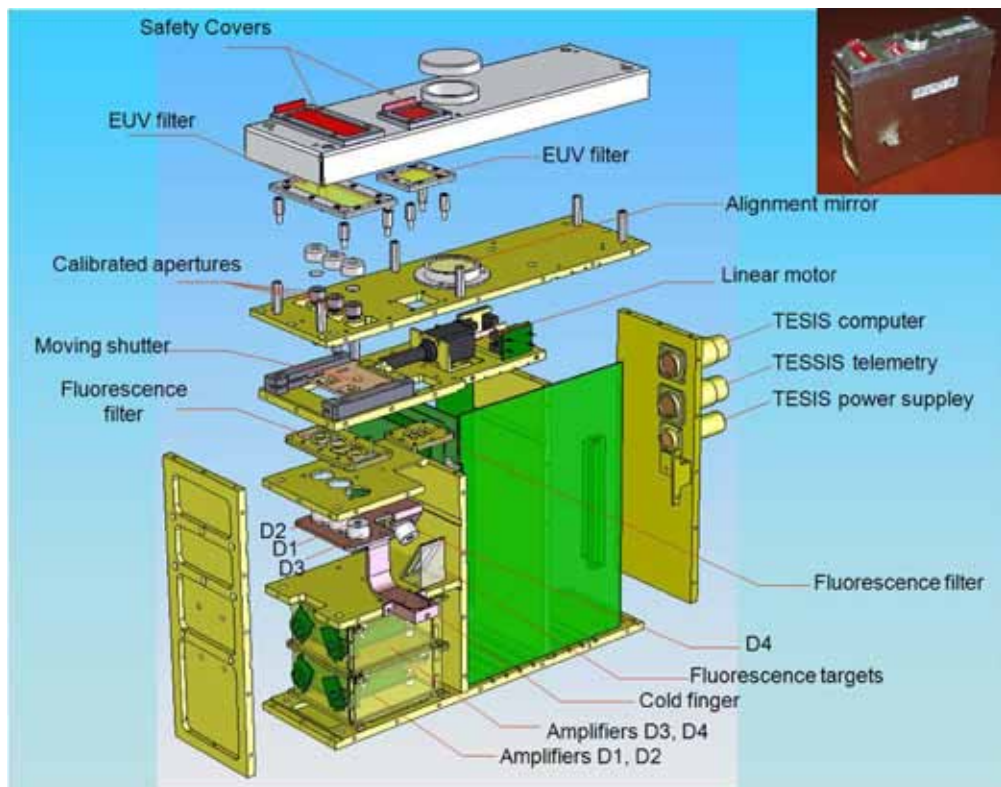


Рис. 4. Монтажная схема спектрофотометра СФИНКС (без боковых стенок). В правом верхнем углу рисунка показана фотография собранного прибора

Rys. 4. Schemat montażowy spektrofotometru SphinX (bez ścian bocznych). W prawym górnym rogu rysunku przedstawiona jest fotografia zmontowanego przyrządu

Система охлаждения для уменьшения шумов детекторов была реализована на элементах Пельтье. Избыточное тепло отводилось теплопроводом к внешнему радиатору спутника, находящемуся в условиях низких температур. Рабочая температура детекторов поддерживалась на уровне $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Внутренняя часть прибора заполнялась электронными платами, в том числе усилителями сигналов от датчиков, а также платами питания и компьютера. Программы компьютера были написаны на языках C++ и Ассемблер. Компьютер обеспечивал связь прибора с внешними системами спутника (прием команд, передача измеряемых данных),

Oprócz opisanych powyżej zespołów przyrządu niezwykle istotnymi elementami był system chłodzenia detektorów w celu zmniejszenia ich szumów, realizowany za pomocą układów Peltiera. Nadmiar ciepła odprowadzany był przewodem cieplnym do zewnętrznego radiatora satelity pozostającego w niskiej temperaturze. Robocza temperatura detektorów była utrzymywana na poziomie $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sporą część wnętrza przyrządu wypełniały układy elektroniczne, w tym wzmacniacze sygnałów z detektorów oraz płyty zasilania i komputera. Komputer oprogramowany był w językach C++ i assemblerze. Zapewniał on łączność przyrządu z zewnętrznymi systemami satelity (przyjmowanie poleceń,

а также управлял работой внутренних систем прибора (переключение диапазона измерений, установка подвижной крышки, сбор, сжатие и передача измеряемых данных на бортовую телеметрию). Специальная программа бортового компьютера позволяла непосредственно анализировать результаты измерения и немедленно реагировать на внешние условия, определяя тем самым: класс и фазу вспышки, прохождение спутника через радиационные пояса или тень Земли. Результаты этого анализа использовались для автономных изменений режимов измерений, а также передавались в виде флагов для использования в других приборах спутника «Коронас-Фотон».

На борту космического аппарата спектрофотометр СФИНКС был размещен внутри большого прибора ТЕСИС, входящего в состав научной аппаратуры спутника «Коронас-Фотон». Функционирование спектрофотометра СФИНКС также осуществлялось через некоторые служебные системы прибора ТЕСИС, обеспечивающие, в частности, питание (до 10 Вт), передачу данных на бортовую систему сбора научной информации (~50 Мбайт/сутки), а также передачу команд управления и загрузку в компьютер новых программ. Интеграция прибора СФИНКС в прибор ТЕСИС требовала тесного взаимодействия проектных групп в процессе изготовления и отработки аппаратуры, что, безусловно, способствовало укреплению долгосрочного сотрудничества Лаборатории физики Солнца Центра космических исследований ПАН с Лабораторией рентгеновской астрономии Солнца Физического института им. П. Н. Лебедева РАН (ФИАН).

В целях повышения точности измерений, а также привязки их к абсолютной системе отсчета, прибор СФИНКС был откалиброван на рентгеновской установке в лаборатории ХАСТ Палермо [Collura et al., 2008], а также прошел процедуру абсолютной калибровки с

передачей данных (передача измеренных данных на бортовую телеметрию), а также управлял работой внутренних систем прибора (переключение диапазона измерений, установка подвижной крышки, сбор, сжатие и передача измеряемых данных на бортовую телеметрию). Специальная программа бортового компьютера позволяла непосредственно анализировать результаты измерения и немедленно реагировать на внешние условия, определяя тем самым: класс и фазу вспышки, прохождение спутника через радиационные пояса или тень Земли. Результаты этого анализа использовались для автономных изменений режимов измерений, а также передавались в виде флагов для использования в других приборах спутника «Коронас-Фотон».

Спектрофотометр SphinX, choć był skonstruowany jako samodzielny instrument, został umieszczony w wolnej przestrzeni dużego przyrządu TESIS, wchodzącego w skład aparatury naukowej satelity „Koronas-Foton”. Konsekwencją tego było serwisowanie spektrofotometru SphinX przez niektóre systemy pomocnicze aparatury TESIS, zapewniające między innymi zasilanie (do 10 W), przesyłanie danych na telemetrię (~50 MB/24h) oraz pośredniczące w przekazywaniu rozkazów sterujących i nowego oprogramowania do komputera. Ścisłe połączenie dwóch przyrządów wymagało szerokiego współdziałania grup konstrukcyjnych i wykonawców obu przyrządów, przyczyniając się do pogłębienia wieloletniej współpracy Zakładu Fizyki Słońca Centrum Badań Kosmicznych PAN z Zakładem Astronomii Rentgenowskiej Słońca Instytutu Fizyki im. P. N. Lebediewa RAN (FIAN).

W celu zwiększenia dokładności używanych pomiarów oraz związania ich z absolutnym systemem odniesienia, przyrząd SphinX został poddany precyzyjnej kalibracji: na stanowisku rentgenowskim laboratorium ХАСТ w Palermo [Collura et al., 2008] oraz z wykorzystaniem wiązki

использованием пучка синхротрона BESSY в Берлине. Пример результатов синхротронной калибровки приведен на рис. 5. К сожалению, в связи с тем, что температура электроники прибора СФИНКС во время его работы в космическом пространстве была выше, чем её температура при наземной калибровке, в детекторах появлялись дополнительные (нежелательные) сигналы, накладывающиеся на сигналы, связанные с физическими эффектами (поглощение фотонов X в детекторах, заряженные частицы среды, окружающей спутник). Удаление этих «температурных эффектов» — достаточно трудоёмкое занятие и пока его не удалось автоматизировать. Тем не менее уже подготовлена значительная часть «очищенных» данных, которые в форме каталога под названием «Level_1» находятся на интернет-страницах вроцлавской лаборатории: http://156.17.94.1/sphinx_11_catalogue/SphinX_cat_main.html.

synchrotronu BESSY w Berlinie. Przykład wyników kalibracji synchrotronowej pokazuje rys. 5. Niestety, na skutek wyższej temperatury elektroniki przyrzędu SphinX podczas pracy w Kosmosie od tej panującej podczas prowadzenia naziemnej kalibracji, w detektorach pojawiały się dodatkowe, niepożądane sygnały nakładające się na sygnały związane z efektami fizycznymi (absorpcja fotonów X w detektorach, rejestracja sygnałów od cząstek otoczenia promienistego satelity). Usuwanie tych „efektów temperaturowych” jest żmudne i nie udało się go jeszcze zautomatyzować. Mimo to już obecnie kompletowany jest zestaw „oczyszczonych” danych, które jako dane tzw. Level_1 są wystawione w postaci katalogu na stronach WWW вроцлавskiej placówki pod adresem: http://156.17.94.1/sphinx_11_catalogue/SphinX_cat_main.html.

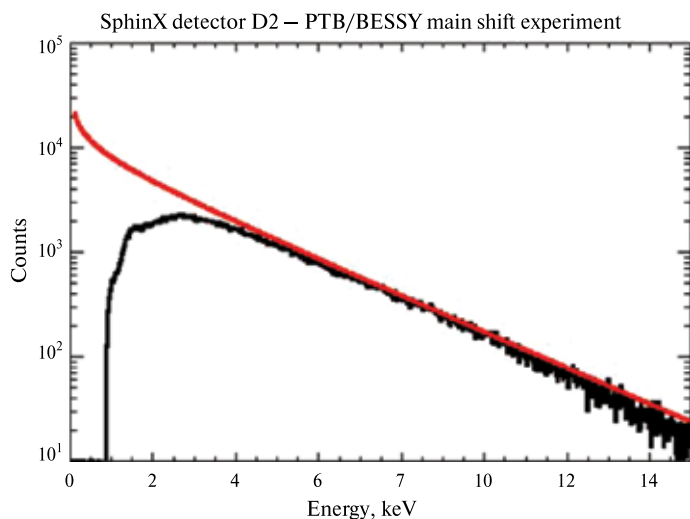


Рис. 5. Спектр синхротронного излучения BESSY (красная линия) и пример его записи детектором D2 спектрофотометра СФИНКС (черная линия). В районе максимальной чувствительности детектора абсолютная точность измерений не хуже 5 %

Rys. 5. Widmo promieniowania z synchrotronu BESSY (linia czerwona) i odpowiedź zarejestrowana za pomocą detektora D2 spektrofotometru SphinX (linia czarna). W zakresie największej czułości detektora dokładność absolutna pomiarów jest lepsza niż 5 %

Пример страницы каталога представлен на рис. 6 (см. с. 42). На рисунке видно, что чувствительность детекторов спектрофотометра СФИНКС позволила впервые зарегистрировать излучение очень слабых солнечных вспышек, для которых даже оказалось необходимым расширить «вниз» существующую классификацию вспышек GOES (классы Q и S).

Высокая чувствительность прибора СФИНКС сделала возможным отслеживание многих деталей в спектрах излучения мягкого рентгеновского диапазона даже во время отсутствия видимой солнечной активности (пятна, активные области). Пример спектра, полученного впервые в такой ситуации, показан на рис. 7 (см. с. 43). На нем видны группы линий, соответствующие переходам в ионах магния, серы, аргона и кальция.

На основании данных спектрофотометра СФИНКС проанализированы спектры, полученные во время глубокого минимума солнечной активности (2–14 июля 2009 года), когда на Солнце существовала изолированная активная область Ar 11024 [Sylwester, 2011]. Исследовано изменение во времени основных физических параметров, характеризующих плазму этой области, таких как температура, мера эмиссии и термодинамическая мера. Для определения объема излучающей плазмы за период до 8 июля были использованы изображения Солнца, полученные прибором ХРТ спутника HINODE. Совокупность этих данных позволила изучить изменения во времени электронной плотности плазмы на первом этапе эволюции активной области. Среднее значение плотности в это время составило $\sim 2 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$.

Детекторы прибора СФИНКС реагировали также на высокоэнергетические частицы, регистрируя их в специально выделенных каналах. Временной ход регистрации этих частиц показан на рис. 6 серым цветом (ниже красной

Przykład strony katalogu przedstawia rys. 6. Widać na nim wyraźnie, że czułość detektorów spektrofotometru SphinX jest wysoka, umożliwiającą po raz pierwszy rejestrowanie bardzo słabych rozbłysków, dla których trzeba było poszerzyć „w dół” istniejący zakres klasyfikacji GOES o klasy Q i S.

Wysoka czułość przyrządu SphinX pozwala śledzić wiele szczegółów w widmie z zakresu miękkiego promieniowania rentgenowskiego nawet w okresie braku widomej aktywności słonecznej (plamy, obszary aktywne). Przykład widma otrzymanego po raz pierwszy w takiej sytuacji przedstawia rys. 7. Widoczne są grupy linii odpowiadające przejściom w jonach magnezu, siarki, argonu i wapnia.

Wykorzystując dane pomiarowe ze spektrofotometru SphinX analizowano widma obserwowane w okresie głębokiego minimum aktywności słonecznej (2–14 lipca 2009 r.), kiedy na Słońcu występował izolowany obszar aktywny Ar 11024 [Sylwester, 2011]. Badano zmienność z czasem głównych parametrów fizycznych charakteryzujących plazmę tego obszaru, takich jak temperatura, miara emisji i miara termodynamiczna. Dla okresu do 8 lipca wykorzystano pomocniczo obrazy XRT z satelity HINODE celem określenia objętości emitującej plazmy. Łącznie dane te umożliwiły zbadanie zmian z czasem gęstości elektronowej plazmy w pierwszej fazie ewolucji obszaru aktywnego. Uzyskana średnia wartość gęstości w tym czasie wynosiła $\sim 2 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$.

Detektory przyrządu SphinX reagowały również na wysokoenergetyczne cząstki, rejestrując je w specjalnie do tego wydzielonych kanałach. Przebieg rejestracji tych cząstek pokazany jest na rys. 6 szarym kolorem pod czerwoną linią zapisu zliczeń

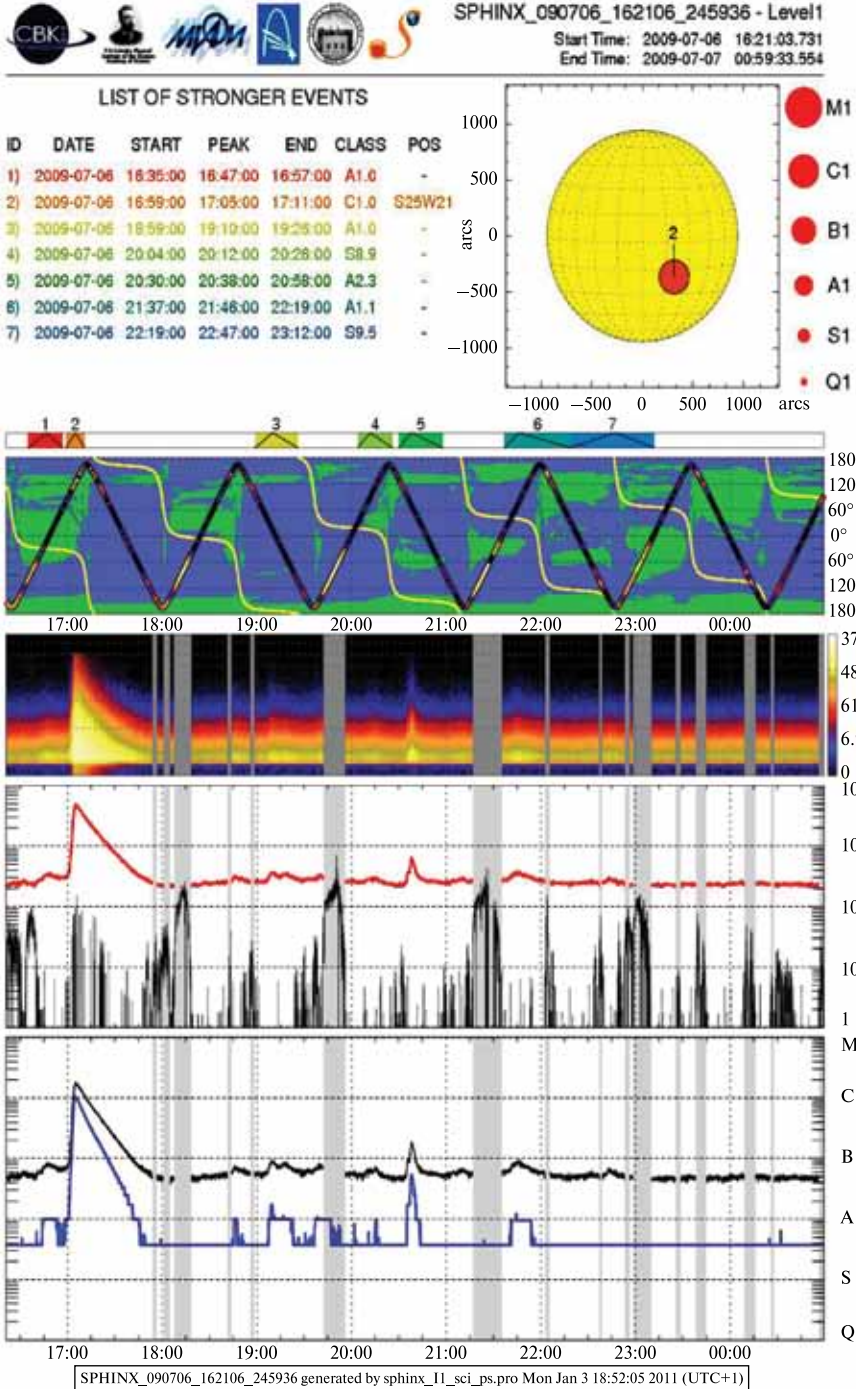


Рис. 6. Пример веб-сайта каталога с данными, полученными прибором СФИНКС 6 июля 2009 года. В нижней части рисунка черная линия показывает временной ход потока в диапазоне $1...8 \text{ \AA}$, наблюдаемого спектрофотометром СФИНКС, а синяя линия — детекторами рентгеновского фотометра GOES в то же время. Очевидна более высокая (примерно, в 100 раз) чувствительность детекторов спектрофотометра СФИНКС, регистрирующих вспышки слабее класса А. Это привело авторов эксперимента СФИНКС к необходимости расширения масштаба GOES, добавляя классы S и Q, включающие самые слабые вспышки, происходящие на Солнце. График в сером цвете (третий снизу) — это запись регистрации детекторами прибора СФИНКС заряженных частиц, в основном, во время прохождения спутника через радиационные пояса и область «Южно-Атлантической аномалии»

Rys. 6. Przykład strony internetowej katalogu z danymi przyrządu SpinX na dzień 6 lipca 2009 roku. Na dole strony czarna linia przedstawia przebieg strumienia z zakresu $1...8 \text{ \AA}$ zarejestrowany przez przyrząd Sphinx, zaś niebieska linia pokazuje dla porównania dane pomiarowe otrzymane za pomocą detektorów fotometru rentgenowskiego GOES dla tego samego czasu. Wyraźnie widać większą (ok. 100 razy) czułość detektorów spektrofotometru Sphinx, rejestrujących rozkłaski słabsze niż klasy A. Skłoniło to autorów eksperymentu Sphinx do poszerzenia skali GOES o klasy S i Q, obejmujące najslabsze rozkłaski występujące na Słońcu. Zapis w kolorze szarym (trzeci od dołu) pokazuje rejestrację przez detektory przyrządu Sphinx cząstek energetycznych, głównie w czasie przejścia satelity przez pasy radiacji i obszar tzw. Anomalii Południowo-atlantyckiej

линии). Сравнивая эти записи с положением на орбите, представленным выше на карте, можно ясно заметить увеличенную скорость регистрации частиц при прохождении спутника через полярные радиационные пояса и область так называемой «Южно-Атлантической аномалии» (SAA). Наблюдения, сделанные спектрофотометром СФИНКС, показывают хорошую корреляцию с измерениями украинского прибора СТЭП-Ф, также работавшего

детектора D1. Порównывая те записи с преебегием орбиты, преедставивоним на выеже положеной карте, wyraźnie widać wzmozone tempo rejestracji cząstek przy przejściu przez biegunowe pasy radiacji i obszar tzw. «Anomalii Południowo-atlantyckiej» (SAA). Obserwacje przyrządu Sphinx wykazują dobrą korelację z pomiarami, prowadzonymi przez przyrząd STEP-F, skonstruowany na Ukrainie, również funkcjonujący na pokładzie satelity „Koronas-Foton”. Wspólne pomiary stwarzają

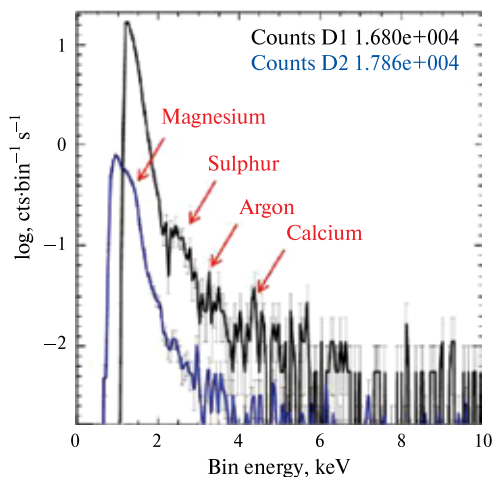


Рис. 7. Усредненный спектр рентгеновского излучения Солнца из диапазона $1...8 \text{ \AA}$, зарегистрированного детекторами спектрофотометра СФИНКС в периоды отсутствия проявлений активности Солнца. На диаграммах четко выделяются группы линий магния, серы, аргона и кальция

Rys. 7. Uśrednione widmo rentgenowskiego promieniowania Słońca z zakresu $1...8 \text{ \AA}$, zarejestrowane przez detektory spektrofotometru Sphinx w okresach braku widomych przejawów aktywności Słońca. Na wykresach wyraźnie wyróżniają się grupy linii magnezu, siarki, argonu i wapnia

на борту спутника «Коронас-Фотон». Общие измерения создают хорошую предпосылку для совместной работы авторов обоих экспериментов по интерпретации полученных данных.

Успех эксперимента со спектрофотометром СФИНКС стал возможным благодаря тесному сотрудничеству польских исполнителей с учеными и конструкторами российских научных учреждений МИФИ и ФИАН. Работа финансировалась польским Министерством науки и высшего образования в рамках грантов 4T12E04529 и N203 381736.

duże szanse na prowadzenie łącznej interpretacji przez twórców obu przyrządów.

Pomyślny przebieg eksperymentu ze spektrofotometrem SphinX był możliwy dzięki ścisłej współpracy polskich wykonawców z uczonymi i konstruktorami rosyjskich placówek naukowych FIAN i MEPhI. Prace były dofinansowane przez Polskie Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach grantów 4T12E04529 i N N203 381736.

ЛИТЕРАТУРА

- Collura A., Barbera M., Varisco S., Calderone G., Reale F., Gburek S., Kowalinski M., Sylwester J., Siarkowski M., Bakala J., Podgorski P., Trzebinski W., Plocieniak S., Kordylewski Z.* (2008) Calibration of the SphinX experiment at the XACT facility in Palermo // Proc. SPIE. 2008. V. 7011. P. 70112. Doi: 10.1117/12.789277.
- Gburek S., Siarkowski M., Kępa A., Sylwester J., Kowaliński M., Bakała J., Podgórski P., Kordylwesi Z., Płocieniak S., Sylwester B., Trzebiński W., Kuzin S.* (2011a) Soft X-Ray Variability Over the Present Minimum of Solar Activity as Observed by SPHINX // Solar System Research. 2011. V. 4. N. 2. P. 182–187.
- Gburek S., Sylwester J., Kowalinski M., Bakała J., Kordylewski Z., Podgorski P., Płocieniak S., Siarkowski M., Sylwester B., Trzebinski W., Kuzin S. V., Pertsov A. A., Kotov Yu. D., Farnik F., Reale F., Phillips K. J. H.* (2011b) SPHINX Soft X-Ray Spectrophotometer: Science Objectives, Design and Performance // Solar System Research. 2011. V. 30. P. 544–567.
- Sylwester J., Kowalinski M., Kuzin S., Kotov Yu. D.* (2006) SphinX: A Solar Fast Soft X-Ray Spectrophotometer // Proc. IAU Symp. 2006. N. 233.
- Sylwester J., Kuzin S., Kotov Yu. D., Farnik F., Reale F.* (2008) SphinX: A Fast Solar Photometer in X-rays // J. Astrophysics and Astronomy. 2008. V. 29. P. 339–343.
- Sylwester B., Sylwester J., Siarkowski M., Engell A. J., Kuzin S. V.* (2011) Physical Characteristics of AR 11024 Plasma Based on SPHINX and XRT Data // Central European Astrophysical Bulletin (CEAB) 2011. N. 34. P. 343.

BIBLIOGRAFIA

The unique solar spectrophotometer SphinX, operating in the soft X-ray range, have been launched and operated in 2009 aboard the Coronas-Photon space mission. The spectra have been recorded in the energy range 0.8...14.5 keV with unprecedented resolution. Based on the data obtained, the solar X-ray luminosity and the spectra have been determined, for the first time during a period of prolonged minimum of the activity.

4 НЕЙТРАЛ

Руководитель проекта
с российской стороны:

В. ИЗМОДЕНОВ

Руководитель проекта
с польской стороны:

М. БЗОВСКИ

Российско-польский проект НЕЙТРАЛ посвящен исследованию свойств границы гелиосферы, посредством анализа пространственных и энергетических распределений межзвездных атомов внутри гелиосферы. Основной задачей проекта является анализ и интерпретация экспериментальных данных, полученных на космических аппаратах Interstellar Boundary Explorer (IBEX), Ulysses, Soho и др., на основе теоретических моделей, разрабатываемых российскими и польскими участниками проекта.

Природа и положение границы гелиосферы, а также структура и свойства внешней области гелиосферы определяются взаимодействием солнечного ветра с межзвездным окружением Солнца — Локальным межзвездным облаком (ЛМО). В настоящее время нет сомнений, что ЛМО является частично-ионизованным облаком, заряженная компонента которого взаимодействует с плазмой солнечного ветра. Образующая при этом взаимодействии газодинамическая структура, которую принято для краткости называть *гелиосферным интерфейсом* (иногда термин гелиосферный интерфейс заменяют оборотом «область взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвездной средой» или называют *гелиосферным ударным слоем*), показана качественно на рис. 1 (см. с. 46).

К основным источникам информации о структуре гелиосферного интерфейса можно отнести следующие эксперименты на космических аппаратах: 1) измерения потоков энергичных (0,01...6 кэВ), нейтральных атомов водорода, гелия, кислорода на орбите Земли космическим аппаратом Interstellar Boundary Explorer (IBEX); 2) прямые измерения межзвездных захваченных

4 NEUTRAŁ

Kierownik projektu
ze strony Rosji:

V. IZMODENOV

Kierownik projektu
ze strony Polski:

M. BZOWSKI

Rosyjsko-polski projekt NEUTRAŁ poświęcony jest badaniu właściwości granicy heliosfery metodami analizy przestrzennych i energetycznych rozkładów atomów międzygwiazdowych we wnętrzu heliosfery. Podstawowym zadaniem projektu jest analiza i interpretacja danych eksperymentalnych uzyskanych z misji kosmicznych Interstellar Boundary Explorer (IBEX), „Ulysses”, „Soho” i innych na podstawie modeli teoretycznych opracowywanych przez rosyjskich i polskich wykonawców projektu.

Natura i położenie granicy heliosfery oraz структура i właściwości wewnętrznego obszaru heliosfery określone są przez oddziaływanie wiatru słonecznego z materią międzygwiazdową w otoczeniu Słońca — Lokalnym Obłokiem Międzygwiazdowym (LIC). Obecnie nie ma już wątpliwości, że LIC jest częściowo zjonizowanym obłokiem międzygwiazdowym, którego składowa zjonizowana oddziałuje z plazmą wiatru słonecznego. Powstaje przy tym struktura, którą przyjęło się nazywać w skrócie *interfejsem heliosferycznym* (niekiedy termin „interfejs heliosferyczny zastępowany jest przez określenie „obszar oddziaływania wiatru słonecznego z lokalnym ośrodkiem międzygwiazdowym” lub „*heliosferyczną warstwą graniczną*”), i która przedstawiona jakościowo na rys. 1.

Do najważniejszych źródeł informacji o strukturze interfejsu heliosferycznego można zaliczyć następujące pomiary realizowane w ramach eksperymentów kosmicznych: 1) pomiary strumieni energetycznych atomów neutralnych wodoru, helu i tlenu w zakresie 0,01...6 keV na orbicie Ziemi w ramach projektu Interstellar Boundary Explorer (IBEX), 2) bezpośrednie pomiary jonów pochwyconych w

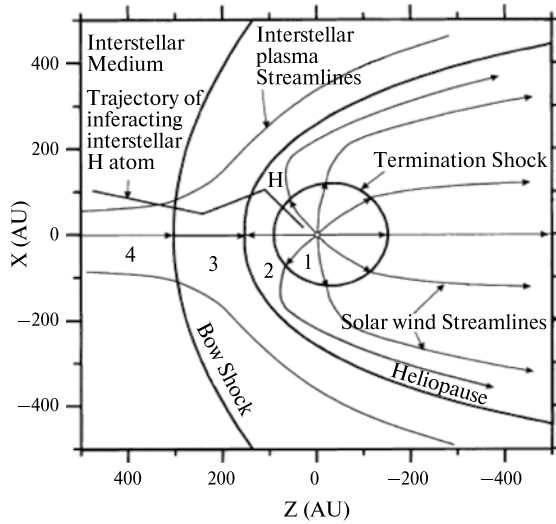


Рис. 1. Схематическое изображение гелиосферного ударного слоя (гелиосферного интерфейса) — области взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвездной средой. Гелиопауза — контактная поверхность, отделяющая плазму солнечного ветра от межзвездной плазмы. На гелиосферной ударной волне поток сверхзвукового солнечного ветра тормозится, нагревается и становится за ней дозвуковым. На внешней ударной волне до дозвуковых скоростей тормозится поток межзвездной среды. Область гелиосферного интерфейса может быть разделена на четыре подобласти с существенно различными свойствами плазмы в них: 1 — сверхзвуковой солнечной ветер; 2 — область дозвукового солнечного ветра между гелиопаузой и гелиосферной ударной волной (эту область часто называют внутренним гелиошисом); 3 — область возмущенной межзвездной плазмы между гелиопаузой и внешней ударной волной (эту область часто называют внешним гелиошисом); 4 — область невозмущенного солнечного ветра. Из-за больших длин свободного пробега межзвездные атомы проникают сквозь область гелиосферного ударного слоя внутрь гелиосферы

Rys. 1. Schematyczne przedstawienie heliosferycznej warstwy uderzeniowej (interfejsu heliosferycznego) — obszaru oddziaływania wiatru słonecznego z lokalnym ośrodkiem międzygwiazdowym. Heliopauza jest powierzchnią nieciągłości tangencjalnej, rozdzielającą plazmę wiatru słonecznego i plazmę międzygwiazdową. Na końcowej fali uderzeniowej naddźwiękowy wiatr słoneczny zwalnia do prędkości poddźwiękowej, ogrzewa się i spręża. Na czołowej fali uderzeniowej heliosfery do prędkości poddźwiękowych zwalnia strumień plazmy międzygwiazdowej. Obszar interfejsu heliosferycznego można podzielić na cztery podobszary, w których plazma ma swoiste właściwości: 1 — obszar naddźwiękowego wiatru słonecznego; 2 — obszar poddźwiękowego wiatru słonecznego między heliopauzą a końcową falą uderzeniową wiatru słonecznego (nazywany też wewnętrznym otokiem heliosfery); 3 — obszar sprężonej plazmy międzygwiazdowej między heliopauzą a czołową falą uderzeniową heliosfery (często nazywany zewnętrznym otokiem heliosfery); 4 — obszar niezakłóconego wiatru międzygwiazdowego. Ze względu na bardzo długie drogi swobodne w porównaniu z rozmiarem heliosfery atomy międzygwiazdowe przenikają przez warstwę graniczną heliosfery do jej wnętrza.

ионов, которые образуются из межзвездных атомов вследствие процессов перезарядки, ионизации электронным ударом и фотоионизации и измеряются на космических аппаратах Ulysses и Ace (прибор SWICS); 3) измерения рассеянного солнечного $Ly\alpha$ -излучения на космических аппаратах Soho и Hubble Space Telescope (HST) на 1 а. е., а также на космических аппаратах Voyager-1 и -2 и Pioneer-10 во внешней гелиосфере; 4) измерения аномальной компоненты космических лучей (АКЛ), которая образуется из захваченных ионов, ускоренных до высоких энергий. АКЛ измеряются на космических аппаратах Voyager, Pioneer, Ulysses, Ace, Sampex и Wind; 5) прямые измерения параметров солнечного ветра (в частности его скорости) на больших гелиоцентрических расстояниях на космическом аппарате Voyager-2.

Для того чтобы на основе измерений с одной или нескольких астрономических единиц определить структуру гелиосферного интерфейса, а также изучить происходящие в нем физические процессы, необходимо построить его теоретическую модель.

Наибольшее содержание в локальной межзвездной среде имеют атомы водорода. Эти атомы проникают глубоко в гелиосферу и эффективно взаимодействуют с протонами как солнечного ветра, так и межзвездной среды. Оценки показывают, что длины свободного пробега атомов водорода сравнимы с характерным размером гелиосферного интерфейса, поэтому для описания распределения атомов водорода во всей области взаимодействия солнечного ветра с межзвездной средой необходимо использовать кинетический подход.

Самосогласованная кинетико-газодинамическая модель гелиосферного

внетрже солнечным, повстающих wskutek jonizacji atomów gazu międzygwiazdowego napływających do wnętrza heliosfery (wymiana ładunku z cząstkami wiatru słonecznego, fotojonizacja przez słoneczne promieniowanie EUV oraz jonizacja przez zderzenia z elektronami wiatru słonecznego), wykonane przez sondy Ulysses i Ace (przyrząd SWICS); 3) pomiary rozproszonego promieniowania Słońca w linii Lyman-alfa przez satelitę „Soho” i „Teleskop Kosmiczny Hubble’a” w odległości ok. 1 AU od Słońca oraz w zewnętrznej heliosferze przez sondy kosmiczne „Voyager-1 i -2” oraz „Pioneer-10”; 4) pomiary anomalnej składowej promieniowania kosmicznego (ACR), która najprawdopodobniej powstaje z jonów pochwyconych w wietrze słonecznym przyspieszonych do wysokich energii; pomiary tych cząstek pochodzą z sond kosmicznych „Voyager”, „Pioneer”, „Ulysses”, „Ace”, „Sampex” i „Wind”; 5) bezpośrednie pomiary parametrów wiatru słonecznego (w szczególności jego prędkości) na dużych odległościach heliocentrycznych z sondy kosmicznej „Voyager-2”.

Aby na podstawie pomiarów wykonanych w różnych odległościach od Słońca określić strukturę heliosferycznej warstwy granicznej oraz zbadać zachodzące w nim procesy fizyczne konieczne jest zbudowanie modelu teoretycznego interfejsu heliosferycznego.

Najobfitszym pierwiastkiem w lokalnym ośrodku międzygwiazdowym jest wodór. Atomy wodoru przenikają głęboko do heliosfery i efektywnie oddziałują zarówno z protonami wiatru słonecznego, jak i z protonami ośrodka międzygwiazdowego. Oceny wskazują, że długość swobodna na zderzenia atomów wodoru porównywalna jest z rozmiarami interfejsu heliosferycznego i w związku z tym do opisanego rozkładu wodoru w całym obszarze oddziaływania wiatru słonecznego z ośrodkiem międzygwiazdowym niezbędne jest zastosowanie podejścia kinetycznego.

Samouzgodniony kinetyczno-gazodynamiczny model interfejsu heliosfe-

интерфейса была предложена в работе [Baranov, Malama, 1993]. В данной модели газодинамические уравнения Эйлера для плазмы решаются самосогласованно с кинетическим уравнением для функции распределения атомов водорода по скоростям. Для решения кинетического уравнения используется метод Монте-Карло с расщеплением по траекториям [Malama, 1991].

Руководителем проекта НЕЙТРАЛ с польской стороны М. Бзовским совместно с другими участниками проекта был проведен анализ измерений захваченных протонов на КА Ulysses [Bzowski et al., 2008, 2009]. Захваченные протоны образуются в области гелиосферного интерфейса в результате перезарядки нейтральных атомов водорода на протонах солнечного ветра и межзвездной среды. Анализ и интерпретация экспериментальных данных проводились на основе комбинированной теоретической модели распределения атомов водорода в гелиосфере. Данная модель совмещает трехмерный, нестационарный кинетический код, разработанный в ЦКИ ПАН, с результатами расчетов, проведенных с помощью самосогласованной кинетико-газодинамической модели в ИКИ РАН. В результате были получены оценки концентрации атомов водорода на гелиосферной ударной волне (т. е. приблизительно на расстоянии 90...100 а. е. от Солнца).

В рамках проекта НЕЙТРАЛ велась совместная подготовительная работа перед запуском КА IBEX, который был осуществлен NASA осенью 2008 года. М. Бзовски и В. Измоденов являются иностранными участниками проекта IBEX. Подробнее проект IBEX, его цели и ожидаемые результаты описаны в работах [McComas et al., 2009a, b; Schwadron et al., 2009].

В 2009 году на космическом аппарате Interstellar Boundary Explorer (КА IBEX) были получены и затем опубликованы первые полные карты неба в потоках энергичных атомов гелиосферного

рычного представлений został w artykule [Baranov, Malama, 1993]. W modelu tym gazodynamiczne równania Eulera dla plazmy rozwiązywane są w samouzgodniony sposób wraz z równaniami kinetycznymi na funkcję rozkładu wodoru neutralnego względem prędkości. W celu rozwiązania równania kinetycznego stosuje się metodę Monte Carlo z rozszczepieniem trajektorii [Malama, 1991].

Kierownik projektu NEUTRAŁ ze strony polskiej M. Bzowski wspólnie z innymi uczestnikami projektu przeprowadził analizę pomiarów jonów pochwyconych wykonanych przez sondę Ulysses [Bzowski et al., 2008, 2009]. Populacja protonów pochwyconych przez wiatr słoneczny powstaje wskutek wymiany ładunku między protonami wiatru słonecznego a atomami gazu międzygwiazdowego i pozostałych wymienionych wcześniej procesów jonizacyjnych na podstawie kombinowanego modelu teoretycznego rozkładu atomów neutralnych wodoru w wewnętrznej heliosferze. Model ten obejmuje trójwymiarowy, zależny od czasu kod kinetyczny opracowany w Warszawie i wyniki obliczeń wykonanych przy użyciu samozugodnionego kinetyczno-gazodynamicznego modelu moskiewskiego. W wyniku otrzymano ocenę gęstości atomów wodoru na końcowej fali uderzeniowej wiatru słonecznego, czyli w odległości ok. 90...100 j. a. od Słońca.

W ramach projektu NEUTRAŁ prowadzone były wspólne prace przygotowawcze do misji komicznej NASA IBEX, która rozpoczęła się jesienią 2008 roku. M. Bzowski i V. Izmodenow są członkami Zespołu Naukowego misji IBEX (Co-Investigators). Projekt IBEX, jego cele i oczekiwane wyniki szerzej opisane są w artykułach [McComas et al., 2009a, b; Schwadron et al., 2009].

W 2009 roku otrzymano z sondy kosmicznej „Interstellar Boundary Explorer” (IBEX) i opublikowano pierwsze pełne mapy nieba „widzianego” poprzez strumienie atomów neutralnych pochodzenia

происхождения в диапазоне энергий от 200 эВ до 6 кэВ. На картах неба была обнаружена узкая простирающаяся через все небо область, названная поясом ЭНА. Потoki нейтральных энергичных частиц из этой области в 2...3 раза превышают потоки из остальных областей (рис. 2). Существование такого пояса не было предсказано ни в одной из моделей внешней гелиосферы. Анализ результатов кинетико-газодинамического моделирования показал, что положение пояса ЭНА хорошо коррелирует с кривой на гелиопаузе (контактной поверхности), вдоль которой радиальная компонента межзвездного магнитного поля равна нулю. Таким образом, была показана корреляция положения пояса ЭНА с направлением и величиной межзвездного магнитного поля.

В работе [Chalov et al., 2010] была предложена физическая интерпретация наблюдаемого на КА IBEX пояса ЭНА. Для этого была усовершенствована кинетико-газодинамическая модель

heliosferycznego w zakresie obszaru wstęgi są 2...3 krotnie silniejsze od strumieni z pozostałych obszarów nieba (rys. 2). Istnienie takiego pasma wzmożonej emisji atomów nie było przewidywane przez żaden istniejących modeli zewnętrznej heliosfery. Analiza wyników modelowania kinetyczno-magnetohydrodynamicznego wykazała, że położenie wstęgi dobrze koreluje z krzywą na heliopauzie (powierzchni rozdzielającej), wzdłuż której radialna składowa międzygwiazdowego pola magnetycznego równa jest zero. W ten sposób pokazano korelacja położenia wstęgi z kierunkiem i natężeniem międzygwiazdowego pola magnetycznego.

W pracy [Chalov et al., 2010] zaproponowano fizyczne wyjaśnienie wstęgi ENA zaobserwowanej z pokładu IBEX-a. W tym celu opracowano kinetyczno-gazodynamiczny model oddziaływania wiatru sło-

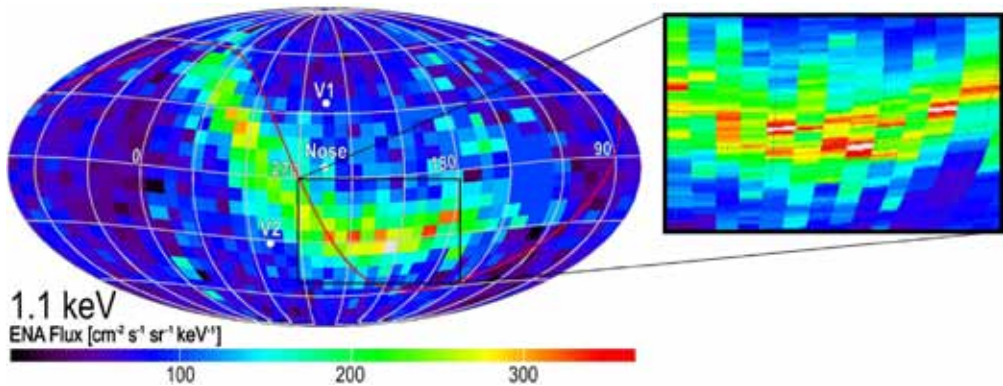


Рис. 2. Потoki энергичных нейтральных атомов гелиосферного происхождения в различных направлениях луча зрения (карта неба) в эклиптических координатах: V1 и V2 — направления движения космических аппаратов Voyager-1 и -2. Пояс энергичных нейтральных атомов (ЭНА) соответствует яркой полосе, проходящей между V1 и V2

Rys. 2. Strumienie energetycznych atomów neutralnych pochodzenia heliosferycznego dla linii widzenia rozłożonych w różnych kierunkach na niebie, przedstawione we współrzędnych ekliptycznych: V1 i V2 — kierunki ruchu sond kosmicznych „Voyager-1 i -2”. Wstęga ENA tworzy jasne pasmo i przechodzi między V1 a V2

взаимодействия солнечного ветра с локальной межзвездной средой, в рамках которой и были рассчитаны потоки энергичных атомов водорода, рождающихся в области взаимодействия в результате перезарядки между межзвездными атомами и энергичными протонами. Усовершенствованная модель учитывает вторичную перезарядку межзвездных атомов водорода с межзвездными захваченными протонами в области, которая располагается за гелиопазузой. Ранее, в 2009 году, в рамках кинетико-газодинамической модели, трактующей захваченные протоны как отдельную кинетическую компоненту [Izmodenov et al., 2009], было показано, что межзвездные захваченные протоны за гелиопазузой могут вносить существенный вклад в потоки энергичных атомов с энергиями выше 1 кэВ. Важное отличие модели, разработанной в рамках проекта, от предыдущих заключается в предположении отсутствия рассеяния по питч-углу для захваченных протонов, рождающихся во внешней части гелиосферного интерфейса (в области за гелиопазузой). В рамках этого предположения образование пояса в потоках энергичных атомов водорода, наблюдаемое на космическом аппарате IBEX, находит естественное объяснение. На рис. 3 (см. с. 51) показаны результаты, полученные в рамках разработанной модели. Видно, что наблюдается качественное совпадение теоретических расчетов с экспериментальными данными с КА IBEX.

В работе [Grzedzielski et al., 2010] участниками проекта с польской стороны было предложено альтернативное объяснение пояса энергичных нейтралов, открытого на КА IBEX. Это объяснение основано на предположении о том, что измеряемые с помощью КА IBEX энергичные нейтральные атомы водорода рождаются на границе Локального межзвездного облака (ЛМО — LIC) в результате перезарядки межзвездных атомов водорода на горячих

нечного с локальным оśrodkiem międzygwiazdowym, в рамках которого обчислено strumienie energetycznych atomów neutralnych wodoru pochodzących z obszaru oddziaływania w wyniku wymiany ładunku między atomami międzygwiazdowymi a energetycznymi protonami. Model ten zawiera wtórną wymianę ładunku między atomami międzygwiazdowymi a pochwyconymi protonami w obszarze rozciągającym się za heliopaузą. Wcześniej w ramach modelu kinetyczno-gazodynamicznego, w którym protony pochwycone traktowane były jako oddzielna składowa kinetyczna [Izmodenov et al., 2009], pokazano, że międzygwiazdowe pochwycone protony za heliopaузą mogą wносить istotny wkład do strumieni energetycznych atomów neutralnych o energiach ponad 1 keV. Istotnym osiągnięciem modelu wypracowanego w ramach projektu w stosunku do modeli poprzednich jest to, że zakłada on brak rozpraszania kąta skłonu protonów pochwyconych w miejscowym polu magnetycznym w zewnętrznym otoku heliosfery (w obszarze za heliopaузą). W ramach tego założenia można znaleźć wyjaśnienia zjawiska wstęgi wzmożonych strumienie ENA obserwowanej przez sondę IBEX. Rys. 3 przedstawia wyniki otrzymane na podstawie opracowanego modelu. Widać, że istnieje jakościowa zgodność obliczeń teoretycznych z danymi eksperymentalnymi z sondy IBEX.

A artykule [Grzedzielski et al., 2010] polscy uczestnicy projektu zaproponowali alternatywne wyjaśnienie wstęgi energetycznych neutralów odkrytej przez IBEX-a. Wytłumaczenie to opiera się na hipotezie, że atomy tworzące wstęgę i jej wnętrze powstają na granicy Obłoku Lokalnego (LIC) gazu międzygwiazdowego i Lokalnego Bąbla (LB) — gorącego, rzadkiego i w pełni zjonizowanego obłoku materii galaktycznej — skutek wymiany ładunku między gorącymi protonami LB i atomami

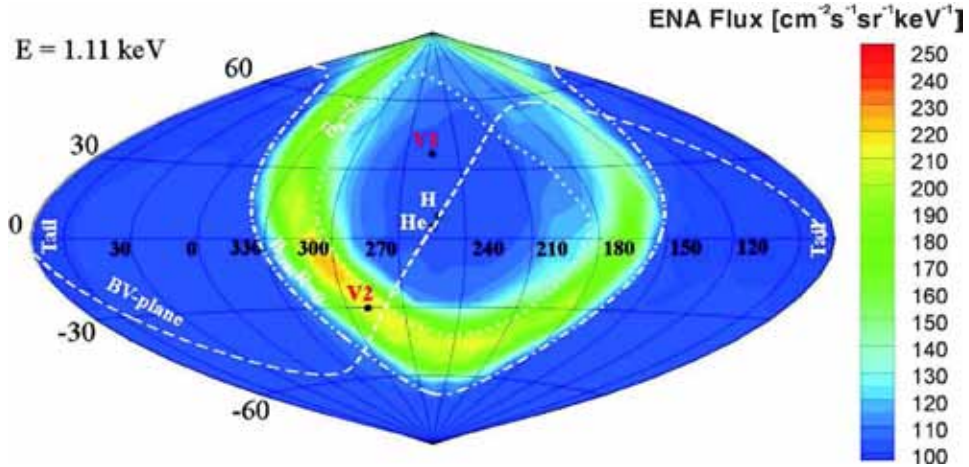


Рис. 3. Карта неба в потоках энергичных нейтральных атомов, полученная в рамках усовершенствованной кинетико-газодинамической модели гелиосферного интерфейса [Chalov et al., 2010]

Rys. 3. Mapa nieba obserwowanego w stumieniach energetycznych atomów neutralnych otrzymana na podstawie ulepszonego kinetyczno-gazodynamicznego modelu interfejsu heliosferycznego [Chalov et al., 2010]

протонах из Локального межзвездного пузыря (LB-Local Bubble). Эти вновь рожденные на границе между Локальным облаком и Локальным пузырем атомы могут достигать окрестности Солнечной системы благодаря малой концентрации вещества в Локальном облаке. В работе [Grzedzielski et al., 2010] были сделаны оценки параметров плазмы в Локальном облаке и пузыре, при которых достигается наилучшее совпадение с данными IBEX. Если предложенная интерпретация данных КА IBEX в дальнейшем подтвердится, то это будет означать, что с помощью данных IBEX можно будет впервые косвенным образом измерять параметры Локального межзвездного пузыря.

Кроме потоков энергичных нейтральных атомов водорода на КА IBEX были впервые измерены также потоки атомов водорода, гелия и кислорода более низких энергий [Moebius et al., 2009a, b]. Российскими и польскими участниками проекта НЕЙТРАЛ были проведены теоретические расчеты

водороду диффундирующими до его wnętrza z LIC. Powstające w wyniku tego procesu energetyczne atomy neutralne mogą osiągnąć orbitę Ziemi dzięki małej gęstości protonów w LIC i postulowanej niewielkiej odległości granicy LIC/LB, rzędu zaledwie 1000 j. a. W [Grzedzielski et al., 2010] artykule przedstawiono szacunki parametrów plazmy w LB i LIC, przy których osiąga się jakościową zgodność postulowanej przez model wstęgi ENA z parametrami wstęgi zaobserwowanej przez sondę IBEX. Jeśli zaproponowana w artykule [Grzedzielski et al., 2010] interpretacja okaże się poprawna, będzie to oznaczało, że dzięki danym z sondy IBEX można będzie po raz pierwszy zmierzyć niemal bezpośrednio parametry Lokalnego Bąbla.

Oprócz strumieni energetycznych atomów neutralnych wodoru sonda kosmiczna IBEX dokonała także pomiarów atomów międzygwiazdowych wodoru, helu, tlenu i neonu o niższych energiach [Moebius et al., 2009a, b]. Rosyjscy i polscy wykonawcy projektu NEUTRAŁ przeprowadzili teoretyczne oceny strumieni ato-

потоков атомов гелия и кислорода, измеряемых на орбите Земли.

В работе [Grzedzielski et al., 2010] также исследовалась эволюция корональных ионов тяжелых элементов C, N, O, Mg, Si и S во внешней гелиосфере и в области внутреннего ударного слоя, между гелиосферной ударной волной и гелиопаузой. Для этого польскими участниками проекта была разработана модель, в которой тяжелые ионы движутся внутри гелиосферы, меняя вдоль траектории свою степень ионизации. Ионы подвергаются воздействию процессов рекомбинации, перезарядки, фотоионизации и ионизации электронным ударом. В расчетах использовались распределения протонов, а также глобальная структура гелиосферного интерфейса, полученная в ИКИ РАН.

Показано, что в области гелиосферного ударного слоя заряженные тяжелые корональные ионы солнечного ветра эффективно рекомбинируют. Результатом такой рекомбинации является образование достаточно большого числа энергичных нейтральных атомов в носовой части ударного слоя. Часть из образованных в окрестности гелиопаузы атомов могут вновь проникать вглубь гелиосферы (в область сверхзвукового солнечного ветра) и вторично ионизоваться там, образуя тем самым захваченный ион. В работе было показано, что для элементов с низким первым ионизационным потенциалом (C, Mg, Si и S) указанный источник захваченных ионов является доминирующим и достаточным для производства аномальной компоненты космических лучей из этих элементов.

мów helu i tlenu oraz neonu mierzone na orbicie Ziemi.

W artykule [Grzedzielski et al., 2010] badano ewolucję stanu ładunkowego ciężkich jonów koronalnych C, N, O, Mg, Si i S w zewnętrznej heliosferze, a także w obrębie wewnętrznej warstwy granicznej heliosfery między końcową falą uderzeniową wiatru słonecznego a heliopaumą. W tym celu polscy wykonawcy projektu opracowali model, w którym wymieniony ciężkie jony poruszają się we wnętrzu heliosfery zmniejszając skutek reakcji wymiany ładunku swój stopień jonizacji. Jony te podlegają procesom rekombinacji, wymiany ładunku, fotojonizacji i jonizacji elektronicznej. W wykonanych obliczeniach wykorzystano rozkład protonów oraz globalną strukturę interfejsu heliosferycznego obliczone w IKI RAN.

Pokazano, że w obszarze warstwy granicznej heliosfery ciężkie jony koronalne w wietrze słonecznym stopniowo rekombinują. W wyniku tej rekombinacji powstaje dość duża ilość energetycznych atomów neutralnych tych pierwiastków w nosowej części warstwy granicznej heliosfery. Część spośród tych atomów może powrócić w głąb heliosfery (do obszaru nadźwiękowego wiatru słonecznego) i ulec ponownej jonizacji, w wyniku czego powstaje nowa populacja jonów pochwyconych w wietrze słonecznym. W artykule pokazano, że dla pierwiastków o niskim potencjale jonizacji (C, Mg, Si i S), proces ten jest dominującym źródłem jonów pochwyconych, o strumieniu dostatecznym do wytłumaczenia natężenia anormalnej składowej promieniowania kosmicznego dla tych pierwiastków.

ЛИТЕРАТУРА

- Baranov V. B., Malama Yu. G. (1993) Model of the solar wind interaction with the local interstellar medium — Numerical solution of self-consistent problem // *J. Geophysical Research*. 1993. V. 98. N. A9. P. 15,157–15,163.
- Bzowski M., Möbius E., Tarnopolski S., Izmodenov V., Gloeckler G. (2008) Density of neutral interstellar hydrogen at the termination shock from Ulysses pickup ion observations // *J. Astronomy and Astrophysics*. 2008. V. 491. Iss. 1. P. 7–19.

BIBLIOGRAFIA

- Bzowski M., Moebius E., Tarnopolski S., Izmodenov V., Gloeckler G.* (2009) Neutral H density at the termination shock: a consolidation of recent results // *Space Science Rev.* 2009. V. 143. N. 1–4. P. 21–30.
- Chalov S.V., Alexashov D.B., McComas D., Izmodenov V.V., Malama Y.G., Schwadron N.* (2010) Scatter-free Pickup Ions beyond the Heliopause as a Model for the Interstellar Boundary Explorer Ribbon // *Astrophysical J. Letters.* 2010. V. 716. Iss. 2. P. L99–L102.
- Grzedzielski S., Wachowicz M.E., Bzowski M., Izmodenov V.* (2010) Heavy coronal ions in the heliosphere: I. Global distribution of charge-states of C, N, O, Mg, Si and S // *J. Astronomy and Astrophysics.* 2010. V. 512. Id. A72.
- Izmodenov V.V., Malama Y.G., Ruderman M.S., Chalov S.V., Alexashov D.B., Katushkina O.A., Provornikova E.A.* (2009) Kinetic-Gasdynamic Modeling of the Heliospheric Interface // *Space Science Rev.* 2009. V. 146. P. 329–351: doi: 10.1007/s11214-009-9528-3.
- Malama Yu. G.* (1991) Monte Carlo simulation of neutral atoms trajectories in the solar system // *Astrophysics and Space Science.* 1991. V. 176. N. 1. P. 21–46.
- McComas D.J., Allegrini F., Bochsler P., Bzowski M., Collier M., Fahr H., Fichtner H., Frisch P., Funsten H.O., Fuselier S.A., Gloeckler G., Gruntman M., Izmodenov V., Knappenberger P., Lee M., Livi S., Mitchell D., Moebius E., Moore T., Pope S., Reisenfeld D., Roelof E., Scherrer J., Schwadron N., Tyler R., Wieser M., Witte M., Wurz P., Zank G.* (2009a) IBEX — Interstellar Boundary Explorer // *Space Science Rev.* 2009. V. 146. N. 1–4. P. 11–33.
- McComas D.J., Allegrini F., Bochsler P., Bzowski M., Christian E.R., Crew G.B., DeMajistre R., Fahr H., Fichtner H., Frisch P.C., Funsten H.O., Fuselier S.A., Gloeckler G., Gruntman M., Heerikhuisen J., Izmodenov V., Janzen P., Knappenberger P., Krimigis S., Kucharek H., Lee M., Livadiotis G., Livi S., MacDowall R.J., Mitchell D., Moebius E., Moore T., Pogorelov N.V., Reisenfeld D., Roelof E., Saul L., Schwadron N.A., Valek P.W., Vanderspek R., Wurz P., Zank G.P.* (2009b) Global Observations of the Interstellar Interaction from the Interstellar Boundary Explorer (IBEX) // *Science.* 2009. V. 326. Iss. 5955. P. 959–962.
- Moebius E., Kucharek H., Clark G., O'Neill M., Petersen L., Bzowski M., Saul L., Wurz P., Fuselier S.A., Izmodenov V.V., McComas D.J., Mueller H.R., Alexashov D.B.* (2009a) Diagnosing the Neutral Interstellar Gas Flow at 1 AU with IBEX-Lo // *Space Science Rev.* 2009. V. 146. P. 149–172.
- Moebius E., Bochsler P., Bzowski M., Crew G.B., Funsten H.O., Fuselier S.A., Ghielmetti A., Heitzler D., Izmodenov V.V., Kubiak M.* et al. (2009b) Direct Observations of Interstellar H, He, and O by the Interstellar Boundary Explorer // *Science.* 2009. V. 326. Iss. 5955. P. 969–971.
- Schwadron N.A., Bzowski M., Crew G.B., Gruntman M., Fahr H., Fichtner H., Frisch P.C., Funsten H.O., Fuselier S., Heerikhuisen J., Izmodenov V., Kucharek H., Lee M., Livadiotis G., McComas D.J., Moebius E., Moore T., Mukherjee J., Pogorelov N.V., Prested C., Reisenfeld D., Roelof E., Zank G.P.* (2009) Comparison of Interstellar Boundary Explorer Observations with 3D Global Heliospheric Models // *Science.* 2009. V. 326. Iss. 5955. P. 966–968.

This Russian-Polish project is devoted exploration of the properties of the heliospheric boundaries where the solar wind meets the local interstellar medium. We study spatial and velocity distributions of the interstellar hydrogen atoms inside the heliosphere. The main goal of this project is to apply the developed by us complex kinetic theoretical models for analysis of the experimental data from different spacecrafts (Interstellar Boundary Explorer, Ulysses, SOHO, Voyager, etc.).

5 ИЗЛУЧЕНИЕ

Руководитель проекта
с российской стороны:

М. МОГИЛЕВСКИЙ

Руководитель проекта
с польской стороны:

Я. ХАНАШ

Российско-польский проект ИЗЛУЧЕНИЕ направлен на изучение одного из самых мощных и загадочных явлений внутренней магнитосферы Земли — аврорального километрового излучения (АКР). В 1996 году был запущен спутник «Интербол-2», в состав научных экспериментов которого входил ПОЛЬРАД, предназначенный для изучения спектральных и поляризационных характеристик АКР [Ханаши и др., 1998]. В этом эксперименте впервые в практике космических исследований на борту космического аппарата (КА) строилась ковариационная матрица электрического поля, из которой находились параметры Стокса. В результате успешного проведения эксперимента ПОЛЬРАД был получен большой объем измерений и проект ИЗЛУЧЕНИЕ во многом базируется на результатах этих измерений.

Авроральное километровое радиоизлучение представляет собой мощное радиоизлучение в диапазоне частот от 30 до 700 кГц (максимум излучения наблюдается в частотном диапазоне от 100 до 300 кГц), генерируемое в авроральных областях магнитосферы и уходящее от Земли. Впервые АКР было зарегистрировано на спутнике «Электрон-2» в 1965 году [Бенедиктов и др., 1965]. Радиоволны в диапазоне АКР не могут пройти из магнитосферы на Землю, поскольку их не пропускает ионосфера, и поэтому даже отраженные сигналы АКР (например, от резкого градиента концентрации на плазмопаузе) не могут быть приняты на Земле. Последующие измерения, проводившиеся на высокоапогейных спутниках, позволили определить основные свойства АКР и условия, при которых происходит генерация этого излучения. Следует отметить, что аналогичное по природе излучение были обнаружены

5 PROMIENIOWANIE

Kierownik projektu
ze strony Rosji:

M. MOGILEWSKY

Kierownik projektu
ze strony Polski:

J. HANASZ

Celem polsko-rosyjskiego projektu PROMIENIOWANIE były badania jednego z najsilniejszych i najbardziej zagadkowych zjawisk wewnętrznej magnetosfery Ziemi — zorzowego promieniowania kilometrowego (AKR — auroral kilometric radiation). W 1996 roku wystartował satelita „Interball-2”, wyposażony w aparaturę naukową, w której skład wchodził eksperyment POLRAD, przeznaczony do badań spektralnych i polaryzacyjnych charakterystyk AKR [Ханаши и др., 1998]. W tym eksperymencie po raz pierwszy w praktyce badań kosmicznych była tworzona na pokładzie sztucznego satelity macierz kowariancyjna pola elektrycznego, która posłużyła do znajdowania parametrów Стокса АКР. W wyniku udanego eksperymentu POLRAD uzyskano wiele pomiarów. Projekt PROMIENIOWANIE opiera się w znacznym stopniu na tych pomiarach.

Zorzowe promieniowanie kilometrowe (AKR) jest silną emisją w zakresie częstotliwości od 30 do 700 kHz (maksimum emisji obserwuje się w zakresie częstotliwości 100 do 300 kHz), generowaną w zorzowych obszarach magnetosfery i rozprzestrzeniającą się swobodnie. АКР zarejestrowano po raz pierwszy na satelicie Elektron-2 w roku 1965 [Бенедиктов и др., 1965]. Fale radiowe w zakresie częstotliwości АКР nie przenikają z magnetosfery do Ziemi, ponieważ nie przepuszcza ich jonosfera. To jest powód dla którego nawet odbitych sygnałów АКР (na przykład od ostrego gradientu gęstości na plazmopauzie) nie można odebrać na Ziemi. Kolejne pomiary przeprowadzane z satelitów o wysokim apogeum, pozwoliły wyznaczyć podstawowe właściwości АКР i warunki w których zachodzi generacja. Warto zauważyć, że analogiczne w swej naturze promieniowanie odkryto u Jowisza, Saturna i Urana. Tego rodzaju promieniowanie jest charakterystyczną właściwością obiektów kosmicznych posia-

от Юпитера, Сатурна, Урана. Такого типа излучение — характерное свойство всех космических тел, обладающих магнитным полем и обтекаемых потоками плазмы [Zarka, 1998].

Авроральное километровое излучение играет важную роль в глобальной динамике авроральной плазмы — от 1 до 10 % энергии электронов может уходить в излучение, его полная энергия составляет порядка 10^7 Вт, а в активные периоды достигает 10^9 Вт [Gurnett, 1974], т. е. АКР является одним из наиболее мощных излучений, генерируемых в магнитосфере Земли. По результатам проведенных измерений было установлено, что АКР связано с дискретными полярными сияниями и его источники находятся над авроральной ионосферой, в основном, в вечернем и ночном секторах магнитосферы, на инвариантных широтах около $65...70^\circ$ [Gurnett, 1974; Kurth et al., 1975; Hanasz et al., 2001] на высотах 2...10 тыс. км [Benson, Calwert, 1979].

Большая мощность АКР вызвала удивление исследователей, и в 1970-х годах шли бурные дискуссии о природе и физическом механизме генерации АКР. В 1979 году в работе Ву Ч. Ч. и Ли Л. С. [Wu, Lee, 1979] для объяснения АКР был предложен механизм циклотронной мазерной неустойчивости, развивающейся в авроральной области с пониженной плотностью, в так называемых кавернах Кальверта [Calwert, 1981], где выполняется условие $\omega_p/\omega_{ce} \ll 1$ (ω_p и ω_{ce} — плазменная и циклотронная частоты электронов). В настоящее время этот механизм является общепризнанным, поскольку он объясняет большинство наблюдаемых свойств АКР: высокую интенсивность АКР, зависимость интенсивности излучения от геомагнитной активности, поляризацию и др. Вместе с тем ряд вопросов генерации и распространения этого излучения, а также структура источника остаются открытыми до настоящего времени. Большой объем изме-

дающих поле магнитычне и опływanych strumieniami plazmy [Zarka, 1998].

AKR odgrywa ważną rolę w globalnej dynamice plazmy zorzowej. Elektrony mogą zużyć na promieniowanie od 1 do 10 % energii. Całkowita energia tego promieniowania jest rzędu 10^7 Watt, a w okresach aktywności osiąga nawet 10^9 Watt [Gurnett, 1974]. Oznacza to, że AKR jest jednym z najsilniejszych promieniowań generowanych w magnetosferze Ziemi. Przeprowadzone pomiary pozwoliły na ustalenie, że AKR jest związane z dyskretnymi łukami zorzowymi, a jego źródła znajdują się ponad jonosferą zorzową, na ogół w wieczornym i nocnym sektorze magnetosfery, na inwariantnych szerokościach około $65...70^\circ$ [Gurnett, 1974; Kurth et al., 1975; Hanasz et al., 2001] i wysokościach od 2...10 tys. km [Benson, Calwert, 1979].

Znaczna moc AKR zadziwiła badaczy i w latach 70-tych miały miejsce burzliwe dysputy na temat natury i mechanizmu fizycznego generacji AKR. W roku 1979 Wu i Lee [Wu, Lee, 1979] zaproponowali mechanizm niestabilności masera cyklotronowego rozwijającej się w obszarze zorzowym o niskiej gęstości jak np. wnęka Calverta [Calwert, 1981], w którym jest spełniony warunek $\omega_p/\omega_{ce} \ll 1$ (ω_p i ω_{ce} — plazmowa i cyklotronowa częstotliwości elektronów). Obecnie ten mechanizm jest ogólnie uznawany, ponieważ wyjaśnia większość obserwowanych cech AKR: jego dużą moc, zależność natężenia promieniowania od aktywności geomagnetycznej, polaryzację i inne. Mimo to szereg problemów dotyczących generacji i rozprzestrzeniania się tego promieniowania jak i problemów dotyczących struktury źródła, pozostają otwarte do dnia dzisiejszego. Wielka ilość pomiarów AKR w eksperymencie POLRAD pozwala na rozwiązywanie wielu zadań, z których część była rozważana w ramach projektu „Promieniowanie”. Tu ograniczymy się do

рений АКР в эксперименте ПОЛЬРАД позволил решить широкий круг задач, часть из них были рассмотрены в рамках проекта ИЗЛУЧЕНИЕ. Здесь мы ограничимся результатами анализа местоположения источника и характеристик диаграммы направленности АКР.

Согласно работе [Wu, Lee, 1979] АКР должно выходить из источника почти перпендикулярно силовым линиям магнитного поля (рис. 1), так как максимум излучения циклотронного мазера в источнике направлен перпендикулярно магнитному полю. Поскольку вблизи источника большой коэффициент преломления, то радиоизлучение отклоняется вверх, что приводит к усилению составляющей волнового вектора, параллельной магнитному полю. В результате максимум диаграммы излучения АКР приближается к направлению вектора магнитного поля согласно измерениям, полученным в работе [Могилевский и др., 2007]. В теоретических работах [Louarn, Le Queau, 1996; Буринская, Рош, 2007] было показано, что границы области генерации

представления результатов анализа локализации источника и характеристики направленности АКР.

Згідно з працею [Wu, Lee, 1979] АКР повинно видоставати ся з джерела правіе простопадле до ліній сил поля магнетичного (рис. 1), поніваж најсильніше вzmocnienie в масеріе циклотроновом наступіе в джереліе в кіеунку простопадлым до поля магнетичного. З powodu dużego współczynnika załamania blisko źródła promieniowanie odchyła się do góry, co prowadzi do wzrostu składowej wektora falowego równoległej do pola magnetycznego. W efekcie maksimum charakterystyki kierunkowej АКР zbliża się do kierunku pola magnetycznego, co jest zgodne z pomiarami [Могилевский и др., 2007]. W pracach teoretycznych [Louarn, Le Queau, 1996; Буринская, Рош, 2007] pokazano, że granice obszaru generacji posiadają istotny wpływ na formowanie charakterystyki kierunkowości źródła (rys. 2). Rolę gra-

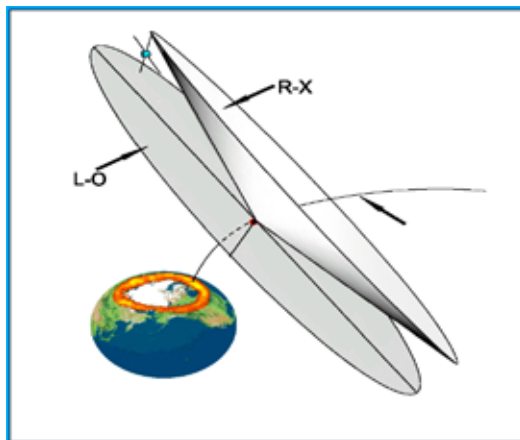


Рис. 1. Диаграмма направленности излучения для источника АКР в плазме без границ согласно работе [Wu, Lee, 1979]. Излучение распространяется почти поперек внешнего магнитного поля. Вдоль магнитного поля — излучение отсутствует

Рис. 1. Charakterystyka kierunkowości promieniowania dla źródła АКР w plazmie bez granic, zgodnie z pracą [Wu, Lee, 1979]. Promieniowanie rozprzestrzenia się prawie w poprzek zewnętrznego pola magnetycznego i nie posiada składowej wzdłuż niego

оказывают существенное влияние на формирование диаграммы направленности источника (рис. 2). Роль границы могут играть либо градиент распределения фоновой плазмы поперек внешнего магнитного поля, либо границы пучка энергичных электронов, инжектируемых из хвоста магнитосферы во внутренние области, являющихся источником энергии АКР [Буринская, Рош, 2007]. В этом случае формируется волновод с характерными широтными размерами, много меньшими, чем долготные ($r_{ш} \ll r_{д}$), и диаграмма направленности излучения формируется этим волноводом.

Для экспериментального определения местоположения источника АКР использовались результаты его измерений на двух спутниках: в эксперименте ПОЛЬРАД на спутнике «Интербол-2» и в эксперименте РВИ на спутнике «Поллар» [Gurnett et al., 1995]. Для анализа был выбран интервал одновременных измерений на двух спутниках, разнесенных в пространстве. Спутник «Интербол-2» находился экваториальнее

ниже może odgrywać albo gradient rozkładu plazmy tła w poprzek zewnętrznego pola magnetycznego, albo granice wiązki energetycznych elektronów wstrzykiwanych z ogona magnetosfery w wewnętrzne obszary, będących źródłem energii АКР [Буринская, Рош, 2007]. W tym przypadku formuje się falowód z charakterystycznym rozmiarem w kierunku szerokości geomagnetycznej o wiele mniejszym niż rozmiary w kierunku długości geomagnetycznej. Charakterystyka kierunkowości promieniowania jest uformowana przez ten falowód.

Dla doświadczalnego wyznaczenia położenia źródła АКР wykorzystywano wyniki pomiarów АКР z dwóch satelitów: eksperymentu POLRAD na satelicie „Interball-2”, i eksperymentu РВИ na satelicie Polar [Gurnett et al., 1995]. Do analizy wybrano interwał równoczesnych pomiarów na obu satelitach, oddalonych od siebie w przestrzeni. Satelita „Interball-2” znajdował się w części łuku zorzowego bliższej równikowi na

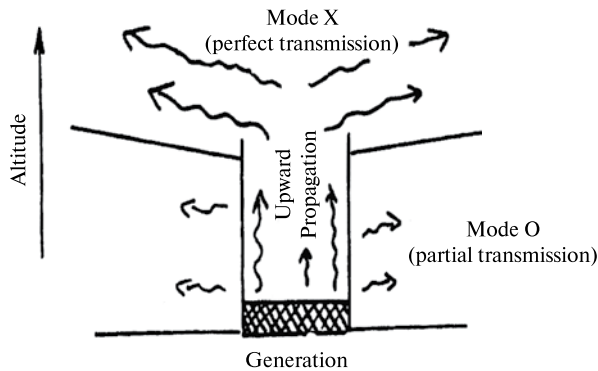


Рис. 2. Схема генерации АКР в ограниченном источнике [Louarn, Le Queau, 1996]. Границами источника могут быть либо неоднородность фоновой плазмы, либо ограниченные размеры потоков энергичных частиц [Буринская, Рош, 2007]. В этом случае диаграмма направленности формируется геометрией источника

Rys. 2. Schemat generacji АКР w źródle ograniczonym [Louarn, Le Queau, 1996]. Granicami źródła może być albo niejednorodność tła plazmy, albo ograniczone rozmiary strumieni energetycznych cząstek [Буринская, Рош, 2007]. W tym przypadku charakterystyka kierunkowości jest formowana przez geometrię źródła

протяженной арки полярных сияний на высотах ~15 000...18 900 км от поверхности Земли, а спутник «Полар» — полярное арки на высотах ~45 000...47 000 км. При этом оба спутника находились приблизительно на одном геомагнитном меридиане (MLT ~22:00 H). Это позволило свести задачу к двумерной, что облегчило обработку результатов измерений.

На рис. 3 приведены две спектрограммы результатов измерений АКР на спутниках «Интербол-2» (верхняя спектрограмма) и «Полар» (нижняя спектрограмма). Для анализа были отобраны два различных типа АКР. Для первого, стационарного, типа (S1) характерны малые вариации амплитуды принимаемого сигнала и малая изменчивость нижней частоты обрезания излучения. Второй тип АКР имеет пуль-

высокоściach 15 000...18 900 km nad powierzchnią Ziemi, a satelita Polar — bliżej biegunowej części łuku na wysokościach ~45 000...47 000 km. Przy tym oba satelity znajdowały się w przybliżeniu na tym samym południku (MLT ~22:00 H). To pozwala sprowadzić zagadnienie do dwuwymiarowego, co ułatwia opracowanie wyników pomiarów.

Na rys. 3 pokazano dwa spektrogramy pomiarów AKR na satelitach „Interball-2” (górný spektrogram) i „Polar” (dolny spektrogram). Do analizy były wybrane dwa różne typy AKR. Pierwszy stacjonarny typ (S1) charakteryzuje mała zmienność amplitudy odbieranego sygnału i mała zmienność częstotliwości dolnego odcięcia promieniowania. Drugi typ AKR ma pulsujący charakter i stanowi następujące po sobie kolejne wybuchy z charakterystycz-

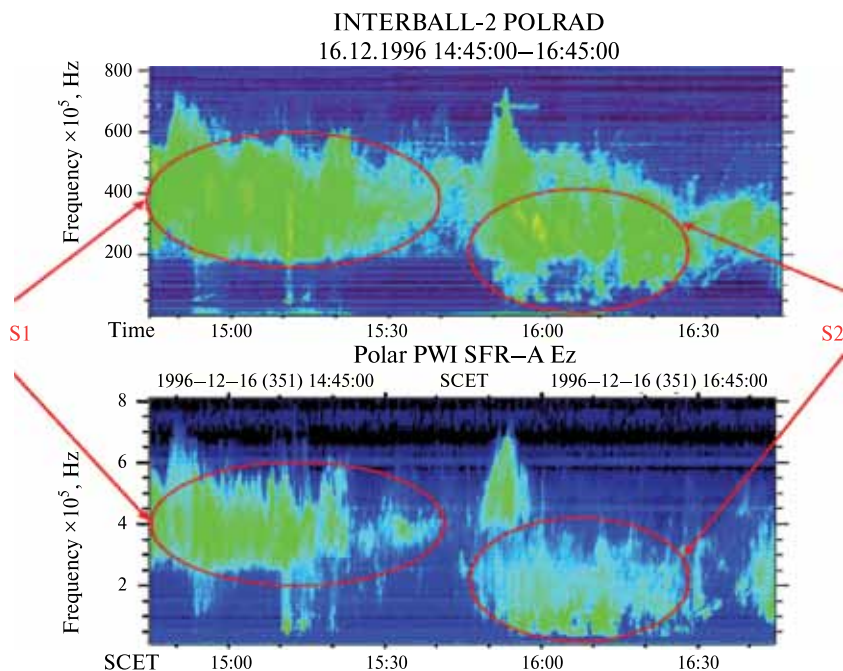


Рис. 3. Динамические спектрограммы результатов одновременных измерений АКР на спутниках «Интербол-2» и «Полар». Анализируемые типы излучения отмечены красным цветом

Rys. 3. Spektrogramy dynamiczne jednoczesnych pomiarów AKR na satelitach „Interball-2” i „Polar”. Analizowane typy promieniowania zostały zaznaczone kolorem czerwonym

сирующий характер и представляет собой последовательность всплесков с характерными временами от нескольких секунд до нескольких десятков секунд. При этом максимум спектра смещен в область низких частот.

В интервале 14:45–15:20 UT наблюдалось стационарное АКР в диапазоне частот 170...600 кГц. Поскольку АКР генерируется вблизи локальной гирочастоты электронов, то наблюдаемый частотный диапазон соответствует высотам генерации излучения 2500...7000 км, которые ниже высот орбиты спутников. Изменения интенсивности излучений и его спектров подобны на двух спутниках, что указывает на один и тот же источник АКР.

Однако наблюдается и устойчивое отличие — нижняя частотная граница АКР на спутнике «Интербол-2» составляет 170 кГц, а на спутнике «Полар» — 260 кГц. Это отличие хорошо заметно на единичных спектрах, приведенных на рис. 4 (см. с. 60), и связано с тем, что на частотах ниже 260 кГц источник АКР расположен таким образом, что спутник «Полар» находился вне диаграммы излучения и не мог зарегистрировать это излучение (рис. 5, см. с. 60).

С использованием отличий в спектрах АКР 170 и 260 кГц, зарегистрированных на двух спутниках, были проведены расчеты диаграммы направленности источника АКР. Результаты вычислений приведены на рис. 6 и 7 (см. с. 61).

Поскольку предполагаем, что источники АКР на частотах 170 и 260 кГц находятся на одной силовой линии, значения инвариантной геомагнитной широты для них должны совпадать. Из результатов расчета местоположения источников излучения АКР можно сделать вывод, что инвариантная геомагнитная широта, на которой происходит генерация, больше 70° (см. рис. 6). На рис. 8 светлыми кружками отмечены те углы, под которыми излучение (на частотах ниже 260 кГц) на спутнике

ными часами твrania od kilku sekund do kilkudziesięciu sekund. W tym przypadku maksimum widma jest przesunięte w kierunku niskich częstotliwości.

W interwale 14:45–15:40 UT obserwuje się stacjonarne АКР w zakresie częstotliwości 170...600 kHz. Ponieważ АКР obserwuje się w pobliżu lokalnej częstotliwości cyklotronowej elektronów, to obserwowany zakres częstotliwości odpowiada wysokościom źródeł generacji promieniowania 2500 do 7000 km, znajdującym się poniżej wysokości satelitów. Zmiany natężenia promieniowania i jego widm są podobne na obu satelitach, co wskazuje na jedno i to samo źródło АКР.

Ale również obserwuje się stałą różnicę — dolna granica częstotliwości АКР na satelicie „Interball-2” wynosi 170 kHz, a na satelicie „Polar” — 260 kHz. Ta różnica daje się łatwo zauważyć na pojedynczych widmach pokazanych na rys. 4, i wynika stąd, że na częstotliwościach poniżej 260 kHz źródło АКР jest tak umiejscowione, że satelita POLAR, który znajduje się na zewnątrz charakterystyki promieniowania, nie może zarejestrować tego promieniowania (rys. 5).

Wysokości generacji АКР na częstotliwościach 170 i 260 kHz były wyznaczone kąta rozwarcia charakterystyki kierunkowości promieniowania i położenia źródła АКР. Wyniki obliczeń zostały pokazane na rysunkach 6 i 7.

Ponieważ oczekujemy że źródła АКР na częstotliwościach 170 i 260 kHz znajdują się na tej samej linii sił, to wartości ich szerokości inwariantnej powinny być zgodne. Na podstawie obliczeń wniosku, że inwariantna szerokość magnetyczna, na której ma miejsce generacja wynosi więcej niż 70° (rys. 6). Na rys. 8 białymi kółkami zaznaczono te kąty dla których nie obserwowano na satelicie POLAR promieniowania (na częstotliwościach poniżej 260 kHz), chociaż dane satelity „Interball” znajdującego

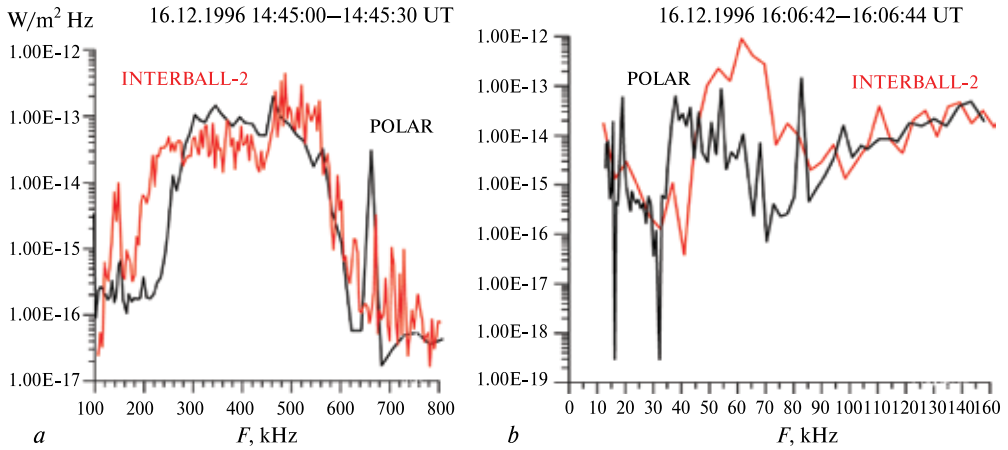


Рис. 4. Единичные спектры АКР по результатам измерений на двух спутниках: *a* — спектры для стационарного АКР (тип 1); *b* — спектры для пульсирующего (тип 2). Спектр АКР первого типа приведен в частотном диапазоне 100...800 кГц, а спектр пульсирующего излучения — в диапазоне частот 15...150 кГц. На рис. *b* наблюдается увеличение интенсивности излучения на низких частотах (10...25 кГц). Это связано с регистрацией свистовой моды излучения, которая здесь не анализируется

Rys. 4. Pojedyncze widma AKR otrzymane z pomiarów na obu satelitach: *a* — są pokazane widma stacjonarnego AKR (typ 1); *b* — pulsującego AKR (typ 2). Widmo AKR pierwszego typu pokazane w zakresie 100...800 kHz, a widmo pulsującego promieniowania w zakresie 15...150 kHz. Na rys. *b* obserwuje się wzrost natężenia promieniowania na niskich częstotliwościach (10...25 kHz). Jest to związane z rejestracją modu świstowego, którego tu nie analizujemy

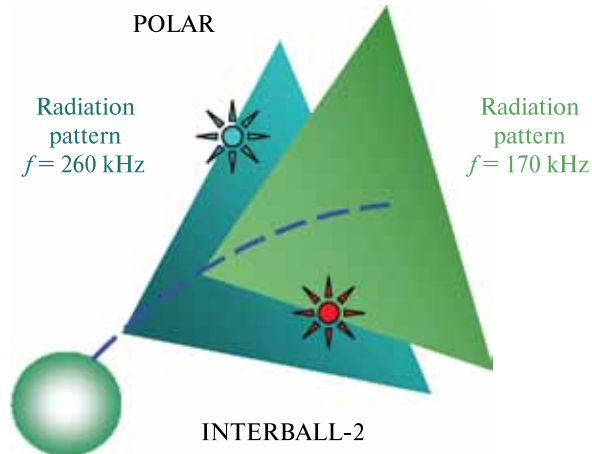


Рис. 5. Схема, поясняющая отличие нижней частоты обрезания АКР на двух спутниках

Rys. 5. Schemat objaśniający różnicę między dolnymi częstotliwościami odcięcia AKR na dwóch satelitach

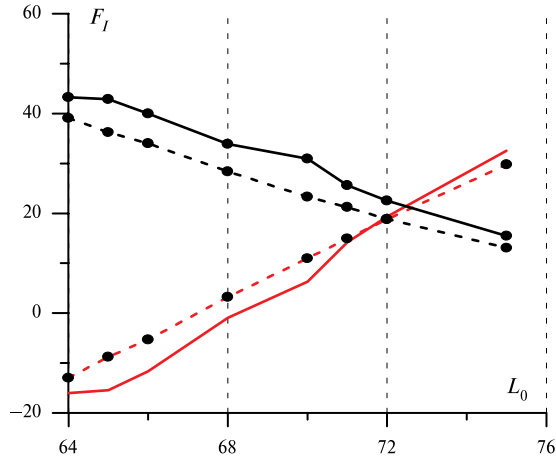


Рис. 6. Результаты вычисления местоположения источников АКР и диаграммы направленности излучения. Красные кривые — расчеты по измерениям на спутнике «Интербол», черные кривые — на спутнике «Полар», сплошные — для частоты 260 кГц, пунктирные — 170 кГц. Пересечение кривых дает положение источников излучения (L_0 — значение геомагнитной широты)

Rys. 6. Wyniki obliczeń położeń źródeł AKR i charakterystyki kierunkowości promieniowania. Czerwone linie — obliczenia oparte na pomiarach na satelicie „Interball”, czarne linie — na satelicie „Polar”, ciągłe linie dla częstotliwości 260 kHz, punktowe dla 170 kHz. Przecięcie linii daje połozenie źródła promieniowania (L_0 — wartość szerokości geomagnetycznej)

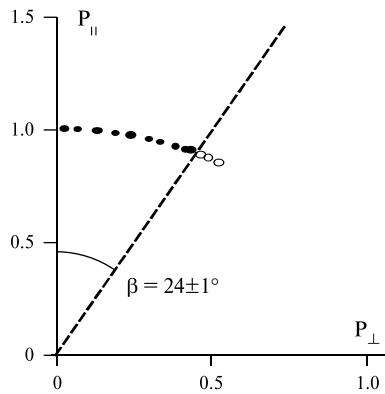


Рис. 7. Результаты расчетов представлены в координатах продольной (вертикальная ось) и поперечной (горизонтальная ось) составляющих нормированного потока излучения по отношению к магнитному полю в источнике

Rys. 7. Wyniki obliczeń przedstawione w postaci normowanej mocy promieniowania we współrzędnej podłużnej (oś pionowa) i poprzecznej (oś pozioma) w odniesieniu do pola magnetycznego w źródle

«Полар» не наблюдалось, хотя по данным спутника «Интербол», находившегося под другим углом по отношению к источнику излучения, сигналы на этих частотах в спектре АКР присутствовали. Таким образом, граница между светлыми и темными кружками является предельным углом диаграммы направленности излучения АКР и составляет $\pm 25^\circ$ по отношению к магнитному полю в точке генерации.

Аналогичный анализ был сделан для пульсирующего источника АКР (см. рис. 6б). В этом случае наблюдается обратное соотношение между нижней частотой обрезания АКР на упомянутых выше спутниках: на спутнике «Интербол» эта частота составляет 45 кГц, а на спутнике «Полар» — 35 кГц. Результаты анализа показывают, что источник пульсирующего АКР находится полярнее по отношению к источнику стационарного излучения, а его диаграмма направленности шире и составляет $\pm 50^\circ$.

Суммируя вышеизложенное, можно сделать следующие выводы:

- диаграмма излучения АКР направлена вдоль магнитного поля в источнике;
- для стационарного источника АКР полный раствор диаграммы излучения составляет $\sim 50^\circ$, что, в целом, согласуется с результатами вычислений углов излучения АКР, полученных в работах [Louarn, Le Queau, 1996; Shreiber, 2005; Pritchett et al., 2002];
- диаграмма направленности пульсирующего источника шире, а его положение полярнее, чем стационарного источника.

Таким образом, экспериментально подтверждено теоретическое предположение, что границы области генерации (представляющие собой либо границы каверны Кальверта, либо границы потоков энергичных частиц) играют определяющую роль в формировании потока мощности АКР.

ся под иным углом względem źródła promieniowania, wskazują że sygnał na tych częstotliwościach był obecny w widmie AKR. Zatem granica pomiędzy jasnymi i ciemnymi kółkami wyznacza kąt graniczny charakterystyki kierunkowości AKR i wynosi $\pm 25^\circ$ względem pola magnetycznego w punkcie generacji.

Analogiczna analiza była przeprowadzona dla pulsującego źródła AKR (rys. 6b). W tym przypadku obserwuje się odwrotny stosunek pomiędzy dolną częstotliwością ucięcia AKR na satelitach INTERBALL i POLAR. Na satelicie INTERBALL ta częstotliwość wynosi 45 kHz, a na satelicie POLAR — 35 kHz. Rezultaty analizy pokazują, że źródło pulsującego AKR znajduje się bliżej bieguna w porównaniu ze źródłem stacjonarnego promieniowania, jego charakterystyka kierunkowości jest szersza i wynosi $\pm 50^\circ$.

W podsumowaniu można sformułować następujące wnioski:

- charakterystyka promieniowania AKR jest skierowana wzdłuż pola magnetycznego w źródle;
- dla stacjonarnego źródła AKR pełny kąt rozwarcia charakterystyki promieniowania wynosi $\sim 50^\circ$, co ogólnie zgadza się z wynikami obliczeń kątów promieniowania AKR uzyskanych w pracach [Louarn, Le Queau, 1996; Shreiber, 2005; Pritchett et al., 2002];
- charakterystyka kierunkowości pulsującego źródła jest szersza, a źródło znajduje się bliżej bieguna w porównaniu ze źródłem stacjonarnym.

W ten sposób potwierdziliśmy doświadczalnie teoretyczne założenie, że granice obszaru generacji (będące albo granicami wnęki Calverta, albo granicami strumieni energetycznych cząstek) odgrywają zasadniczą rolę w formowaniu strumienia mocy AKR.

ЛИТЕРАТУРА

BIBLIOGRAFIA

- Бенедиктов Е. А., Гетманцев Г. Г., Сазонов Ю. А., Тарасов А. Ф.* (1965) Предварительные результаты измерений интенсивного внегалактического радиоизлучения на частотах 725 и 1525 кГц со спутника «Электрон-2» // Космич. исслед. 1965. Т. 3. С. 492.
- Буринская Т. М., Рош Ж.-Л.* (2007) Волноводный режим циклотронной мазерной неустойчивости в областях плазмы с пониженной плотностью // Физика плазмы. 2007. Т. 33 (1). С. 28–37.
- Могилевский М. М., Романцова Т. В., Ханаши Я.* и др. (2007) Об источнике аврорального километрового излучения // Письма в ЖЭТФ. 2007. Т. 86. № 11. С. 819.
- Ханаши Я., Кравчик З., Могилевский М. М.* и др. (1998) Наблюдение аврорального километрового излучения на спутнике «Интербол-2»: эксперимент ПОЛЬРАД // Космич. исслед. 1998. Т. 36. С. 617.
- Benson R. F., Calvert W.* (1979) ISIS-1 observations of the source of AKR // Geophysical Research Letters. 1979. V. 6. P. 479.
- Calvert W.* (1981) The auroral plasma cavity // Geophysical Research Letters. 1981. V. 8. P. 919.
- Gurnett D. A.* (1974) The Earth as a radio source: Terrestrial kilometric radiation // J. Geophysical Research. 1974. V. 79. P. 4227.
- Gurnett D. A., Persoon A. M., Randall R. F.* et al. (1995) The Polar plasma wave instrument // Space Science Rev. 1995. V. 71. P. 597–622.
- Hanasz J., De Feraudy H., Schieber R.* et al. (2001) Wideband bursts of auroral kilometric radiation and their association with UV auroral bulges // J. Geophysical Research. 2001. V. 106. N. A3. P. 3859.
- Kurth W. S., Baumbach M. M., Gurnett D. A.* (1975) Direction finding measurements of auroral kilometric radiation // J. Geophysical Research. 1975. V. 80. P. 2764.
- Louarn P., Le Queau D.* (1996) Generation of the auroral kilometric radiation in plasma cavities. II The cyclotron maser instability in small size sources // Planetary and Space Science. 1996. V. 44. P. 211.
- Pritchett P. L., Strangeway R. J., Ergun R. E., Carlson C. W.* (2002) Generation and propagation of cyclotron maser emissions in the finite auroral kilometric radiation source cavity // J. Geophysical Research. 2002. V. 107. N. A12. P. 1437.
- Schreiber R.* (2005) A simple model of the auroral kilometric radiation visibility // J. Geophysical Research. 2005. V. 110. N. A11. P. 222.
- Wu C. S., Lee L. C.* (1979) A Theory of the Terrestrial Kilometric Radiation // Astrophysical J. 1979. V. 230. P. 621.
- Zarka P.* (1998) Auroral radio emissions at the outer planets: Observations and theories // J. Geophysical Research. 1998. V. 103. N. 20. P. 159.

The Russian-Polish project RADIATION is aimed on studying one of the most powerful and mysterious phenomena of the inner magnetosphere of the Earth — Auroral kilometric radiation (AKR). Interboll-2 spacecraft was launched in 1996, the Polrad experiment (Hanasz, et al., 1998) installed onboard the spacecraft carried out measurements of spectral and polarization characteristics of the AKR. The POLRAD instrument performed first onboard calculation of covariance matrix of the electric field and determinates the full set of Stokes parameters. The project RADIATION has been based on a wealth of data gathered by the POLRAD experiment onboard the Interball-2 spacecraft.

6 СТРУКТУРА

Руководитель проекта
с российской стороны:

С. САВИН

Руководитель проекта
с польской стороны:

Я. БЛЕНЦКИ

Проект направлен на экспериментальное изучение тонкой структуры волновых процессов в пограничных слоях магнитосферы Земли, а также процессов переноса через границы, которые в бесстолкновительной плазме определяются, главным образом, взаимодействиями волна-частица.

Основной экспериментальной базой наших исследований являются плазменно-волновые данные со спутников «Интербол-1», «Кластер» (Cluster), «Темис» (Themis), «Геотейл» (Geotail), «Винд» (Wind), «Асе» (Ace), «Деметер» (Demeter) и др.

Основное направление — изучение роли структурированных в пространстве и времени потоков плазмы в пограничных магнитосферных слоях [Savin et al., 2005a, b, 2006, 2008, 2010], а также связанных с ними всплесков плазменных излучений [Blecki et al., 2005, 2007; Błęcki et al., 2006]. Наиболее интересными с точки зрения энергетики и статистики плазменных процессов являются сверхбыстрые плазменные струи (СПС), регулярно наблюдаемые в магнитослое (в возмущенном земным магнитным диполем течении плазмы между головной ударной волной и границей магнитосферы — магнитопаузой). Динамическое давление в СПС может в несколько раз превышать давление в источнике энергии и массы — в сверхзвуковом солнечном ветре (СВ), а также магнитное давление внутри магнитосферы непосредственно под магнитопаузой. Имея поперечный размер в несколько тысяч километров и продольный — сравнимый с толщиной магнитослоя, СПС способны продавливать магнитопаузу на глубину, сравнимую с толщиной среднего равнове-

6 STRUKTURA

Kierownik projektu
ze strony Rosji:

S. SAVIN

Kierownik projektu
ze strony Polski:

J. BŁECKI

Celem projektu jest na eksperymentalne badanie subtelnej struktury procesów falowych w warstwach granicznych magnetosfery oraz procesów przenoszenia plazmy przez te granice. W plazmie bezzderzeniowej są one realizowane zasadniczo przez oddziaływania fala-cząstka.

Dane eksperymentalne używane w tych badaniach to pomiary plazmowo-falowe pochodzące głównie z satelitów „Inerball-1”, „Cluster”, „Themis”, „Geotail”, „Wind”, „Ace” i „Demeter”, ale także z innych.

Główne zadanie to badanie roli strumieni plazmy w warstwach granicznych magnetosfery wykazujących wewnętrzną strukturę zarówno przestrzenną jak i czasową [Savin et al., 2005a, b, 2006, 2008, 2010], ale także związanych z nimi wybuchów emisji fal plazmowych [Blecki et al., 2005, 2007; Błęcki et al., 2006]. Najciekawszymi, z punktu widzenia energetyki i statystyki procesów plazmowych są tzw. superszybkie strumienie plazmy (SPS) regularnie obserwowane w otoku magnetosferycznym (w obszarze przepływu plazmy między czołowym frontem uderzeniowym a granicą magnetosfery-magnetopauzą). Ciśnienie dynamiczne w SPS może kilkakrotnie przewyższać ciśnienie w źródle energii i plazmy czyli w ponaddźwiękowym wietrze słonecznym (SW) a także ciśnienie pola magnetycznego wewnątrz magnetosfery bezpośrednio pod magnetopauzą. Mając rozmiar poprzeczny kilka tysięcy kilometrów a podłużny porównywalny z grubością otoka magnetosferycznego, SPS mogą przenikać przez magnetopauzę na głębokość porównywalną z grubością otoka magnetosferycznego a nawet przechodzić przez wysokoszerokościową magnetopauzę

ного магнитослоя, и даже проходить сквозь высокоширотную магнитопазу непосредственно в геомагнитный хвост. Ни механизмы образования СПС, ни их повторяющиеся параметры, напоминающие фононы или солитоны, пока еще не объяснены. Вклад СПС в общий баланс потока плазмы, в обтекание магнитосферы солнечным ветром в среднем оценивается в 30 %, хотя при установлении новых равновесных состояний внешней магнитосферы при изменении параметров СВ или при внутренней неустойчивости обтекания вклад СПС может быть решающим.

Нами прослеживается прохождение плазменно-волновых структур от границ магнитосферы до ионосферы, что позволяет определить способы передачи энергии и массы внутрь магнитосферы, а также выявить соответствующие глобальные магнитосферно-ионосферные резонансы.

Итак, мы, с одной стороны, привлекаем для анализа данные все большего количества уже осуществленных и осуществляемых экспериментов, с другой стороны, начинаем совместные работы в рамках перспективных проектов РОЙ и СТРАННИК, которые, вместе с проектами SCOPE (Япония и Канада) и MAGNETOSPHERIC MULTI SCALE (США), предоставят возможность изучать структуризацию погранслоев между движущимися средами одновременно на 3–4 масштабах.

Помимо чисто научного интереса, наблюдения солнечного ветра и его взаимодействия с магнитосферой имеют большое практическое значение, так как плазма солнечного ветра является основным агентом, с помощью которого активные процессы на Солнце оказывают влияние на состояние околоземного космического пространства, магнитосферы и ионосферы Земли. Изучение динамики геомагнитосферы необходимо для решения как научных, так и практических задач в области

bezpośrednio wgłąb ogona magnetosfery. Ani mechanizm powstawania SPS ani ich powtarzające się parametry przypominające fonony lub solitony nie zostały do tej pory wyjaśnione. Wkład SPS w ogólny bilans strumienia plazmy w opływie magnetosfery przez wiatr słoneczny ocenia się średnio na 30%, chociaż w tworzeniu się nowego stanu równowagi zewnętrznej magnetosfery z wiatrem słonecznym, przy zmianie parametrów WS, lub w sytuacji wystąpienia niestabilności opływu, wkład SPS może mieć znaczenie decydujące.

Śledzimy przechodzenie plazmowo-falowych struktur od granicy magnetosfery do jonosfery, co pozwala na określenie sposobu przekazu energii i masy wewnątrz magnetosfery a także pokazać odpowiadające im globalne magnetosferyczno-jonosferyczne rezonanse. Dla realizacji tego zadania z jednej strony używamy dane z już zrealizowanych eksperymentów satelitarnych a z drugiej strony rozpoczynamy wspólne prace dla przygotowania nowych perspektywicznych projektów takich jak ROJ i STRANNIK, które wspólnie z projektami SCOPE (Japonia i Kanada) oraz MAGNETOSPHERIC MULTISCALE (USA) pozwolą badać procesy tworzenia struktur warstw granicznych między przepływającymi ośrodkami w 3 wymiarach i w czasie.

Observacje wiatru słonecznego i jego oddziaływania z magnetosferą mają obok czysto naukowego także ogromne znaczenie praktyczne, ponieważ plazma wiatru słonecznego jest głównym czynnikiem, który jest pośrednikiem w przekazywaniu wpływu procesów aktywnych na Słońcu na stan przestrzeni kosmicznej w pobliżu Ziemi — magnetosfery i jonosfery. Badanie magnetosfery ziemskiej jest ważne tak z powodów czysto naukowych jak i praktycznych znajdujących szerokie zastosowanie w kosmonautyce, telekomunikacji, meto-

космонавтики, радиосвязи, метеорологии и климатологии и тех видов деятельности, которые существенно от них зависят, в частности сельского хозяйства, биологии и медицины. Этот аспект солнечно-земных связей, названный в начале XX века «космической погодой», в последнее время пользуется повышенным интересом как у научных работников, так и у специалистов по энергетике, здравоохранению и телекоммуникациям.

Проблема исследования электромагнитных явлений, регулирующих проникновение энергии и вещества солнечного ветра в магнитосферу и ионосферу Земли, появилась при первых же запусках искусственных спутников и связана с сильным возмущением концентрации частиц ионосферы и возникновением магнитных бурь, приводящих к таким возмущениям на земной поверхности как отключение электрических цепей в целых регионах (например, во всей северной части США и южной части Канады в 1974 году).

К настоящему времени накоплен значительный объем знаний по этой тематике. Несмотря на это, сложность процессов на границе магнитосферы, включающих сильную перемежаемую турбулентность, не позволяет получить достоверные прогнозы наземных возмущений на основе данных с многочисленных спутников во внешней магнитосфере и солнечном ветре. Это связано с фундаментальными проблемами физики турбулентной плазмы. Причем похожие задачи возникают и в пограничных слоях термоядерных установок, где повышенный аномальный перенос из центральных областей в пристеночные области препятствует надежному удержанию плазмы для поддержания устойчивой термоядерной реакции. Экспериментальные исследования флуктуаций параметров плазмы и их влияния на процессы переноса через плазменные границы продолжались на

метеорологии, климатологии а также в таких областях активности людской как сельское хозяйство, медицина и биология. Этот аспект связей Солнце-Земля названы został na początku XX wieku „pogodą kosmiczną” а в ostatnich latach cieszy się znaczącym zainteresowaniem tak wśród naukowców jak i specjalistów w dziedzinie energetyki, ochrony zdrowia i telekomunikacji.

Zagadnienie badania zjawisk elektromagnetycznych odpowiedzialnych za przenikanie energii i plazmy wiatru słonecznego do magnetosfery а następnie do jonosfery pojawiło się już przy pierwszych lotach sztucznych satelitów i związane było z silnym zaburzeniem koncentracji cząstek w jonosferze i rozwojem burz magnetycznych prowadzących do zaburzeń magnetycznych obserwowanych na powierzchni Ziemi wywołujących awarie elektrycznych sieci energetycznych na dużych obszarach (tak jak to miało miejsce w całej wschodniej części Stanów Zjednoczonych а także w południowej części Kanady w roku 1974).

Obecnie poziom wiedzy na temat zagadnień pogody kosmicznej jest bardzo wysoki w porównaniu z okresem pierwszych sztucznych satelitów. Jednak mimo tego złożoność procesów na granicy magnetosfery, w tym silna turbulencja plazmy, nie pozwala jeszcze na dostatecznie wiarygodne prognozowanie zaburzeń na powierzchni Ziemi na podstawie danych otrzymywanych z wielu satelitów pracujących w magnetosferze i wietrze słonecznym. Jest to związane z fundamentalnymi zagadnieniami fizyki turbulencja plazmy. Z podobnymi problemami spotykamy się w warstwach granicznych konstrukcji budowanych do kontrolowanej syntezy jądrowej, gdzie zwiększony transport plazmy z obszarów centralnych do ścianek jest jednym z podstawowych mechanizmów utrudniających utrzymywanie plazmy i przebiegu stabilnej reakcji syntezy. Eksperymentalne badanie fuktuacji parametrów plazmy i ich wpływu na procesy transportu przez grani-

основе сравнения уже имеющихся данных со спутников «Прогноз-8 и -10», «Интербол-1» (рис. 1) и «Магион-4» с новыми плазменно-волновыми данными, получаемыми на спутниках «Кластер» (Cluster), «Деметер» (Demeter) и «Темис» (Themis).

Основным достижением нашего проекта является обнаружение мелко-масштабных структур на внешних магнитосферных границах — плазменных струй и магнитных барьеров, — в которых концентрируется кинетическая и магнитная энергия, что обеспечивает нелокальное и существенно нелинейное взаимодействие плазмы солнечного ветра с геомагнитным препятствием.

Возмущенный магнитослоей содержит всплески кинетического давления — *струи* (рис. 2, см. с. 68) — с амплитудой в несколько раз выше, чем давление в невозмущенном солнечном ветре, ~20 % струй должны деформировать магнитопаузу на высоких широтах. Это противоречит предсказываемому

це plazmowe były prowadzone na podstawie porównania wcześniejszych danych z satelitów „Prognoz-8 i -10”, „Interball-1” (rys. 1) i jego subsatellity „Magion 4” z nowymi danymi plazmowo falowymi z satelitów „Cluster”, „Demeter” i „Themis”.

Najważniejszym wynikiem naszych badań jest odkrycie drobnoskalowych struktur na zewnętrznych granicach magnetosfery — strumieni plazmowych i barier magnetycznych, — w których skupia się kinetyczna i magnetyczna energia, co zapewnia nielokalne i silnie nieliniowe oddziaływanie plazmy wiatru słonecznego z geomagnetyczną przeszkodą.

Zaburzony otok magnetosferyczny zawiera obszary o podwyższonym ciśnieniu kinetycznym — strumienie (rys. 2) — o amplitudzie ciśnienia kilka razy większej aniżeli ciśnienie w niezaburzonym wietrze słonecznym. Około 20 % strumieni powinno deformować magnetopauzę w wysokich szerokościach. Jest to sprzecz-

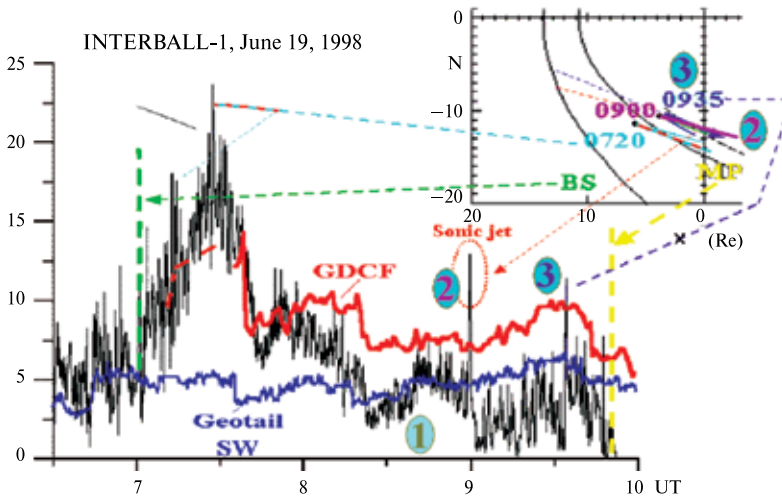


Рис. 1. Поток ионов от Солнца nV_x по данным спутников «Интербол-1» и «Геотейл» 19 июня 1998 года в солнечном ветре и из газодинамической модели (GDCF). Вставка: направления потоков в плоскости XZ GSE относительно магнитопаузы (MP) и ударной волны (BS)

Рис. 1. „Interball-1”, 19.07.1998. Strumień jonów w kierunku ogona nV_x z satelitów „Interball-1” i „Geotail” w wietrze słonecznym oraz z modelu gazodynamicznego (GDCF). Obok: kierunek strumienia w płaszczyźnie XZ GSE względem magnetopauzy i frontu uderzeniowego

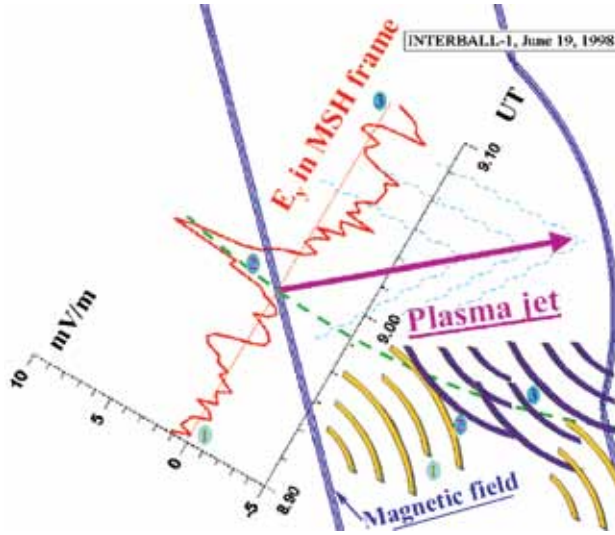


Рис. 2. Схема ускорения струи «2» (см. рис. 1) альвеновской структурой (E_y в системе отсчета MSH) на границе (пунктир) сверх- и субальвеновских потоков; волнообразные линии показывают интерференционную картину, возникающую при взаимодействии падающих и отраженных волн

Rys. 2. Schemat przyspieszania strumienia '2' (patrz rys. 2) przez stojącą strukturę (E_y w układzie MSH) na granicy między nad i pod alfenowskimi strumieniami; pofalowane linie pokazują obraz interferencyjny powstały przez oddziaływanie fali padającej z falą odbitą

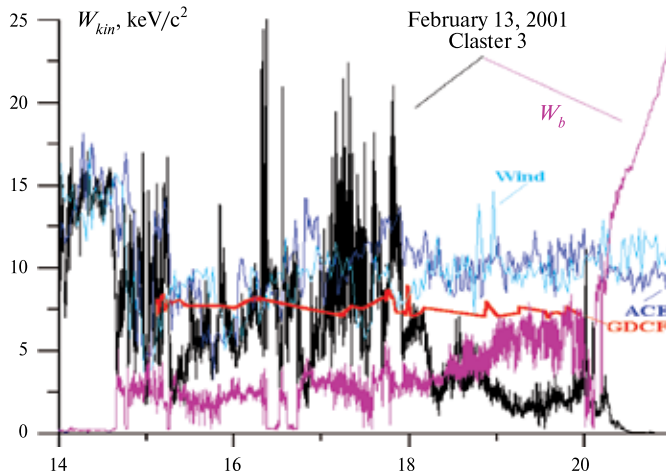


Рис. 3. В данных спутника КЛАСТЕР также видны пики в кинетическом давлении W_{kin} относительно газодинамической модели (красный цвет); пренебрежимо малое магнитное давление W_b исключает магнитное пересоединение как источник ускорения струй

Rys. 3. Cluster pokazał istnienie olbrzymich skoków wartości ciśnienia dynamicznego W_{kin} większych od tego co przewiduje gazodynamika, oraz zaniedbywalnie małe ciśnienie magnetyczne W_b co wyklucza rekoneksję jako źródło tych strumieni

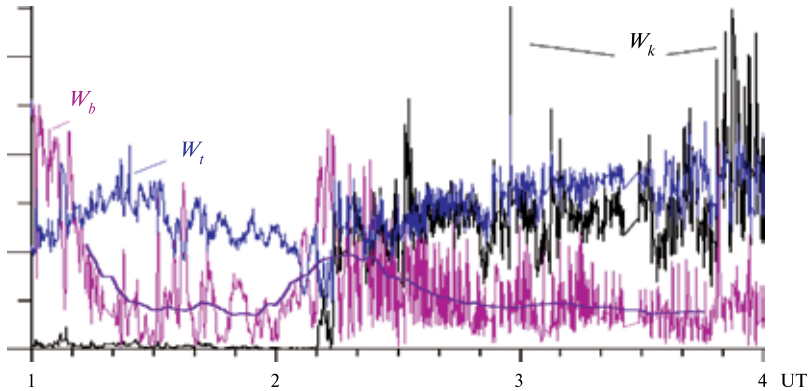


Рис. 4. Магнитный барьер: W_b — магнитное давление; W_t — тепловое давление ионов; W_k — кинетическое давление ионов

Rys. 4. Bariera magnetyczna: W_b — ciśnienie magnetyczne; W_t — ciśnienie termiczne jonów; W_k — ciśnienie kinetyczne jonów

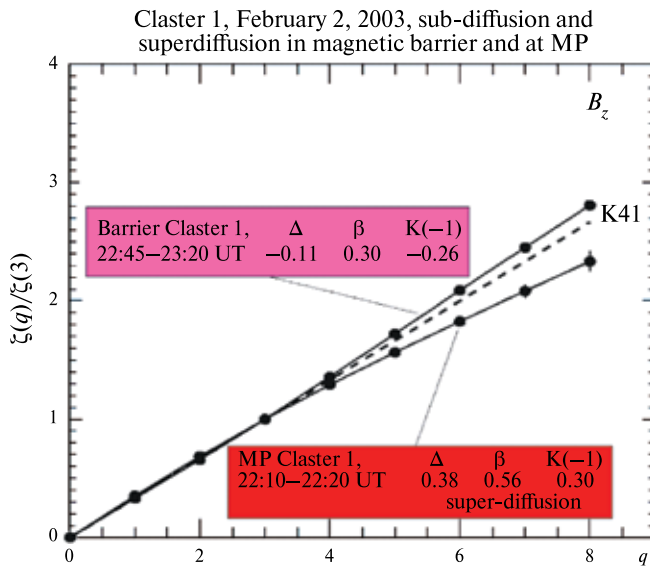


Рис. 5. Сравнение статистических данных с лог-пуассоновским распределением вероятностей. Нами впервые определен характер диффузии в магнитосферных погранслоях: для магнитопаузы характерна супердиффузия; для границы движущейся и застойной плазмы — диффузия. Данные спутника «Кластер-1» 02.02.2003 по магнитной компоненте B_z

Rys. 5. Porównując dane statystyczne z logarytmiczno- poissonowskim rozkładem prawdopodobieństw, określiliśmy po raz pierwszy charakter dyfuzji w warstwach granicznych magnetosfery: na magnetopauzie ma ona właściwości superdyfuzji; dla poruszającej się granicy oraz dla plazmy w obszarze stagnacji jest to dyfuzja. Składowa B_z pola magnetycznego Dane z satelity „Cluster-1” z dnia 02.02.2003

МГД превращению на ударной волне кинетической энергии солнечного ветра в тепловую: в термализованных струях кинетическое давление растет (рис. 3, см. с. 68). Растущий со временем коэффициент диффузии — *супердиффузия* — должен существенно увеличить проникновение солнечной плазмы в магнитосферу. Снаружи магнитопаузы *в коллапсирующем магнитном барьере* (рис. 4, см. с. 69), разделяющей обтекающую и застойную плазму, наоборот, *диффузия* (рис. 5, см. с. 69) ограничивает обмен импульсом между потоком и погранслоем.

В работе [Kuznetsov et al., 2007] альфеновский коллапс был определен как трехмерный процесс бесконечного нарастания магнитного поля, который может происходить в МГД-приближении в плазме с большим тепловым давлением вследствие «опрокидывания» магнитных силовых линий, что может быть скомпенсировано обратной диффузией D_H магнитного поля вследствие градиента давления с масштабом ионного гирорадиуса; соответствующая равновесная скорость u оценивается из приведенного уравнения, что для характерных параметров соответствует измеренной скорости, близкой к тепловой скорости ионов:

$$D_H \Delta \mathbf{B} + \text{curl}[\mathbf{u} \times \mathbf{B}] = 0, \text{ или } (\text{от } u_{\perp} = D_H \frac{\mathbf{B} \times \text{curl} \mathbf{B}}{|\mathbf{B}|^2}.$$

не з прzerwidywaniami MHD zamiany na froncie uderzeniowym energii kinetycznej wiatru słonecznego — w energię cieplną; w strumieniach stermalizowanych ciśnienie kinetyczne wzrasta (rys. 3)! Rosnący w czasie współczynnik dyfuzji — *superdyfuzja* — powinien w istotnym stopniu zwiększyć przenikanie plazmy wiatru słonecznego do magnetosfery. Na zewnątrz magneto-pauzy *w kolapsującej barierze magnetycznej* (rys. 4), rozdzielającej plazmę opływającą od plazmy w obszarze stagnacji odwrotnie *dyfuzja* (rys. 5) ogranicza wymianę pędu między przepływem a warstwą graniczną.

Zgodnie z pracą [Kuznetsov et al., 2007] określili alfwenowski kolaps jako 3-wymiarowy proces nieskończonego narastania pola magnetycznego, który wg przybliżenia MHD może wystąpić w plazmie o dużym ciśnieniu magnetycznym w wyniku „zawijania” linii pola magnetycznego, które z kolei może być kompensowane przez powrotną dyfuzję D_H pola magnetycznego spowodowaną przez gradient ciśnienia o skali promienia larmorowskiego dla jonów; odpowiadająca temu prędkość równowagowa u może być oszacowana za pomocą przytoczonego poniżej równania, co dla charakterystycznych parametrów daje wartość bliską prędkości termicznej prędkości jonów:

ЛИТЕРАТУРА

- Blecki J., Savin S., Cornilleau-Wehrlin N., Kossacki K., Parrot M., Nemecek Z., Safrankova J., Wronowski R., Kudela K., Santolik O. (2005) The Low Frequency Plasma Waves in the Outer Polar Cusp: Review of Observations From Prognoz-8, Magion-4, Interball-1 and Cluster Satellites // Survey in Geophysics. 2005. V. 26. N. 1. P. 177–191.
- Blecki J., Savin S., Parrot M., Wronowski R. (2007) Nonlinear Interactions of the Low Frequency Plasma Waves in the Middle-altitude Polar Cusp as Observed by Prognoz-8, Interball-1 and Cluster Satellites // Acta Geophysica. 2007. V. 55. N. 4. P. 459–468.
- Błęcki J., Cornilleau-Wehrlin N., Parrot M., Savin S., Amata E., Bucik R., Wronowski R. (2006) Instability of the Energetic Electron Beams in the Polar Cusp-Observations by Cluster and Interball-1 // Proc. Symp. 5th Years of CLUSTER in Space. 2006. ESA, Noordwijk. P. 598.

BIBLIOGRAFIA

- Kuznetsov E. A., Savin S. P., Amata E., Dunlop M., Khotyaintsev Y., Zelenyi L. M., Panov E. V., Buchner J., Romanov S. A., Blecki J., Rauch J. L., Nikutowski B.* (2007) Strong space plasma magnetic barriers and Alfvénic collapse // *JETP Letters*. 2007. V. 85. N. 5. P. 288–293.
- Savin S., Song P., Skalsky A., Zelenyi L., Amata E., Buechner J., Blecki J., Avanzo A., Borodkova N., Consolini G., Farrugia C., Fritz T. A., Kawano H., Klimov S., Lutsenko V., Maynard N., Nemecek Z., Nikutowski B., Panov E., Pickett J., Parrot M., Rauch J. L., Romanov S., Russell C. T., Safrankova J., Sandahl I., Sauvaud J. A., Smirnov V., Stasiewicz K., Trotignon J. G., Yermolaev Yu.* (2005a) Magnetosheath Interaction with High Latitude Magnetopause // *Survey in Geophysics*. 2005. V. 26. N. 3. P. 95–133.
- Savin S., Zelenyi L., Amata E., Buechner J., Blecki J., Greco A., Klimov S., Lopez R. E., Nikutowski B., Panov E., Pickett J., Rauch J. L., Romanov S., Song P., Skalsky A., Smirnov V., Taktakishvili A., Veltry P., Zimbaro G.* (2005b) Magnetosheath interaction with high latitude magnetopause: Dynamic flow chaotization // *Planetary and Space Sciences*. 2005. V. 53. N. 3. P. 133–140.
- Savin S., Amata E., Andre M., Dunlop M., Khotyaintsev Y., Decreau P. M. E., Rauch J. L., Trotignon J. G., Buechner J., Nikutowski I. B., Blecki J., Skalsky A., Romanov S., Zelenyi L., Buckley A. M., Carozzi T. D., Gough M. P., Song P., Rem H., Volosevich A., Alleyne H., Panov E.* (2006) Experimental study of nonlinear interaction of plasma flow with charged thin current sheets: 2. Hall dynamics, mass and momentum transfer // *Nonlinear Processes in Geophysics*. 2006. V. 13. P. 377–392.
- Savin S., Amata E., Zelenyi L., Treumann T. A., Lucek E., Khotyaintsev Yu., André M., Budaev V., Safrankova J., Nemeček Z., Buechner J., Alleyne H., Song P., Blecki J., Rauch J. L., Romanov S., Skalsky A.* (2008) Observation of collimated, very high kinetic-pressure plasma jets: Implications for flow dynamics and anomalous transport in the Earth’s magnetosheath // *JETP Letters*. 2008. V. 87. N. 11. P. 691–697.
- Savin S., Zelenyi L., Amata E., Budaev V., Buechner J., Blecki J., Balikhin M., Klimov S., Korepanov V., Kozak L., Kudryashov V., Kunitsyn V., Lezhen L., Milovanov A., Nemecek Z., Nesterov I., Novikov D., Panov E., Rauch J. L., Rothkaehl H., Romanov S., Safrankova J., Skalsky A., Veselov M.* (2010) ROY — A multiscale magnetospheric mission // *Planetary and Space Science*. 2010. doi:10.1016/j.pss.2010.05.001.
- Volosevich A. V., Savin S. P., Blecki J., Amata E.* (2007) Theoretical and experimental diagnostics of coherent nonlinear structures in space plasma // *Proc. Scientific-Practical Conf. “Optics of non-uniform structures”*. Mogilev, Belarus, 2007.

Our Project is aimed at experimental studies of fine structure of wave processes in magnetospheric boundary layers, along with transport processes across the boundaries, which in collisionless plasma are generally due to wave-particle interactions. Our investigations are mainly based on the plasma and wave data from satellites Interball-1, Cluster, Themis, Geotail, Wind, Ace, Demeter etc. We are concentrated on the role of plasma flows being structured in space and time in the magnetospheric boundary layers [Savin et al., 2005, 2006, 2008, 2010], along with the respective plasma wave bursts [Blecki et al., 2005–2007]. The most energetic events of this kind are Superfast Plasma Steams (SPS), which are regularly detected in magnetosheath (MSH, being disturbed plasma flow between the bow shock and magnetopause — outer magnetospheric boundary). The SPS dynamic pressure can exceed in several times that of solar wind (SW, being the supersonic plasma flow from the Sun which supplies the energy and mass into the magnetosphere), as well as exceed a magnetic pressure under the magnetopause. The SPS have transverse size of several thousand km and their parallel one is comparable with that of average MSH. SPS are able to deform the magnetopause on the depth up to average MSH one. Sometimes SPS could skew the flank magnetopause and penetrate into geomagnetic tail. We know neither SPS generation mechanism, nor why the SPS parameters are rather standard so that the SPS resemble phonons or solitons. SPS average input into the MSH flow balance can be over 30 %, while they can dominate at the dynamic stages of new equilibrium establishing in response to the SW parameter changes or to the inherently unstable streamlining.

We map waveplasma structures throughout magnetosphere until ionosphere for displaying of the energy and mass transfer ways and the respective global magnetospheric/ ionospheric resonances. So, from one side, we enlarge our analysis database by that of maximum available executed and on-going experiments, from another side, we start common work on the future Projects ROY and STRANNIK, which (together with the projects SCOPE (Japan, Canada) and MAGNETOSPHERIC MULTI SCALE (USA) should enable to study the structurization of boundary layers between moving plasmas at 3...4 scales simultaneously.

7 ИОНОСФЕРА: МОДЕЛИРОВАНИЕ ИОНОСФЕРНОЙ ПОГОДЫ ДЛЯ РАДИОСВЯЗИ

Руководитель проекта
с российской стороны:

Т. ГУЛЯЕВА

Руководитель проекта
с польской стороны:

И. СТАНИСЛАВСКА

Целью совместного проекта между ИЗМИРАН и Центром космических исследований (ЦКИ) ПАН является предоставление в реальном времени в сети Интернет ионосферных параметров, характеризующих космическую погоду в ионосфере. ЦКИ исполняет роль регионального Центра рассылки ионосферных данных в Европе (Ionospheric Despatch Center in Europe, IDCE), предоставляя с 1997 года стандартные ионосферные характеристики в реальном времени на странице Интернет ЦКИ <http://www.cbk.waw.pl/IDCE/> [Stanisławska et al., 1999]. В рамках данного проекта в ИЗМИРАН в 2006 году создан сайт «Ионосферная погода» <http://www.izmiran.ru/services/iweather>. На нем представлены результаты анализа ионосферных характеристик для определения спокойных и возмущенных условий в ионосфере. Информация обновляется ежедневно. Данные за прошедшие месяцы хранятся в архиве. Каталог возмущенных периодов в ионосфере предоставляется на сайтах ЦКИ и ИЗМИРАН. Ниже кратко изложены разработанные по данному проекту соответствующие методы, модели и программное обеспечение, в том числе методика реконструкции недостающих наблюдений ионозонда, прогноз ионосферной критической частоты с заблаговременностью в 24 часа, формирование каталога спокойных и возмущенных дней в ионосфере, система индексов ионосферной возмущенности, список планетарных ионосферно-плазмосферных бурь, карты ионосферных параметров.

Мониторинг космической погоды в ионосфере производится мировой сетью ионозондов и глобальной сетью приемников сигналов навигационных спутников — IGS GPS. Максимальная плотность электронов в ионосфе-

7 JONOSFERA: MODELOWANIE POGODY JONOSFERYCZNEJ DLA ŁĄCZNOŚCI RADIOWEJ

Prowadzący projekt
ze strony Rosyjskiej:

T. GULYAEVA

Prowadzący projekt
ze strony Polskiej:

I. STANISŁAWSKA

Celem projektu prowadzonego przez IZMIRAN i Centrum Badań Kosmicznych PAN jest przedstawienie parametrów jonosferycznych charakteryzujących pogodę kosmiczną w czasie rzeczywistym w Internecie. W CBK PAN działa Regionalne Centrum Ostrzegawcze organizacji ISES oraz od 1997 r. Europejskie Centrum Przekazu danych Jonosferycznych (Ionospheric Despatch Center in Europe, IDCE) <http://www.cbk.waw.pl/IDCE/> [Stanisławska et al., 1999]. W ramach obecnego projektu od 2006 r. w IZMIRAN zbudowana została strona „Pogoda Jonosferyczna” <http://www.izmiran.ru/services/iweather>. Zawiera ona analizę charakterystyk jonosferycznych której wynikiem jest określenie spokojnych i zaburzonych stanów jonosfery. Katalog tych zaburzeń przedstawiony jest na stronach CBK PAN i IZMIRAN, a także opisane są metody zastosowane do jego otrzymania, prognoza 24 godzinna jonosferycznej częstotliwości krytycznej, indeksy zaburzeń jonosferycznych, lista planetarnych jonosferyczno-plazmosferycznych burz, oraz mapy parametrów jonosferycznych.

Monitorowanie pogody kosmicznej w jonosferze odbywa się przy pomocy światowej sieci jonosond i globalnej sieci IGS odbiorników GPS. Maksymalna koncentracja elektronowa (związana z częstotliwością krytyczną warstwy F₂, *foF2*) i całkowi-

ре (критическая частота слоя F2, $foF2$) и полное электронное содержание в ионосфере и плазмосфере (Total Electron Content, TEC) предоставляются на страницах Интернет в ряде центров данных. Максимальная и интегральная ионизация являются управляющими параметрами современных моделей ионосферы, таких как Международная модель ионосферы (IRI), модель ITU-R и др., используемые для оценки и прогноза космической погоды в радиосвязи и навигации.

Оперативное использование модели требует непрерывного ряда текущих управляющих параметров, однако данные наблюдений ионозонда имеют пробелы вследствие появления экранирующего спорадического слоя E, явления F-рассеяния, поглощения радиосигнала и других физических или технических причин, которые наиболее часто случаются ночью в высоких широтах во время ионосферных возмущений. На рис. 1 приведен пример

та концентрация электронова в ионосфере и плазмосфере (Total Electron Content, TEC) przedstawiana jest w szeregu stacji dostępnych w Internecie. Parametry maksymalnej i scałkowanej jonizacji są podstawowymi parametrami dzisiejszych modeli jonosfery, takich jak Międzynarodowy Model Referencyjny, IRI, model ITU-R i innych wykorzystywanych dla oceny i prognozy pogody kosmicznej w łączności radiowej i nawigacji.

Operacyjne wykorzystywanie modelu wymaga ciągłego dostępu do parametrów pozwalających na uruchamianie modeli w czasie rzeczywistym, podczas gdy pomiary z jonosond zawierają naturalne braki wynikające z ekranującej warstwy E, rozprzyszczenia w warstwie F, pochłaniania sygnału radiowego i szeregu innych przyczyn, szczególnie nocą na wysokich szerokościach w czasie zaburzeń jonosferycznych. Rysunek 1 przedstawia przykład braków pomiarów częstotliwości krytycznej $foF2$

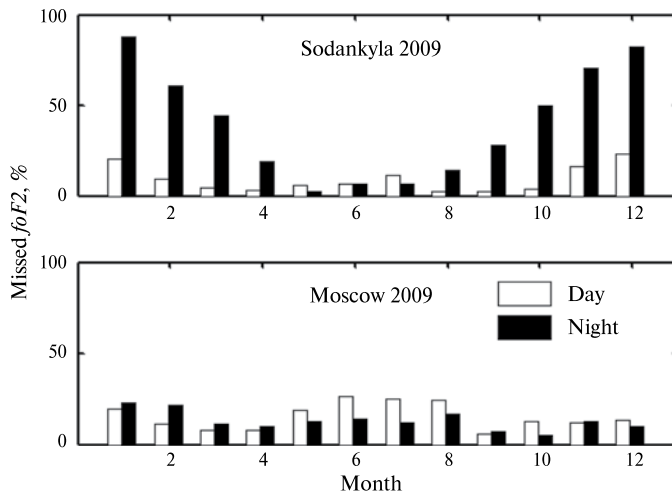


Рис. 1. Процент ненаблюдаемых значений критической частоты слоя F2 днем и ночью в высокоширотной зоне на станции Соданкюла (67,4° N; 26,6° E) и среднеширотной станции Москва (55,5° N; 37,3° E) в год минимума солнечной активности (2009)

Rys. 1. Procentowa nieobecność obserwacji częstotliwości krytycznej warstwy $foF2$ za dnia i w nocy na wysokoszerokościowej stacji Sodankyla (67.4° N; 26.6° E) i na średnioszerokościowej stacji Moskwa (55.5° N; 37.3° E) w roku minimum słonecznej aktywności (2009)

распределения пропусков наблюдений критической частоты $foF2$ в высоких широтах (Соданкюла), где ночные значения невозможно наблюдать зимой в более 80 % времени, в то время как на средних широтах (Москва) пропуски в данных наблюдений дигизонда при автоматическом сканировании ионограммы составляют от 10 до 20 %.

Пропущенные наблюдения ионозонда реконструируются путем *клонирования данных* наблюдений другой станции в пределах их радиуса корреляции [Gulyaeva et al., 2008]. При этом предполагается, что отклонения от спокойных медианных условий синхронизированы в исходных и клонированных данных.

В то время как глобальные модели ионосферы, такие как IRI, модель ITU-R и др., позволяют оценить среднее спокойное состояние ионосферы, для оценки текущего состояния ионосферы и краткосрочного прогноза ее параметров разработаны соответствующие методы и модели [Stanislawska, Zbyszyński, 2001; Belehaki et al., 2007]. В методике IDCE [Stanislawska, Zbyszyński, 2001] используется автокорреляция, построенная по данным трех последних дней наблюдений, для прогноза на следующие 24 часа расчеты обновляются каждый час в режиме реального времени. В методике DIAS [Behlaki et al., 2007] используется модель отклика ионосферы на параметры солнечного ветра, построенная по подборке данных за время ряда магнитосферных бурь, при этом прогноз на 24 часа вперед сопровождается оценкой дисперсии модели для каждого пункта наблюдений.

На рис. 2 (см. с. 76) приведен пример прогноза критической частоты $foF2$ на последующие 24 часа, выполненного 10 января 2011 года по методикам IDCE [Stanislawska, Zbyszyński, 2001] и DIAS [Behlaki et al., 2007]. Результаты двух методов прогноза близки между собой и хорошо отображают изменения наблюдаемой критической частоты

на wysokich szerokościach (Sodankyla), gdzie nocą i zimą obserwuje się ponad 80 % braków, podczas gdy na średnich szerokościach (Moskwa) braki przy automatycznym sondowaniu to jedynie 10...20 % obserwacji.

Brakujące dane uzupełniane są metodą *klonowania* danych ze stacji odległych na promień korelacji [Gulyaeva et al., 2008]. Zakłada się przy tym, że odchylenia od warunków spokojnych dla danych podstawowych i klonowanych są proporcjonalne do wartości median w danych punktach.

Podczas gdy globalne, modele takie jak IRI, czy ITU-R pozwalają na ocenę średnich, spokojnych wartości jonosfery, dla oceny bieżącego stanu jonosfery i dla prognozy krótkoterminowej opracowano odpowiednio metody i modele [Stanislawska, Zbyszyński, 2001; Belehaki et al., 2007]. W metodzie IDCE [Stanislawska, Zbyszyński, 2001] zastosowana została metoda autokorelacji przy użyciu danych z trzech ostatnich dni obserwacji, dla prognozy na następujące 24 godziny na każdą następną godzinę w systemie on-line. W metodzie DIAS [Behlaki et al., 2007] zastosowano odpowiedź jonosfery na aktualne parametry wiatru słonecznego wynikające ze statystycznego obrazu wielu burz magnetosferycznych, przy czym prognoza na 24 godziny opiera się na ocenie dyspersji modelu w każdym punkcie obserwacyjnym.

Rysunek 2 przedstawia przykład prognozy częstotliwości krytycznej $foF2$ na 24 godziny wykonaną 10.01.2011 metodą IDCE [Stanislawska, Zbyszyński, 2001] i DIAS [Behlaki et al., 2007]. Rezultaty obu metod są biskie sobie i dobrze odzwierciedlają zmiany obserwowanej częstotliwości krytycznej w dniu następnym 11.01.2011 w Chilton i Tortosa.

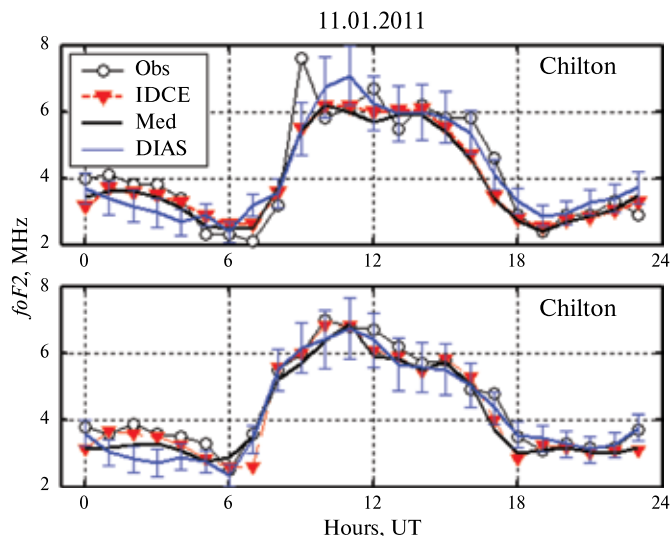


Рис. 2. Сравнение прогноза критической частоты $foF2$ с данными наблюдений в течение суток 11 января 2011 года и медианой по методике IDCE [Stanisławska, Zbyszyński, 2001] и DIAS [Belehaki et al., 2007] на станциях Чилтон [51,6° N; 358,7° E] и Тортоза [40,8° N; 0,5° E]

Rys. 2. Porównanie prognozy częstotliwości krytycznej $foF2$ z obserwacjami w czasie doby 11 stycznia 2011 r. oraz metody uzupełnień IDCE [Stanisławska, Zbyszyński, 2001] i DIAS [Belehaki et al., 2007] na stacji Chilton (51.6° N, 358.7° E) i Tortosa (40.8° N, 0.5° E)

$foF2$ на следующий день — 11 января 2011 года в Чилтоне и Тортозе.

Для операторов космической связи и навигации важно знать, показывают ли параметры ионосферы ее обычное спокойное состояние, характерное для данного уровня солнечной активности, или они указывают на краткосрочные возмущения в ионосфере в связи с возмущениями на Солнце и в магнитосфере Земли. Подобно геомагнитным индексам изменения ионосферной погоды предложено градуировать W -индексом по четырем уровням для положительных и отрицательных логарифмических отклонений $foF2$ или TEC от спокойного медианного значения [Gulyaeva et al., 2008]:

- $W = \pm 1$ — спокойное состояние;
 - $W = \pm 2$ — умеренное возмущение;
 - $W = \pm 3$ — умеренная ионосферная буря или суббуря;
 - $W = \pm 4$ — сильная ионосферная буря.
- $W = \pm 1$ warunki spokojne,
 - $W = \pm 2$ zaburzenia umiarkowane,
 - $W = \pm 3$ umiarkowana burza jonosferyczna, lub subburza,
 - $W = \pm 4$ silna burza jonosferyczna.

Оценка ионосферного W -индекса выполняется в режиме реального времени на сайте ИЗМИРАН по наблюдениям дигизонда DPS-4 в Москве, включая прогноз на последующие 24 часа по методике [Belehaki et al., 2007]. Пример соответствующих изменений критической частоты и W -индекса в Москве 11 января 2011 года (в тот же день, что на рис. 2) представлен на рис. 3. Подобная оценка W -индекса выполняется по наблюдениям критической частоты на сети 46 ионосферных станций и представлена в соответствующих таблицах на сайте «Ионосферная погода» ИЗМИРАН.

Система W -индекса ионосферной погоды получила дальнейшее развитие в применении к параметру полного электронного содержания — ТЕС, что позволило разработать методику оцен-

Ocena jonosferycznego indeksu W następuje on-line na stronie IZMIR AN na podstawie pomiarów digisondą DPS-4 w Moskwie, włączając prognozę na 24 godziny metodą [Belehaki et al., 2007]. Przykład odpowiadających pomiarów częstotliwości krytycznej i indeksu W w Moskwie 11.01.2010 (ten sam dzień co na rys. 2) przedstawiony jest na rys. 3a, b. Podobne oszacowanie indeksu W następuje na podstawie obserwacji częstotliwości krytycznej z 46 stacji obserwacyjnych i wyniki zamieszczone są w tablicach na stronie „Pogoda jonosferyczna” IZMIRAN.

Ciąg dalszy zastosowania indeksu W nastąpił po zastosowaniu tej samej metodyki do parametru całkowitej gęstości elektronowej, co pozwoliło na zastosowanie tego indeksu do globalnego opisu zaburzeń jo-

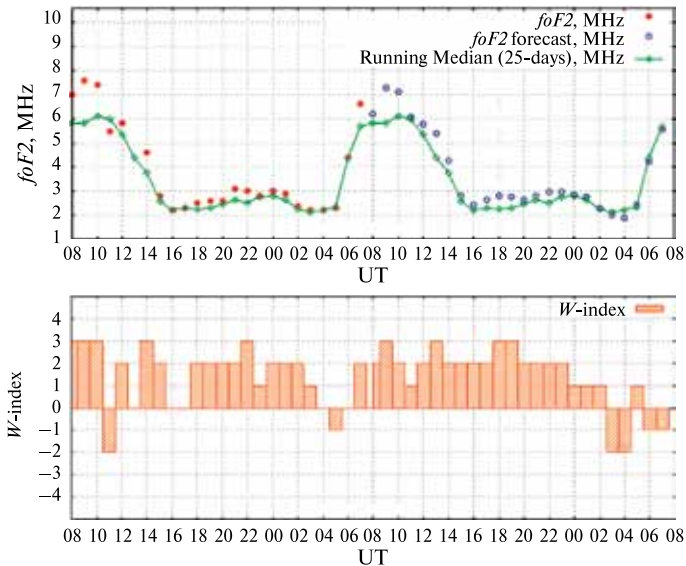


Рис. 3. Наблюдения и прогноз критической частоты $foF2$ 11 января 2011 года в Москве на сайте ИЗМИРАН, на фоне спокойной медианы (верхняя часть), и соответствующий W -индекс ионосферной погоды (нижняя часть), отображающий спокойные и возмущенные условия в ионосфере

Rys. 3. Obserwacje i prognoza częstotliwości krytycznej $foF2$ 11 stycznia 2011 r. w Moskwie na stronie IZMIR AN, na tle spokojnej mediany (panel górny) i odpowiednio indeks W pogody jonosferycznej (panel dolny), przedstawiające spokojne i zaburzone stany w jonosferze

ки планетарных индексов ионосферной возмущенности [Gulyaeva, Stanisławska, 2008; 2010]. Планетарный индекс W_p определяется по глобальным картам вертикального полного электронного содержания GPS-TEC. Значения TEC выбираются в 600 узлах сетки на карте от 60° S до 60° N с шагом 5° по широте и от 0° до 360° E с шагом 15° по долготе, что соответствует ежечасным значениям от 0 до 23 часов местного времени на выбранных широтах. Локальные эффекты солнечного ионизирующего излучения отфильтрованы путем нормализации значений TEC по зенитному углу Солнца в каждый момент местного времени и в местный полдень на данной широте [Gulyaeva, 2009]. Уровень возмущенности TEC по отношению к спокойной медиане за каждый час в предыдущие 27 дней градуируется по локальной шкале W -индекса с теми же пороговыми значениями, которые были приняты для максимальной плотности электронов (критической частоты слоя F2) [Gulyaeva et al., 2008]. Значения W -индекса в 600 узлах карты формируют карту W -индекса, наглядно показывающую состояние ионосферной погоды в глобальном или региональном масштабе.

Пример региональной карты W -индекса, формируемой в режиме реального времени на сайте IDCE по наблюдениям TEC системой EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) 31 января 2011 года в 05 часов мирового времени (05 UT), представлен на рис. 4 (см. с. 79). Здесь ясно видны области положительных (оранжевый цвет) и отрицательных (синий цвет) ионосферных возмущений.

По глобальным картам W -индекса предложен метод оценки планетарного W_p индекса, учитывающий диапазон разности положительных и отрицательных значений W -индекса ионосферных бурь и суббурь на каждой широте ($|W| \geq 3$), с весовым коэффициентом, пропорциональным их широтно-дол-

носферичных [Gulyaeva, Stanisławska, 2008; 2010]. Тzw планетарный индекс W_p określa się na podstawie globalnych map pionowego parametru TEC-GPS. Wartości TEC wybierane są w 600 węzłach mapy z przedziałów szerokości od 60° S do 60° N z krokiem 5° po szerokości, i od 0° do 360° E z krokiem 15° po długości, co odpowiada jednoczesnym pomiarom od 0 do 23 godziny czasu lokalnego na wybranych szerokościach. Lokalne efekty jonizującego promieniowania Słońca odfiltrowywane są za pomocą normalizacji wartości TEC w każdej chwili czasu lokalnego i lokalne południe na danej szerokości [Gulyaeva, 2009]. Poziom zaburzeń TEC jako odchylenie od mediany w każdej godzinie w poprzedzających 27 dniach ustalany jest wraz z wartościami progowymi które zostały przyjęte dla maksymalne koncentracji elektronowej (częstotliwość krytyczna warstwy F2) [Gulyaeva et al., 2008]. Wartości indeksu W w 600 węzłach siatki budują mapę indeksu W obrazującą stan pogody jonosferycznej w skalach zarówno globalnych, jak i lokalnych.

Przykład regionalnej mapy indeksu W , konstruowanej w czasie rzeczywistym na podstawie pomiarów TEC w systemie EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) na stronie IDCE 31 stycznia 2011 o 05 UT przedstawiony jest na rysunku 4. Wyraźnie widoczne są na takiej mapie obszary zaburzeń jonosferycznych dodatnich zaburzeń (kolor pomarańczowy) i ujemnych (niebieski).

Z globalnych map indeksu W przedstawiono metody oceny planetarnego indeksu W_p przedstawiający skalę różnic dodatnich i ujemnych wartości indeksu burz i subburz jonosferycznych na dowolnej szerokości pomnożonej przez współczynnik wagowy, proporcjonalny do szerokościowo-długościowego rozkładu indeksu burzowego

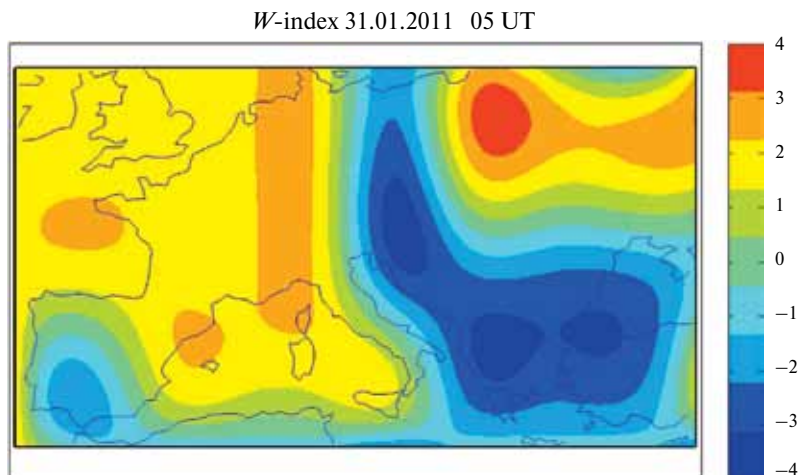


Рис. 4. Карта W -индекса ионосферной погоды над Европой, представленная на сайте IDCE 31 января 2011 года в 05 часов мирового времени (05 UT)

Rys. 4. Mapa indeksu W pogody jonosferycznej nad Europą, na stronie IDCE 31 stycznia 2011 r. (05 UT)

готному распространению [Gulyaeva, Stanislawska, 2008; 2010]. В результате получены величины планетарного индекса ионосферной погоды Wp , принимающего только положительные значения, и, при его превышении порогового значения $Wp \geq 6,0$, означающего планетарную ионосферно-плазменную бурю. Составлен каталог ионосферно-плазменосферных бурь (представлен на сайте ИЗМИРАН), в котором за период с 1999 год по настоящее время перечислено более 150 ионосферно-плазменосферных бурь. Показано, что эти события могут полностью или частично совпадать с магнитосферными бурями, оцениваемыми по разным солнечным и магнитным индексам, но могут наблюдаться и индивидуально при спокойной геомагнитной обстановке [Gulyaeva, Stanislawska, 2010].

В заключение отметим, что многие из указанных результатов были представлены и одобрены в ряде Европейских проектов КОСТ (Комиссия по науке и технологии) и в проекте УРСИ и КОСПАР по Международной модели

$|W| \geq 3$ [Gulyaeva, Stanislawska, 2008; 2010]. W rezultacie otrzymuje się wartości indeksu planetarnego Wp pogody jonosferycznej o jedynie dodatnich wartościach, i przy wartościach przewyższających wartości progowe $Wp \geq 6.0$ oznaczających planetarną burzę jonosferyczno-plazmasferyczną. Zestawiony katalog 150 burz jonosferyczno-plazmasferycznych przedstawiony jest na stronie IZMIR AN za okres 1999 po dzień aktualny. Pokazano, że burze te, mogą w całości, lub dużej części pokrywać się z burzami magnetosferycznymi klasyfikowanymi na podstawie różnych indeksów słonecznych i magnetycznych, jakkolwiek pojawiają się tu burze w czasie wyraźnie spokojnych stanów magnetycznych [Gulyaeva, Stanislawska, 2010].

Na zakończenie chcemy podkreślić, że wiele z przedstawionych wyników prezentowanych było w ramach Europejskiego projektu COST (European co-operation in the field of Scientific and Technical Research), oraz na konferencjach URSI i

ионосферы, IRI, что свидетельствует о соответствии предложенных разработок высоким международным стандартам. Проект продолжает успешно развиваться, расширяя возможности использования его продуктов в радио-, навигационных и спутниковых технологиях, как в Европе и России, так и в мире, и используя общедоступные через Интернет данные ионосферных наблюдений, со своей стороны предлагая оригинальные методы их анализа и представления результатов в Интернет.

Совместный проект РАН и ПАН позволяет:

- лучше координировать существующие исследовательские программы ИЗМИРАН и ЦКИ;
- обмениваться данными, идеями, алгоритмами и программами анализа и обработки экспериментальных данных;
- включать общие результаты в совместные публикации и доклады на конференциях [Belehaki et al., 2007, 2009; Gulyaeva, 2009a, b, 2010; Gulyaeva, Stanislawska, 2008, 2010; Gulyaeva et al., 2008; Stanislawska, Zbyszynski, 2001; Stanislawska et al., 1999, 2009, 2010], а также представлять их в других европейских и международных проектах.

COSPAR в части dotyczącej międzynarodowego modelu IRI, co jest potwierdzeniem wysokich standardów prac. Projekt jest kontynuowany i rozszerzany pod kątem wykorzystania w kosmicznych technologiach nawigacyjnych zarówno w Europie, jak i w Rosji, z jednej strony wykorzystując szeroko dostępne zestawy danych w Internecie, a z drugiej oferując społeczności międzynarodowej oryginalne metody własne.

Wspólny projekt PAN RAN pozwala na:

- lepszą koordynację współpracy w tej dziedzinie CBK PAN IZMIR AN;
- wydajniejszą wymianę danych pomiarowych, idei i programów do opracowywania danych eksperymentalnych;
- włączanie wyników we wspólne publikacje i referaty konferencyjne [Belehaki et al., 2007, 2009; Gulyaeva, 2009a, b, 2010; Gulyaeva, Stanislawska, 2008, 2010; Gulyaeva et al., 2008; Stanislawska et al., 1999, 2009, 2010; Stanislawska, Zbyszynski, 2001], а także na wspólną pracę w większych projektach Europejskich.

ЛИТЕРАТУРА

- Belehaki A., Cander L., Zolesi B., Bremer J., Juren C., Stanislawska I., Dialetis D., Hatzopoulos M. (2007) Ionospheric specification and forecasting based on observations from European ionosondes participating in DIAS project// Acta Geophysica. 2007. V. 55. N. 3. P. 398–409. doi:10.2478/s11600-007-0010-x.
- Belehaki A., Stanislawska I., Liliensten J. (2009) An Overview of Ionosphere-Thermosphere Models Available for Space Weather Purposes// Space Science Rev. 2009. doi: 10.1007/s11214-009-9510-0.
- Gulyaeva T. L. (2009a) Proxy for the ionospheric peak plasma density reduced by the solar zenith angle // Earth, Planets and Space. 2009. V. 61. N. 5. P. 629–631.
- Gulyaeva T. L. (2009b) Linkage of the ionospheric peak electron density and height deduced from the topside sounding data // Advances in Space Research. 2009. V. 43. P. 1794–1799. doi: 10.1016/j.asr.2008.08.015.
- Gulyaeva T. L. (2010) Calibration of IRI–ITU-R peak density and height over the oceans with topside sounding data // Advances in Space Research. 2010. V. 45. P. 276–283. doi: 10.1016/j.asr.2009.09.002.

BIBLIOGRAFIA

- Gulyaeva T. L., Stanislawska I.* (2008) Derivation of a planetary ionospheric storm index // *Annales Geophysicae*. 2008. V. 26. N. 9. P. 2645–2648.
- Gulyaeva T. L., Stanislawska I.* (2010) Magnetosphere associated storms and autonomous storms in the ionosphere-plasmasphere environment // *Atmospheric and Terrestrial Physics (JASTP)*. 2010. V. 72. P. 90–96. doi: 10.1016/j.jastp.2009.10.012.
- Gulyaeva T. L., Stanislawska I., Tomasik M.* (2008) Ionospheric weather: Cloning missed *foF2* observations for derivation of variability index // *Annales Geophysicae*. 2008. V. 26. N. 2. P. 315–321.
- Stanislawska I., Gulyaeva T. L., Hanbaba R.* (1999) Ionospheric Despatch Centre in Europe // *J. Physics and Chemistry of the Earth*. P. C: Solar, Terrestrial and Planetary Science. 1999. V. 24. N. 4. P. 355–357.
- Stanislawska I., Zbyszyński Z.* (2001) Forecasting of the ionospheric quiet and disturbed *foF2* values at a single location // *Radio Science*. 2001. V. 36. N. 5. P. 1065–1071.
- Stanislawska I., Belehaki A., Jakowski N., Zolesi B., Gulyaeva T. L., Cander Lj. R., Reinisch B. W., Pezzopane M., Tsagouri I., Tomasik L., Galkin I.* (2009) COST 296 scientific results designed for operational use // *Annals of Geophysics*. 2009. V. 52. N. 3–4. P. 423–436.
- Stanislawska I., Lastovicka J., Bourdillon A., Zolesi B., Cander Lj. R.* (2010) Monitoring and modeling of ionospheric characteristics in the framework of European COST 296 Action MIERS // *Space Weather*. 2010. doi: 1029/2009SW000493.

This cooperative research between IZMIRAN and CBK is aimed to provide on-line ionospheric parameters characterizing space weather in the ionosphere. CBK serves as Ionospheric Dispatch Centre in Europe, IDCE, providing since 1997 standard ionospheric characteristics in real time on Internet page of CBK at <http://www.cbk.waw.pl/IDCE/>. Site 'Ionospheric Weather' is established in the framework of this Project at IZMIRAN since 2006 at <http://www.izmiran.ru/services/iweather>. Relevant methods and software to determine ionospheric disturbed and quiet periods, maps and catalogues of the ionosphere-plasmasphere indices and planetary storms have been and continue to be developed and results of their implementation provided on the web sites are reported.

8 ДИАГНОСТИКА ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМ ГЛОБАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ

Руководитель проекта с российской стороны:

И. ШАГИМУРАТОВ

Руководитель проекта с польской стороны:

А. КРАНКОВСКИЙ

Проект «Диагностика ионосферы Земли с использованием систем глобальной навигации» реализуется в рамках плана совместных межакадемических российско-польских фундаментальных космических исследований. Работа осуществляется научными коллективами Западного отделения ИЗМИРАН (Калининград) и Кафедры астрономии и геодинамики Варминско-Мазурского Университета (Ольштын), Польша.

В рамках совместных исследований решены следующие научные задачи:

- анализ и обобщение вариаций параметров возмущенной ионосферы;
- изучение характеристик крупных и малых неоднородностей ионосферы с использованием различных радиофизических методов наблюдений (вертикальное зондирование ионосферы, GPS/GLONASS — радиопросвечивание, радиозатменное FORMOSAT 3/COSMIC зондирование).

Для исследования поведения ионосферы формируются временные ряды значений TEC (полное электронное содержание) независимо для каждой выбранной обсерватории.

При исследовании ионосферных возмущений формируются временные ряды, содержащие значения TEC для периодов магнитных бурь, TEC для нескольких дней, предшествующих буре, и для нескольких спокойных дней после ее окончания.

Для изучения структуры ионосферы на средних и высоких широтах во время магнитных бурь созданы базы данных

8 DIAGNOSTYKA JONOSFERY PRZY UŻYCIU OBSERWACJI GNSS

Kierownik projektu ze strony Rosji:

I. SHAGIMURATOV

Kierownik projektu ze strony Polski:

A. KRANKOWSKI

Projekt Diagnostyka jonosfery przy użyciu obserwacji GNSS jest realizowany w ramach planu wspólnych projektów badawczych Akademii Nauk Rosji i Polski, w dziedzinie podstawowych Badań Kosmicznych. Wykonują go zespoły naukowe Zachodniego Oddziału Instytutu Ziemskiego Magnetyzmu, Jonosfery i Propagacji Fal Radiowych Rosyjskiej Akademii Nauk w Kaliningradzie oraz Katedry Astronomii i Geodynamiki Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie.

W ramach współpracy zrealizowane są następujące zadania badawcze:

- analiza i uogólnienie zmian zaburzonej jonosfery;
- badanie wielkoskalowych i drobnoskalowych niejednorodności jonosfery z wykorzystaniem różnych technik obserwacyjnych (sondowania jonosfery, GNSS, FORMOSAT 3/COSMIC)

Niezależnie od szeregów czasowych wartości TEC dla wybranych obserwatoriów, tworzone są także zbiory wartości tego parametru dla okresów burz magnetycznych.

Jest regułą, że zbiory takie zawierają także wartości TEC dla kilku dni poprzedzających ekstremum burzy oraz dla kilku spokojnych dni po ustaniu burzy. I tak, np. do badania struktury jonosfery w średnich i wysokich szerokościach geograficznych w czasie burz magnetycznych tworzone są zbiory wartości TEC dla ponad 100 stacji IGS/EPN z Europy oraz 70 stacji z Ameryki Północnej. Do analizy reakcji jonosfe-

вариаций TEC, включающие информацию о более чем 100 Европейских станциях IGS/EPN и 70 станций в Северной Америке. Для анализа ионосферного отклика на полное солнечное затмение 3 октября 2005 года вариации TEC были рассчитаны для 100 станций IGS/EPN.

Для исследования динамики флуктуаций TEC в ионосфере над Антарктикой и Арктикой также созданы и проанализированы временные ряды измерений TEC (2000–2010) по данным станций сети IGS.

В ходе реализации совместного исследовательского проекта в последние годы проводился детальный анализ структуры и динамики ионосферы во время следующих событий:

- а) геомагнитных бурь:
 - 28 октября – 2 ноября 2003 года [Krankowski et al., 2007a];
 - 7–12 ноября 2004 года (рис. 1, см. с. 82) [Krankowski et al., 2007b];
 - 8–11 октября 2008 года.
- б) солнечных затмений:
 - 3 октября 2005 г. [Krankowski et al., 2008];
- в) землетрясений:
 - 25 сентября 2003 года [Zakharenkova et al., 2007a];
 - 21 сентября 2004 года [Krankowski et al., 2006a];
 - 26 декабря 2004 года [Zakharenkova et al., 2006a];
 - 26 сентября 2005 года [Zakharenkova et al., 2008];
 - 8 февраля 2006 года [Zakharenkova et al., 2007b].

Исследования проводились на основе анализа временных рядов значений TEC, определяемых из вариаций сигналов GPS по данным наблюдений стационарной сети станций IGS и EPN. Значения TEC были использованы для создания карт полного электронного содержания. С этой целью использу-

ры на całkowite zaćmienie Słońca w dniu 3 października 2005 roku wyznaczano wartości TEC dla 100 stacji IGS/EPN.

Do badania rozwoju fluktuacji TEC jonosfery nad Antarktydą i Artyką utworzono również szeregi czasowe analizowanego parametru TEC (lata 2000–2010) dla stacji satelitarnych IGS.

W ramach realizacji projektu badawczego przeprowadzono w ostatnich latach szczegółową analizę struktury i dynamiki jonosfery w czasie następujących:

- а) burz geomagnetycznych:
 - 28 października – 2 listopada 2003 roku [Krankowski et al., 2007a];
 - 7–12 listopada 2004 roku [Krankowski et al., 2007b];
 - 8–11 października 2008 roku;
- б) заćmieni Słońca:
 - 3 października 2005 roku [Krankowski et al., 2008];
- с) trzęsień Ziemi:
 - 25 września 2003 [Zakharenkova et al., 2007a];
 - 21 września 2004 [Krankowski et al., 2006a];
 - 26 grudnia 2004 roku [Zakharenkova et al., 2006a];
 - 26 wrzesień 2005 [Zakharenkova et al., 2008];
 - 8 styczeń 2006 roku [Zakharenkova et al., 2007b].

Podstawę analiz stanowiły szeregi czasowe wartości TEC, wyznaczone na podstawie permanentnych obserwacji GPS, prowadzonych przez stacje IGS i EPN. Wartości TEC były wykorzystywane do sporządzania map koncentracji elektronów. W tym celu wyznaczone wartości TEC były przedstawiane w postaci szeregów harmo-

ется разложение ТЕС в виде сферических функций для пространственного распределения ТЕС в зависимости от географической широты и долготы. Для разложения по сферическим гармоникам обычно используются 16 коэффициентов сферических гармоник 16-й степени. Такие карты, построенные для определенного интервала широты и долготы, представляют собой

ник сферических, jako funkcje współrzędnych geograficznych: długości i szerokości. Z reguły stosowano rozwinięcie 16 stopnia i 16 rzędu. Mapy takie sporządzane dla określonego przedziału szerokości geograficznych, stanowiły swojego rodzaju szereg czasowy, będący doskonałą ilustracją zmian struktury jonosfery w czasie i w przestrzeni. W zależności od potrzeb, mapy jonosfery były sporządzane w interwale np.

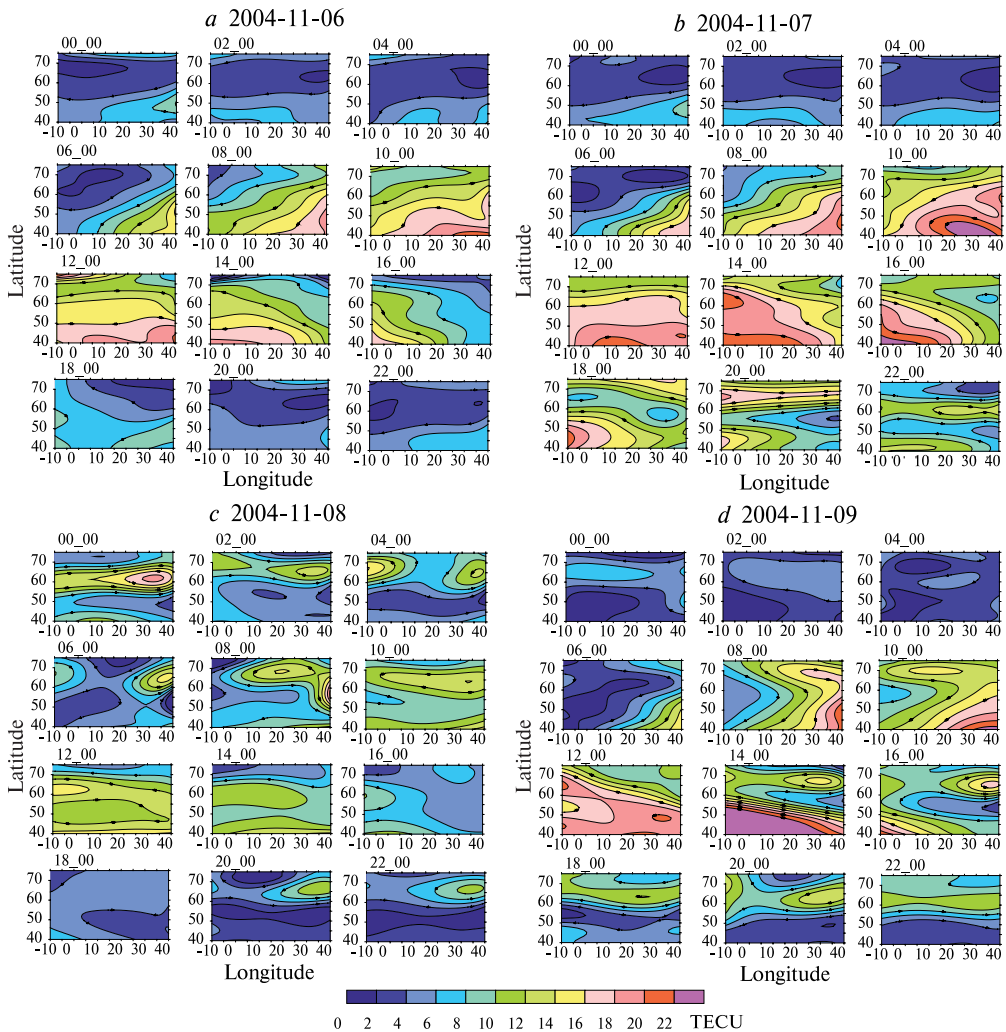


Рис. 1. Карты значений ТЕС над Европой (6–9 ноября 2004 года) [Krakowski et al., 2007b]

Rys. 1. Mapy wartości TEC nad Europą (6–9 listopada, 2004 r. [Krakowski et al., 2007b]

своего рода временной срез, прекрасно иллюстрирующий структуру ионосферы в пространстве и времени. В зависимости от задачи строятся карты ионосферы с временным разрешением 1 час, 15 либо 5 минут. Серии таких карт для Европы, построенные с двухчасовым временным разрешением для периода геомагнитной бури 7–9 ноября 2004 года, показаны на рис. 1 (см. с. 84).

1 godz, 15 lub 5 minut. Serię takich map nad Europą w okresie burzy geomagnetycznej w dniach 7–9 listopada 2004 r., w odstępach dwugodzinnych, przedstawiono na rys. 1.

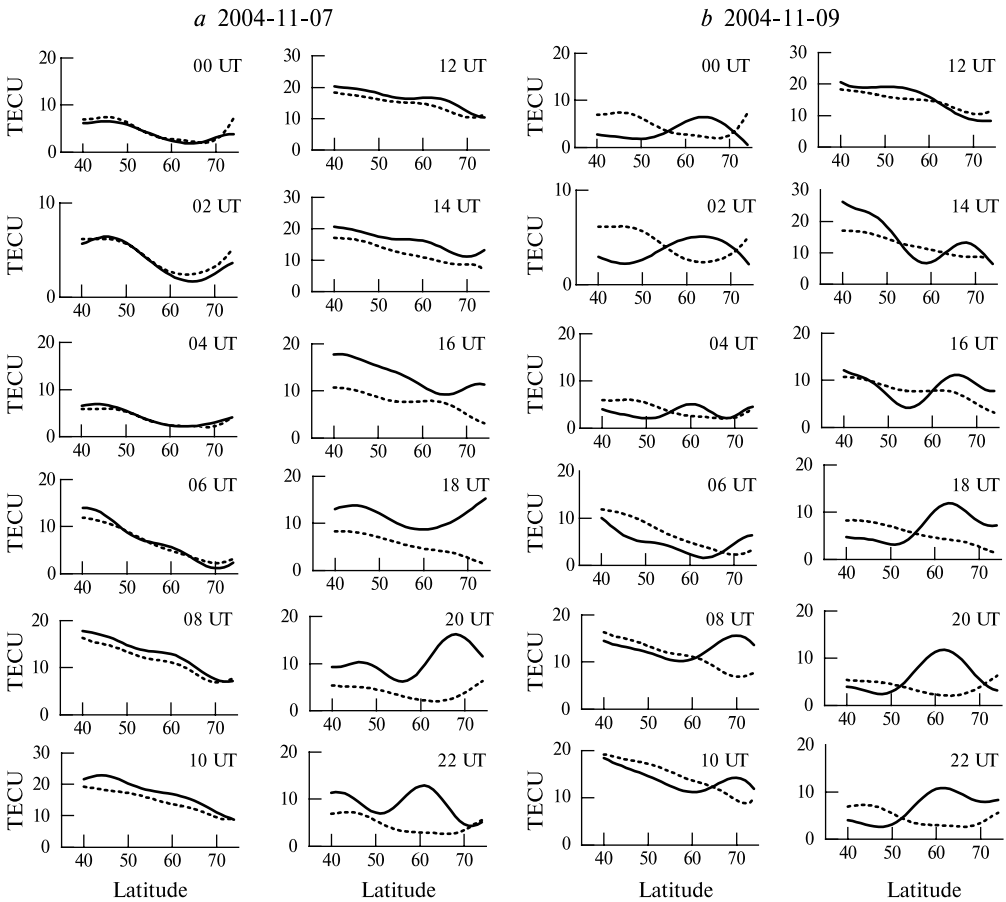


Рис. 2. Динамика широтного профиля значений TEC для периода возмущенной ионосферы (7 и 9 ноября 2004 года — сплошная линия) относительно спокойного дня (6 ноября 2004 года — прерывистая линия) [Krankowski et al., 2007b]

Rys. 2. Dynamika zmian profili szerokościowych wartości TEC w dniach zaburzonej jonosfery (7 i 9 listopada 2004 r. — linia ciągła), w stosunku do dnia spokojnej jonosfery (6 listopada 2004 r. — linia przerywana) [Krankowski et al., 2007b]

Для анализа динамики TEC также могут быть использованы широтные профили ионосферы, представленные на рис. 2 (см. с. 85). Широтные профили TEC были построены вдоль меридиана 20° E, позволяют определить фазу

Do śledzenia dynamiki zmian TEC mogą też służyć, przedstawione na rys. 2, szerokościowe profile jonosfery. Wykonano je wzdłuż południka 20° E. Pozwalają one innym na ustalenie fazy analizowanej burzy czy określenie położenia rowu jo-

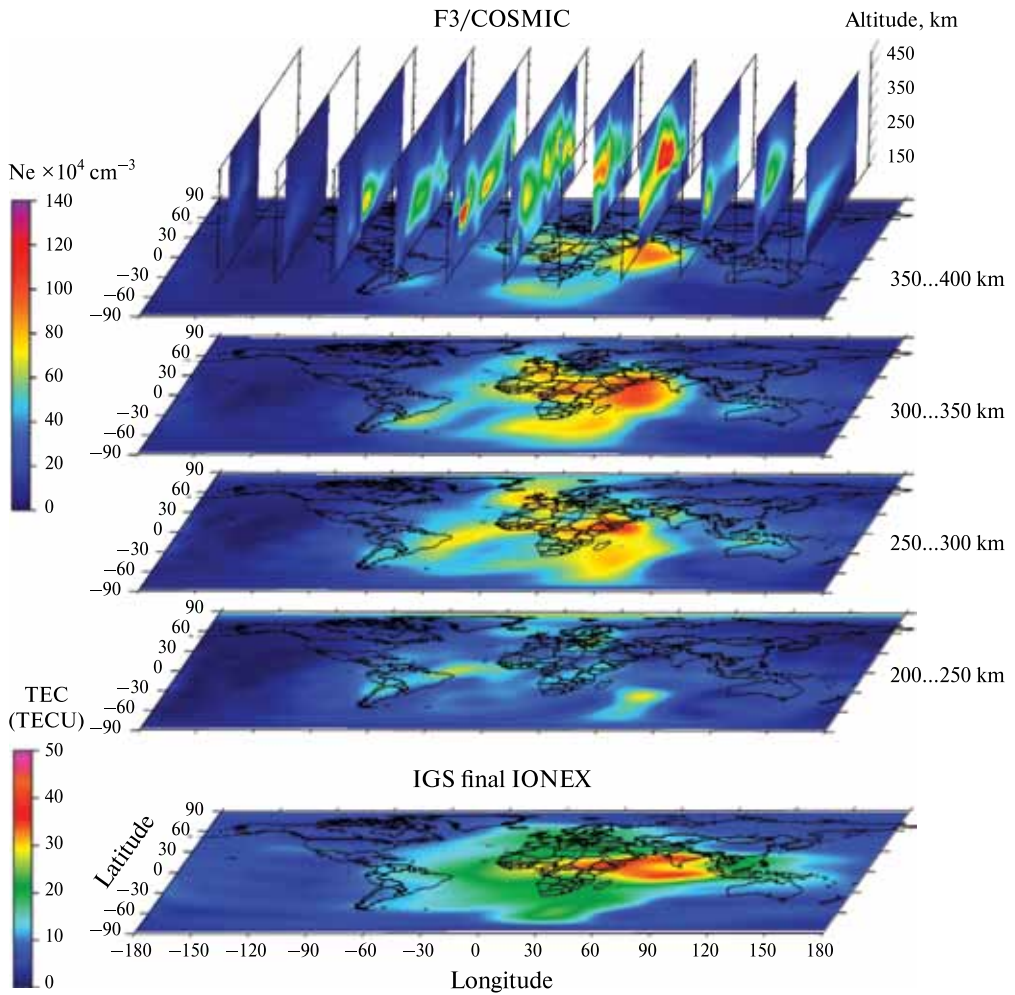


Рис. 3а. Трехмерные карты (разрешающая способность по высоте 50 км) электронной концентрации ионосферы в период магнитной бури 11 октября 2008 года. Для сравнения также показаны вариации в TEC по глобальным картам IGS

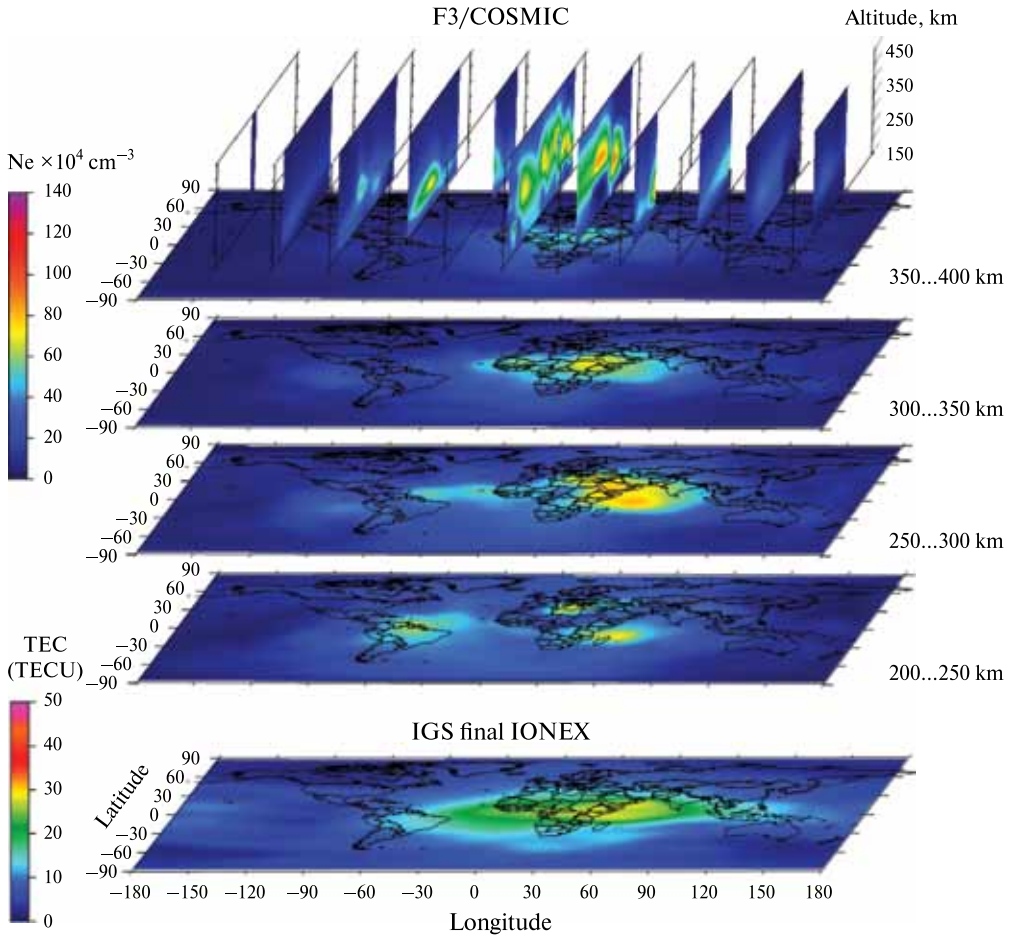
Rys. 3a. Mapy tomograficzne (z rozdzielczością wysokościową 50 km) stanu jonosfery w okresie burzy geomagnetycznej w dniu 11 października 2008. Dla porównania przedstawiono również zmiany TEC otrzymane z globalnych map IGS

исследуемой бури и/или определить положение главного ионосферного провала, перемещающегося от высоких широт к экватору.

В 2010 году нами проводилась разработка способов получения трехмерной структуры вариаций концентрации электронов в ионосфере. Построены

nosferycznego, przemieszczającego się od wysokich szerokości ku równikowi.

W 2010 roku prowadzono badania nad sposobem trójwymiarowego mapowania zmian koncentracji elektronów. Zbudowano pierwsze globalne mapy tomograficzne



11.10.2008 12 UT

Рис. 3б. Трехмерные карты (разрешающая способность по высоте 50 км) электронной концентрации ионосферы для спокойного дня 9 октября 2008 года. Для сравнения также показаны вариации в TEC по глобальным картам IGS

Rys. 3b. Mapy tomograficzne (z rozdzielczością wysokościową 50 km) stanu jonosfery w okresie burzy geomagnetycznej w okresie spokojnej jonosfery w dniu 9 października 2008. Dla porównania przedstawiono również zmiany TEC otrzymane z globalnych map IGS

первые глобальные трехмерные карты ионосферы на базе данных группировки FORMOSAT 3/COSMIC. Карты имеют разрешение 50 км по высоте и 1 час по времени. Такое разрешение позволяет достаточно подробно оценивать реакцию ионосферы на геомагнитные возмущения. Рисунок 3 (см. с. 86, 87) демонстрирует трехмерные карты

ионосферы в опарциу о system COSMIC. Otrzymano rozdzielczość wysokościową 50 km oraz czasową. Rozdzielczość ta pozwala w dokładny sposób śledzić odpowiedz jonosfery na występujące zaburzenia magnetyczne. Rysunek 3 przedstawia mapy tomograficzne stanu jonosfery w okresie burzy geomagnetycznej w dniu 11 października 2008 r. (a) oraz w okresie spokojnej jo-

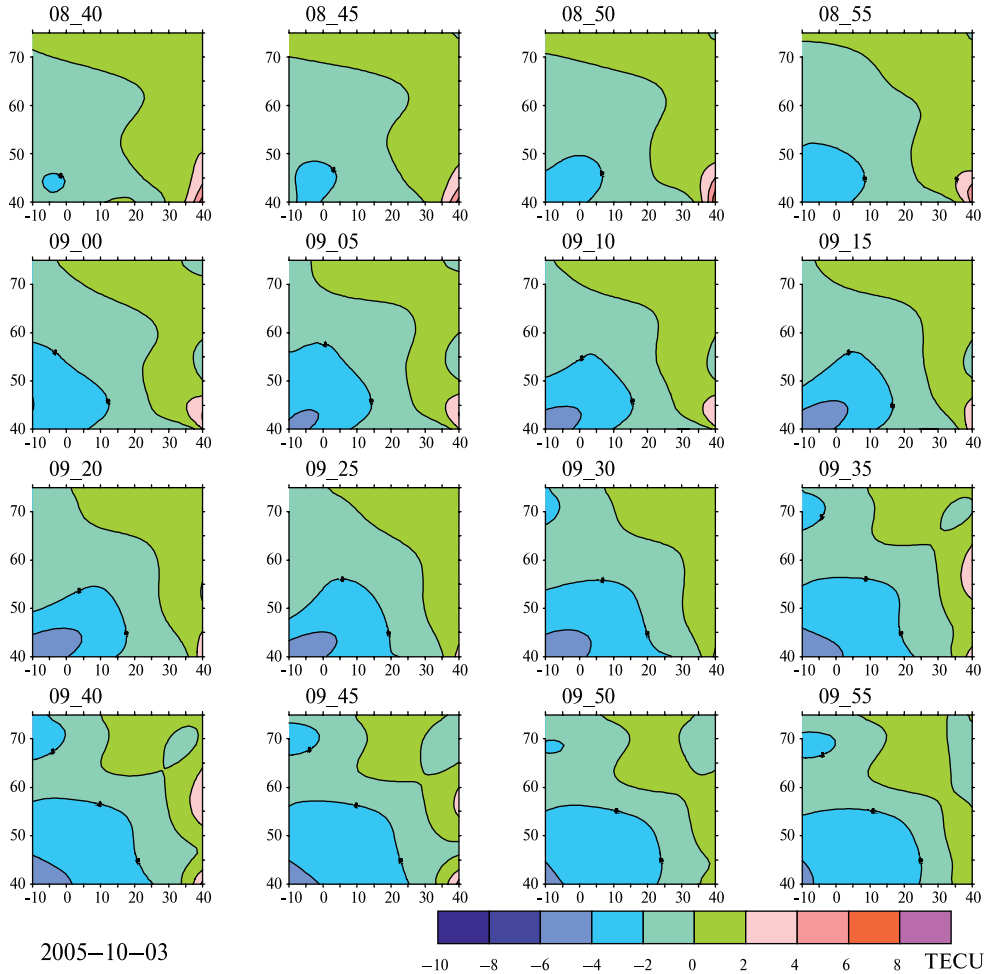


Рис. 4. Дифференциальные карты TEC над Европой, построенные с разрешением 5 минут в день солнечного затмения 3 октября 2005 года относительно невозмущенного дня 4 октября 2005 года [Krankowski et al., 2008]

Rys. 4. Różnicowe mapy TEC nad Europą tworzone z rozdzielczością 5 min., w dniu zaćmienia Słońca 3 październik 2005 w porównaniu do spokojnego dnia 4 październik 2005 r. [Krankowski et al., 2008]

ионосферы во время геомагнитной бури 11 октября 2008 года (а) и в спокойный день 9 октября 2008 года (б). Для сравнения также показаны вариации в TEC, полученные по глобальным картам сервиса IGS.

Очень хорошо прослеживается динамика крупномасштабных структур, образующихся в ионосфере в периоды солнечных затмений и землетрясений. Для того чтобы отслеживать динамику ионосферы во время геомагнитной бури, был построен набор карт, отражающих изменения TEC над Европой с высоким временным разрешением — до 5 минут (см. рис. 3). Ионосферный эффект солнечного затмения наблюдается в форме уменьшения электронного содержания (депрессии TEC) вдоль пути солнечной тени [Krankowski et al., 2008]. В рассматриваемом случае депрессия достигла значения 4...6 TEC-единиц. Данное возмущение наблюдалось между 8:40 UT и 10 UT (рис. 4, см. с. 88).

Другой тип явлений, которые могут вызывать динамически меняющиеся крупномасштабные структуры в ионосфере, представляют собой землетрясения. В ходе проекта проанализировано влияние этого явления на изменения в ионосфере, предшествующие землетрясениям, с целью нахождения его предвестников. Был проанализирован ряд землетрясений, и возмущения в ионосфере, которые можно считать их предвестниками, были обнаружены за один — несколько дней до основного сейсмического удара. Причиной этих возмущений может быть электрическое поле, которое проникает от эпицентра землетрясения в ионосферу. Хорошей иллюстрацией возникающих в ионосфере изменений за один день до события являются карты вариаций TEC над Европой, представленные на рис. 5 (см. с. 90). Эти карты показывают значительное увеличение концентрации электронов в ионосфере, достигающее 55 % от спокойного дня 7 января

ионосферы в dniu 9 października 2008 (b). Dla porównania przedstawiono również zmiany TEC otrzymane z globalnych map IGS.

Bardzo dobrą ilustrację dynamiki tworzących się wielkoskalowych struktur w jonosferze są okresy zaćmień Słońca oraz trzęsień Ziemi. W celu śledzenia dynamiki jonosfery podczas tego pierwszego zjawiska wykonano serię map zmian TEC nad Europą z wysoką rozdzielczością czasową — 5 min. (rys. 3). Efekt ten widoczny jest w jonosferze w postaci zmniejszenia zawartości elektronów (depresji TEC) wzdłuż ścieżki przebiegu zaćmienia Słońca [Krankowski et al., 2008]. W analizowanym przypadku analizowana depresja osiągnęła wartości 4–6 jednostek TEC. Czas występowania tego zaburzenia zawierał się między 8:40 UT a 10 UT (rys. 4).

Innym typem zjawiska, który powoduje występowanie dynamicznie zmieniających się wielkoskalowych struktur w jonosferze są trzęsienia Ziemi. W projekcie analizowano wpływ tego zjawiska na zmiany w jonosferze przed wystąpieniem trzęsienia, w celu badania jego prekursorów. Przeanalizowano kilka trzęsień Ziemi i stwierdzono występowanie jego prekursorów od 1-go do kilku dni przed wystąpieniem głównego wstrząsu sejsmicznego. Powodem tych nieregularności jest powstające pole elektryczne, które penetruje jonosferę, powstające nad epicentrum trzęsienia. Dobrą ilustracją powstających zmian w jonosferze jeden dzień przed wystąpieniem tego zjawiska są mapy zmian TEC nad Europą prezentowane na rysunku 5. Mapy te ukazują znaczny wzrost koncentracji elektronowej sięgający aż 55% spokojnego stanu jonosfery w dniu 7 stycznia 2006 r. Warto nadmienić, że dnia następnego (8 stycznia 2006 r.), w rejonie Grecji miało miejsce silne trzęsienie Ziemi o magnitudzie 7. Z rysunku 5 widać także, że powstający efekt zwiększe-

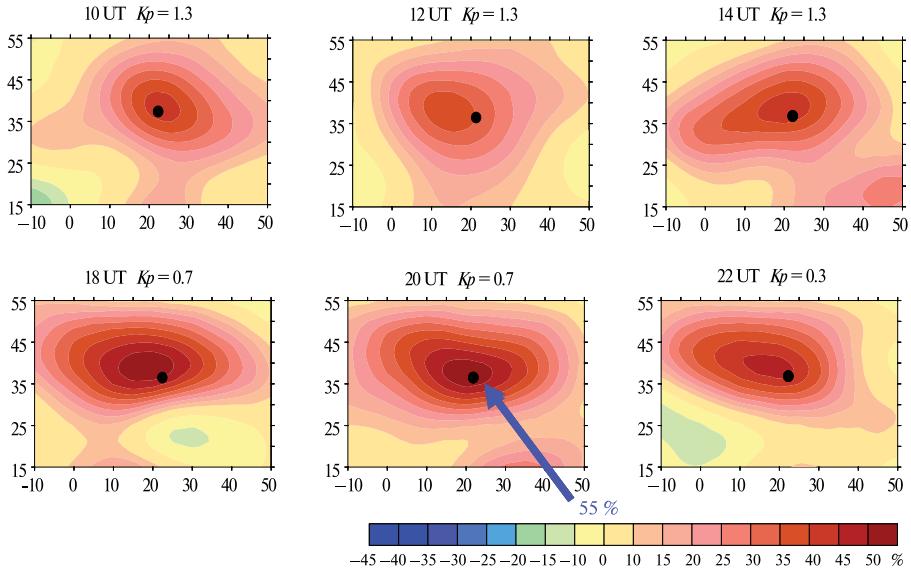


Рис. 5. Дифференциальные карты TEC над Европой для 7 января 2006 года относительно спокойного периода [Zakharenkova et al. 2007b]

Rys. 5. Różnicowe mapy TEC nad Europą w dniu 7 stycznia 2006 r. utworzone w stosunku do spokojnego stanu jonosfery [Zakharenkova et al., 2007b]

2006 года. Стоит отметить, что на следующий день (8 января 2006 года) в районе Греции произошло сильное землетрясение с магнитудой 7. На рис. 5 также можно видеть, что положительный эффект увеличения концентрации электронов имеет локальный характер.

В настоящее время в мире для исследования флуктуаций TEC в ионосфере широко используются сети стационарных станций IGS/EPN. Неоднородности различных масштабов наблюдаются во время ионосферных возмущений. Предметом нашего особого интереса является динамика ионосферы над полярными регионами, где влияние вариаций ионосферы во время геомагнитной бури на точность определения координат очень существенно. Структура ионосферы в этом регионе Земли очень сложна и изменчива, значительные изменения полного электронного содержания — TEC — происходят здесь постоянно. Крупномасштабные

ния концентрации электронов ма характер локальный.

В ostatnich latach powszechnie wykorzystuje się sieć stacji permanentnych IGS/EPN do badania fluktuacji jonosfery. Nieregularności o różnych skalach można zaobserwować w czasie trwania zaburzeń jonosferycznych. Przedmiotem naszego szczególnego zainteresowania była dynamika jonosfery nad rejonami polarnymi, gdzie wpływ zmieniającej się jonosfery w czasie burzy geomagnetycznej na dokładność wyznaczenia pozycji jest wyjątkowo wyrazisty. Struktura jonosfery w tych rejonach Ziemi jest bardzo złożona i zmienna, a występowanie fluktuacji całkowitej zawartości elektronów — TEC jest powszechne. Wielkoskalowe fluktuacje (large-scale fluctuations — LSF) charakteryzują się

флуктуации — LSF (large-scale fluctuations) — характеризуются большими пространственными изменениями в TEC с характерными размерами более чем 100...300 км. Второй тип неоднородностей — мелкомасштабные флуктуации (small-scale fluctuations — SSF). Эти структуры с характерными размерами порядка 10 км также вызывают флуктуации сигналов GPS.

Одним из наиболее часто используемых параметров, описывающих уровень флуктуаций в ионосфере, является ROT (rate of change of TEC) — скорость изменения величины TEC:

$$\text{ROT} = 9,53((\Phi_1 - \Phi_2)_{ij} - (\Phi_1 - \Phi_2)_{ii}),$$

где Φ_1 и Φ_2 — измеренные значения разности фаз на несущих частотах системы GPS L_1 и L_2 . Величиной, характеризующей интенсивность флуктуаций TEC, также является параметр ROTI (Rate of TEC Index), величина которого определяется стандартным отклонением (дисперсией) параметра ROT.

Пространственные и временные изменения TEC хорошо просматриваются при анализе отдельных пролетов спутников GPS над станцией наблюдения. В качестве примера представлены вариации TEC вдоль пролетов 18-го и 21-го спутника над полярной станцией MCM4 и среднеширотной станцией OHIG.

Крупномасштабные флуктуации (LSF) можно наблюдать на полярной станции MCM4 как увеличение в TEC, что показано на рис. 6 (см. с. 92). Над полярной станцией MCM4 вариации TEC характеризуются сильной изменчивостью как для спокойных, так и возмущенных геомагнитных условий. Как видно на графике, во время бури интенсивность изменений TEC резко возросла и достигла очень высокого уровня — около 50 TECU.

На средних геомагнитных широтах интенсивность LSF уменьшается. Амплитуда изменений TEC значительно меньше, чем на полярных станциях.

dużymi przestrzennymi zmianami TEC i rozmiarami większymi niż 100...300 km. Drugim typem nieregularności są drobnoskalowe fuktuacje (small-scale fluctuations — SSF). Struktury te o rozmiarach rzędu 10 km powodują fuktuacje sygnałów GPS.

Jednym z najczęściej stosowanych parametrów opisujących tempo zmian TEC jest wielkość ROT (rate of change of TEC):

$$\text{ROT} = 9,53((\Phi_1 - \Phi_2)_{ij} - (\Phi_1 - \Phi_2)_{ii}),$$

gdzie Φ_1 i Φ_2 przedstawiają zmierzone wartości fazy na częstotliwościach L_1 i L_2 . Powszechnie stosowanym parametrem opisującym występowanie zjawiska fuktuacji TEC jest również parametr ROTI (Rate of TEC Index), który jest odchyleniem standardowym parametru ROT.

Przestrzenne i czasowe zmiany TEC są dobrze widoczne w zmianach całkowitej zawartości elektronów wzdłuż pojedynczego przejścia satelity GPS nad stacją obserwacyjną.

Wielkoskalowe fuktuacje (LSF), widoczne jako wzrost TEC, ilustruje rys. 6 [Shagimuratov et al., 2006]. Nad stacją polarną MCM4 linia zmian TEC prezentuje dużą zmienność, zarówno podczas spokojnych jak i silnie zaburzonych warunków geomagnetycznych. Jak można zauważyć podczas burzy intensywność zmian dramatycznie wzrosła. Bez względu na wartość TEC osiągnęła bardzo wysoki poziomok. 50 TECU.

Na średnich szerokościach magnetycznych intensywność LSF maleje. Amplitudy zmian TEC są znacznie mniejsze niż nad stacjami polarnymi. Nad stacją OHIG,

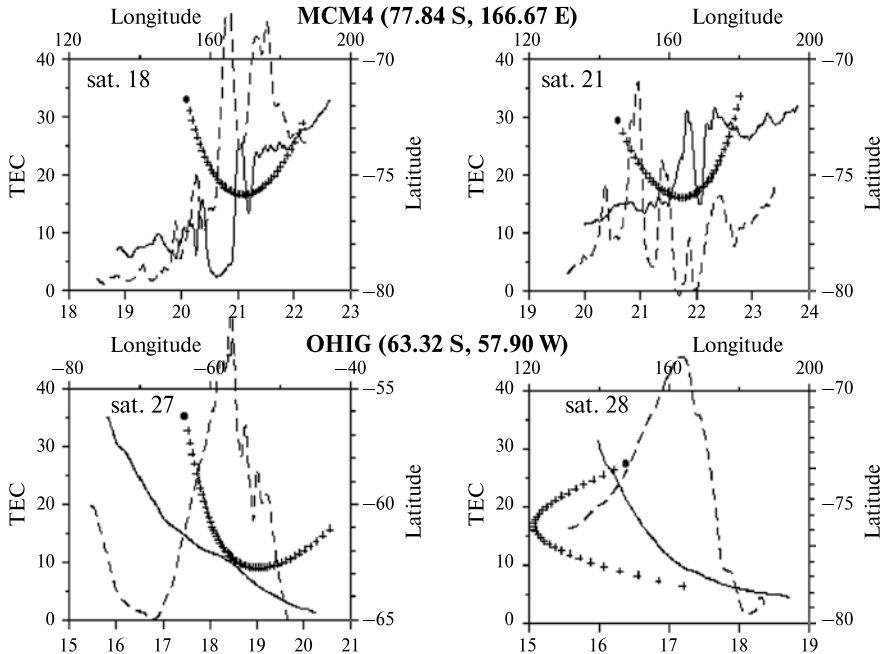


Рис. 6. Вариации TEC для разных пролетов спутников GPS, наблюдавшихся над станциями MCM4 и OHIG 26 марта 2001 (сплошная линия) и 31 марта 2001 года (штриховая линия) [Shagimuratov et al. 2006]

Rys. 6. Zmiany TEC dla różnych przelotów satelitów GPS obserwowanych nad stacjami MCM4 oraz OHIG, dnia 26 marca 2001 (linia ciągła) oraz 31 marca 2001 r. (linia przerywana) [Shagimuratov et al., 2006]

Над станцией OHIG LSF можно наблюдать только во время сильных геомагнитных возмущений. Причиной этого может быть перемещение на эти широты во время сильной магнитной бури главного ионосферного провала, на стенках которого возникают данные неоднородности.

Хорошей иллюстрацией динамики TEC (ROT-индекс) для различных пролетов спутников GPS над полярными станциями CAS1 и MCM4 9 и 11 апреля 2001 года является рис. 7 (см. с. 93) [Krankowski et al., 2006b]. На рисунке показаны абсолютные значения TEC для пролета различных спутников GPS. Максимальные значения ROT достигали величины 6 TECU/мин. Причи-

только podczas silnych zaburzeń można zaobserwować występowanie LSF. Przyczyną tego może być występowanie na tych szerokościach rowu jonosferycznego, powodującego wzrost wartości poziomych gradientów. Jak wiadomo wartości tych gradientów mogą różnić się i to znacznie podczas zaburzonych i spokojnych geomagnetycznych warunków.

Dobłą ilustrację dynamiki zmian TEC (index ROT) dla różnych przelotów satelitów GPS nad stacjami polarnymi CAS1 i MCM4 stanowi rysunek 7 [Krankowski et al., 2006b]. Maksymalne wartości ROT osiągnęły nawet wartość 6 TECU/min. Na rysunku tym przedstawiono również bezwzględne wartości TEC dla różnych przelotów satelitów GPS. Przyczyną silnych fluktuacji TEC mogą być wielkoskalowe

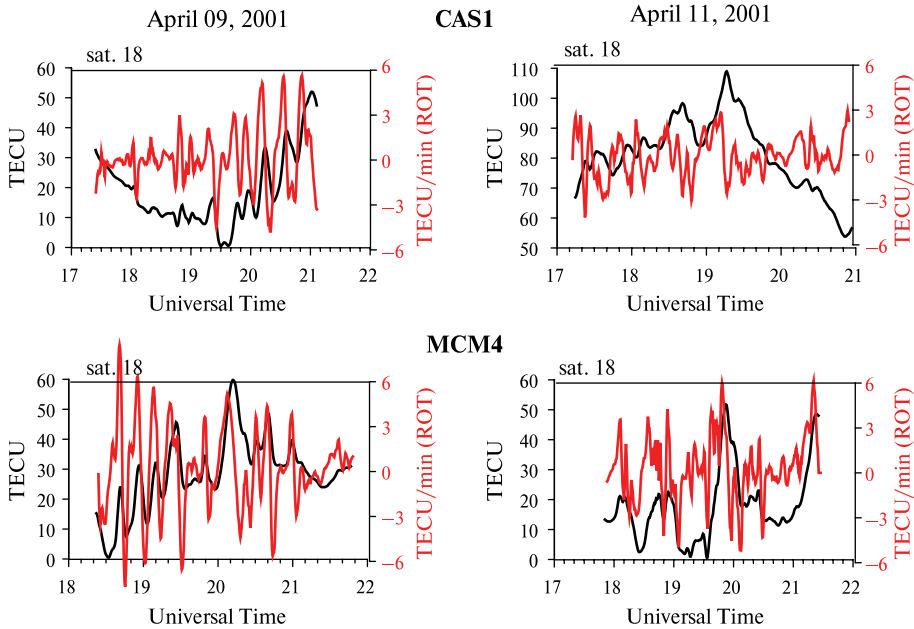


Рис. 7. Вариации TEC (черная линия) и параметра ROT (красная линия) для пролетов 18 спутников GPS, наблюдавшихся над станциями CAS1 и MCM4 9 и 11 апреля 2001 года [Krankowski et al., 2006b]

Rys. 7. Zmiany TEC (czarna linia) oraz parametru ROT (czerwona linia) dla przelotów satelity 18 GPS, obserwowanego nad stacjami CAS1 i MCM4 w dniach 9 i 11 kwietnia 2001 r. [Krankowski et al., 2006b]

ной сильных флуктуаций TEC могут быть крупномасштабные структуры (типа полярных патчей) с повышенной концентрацией электронов, перемещающиеся из полярной ионосферы. Аналогичные изменения в полярной ионосфере наблюдались во время бури в июле 2004 года. На рис. 8 (см. с. 94) представлены проявления флуктуаций TEC за период 21–28 июля 2004 года по всем пролетам спутников GPS над станциями CAS1, MCM4, DAV1, MAW1 и SYOG [Shagimuratov et al. 2006]. Для станций, расположенных на разных долготах, усиление интенсивности TEC-флуктуаций наблюдается практически одновременно.

Пространственно-временное распределение интенсивности TEC-флуктуаций над станциями OHIG и

структуры о повышенной концентрации электронов, występujące w polarnej jonosferze. Podobne zmiany w polarnej jonosferze były obserwowane dla lipcowej burzy z 2004 roku. Szczegółowe zestawienie fluktuacji TEC dla okresu między 21 a 28 lipca 2004 roku dla wszystkich przelotów satelitów GPS nad stacjami CAS, MCM4, DAV1, MAW1 oraz SYOG prezentuje rys. 8 [Shagimuratov et al., 2006].

Dla stacji powyżej 80 CGL (CAS1, MCM4) silne fluktuacje Kompleksowe zestawienie lokalizacji fazowych fluktuacji

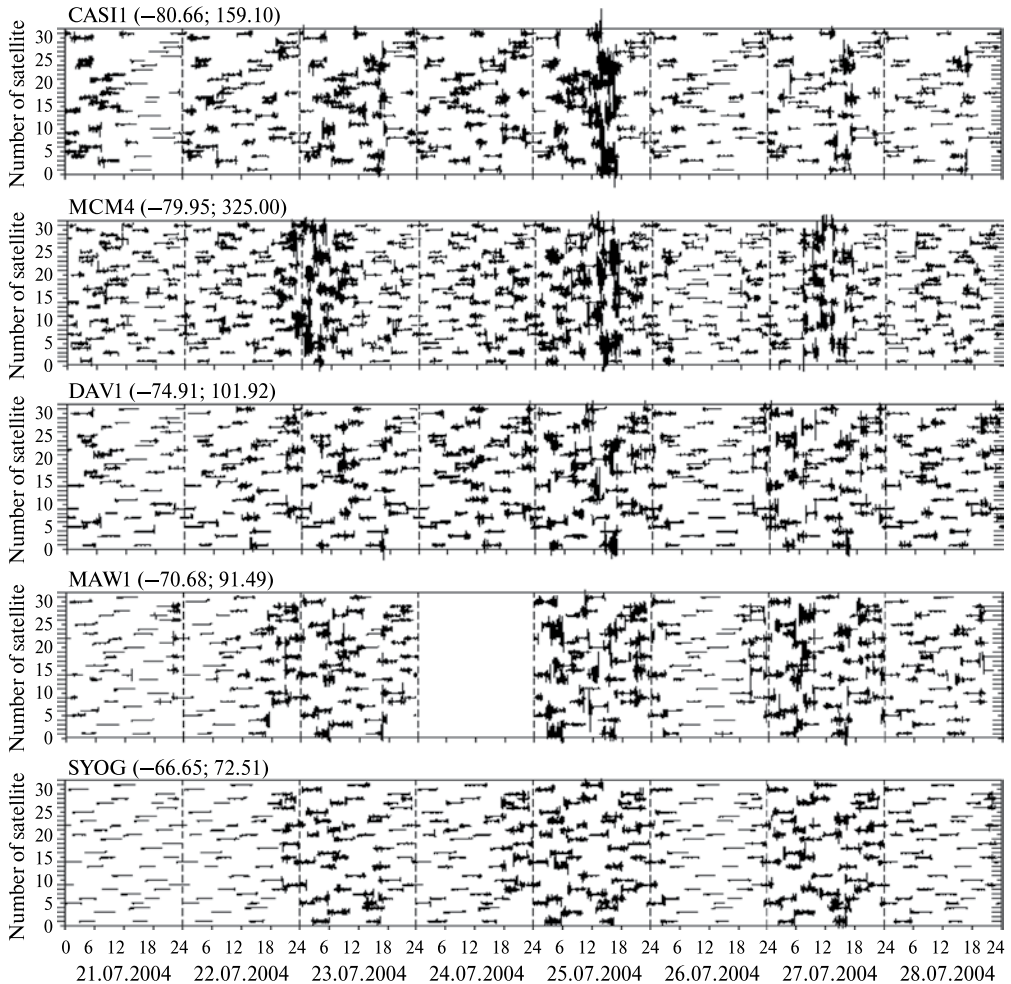


Рис. 8. Структура флуктуаций TEC в период 21–28 июля 2004 года для всех пролетов спутников GPS над станциями CAS1, MCM4, DAV1, MAW1 и SYOG [Shagimuratov et al., 2008]

Rys. 8. Kompleksowe zestawienie fluktuacji TEC dla okresu między 21 a 28 lipca 2004 r. dla wszystkich przelotów satelitów GPS nad stacjami CAS1, MCM4, DAV1, MAW1 oraz SYOG [Shagimuratov et al., 2008]

MCM4 для спокойного и возмущенного дня в координатах геомагнитного местного времени и широты представлено на рис. 9 (см. с. 95). Над полярными станциями (такими как MCM4) TEC-флуктуации различной интенсивности наблюдаются в любое время дня и в различных геомагнитных условиях

TEC o różnej intensywności przedstawiają rysunki 9. Występowanie tych różnoskalowych nieregularności zaprezentowane jest w funkcji lokalnego czasu geomagnetycznego oraz szerokości geomagnetycznej. Nad stacjami polarnymi (np. MCM4) fluktuacje TEC o różnej skali są obserwowane o każdej porze dnia i w każdych warunkach

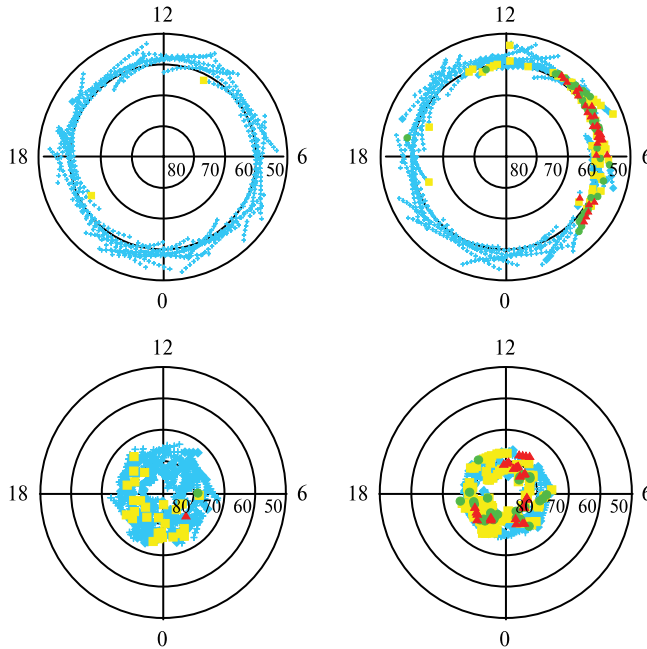


Рис. 9. Положение флуктуаций TEC, полученных по данным GPS-наблюдений в координатах геомагнитного местного времени и широты над станциями OHIG и MCM4 для 26 и 31 марта 2001 года. Интенсивность флуктуаций TEC: в диапазоне ниже 0,3 TECU/мин — синие крестики; в диапазоне 0,3...0,5 TECU/мин — желтые квадраты; выше 1,5 TECU/мин — красные треугольники [Shagimuratov et al., 2006]

Rys. 9. Lokalizacja fluktuacji TEC otrzymanych z danych GPS jako funkcja lokalnego czasu geomagnetycznego oraz poprawionej szerokości geomagnetycznej nad stacjami OHIG i MCM4 w dniu 26 i 31 marca 2001 r. Intensywność fluktuacji TEC: między 0,3 TECU/min — krzyże niebieski; 0,3...0,5 TECU/min — żółty kwadrat; powyżej 1.5 TECU/min — czerwone trójkąty [Shagimuratov et al., 2006]

(как во время бури, так и в периоды спокойной ионосферы).

Над среднеширотной станцией в спокойный период флуктуации практически отсутствуют, во время возмущений их интенсивность значительно увеличивается. Из данных рис. 9 видно, что во время сильного возмущения (31 марта 2001 года) интенсивность флуктуаций возрастает и на среднеширотной станции OHIG [Shagimuratov et al., 2006].

Динамика средне- и крупномасштабных флуктуаций для спокойного и возмущенного периодов приведена на рис. 10 (см. с. 96).

geomagnetycznych (zarówno w czasie burz, jak też okresów spokojnej jonosfery).

Jednak, jak można zaobserwować na rysunku 9, w czasie występowania silnego zaburzenia (31 marca 2001) nieregularności rozwijają się aż do średnich szerokości geomagnetycznych (stacja OHIG). Podczas spokojnego stanu jonosfery, w dniu 26 marca 2001 roku, intensywność fluktuacji TEC nad stacją O'Higgins była niewielka [Shagimuratov et al., 2006].

Динамика średnio- i wielko-skalowych fluktuacji w okresie zaburzonej i spokojnej jonosfery pokazany na rys. 10.

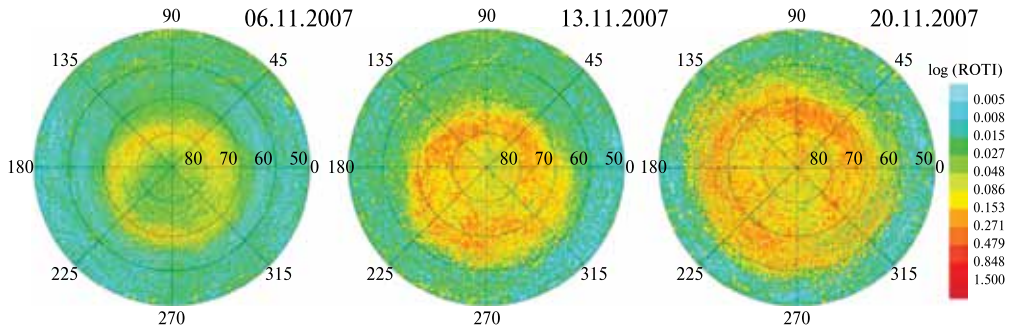


Рис. 10. Динамика средне- и крупномасштабных флуктуаций для спокойного и возмущенного периодов [Shagimuratov et al., 2011]

Rys. 10. Dynamika średnio- i wielko-skalowych fluktuacji w okresie zaburzonej i spokojnej jonosfery [Shagimuratov et al., 2011]

Научно-методические вопросы проекта «Диагностика ионосферы Земли с использованием систем глобальной навигации» российские и польские ученые представили в ряде совместных публикаций и докладов на международных конференциях.

Rosyjscy i polscy badacze opublikowali szereg prac i zaprezentowali kilkadziesiąt referatów na międzynarodowych konferencjach naukowych.

ЛИТЕРАТУРА

BIBLIOGRAFIA

- Krankowski A., Shagimuratov I. I.* (2006) Impact of TEC fluctuations in the Antarctic ionosphere on GPS positioning accuracy // Artificial Satellites. 2006. V. 41. N. 1. P. 43–56.
- Krankowski A., Shagimuratov I. I., Zakharenkova I. E.* (2006a) Response of the ionosphere to the Baltic Sea earthquake of 21 September 2004 // Acta Geophysica. 2006. V. 54. N. 1. P. 90–101.
- Krankowski A., Shagimuratov I. I., Baran L. W., Efishov I. I., Tepenitzyina N. J.* (2006b) The Occurrence of Polar Cap Patches in TEC Fluctuation Using GPS Measurements // Advances in Space Research. 2006. V. 38. N. 11. P. 2601–2609.
- Krankowski A., Shagimuratov I. I., Baran L. W.* (2007a) Mapping of $foF2$ over Europe based on GPS-derived TEC data // Advances in Space Research. 2007. V. 39. P. 651–660.
- Krankowski A., Shagimuratov I. I., Baran L. W., Yakimova G. A.* (2007b) The structure of the mid- and high-latitude ionosphere during the November 2004 storm event obtained from GPS observations // Acta Geophysica. 2007. V. 55. N. 4. P. 490–508.
- Krankowski A., Shagimuratov I. I., Baran L. W., Yakimova G. A.* (2008) The occurrence of total solar eclipse on October 3, 2005 in TEC over Europe // Advances in Space Research. 2008. V. 41. N. 4. P. 628–638.
- Krankowski A., Shagimuratov I. I., Efishov I. I., Krypiak-Gregorczyk A., Yakimova G.* (2009) The occurrence of the mid-latitude ionospheric trough in GPS-TEC measurements // Advances in Space Research. 2009. V. 43. N. 11. P. 1721–1731.
- Krankowski A., Zakharenkova I., Krypiak-Gregorczyk A., Shagimuratov I. I., Wielgosz P.* (2011) Ionospheric Electron Density Observed by FORMOSAT-3/COSMIC over European Region // J. Geodesy. 2011 (after review, accepted).
- Shagimuratov I. I., Efishov I., Krankowski A., Ruzhin Y., Tepenitzyina N.* (2006) Occurrence of phase fluctuations of GPS signals in Antarctic ionosphere during severe November 2004 storm // Proc. 18th Intern. Wrocław Symp. and Exhibition on Electromagnetic Compatibility. Wrocław, Poland, 28–30 June 2006. P. 31–35.

- Shagimuratov I. I., Krankowski A., Efishov I. I., Zakharenkova I. E., Tepenitsyna N. Yu.* (2008) Influence of polar ionosphere on transionospheric propagation of GPS signals // Proc. 19th Intern. Wroclaw Symp. and Exhibition on Electromagnetic Compatibility. Wroclaw, Poland, June 11–13 2008.
- Shagimuratov I. I., Krankowski A., Efishov I., Cherniak Yu., Wielgosz P., Zakharenkova I.* (2011) High latitude TEC fluctuations and irregularity oval during geomagnetic storms // Earth, Planets and Space (EPS). 2011 (after review, accepted).
- Zakharenkova I. E., Krankowski A., Shagimuratov I. I.* (2006a) Modification of the low-latitude ionosphere before the 26 December 2004 Indonesian earthquake // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2006. V. 6. P. 817–823.
- Zakharenkova I. E., Shagimuratov I. I., Krankowski A., Lagovsky A. F.* (2006b) Ionospheric precursors observed during the Mediterranean region earthquakes // Proc. 18th Intern. Wroclaw Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility. Wroclaw, Poland, 28–30 June 2006. P. 86–90.
- Zakharenkova I. E., Shagimuratov I. I., Krankowski A., Lagovsky A. F.* (2007a) Precursory phenomena observed in the total electron content measurements before great Hokkaido earthquake of September 25, 2003 (M = 8.3) // Studia Geophysica et Geodaetica. Netherlands: Springer, 2007. V. 51. N. 2. P. 267–278.
- Zakharenkova I. E., Shagimuratov I. I., Krankowski A.* (2007b) Features of the ionosphere behavior before the Kythira 2006 earthquake // Acta Geophysica. 2007. V. 55. N. 4. P. 524–534.
- Zakharenkova I. E., Shagimuratov I. I., Tepenitzina N. Yu., Krankowski A.* (2008) Anomalous modification of the ionospheric total electron content prior to the 26 September 2005 Peru earthquake // J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2008. V. 70. N. 15. P. 1919–1928.

Project «GPS diagnostic of the ionosphere» is realized in framework joint interacademic Russian-Polish projects in sphere of the fundamental space research. The project is implemented by scientific teams from WD IZMIRAN (Kaliningrad, Russia) and UWM (Olsztyn, Poland). In the course of the project it was carried out investigations of the ionosphere structure and dynamics by using several methods for radiophysical diagnostics of the ionosphere – vertical ionosphere sounding, GPS/GLONAS transionospheric signal propagation, radiooccultation. It was developed the complex of methods, algorithms and programs to restore the spatial-temporal distribution of total electron content (TEC) by using the GPS receivers. It was carried out the analysis and interpretation of the ionosphere parameters variations during disturbances of various origin and intensity (geomagnetic storms, solar flares, solar eclipses, earthquakes). It was investigated the ionospheric fluctuation dynamics in the Arctic and Antarctic regions as well as at midlatitudes during strong geomagnetic storms. It was estimated by radiophysical data the seismo-ionospheric effects.

9 ИНЖЕКЦИЯ

Руководитель проекта
с российской стороны:

Ю. МИХАЙЛОВ

Руководитель проекта
с польской стороны:

З. КЛОС

Проект является продолжением и развитием совместных исследований российских и польских специалистов, начатых на спутниках «Интеркосмос-15, -19, -24 и -25» и «Космос-1809», и посвящён анализу неустойчивостей в космической плазме, вызванных инжекцией в невозмущённую плазму немодулированных и модулированных пучков электронов и ионов различных энергий. В работе содержатся результаты анализа данных, полученных на спутнике «Интеркосмос-25» в проекте АПЭКС. Исследуются эффекты возникновения КНЧ-ОНЧ-волн, возбуждаемых одновременно с началом работы ускорителя ионов Хе, а также эффекты, наблюдаемые по окончании работы ускорителя, которые интерпретируются как эхо-сигналы. Последние рассматриваются как результат распространения альвеновских волн вдоль силовой линии магнитного поля до высот ионосферы и обратно. Оценки времени задержки возмущений совпадают с экспериментальными данными. Рассматриваются также эффекты двухлучевой неустойчивости в качестве источника возбуждения наблюдаемых сигналов.

ЭФФЕКТЫ ВОЗБУЖДЕНИЯ КНЧ-ОНЧ-ВОЛН

Основу проекта составляли пучки ионов и электронов, инжектируемые с борта спутника «Интеркосмос-25», запущенного 18 декабря 1991 года в рамках проекта АПЭКС. Описание спутника приведено в работе [Kramer, 1993]. Была применена система спутник — субспутник, что позволяло изучать, в первую очередь, пространственную структуру явлений. Параметры орбиты: апогей — 3080 км, перигей — 440 км, наклонение — 82,5°. В качестве инжектируемого газа использовался Хе, причем на 70 % газ был ионизирован. Направление инжекции было выбрано

9 INIEKCJA

Kierownik projektu
ze strony Rosji:

Y. MIKHAILOV

Kierownik projektu
ze strony Polski:

Z. KŁOS

Projekt jest kontynuacją ale i rozwinięciem wspólnych badań rosyjskich i polskich naukowców, które rozpoczęto na satelitach „Interkosmos-15, -19, -24 i -25” oraz „Kosmos-1809” i odnosi się do analizy niestabilności w plazmie kosmicznej, powodowanych iniekcją w niezaburzoną plazmę niemodulowanych i modulowanych wiązek elektronów i jonów z różnymi energiami. Badano zaburzenia parametrów plazmy wzbudzone falami w paśmie ELF-VLF oraz Wcz a także, czasy życia i skale przestrzenne tych zjawisk. W pracy przedstawiono wyniki analizy danych otrzymanych z satelitów Interkosmos-25 w projekcie APEX. Badano efekty pojawiania się fal ELF-VLF wzbudzanych jednocześnie z początkiem pracy akceleratora jonów Хе, a także efekty obserwowane po zakończeniu pracy akceleratora, które zinterpretowano jako echo-sygnały. Echo rozpatrywano je jako wynik propagacji fal Alfvena wzdłuż linii sił pola magnetycznego do wysokości jonosfery i ich odbicia. Ocena czasu opóźnienia zaburzenia jest zgodna z danymi eksperymentalnymi. Rozpatrzono także efekty dwustrumieniowej niestabilności jako źródła wzbudzania obserwowanych sygnałów.

EFEKTY WZBUDZANIA FAL ELF-VLF

Projekt oparty był o iniekcję wiązki elektronów i jonów z pokładu satelity. W projekcie wykorzystano konfigurację satelity — sub-satelity co pozwoliło badać, w pierwszej kolejności, przestrzenne struktury zjawisk. Parametry orbity satelity: apogeum 3080 km, perygeum 440 km, nachylenie 82,5° [Kramer, 1993]. Wpuszczanym gazem był Хе i 70 % gazu było zjonizowane. Kierunek iniekcji był przeciwny do ruchu satelity i pod kątem 45° względem linii sił pola magnetycznego Ziemi. Wyniki eksperymentu uzyskane dla orbity 767-ej satelity przedstawia Rys.1. Na rysunku od dołu ku górze są przedstawione: prąd dzia-

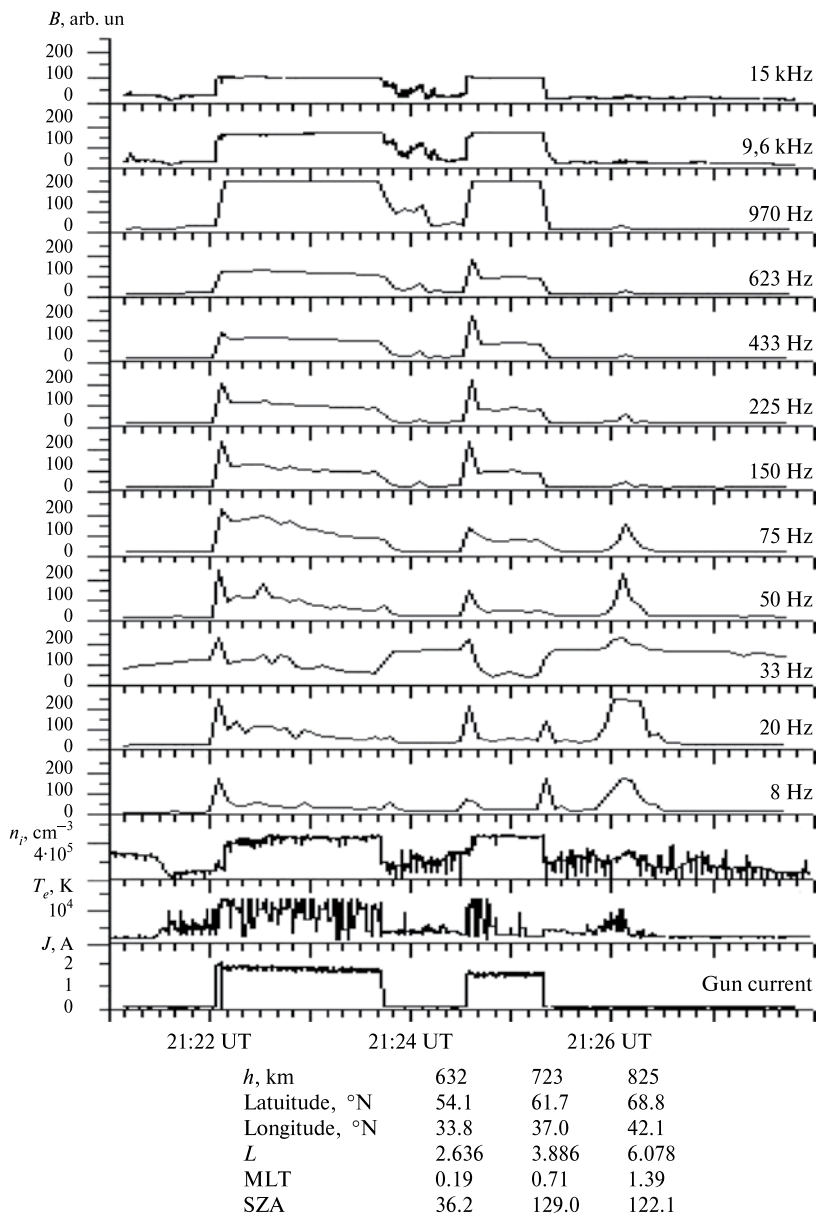


Рис. 1. Магнитная компонента B КНЧ-ОНЧ-излучений, регистрировавшихся с помощью системы дискретных фильтров, частоты которых приведены справа, ток J инъекции Хепушки, температура электронов T_e и плотность ионов n_i

Rys. 1. Składowa magnetyczna B emisji ULF-VLF, rejestrowana systemem filtrów dyskretnych częstości których wartości zaznaczone są na prawej stronie rysunku, prąd iniekcji J działa Xe, temperatura elektronów T_e i gęstość jonów n_i

противоположным вектору скорости спутника, под углом 45° к магнитному полю Земли. Результаты эксперимента на 767-м витке спутника представлены на рис. 1 (см. с. 99). На рисунке снизу вверх приведены: ток ксеноновой пушки, возмущения температуры электронов и концентрации ионов в плазме, а также спектральные компоненты КНЧ-ОНЧ-шумов (B_x -составляющая) в относительных единицах, регистрируемые в окрестности пушки. Как видно из данных рис. 1, импульсам тока пушки соответствуют всплески КНЧ-ОНЧ-волн, а также возмущения T_e и n_i . Однако наряду с этими всплесками отмечаются и такие, во время которых ток инжекции отсутствует. Эти всплески возникают, по нашему мнению, вследствие эффекта «эхо».

На рис. 2 приведено распределение интенсивности всплесков по спектру. Как видно на рис. 2, всплески во время инжекции имеют тенденцию группироваться ближе к ОНЧ-диапазону, в то время как «эхо»-всплески группируются в КНЧ-области. Частотой, на которой разделяются эти две области, является гирочастота ионов. Измерения ионного состава на спутнике «Интеркосмос-25» отсутствовали, и эту величину можно оценить лишь приближённо. Естественно связать «эхо»-эффекты

ла ксенонowego, zaburzenie temperatury elektronów i gęstości jonów w plazmie, a także spektralne składowe magnetyczne B_x -szumów ELF-VLF rejestrowane w okolicy działa. Jak widać z rys. 1 impulsom prądu działa towarzyszą rozbłyski szumów w paśmie VLF jak i zaburzenia T_e i n_i . Jednocześnie z tymi rozbłyskami występują także rozbłyski, w czasie których prąd działa zanika. Te rozbłyski, według naszej opinii, pojawiają się na skutek efektu „echa”.

Charakterystyka obserwowanych widm ELF-VLF w czasie iniekcji i w modzie „echa” różni się co wyraźnie widać na rys. 2. Na tym rysunku przedstawiono rozkład intensywności rozbłysków w zależności od widma. Jak widać na rys. 2, rozbłyski w czasie iniekcji mają tendencję grupowania się bliżej zakresu VLF natomiast w sytuacji „echa” rozbłyski grupują się w części ELF widma. Częstością rozdzielającą te dwa obszary okazuje się być częstotliwość cyklotronowa jonów. Pomiar składu jonoowego na tym satelicie nie były prowadzone,

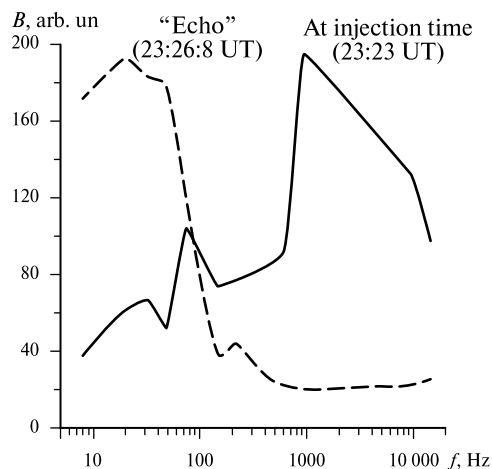


Рис. 2. Зависимость B -компоненты от частоты в относительных единицах

Rys. 2. Zależność składowej B od częstotliwości w jednostkach względnych

с альвеновскими волнами. Можно предположить, что альвеновская волна возникает во время второго импульса иньекции. Это подтверждается магнитограммой для B_x -компонеты поля, полученной с помощью магнитометра на второй гармонике, предназначенного для регистрации медленных измерений поля [Mikhailov et al., 2000]. На этой магнитограмме отчетливо выражены две волны с периодом 50 с. Далее волна распространяется по наиболее протяженному участку силовой линии, при этом вектор волновой нормали \mathbf{K} параллелен вектору \mathbf{B} .

Поясним это следующими оценками. Дисперсионное уравнение для МГД-волны записывается в следующем виде: $\omega = \mathbf{K} \cdot \mathbf{B} \sqrt{4\pi\rho}$, где ω — круговая частота волны; ρ — плотность среды. Групповая скорость волны определяется формулой $\mathbf{V}_{gp} = \partial\omega/\partial\mathbf{K}$. Из дисперсионного уравнения следует $\mathbf{V}_{gp} = \mathbf{B}/\sqrt{4\pi\rho}$. Для волны, у которой вектор \mathbf{K} параллелен \mathbf{B} , формула для V_{gp} упрощается: $V_{gp} = B/\sqrt{4\pi\rho}$. Далее вычисляется величина плотности и индукции поля вдоль силовой линии. Укажем, что индукция в вершине силовой линии ~ 10 нТ, а плотность около 100 см^{-3} . Учитывая изменение параметров B и ρ вдоль силовой линии, можно оценить среднюю скорость МГД-волны как $5 \cdot 10^8 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$. Общая длина траектории волны складывается из пути до ионосферы при $L = 5,5$ и пути после отражения от ионосферы при $L = 6,0$. Эта длина оценивается как $143 \cdot 10^3 \text{ км}$ [Ружин, Захарова, 1991]. Время задержки примерно 28 с, что совпадает со временем, значение которого вытекает из результатов, представленных на рис. 1.

ВОЗМУЩЕНИЯ КВАЗИПОСТОЯННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО И МАГНИТНОГО ПОЛЕЙ

На рис. 3 (см. с. 102) представлены компоненты возмущения электрического δE_{xz} (0,1...2 Гц) и магнитного δB_{xy}

дlatego jej wartość można określić jedynie w przybliżeniu. Naturalnym jest aby efekt „echo” wiązać z falami alfvena. Można przyjąć, że fala alfvena powstaje w czasie drugiego impulsu iniekcji. To potwierdza magnetogram B_x pokazany w [Mikhailov et al., 2000]. Na tym magnetogramie wyraźnie są widoczne dwie fale z okresem 60 s. Fala rozprzestrzenia się w najbardziej rozciągającą się część linii pola magnetycznego a wektor normalny fali \mathbf{K} jest równoległy do wektora pola magnetycznego \mathbf{B} .

Wyjaśnimy to następującymi oszacowaniami. Równanie dyspersyjne dla fal MHD zapisuje się jako $\omega = \mathbf{K} \cdot \mathbf{B} \sqrt{4\pi\rho}$, gdzie ω — częstość kołowa fali ρ — gęstość ośrodka. Prędkość grupowa fali jest określona formułą $\mathbf{V}_{pg} = \partial\omega/\partial\mathbf{K}$. Z równania dyspersyjnego wynika, że $\mathbf{V}_{pg} = \mathbf{B}/\sqrt{4\pi\rho}$. Dla fali gdzie $\mathbf{K} // \mathbf{B}$, formuła dla V_{gp} upraszcza się $V_{gp} = B/\sqrt{4\pi\rho}$. Kolejno wyliczana jest wielkość gęstości i indukcji pola wzdłuż linii sił. Pokazujemy, że indukcja w górnej części linii sił jest rzędu 10nT, a gęstość ca. 100 cm^{-3} . Uwzględniając zmiany parametrów B i ρ wzdłuż linii sił pola można ocenić średnią prędkość fali MHD na $5 \cdot 10^8 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. Całkowita długość wewnątrz S dla fali składa się z drogi do jonosfery przy $L = 5.5$ i drogi po odbiciu od jonosfery przy $L = 6.0$. Ta długość drogi to $143 \cdot 10^3 \text{ km}$ [Ружин, Захарова, 1991]. Czas opóźnienia to 28 s. co pokrywa się z czasem wynikającym z pomiarów przedstawionych na rys. 1.

ZABURZENIA QUASI-STACJONARNEGO POLA ELEKTRYCZNEGO I MAGNETYCZNEGO

Na rys. 3 przedstawiono zaburzenia pola elektrycznego δE_x (0,1...2 Hz) i quasi stacjonarnego pola magnetycznego δB_{xy} , a

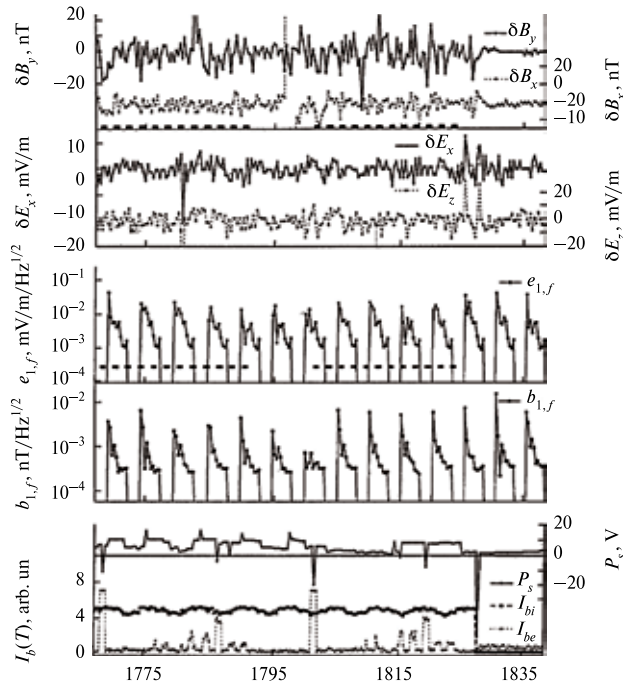


Рис. 3. Возмущения компонент квазипостоянного магнитного δB_{xy} и электрического поля δE_{xz} (0,1...2 Гц), ОНЧ-спектры электрического и магнитного полей $e_{1,f}$, $b_{1,f}$ в диапазоне 8...969 Гц (10 фиксированных частот), потенциал корпуса спутника P_s и телеметрия активного цикла работы инжекторов на спутнике «Интеркосмос-25»

Rys. 3. Zaburzenia składowych quasi-stacjonarnego pola magnetycznego δB_{xy} i pola elektrycznego δE_{xz} (0.1...2 Hz), widma VLF pól elektrycznego i magnetycznego: $e_{1,f}$, $b_{1,f}$ w zakresie (8...969 Hz, dla 10 ustalonych częstotliwości), potencjał elektryczny korpusu satelity i telemetria aktywnego cyklu pracy iniektorów na satelicie „Intercosmos-25”

полей, а также ОНЧ-спектры электрической и магнитной составляющих $e_{1,f}$ и $b_{1,f}$ в диапазоне 8...969 Гц. На том же рисунке приводятся осциллограммы потенциала корпуса и токов инжекции, включающих электронную и ионную компоненты [Баранец и др., 2007]. Анализируемый режим работы инжекторов применяется на спутнике «Интеркосмос-25» на некоторых из витков. Эти режимы позволяют изучать взаимодействие двух пучков в космической плазме. Инжекция электронного пучка сквозь ионный имеет чётко выраженную пространственно-временную структуру [Баранец и др., 2007].

также widma VLF elektrycznych i magnetycznych składowych $e_{1,f}$ i $b_{1,f}$ w zakresie (8...969 Hz). Na tym rysunku przedstawiono również oscylogramy potencjału elektrycznego korpusu satelity i prądów iniekcji [Баранец и др., 2007]. Analizowany reżim pracy iniektorów był realizowany na wybranych orbitach satelity „Intercosmos-25”. Te reżimy pozwoliły badać wzajemne oddziaływanie dwóch wiązek w plazmie kosmicznej. Iniekcja wiązki elektronowej skośnie do strumienia jonów daje wyraźną strukturę czasowo-przestrzenną [Баранец и др., 2007].

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ПОЛЯ

В работе [Баранец и др., 2007] представлены результаты исследований на спутнике «Магион-3», где наблюдалась инжекция электронного и ионного пучков в одном направлении вертикально от поверхности Земли. Измеренные ВЧ-поля могут быть объяснены развитием плазменно-пучковой неустойчивости при инжекции потока разогретых электронов в холодную ионосферную плазму [Баранец и др., 2000; Klos, 1995; Klos, Zaliznyak, 1999].

POLA W CZ

W pracy [Баранец и др., 2007] przedstawiono wyniki uzyskane na satelicie „Magion-3” gdzie badano iniekcję wiązki elektronów i jonów w jednym kierunku — pionowo od powierzchni Ziemi. Pomierzone pola Wcz. można wyjaśnić rozwojem plazmowo — wiązkowej niestabilności dla iniekcji gorących elektronów w zimną plazmę jonosfery [Баранец и др., 2000; Klos, 1995; Klos, Zaliznyak, 1999].

ЛИТЕРАТУРА

- Баранец Н. В., Ружин Ю. Я., Афонин В. В., Ораевский В. Н., Пулинец С. А., Докукин В. С., Михайлов Ю. М., Соболев Я. П., Жузгов Л. Н., Прутенский И. С. (2000) Квазипоперечная к геомагнитному полю инжекция электронных пучков по данным спутника «Интеркосмос-25»: проект АПЭКС // Космична наука и технология. 2000. Т. 6. № 516. С. 49–62.
- Баранец Н. В., Соболев Я. П., Чобану М., Войта Я., Шмиллауэр Я., Клос З., Роткель Х., Курага А., Кудела К., Матишин Я., Афонин В. В., Рябов Б. С., Исаев Н. В. (2007) Развитие пучковой неустойчивости при инжекции слабоэнергичного электронного пучка в ионосферную плазму // Физика плазмы. 2007. Т. 33. № 12. С. 1086–1106.
- Ружин Ю. Я., Захарова О. К. (1991) Магнитная сопряжённость как предмет исследований методом активных экспериментов: Препринт ИЗМИРАН. М.: ИЗМИРАН, 1991. № 23 (970). 28 с.
- Klos Z. (1995) Plasma waves observed in neutral gas release and plasma injection experiments in the ionosphere. The Solar Wind — Magnetosphere system 2 // Proc. Intern. Workshop. Held, Graz, Sept. 27–29. 1995. P. 283–295.
- Klos Z., Zaliznyak Yu. (1999) On the possible mechanism of HF waves generation during APEX active plasma beam injection // J. Technical Physics. 1999. V. 40. Special Iss. 2. P. 155–162.
- Kramer H. (1993) Observation of the Earth and its Environment Survey of Missions and Sensors. German Remote Sensing Data Center, 1993. P. 474.
- Mikhailov Yu. M., Oraevski V. N., Sobolev Ya. P., Dokoukin V. S., Kapustina O. V., Shibaev I. G., Afonin V. V. (2000) Waves generating in vicinity of Xenon plasma gun in the APEX-experiment // Physics and Chemistry of the Earth. Pt. C. 2000. V. 25. N. 1–2. P. 67–70.

BIBLIOGRAPHY

The project is continuation and development of the cooperative research of Russian and Polish scientists, based on measuring on Intercosmos-15, -19, -24 and -25 satellites and dedicated to instability analysis of nonmodulated and modulated electron-ion beams in cosmic plasma. The report contains the results of analysis performed on the data from Intercosmos-25 satellite of project APEX. The excitation of ELF-VLF-signals related to the injection of Xe-ions beam at the beginning as well as after the end of this event is described in details. The observed signals in the period after injection are interpreted as echo signals which appear in result of Alfvén wave propagation along the magnetic field line of force to the ionosphere altitudes and back. The estimated time of delay is agreed with experimental data. It is also considered the effect of two beams instability as a source of observed signal excitation.

10 ПВО — ПЛАЗМЕННО-ВОЛНОВАЯ ОБСТАНОВКА

Руководитель проекта
с российской стороны:

С. КЛИМОВ

Руководитель проекта
с польской стороны:

Х. РОТХЕЛЬ

Проект ПВО (Плазменно-волновая обстановка) — исследования плазменно-волновых процессов в совместном российско-польском эксперименте на Международной космической станции. Проект проводится в рамках Плана совместных межкадетических российских-польских проектов в области фундаментальных космических исследований.

Проект ПВО — составная часть космического эксперимента (КЭ) ОБСТАНОВКА, 1-й этап, запланированного для реализации в 2011 году на борту Российского сегмента Международной космической станции (РС МКС). Космический эксперимент является международным проектом с участием учёных и специалистов Англии, Болгарии, Венгрии, Польши, России, Украины и Швеции в рамках «Долгосрочной программы научно-прикладных исследований и экспериментов, планируемых на Российском сегменте МКС» (Версия 2008 года) как часть Российской федеральной космической программы.

Специалисты ЦКИ ПАН провели разработку, изготовление, наземные автономные испытания радиочастотного анализатора (РЧА). Особенно следует отметить разработку в ЦКИ ПАН, изготовление и испытания автоматически раскрывающихся в космосе электрической РЧА-АД (три ортогональных диполя) и магнитной РЧА-АМ (три ортогональные рамки) антенн, обеспечивающих измерение полного потока и направления электромагнитной энергии (рис. 1, см. с. 105).

Прибор РЧА интегрирован в плазменно-волновой комплекс (ПВК, рис. 2, см. с. 106).

10 PWO — ŚRODOWISKO PLAZMOWO-FALOWE

Kierownik projektu
ze strony Rosji:

S. KLIMOW

Kierownik projektu
ze strony Polski:

H. ROTHKAENL

Проект PWO (Środowisko plazmowo-falowe) — Badania plazmowo-falowych procesów we wspólnym Rosyjsko-Polskim eksperymencie na Międzynarodowej Stacji Kosmicznej. Projekt jest realizowany w ramach planu wspólnych projektów badawczych Akademii Nauk Rosji i Polski, w dziedzinie podstawowych Badań Kosmicznych.

Проект PWO jest częścią składową Eksperymentu Kosmicznego OBSTANOWKA, etap, 1-szy (Środowisko etap 1szy), zaplanowanego do realizacji w roku 2011 na pokładzie Rosyjskiego Segmentu Międzynarodowej Stacji Kosmicznej (MSK). OBSTANOWKA jest międzynarodowym projektem z udziałem Wielkiej Brytanii, Bułgarii, Węgier, Polski, Rosji, Ukrainy i Szwecji, w ramach “Długofalowego programu badań naukowych-stosowanych i eksperymentów, planowanych na Rosyjskim Segmentcie MSK.” (wersja z r. 2008), który jest częścią składową Rosyjskiego Federalnego Programu Kosmicznego.

Zespół badawczy z Centrum Badań Kosmicznych PAN zaprojektował i zrealizował autonomiczną, naziemną kalibrację urządzenia RFA (Analizator Częstotści Radiowych). Ponadto szczególnie należy podkreślić innowacyjność i jakość przeprowadzonych w CBK PAN testów mechanicznych i elektromagnetycznych anten: elektrycznej RFA-AE (trzy ortogonalne dipole) i magnetycznej RFA-AM (trzy ortogonalne pętle), rys. 1. Sensory te zapewniają kompleksowy pomiar strumienia i kierunku fal elektromagnetycznych.

Urządzenia RFA jest zintegrowane z Kompleksem Plazmowo-Falowym PWK widocznym na rys. 2.

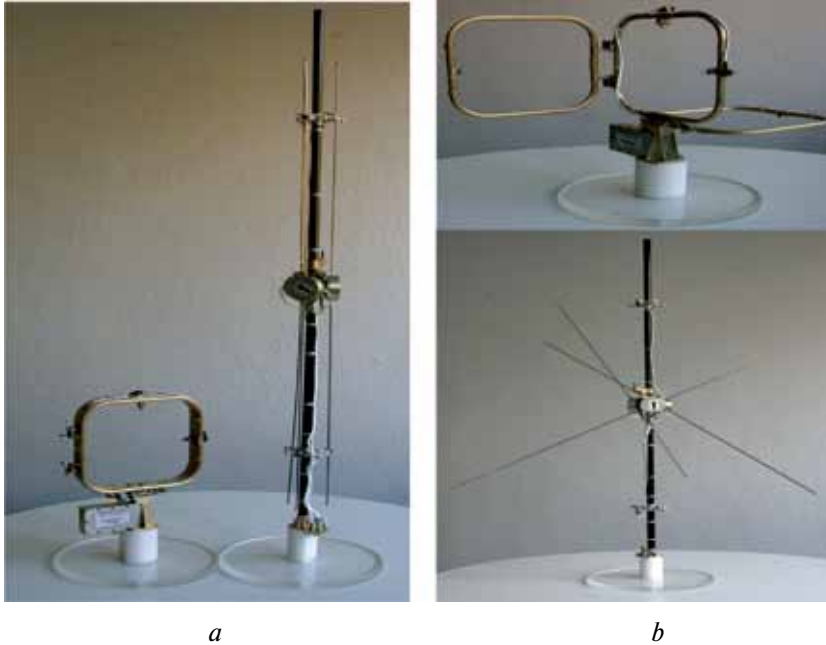


Рис. 1. Общий вид антенн РЧА: *a* — антенны в сложенном (зачекованном) положении; магнитная антенна РЧА-АМ (слева), электрическая антенна РЧА-АД (справа); *b* — антенны в раскрытом состоянии. Магнитная антенна РЧА-АМ (вверху), электрическая антенна РЧА-АД (внизу)

Rys. 1. Widok ogólny anten RFA: *a* — anteny w pozycji złożonej: antena magnetyczna RFA-AM (z lewej) i Antena Elektryczna RFA-AE (z prawej); *b* — anteny w pozycji rozłożonej: antena magnetyczna RFA-AM (u góry) i antena elektryczna RFA-AM (poniżej)

Технологический образец РЧА (ТО РЧА) в 2006–2009 годах в составе технологического образца комплекса ПВК (ТО ПВК) прошел полный цикл наземных испытаний в соответствии с требованиями, предъявляемыми к аппаратуре, устанавливаемой на РС МКС. Эти испытания проводились как в ИКИ РАН, так и на комплексном стенде (КС) РС МКС в Ракетно-космической корпорации «Энергия» им. С.П. Королева (РКК «Энергия»). Технологический образец РЧА в составе ТО ПВК прошёл испытания на КС без замечаний. Польские и российские специалисты проводят обработку и анализ данных, полученных в ходе наземных испытаний. Такой же цикл испытаний пройдет лётный образец ПВК и соот-

РЧА модель технологическая (EM), przeszedł w latach 2006–2009 pełen cykl naziemnych testów wymaganych dla aparatury umieszczonej na rosyjskim segmencie MКС. Testy te były przeprowadzone zarówno w IКИ РАН (Instytut Badań Kosmicznych РАН) jak i na zespolonej platformie dla Rosyjskiego Segmentu MSK w Koncernie Kosmicznym “Energia”. Model Technologiczny RFA w zestawie modelu Technologicznego PWK przeszedł testy bez zastrzeżeń. Obecnie polscy i rosyjscy specjaliści opracowują i analizują dane, otrzymane w trakcie testów naziemnych. Taki sam cykl testów przejdzie też egzemplarz lotny (FM) kompleksu PWK wraz z odpowiednim egzemplarzem lotnym RFA. Transport urządzenia PWK na orbitę jest przewidziany na koniec roku 2011.

ветственно РЧА. Доставка ПВК на орбиту запланирована на конец 2011 года.

Участники данной работы из ИКИ РАН и ЦКИ ПАН осуществили в рамках подготовки космического эксперимента ОБСТАНОВКА, 1-й этап методическую и техническую разработку комплекса ПВК.

Методическая проработка основывается на том, что КЭ проводится в интересах фундаментальных космических исследований и носит поисковый характер, так как до сих пор практически не известны спектральные и энергетические характеристики электромагнитных полей в ионосфере (на высотах 350...400 км). На этих высотах (слой F2 ионосферы) не было и нет отечественных долгоживущих космических аппаратов (КА), кроме орбитальных станций, с помощью которых можно было бы осуществить комплексные исследования свойств околоземной плазмы.

W ramach Eksperymentu Kosmicznego OBSTANOVKA etap 1-szy, jego uczestnicy z IKI RAN oraz z CBK PAN opracowali program naukowy, metodologię i harmonogram pomiaru kompleksu PWK.

Program naukowy został tak opracowany, aby odpowiedzieć na zapotrzebowania i pytania stawiane poprzez program podstawowych problemów badań przestrzeni kosmicznej a także aby uzupełnić bazę danych pomiarowych w najbliższym otoczeniu Ziemi, długofalową diagnostyką widmową i energetyczną pól elektromagnetycznych na wysokościach 350...400 km warstwy F2. Naukowe cele eksperymentu wymagają, aby dynamicznie w czasie jego trwania można było zmieniać cykle pracy instrumentów. Wymaga to z kolei przesyłania z Ziemi na orbitę znacznych ilości zdalnych poleceń.

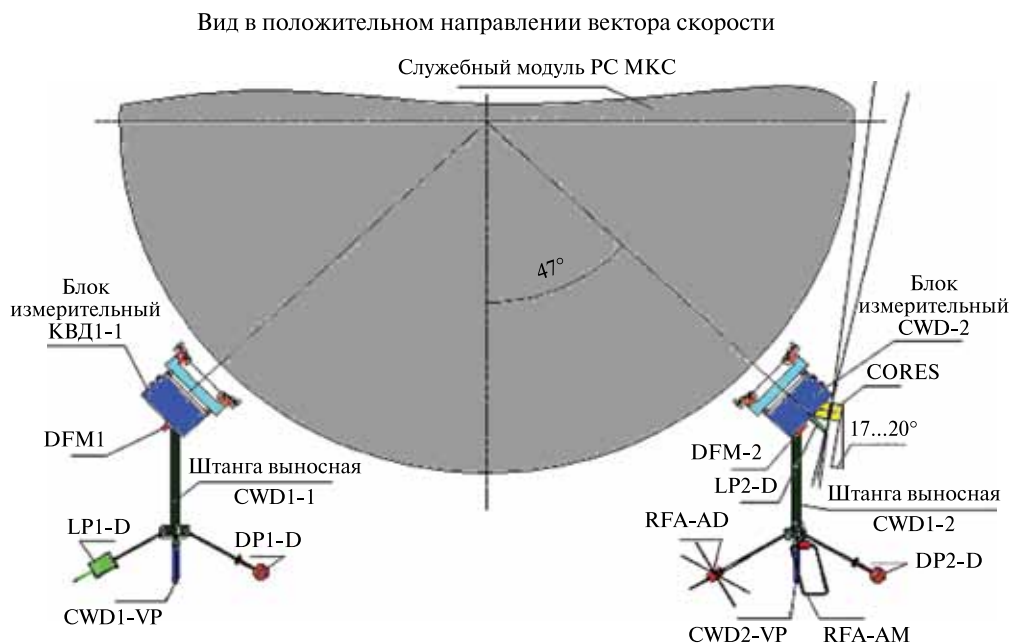


Рис. 2. Состав и размещение ПВК на PC MKC

Rys. 2. Rozmieszczenie i skład kompleksu PWK na rosyjskim segmencie MSK

Методически важно, что орбиты МКС проходят по ионосфере. Благодаря относительно высокой, по сравнению с другими областями околоземного космического пространства, концентрации плазмы, ионосфера является важным интерфейсом в энергетическом процессе солнечно-магнитосферно-атмосферных связей.

Определены основные цели КЭ ОБСТАНОВКА, 1-й этап.

1. Геофизические исследования, которые предполагают долгосрочные мониторинговые измерения параметров плазмы и плазменно-волновых процессов, связанных с проявлением в ионосфере солнечно-магнитосферно-ионосферных и ионосферно-атмосферных связей.

Параметры ионосферной плазмы зависят от параметров солнечного излучения и активности Солнца (солнечный ветер, корональные выбросы массы и др.), отражающейся в возмущениях магнитного поля Земли (геомагнитные бури и суббури), в том числе и в ионосфере. Эти возмущения генерируют электрические поля, что приводит к крупномасштабной конвекции плазмы в ионосфере. Плазма очень чувствительна к различного рода возмущениям. Реакцией на возмущения является генерация широкого спектра электромагнитных излучений в диапазоне частот от долей герц до десятков мегагерц.

Получение новых данных об электромагнитных параметрах ионосферной плазмы необходимо для уточнения моделей ближнего космоса в той его области, где, в частности, осуществляются долгосрочные полеты с человеком на борту. При длительных сроках функционирования орбитальных станций (10...15 лет и более), наряду с кратковременными возмущениями (суббури и магнитные бури), можно исследовать долговременные колебания геомагнитных возмущений, например 11-летний цикл солнечной активности.

Cele naukowe eksperymentu są implikowane lokalizacją orbity Międzynarodowej Stacji Kosmicznej w jonosferze. Ponieważ koncentracja plazmy jest tu wysoka w porównaniu z innymi obszarami przestrzeni okołozemskiej, jonosfera okazuje się być ważnym ogniwem w łańcuchu energetycznego oddziaływania Słońce – Magnetosfera – Atmosfera.

Podstawowe cele Eksperymentu Kosmicznego OBSTANOWKA, etap 1-szy to:

1. Badania geofizyczne, zakładające długotrwałe monitorowanie parametrów plazmy i procesów plazmowo-falowych w jonosferze związanych z oddziaływaniami w układzie: Słońce – Magnetosfera – Jonosfera oraz Jonosfera – Atmosfera.

Zmienność parametrów promieniowania słonecznego oraz aktywności Słońca (wiatr słoneczny, wyrzuty koronalne masy) znajdują odbicie w zaburzeniach pola magnetycznego Ziemi (burze- i subburze magnetyczne), w tym również w właściwościach plazmy jonosferycznej. Takie zaburzenia pola magnetycznego generują pola elektryczne, co prowadzi z kolei do konwekcji jonosferycznej plazmy, niezwykle podatnej na różnego typu indykatory. Reakcją plazmy na zaburzenia jest generacja promieniowania elektromagnetycznego w zakresie od ułamków Hz do dziesiątków megahertzów (MHz).

Uzyskanie nowych danych o elektromagnetycznych parametrach plazmy jonosferycznej jest niezbędne dla udoskonalenia modeli bliskiej przestrzeni kosmicznej, a zwłaszcza dla obszarów gdzie przebiegają długotrwałe loty załogowe. Długi czas funkcjonowania stacji orbitalnych (10...15 lat i więcej), umożliwi badanie nie tylko krótkotrwałych zaburzeń (jak burze i subburze magnetyczne), ale także długotrwałych zmian, np. tych związanych z 11 letnim cyklem aktywności słonecznej.

Важным направлением исследований является изучение и предсказание параметров «космической погоды», которые необходимы для групп, управляющих работой прикладных космических аппаратов на орбите, с целью обеспечения их долговременной активной работы. Например, не исключено, что при прогнозе сильных магнитосферных возмущений некоторые КА необходимо переводить в щадящий режим функционирования бортовой аппаратуры.

2. Исследования в приповерхностной зоне плазменно-волновых процессов взаимодействия сверхбольшого КА, каким является МКС, с ионосферой (необходимых как для прикладных, так и для фундаментальных геофизических исследований). Электрические и магнитные поля и токи у поверхности КА определяются параметрами окружающей космической плазмы и характером взаимодействия материалов, находящихся на поверхности КА, с этой средой.

Проводимые на борту КА измерения позволяют проследить изменения этих полей в полете в зависимости от параметров орбиты и характеристик окружающей среды, которые определяются степенью внешних геофизических возмущений и их природой. Опыт проведения этих измерений свидетельствует о том, что в ряде случаев эти поля достигали значений, приводящих к выходу из строя отдельных приборов и систем. Подобные измерения ранее проводились на орбитальном комплексе МИР.

Долговременный мониторинг параметров ионосферы с борта орбитальных станций может оказать неоценимую помощь, во-первых, для потребителей текущей информации о состоянии ионосферы (радиосвязь и навигация), а также для исследователей солнечно-земных связей. Комплекс ПВК предназначен для непрерывной работы, особенно в процессе формирования МКС,

Zrozumienie i prognozowanie parametrów “Pogody Kosmicznej” staje się niezbędne dla ośrodków zarządzających pracą urządzeń satelitarnych, w celu zabezpieczenia ich długotrwałego i poprawnego funkcjonowania. Przykładowo, nie wyklucza się że w przypadku prognozy o silnych magnetosferycznych zaburzeniach, konieczne będzie przełączenie niektórych urządzeń pokładowych w tryb nieaktywny.

2. Badanie plazmowo-falowych oddziaływań pomiędzy super dużym obiektem kosmicznym jakim jest Międzynarodowa Stacja Kosmiczna a jonosferą, jest niezbędne tak z punktu widzenia geofizyki jak i dla potrzeb aplikacyjnych. Pola elektryczne i magnetyczne oraz prądy wokół satelity zależą od parametrów otaczającej plazmy kosmicznej i od charakteru oddziaływania materiałów powierzchni satelity z otaczającą plazmą.

Prowadzone na pokładzie satelity pomiary pozwolą zaobserwować i zmierzyć te pola w zależności od ich lokalizacji w przestrzeni okołozemskiej i od własności otaczającego ośrodka, poddanemu różnego rodzaju zewnętrznym zaburzeniom geofizycznym. Dotychczasowe doświadczenia z podobnymi pomiarami pokazują, że w wielu przypadkach mierzone pola osiągają tak duże wartości iż mogące rozregulować lub zniszczyć niezależne urządzenia. Podobne pomiary były już prowadzone na stacji kosmicznej MIR.

Długotrwały monitoring parametrów jonosfery i niektórych rejonów magnetosfery z pokładu stacji orbitalnej może być nieocenioną pomocą dla tworzenia serwisów o stanie jonosfery (łączość radiowa i nawigacja) oraz dla badań związków Słońce-Ziemia. Przewiduje się ciągłą pracę kompleksu PWK, zwłaszcza w czasie rozbudowy MКС, jako że będzie się wtedy zmieniać sposób jej oddziaływania

так как при этом изменяется структура взаимодействия МКС с окружающей средой, её нейтральной и плазменной компонентами. Непрерывная работа ПВК необходима также для исследования орбитальных, суточных и сезонных вариаций процессов взаимодействия. Для изучения процессов «космической погоды», так же как и для метеорологической погоды, требуются непрерывные наблюдения.

Назначение комплекса ПВК состоит в обеспечении физических измерений параметров тепловой плазмы, электрических и магнитных полей, спектров надтепловых электронов, электромагнитных волн в ближней зоне (не далее 3 м от поверхности), а также вариаций электрического потенциала МКС.

С помощью РЧА проводятся измерения спектральной плотности:

- электростатических плазменных волн и электрической компоненты электромагнитных излучений E в диапазоне 0,1...15 МГц (три компоненты) (рис. 3, см. с. 111);
- магнитной компоненты электромагнитных излучений H в диапазоне 0,1...15 МГц (три компоненты).

На современном уровне исследований земной ионосферы существенно новые результаты исследований могут быть получены при одновременных измерениях с нескольких КА (многомерные измерения, «связки» КА). Во-первых, это дает возможность достоверно различить пространственные и временные вариации при исследованиях какого-либо явления, во-вторых, только так могут быть исследованы динамические взаимодействия крупномасштабных структур ионосферы и магнитосферы. При этом на стадии подготовки проекта необходимо проведение существенной работы по формированию орбит — тщательный ситуационный анализ-прогноз. Система КА может быть конфигурирована таким

z plazmowymi i neutralnymi składnikami otaczającego ośrodka. Nieprzerwana praca jest też konieczna dla prześledzenia orbitalnych, dobowych i sezonowych zmian tego procesu. Badanie procesów “Pogody Kosmicznej” jak i procesów meteorologicznych wymaga takich właśnie ciągłych obserwacji.

Przeznaczenie kompleksu PWK polega na zapewnieniu pomiarów fizycznych parametrów plazmy termicznej, pól elektrycznego i magnetycznego, widm nadtermicznych elektronów, diagnostyce fali elektromagnetycznych w strefie bliskiej (nie dalej niż 3 metry od powierzchni) oraz zmian potencjału elektrycznego MSK.

Z pomocą RFA przeprowadza się pomiary gęstości widmowej:

- elektrostacyjnych fal plazmowych oraz składowej elektrycznej E promieniowania elektromagnetycznego w zakresie 0,1...15 MHz (trzy składowe);
- składowej magnetycznej H promieniowania elektromagnetycznego w zakresie 0,1...15 MHz (trzy składowe).

Na współczesnym poziomie badań ziemskiej jonosfery, istotnie nowe wyniki badań można osiągnąć przy jednoczesnych pomiarach z kilku satelitów (wielowymiarowe pomiary, grupy satelitów). Po pierwsze, daje to możliwość wiarygodnego rozdzielenia przestrzennych i czasowych zmian przy obserwacji dowolnego zjawiska, a po drugie tylko tak można zbadać wzajemne oddziaływania wielkoskalowych struktur w jonosferze i w magnetosferze. Przy tym, już na etapie przygotowania projektu konieczne jest wykonanie istotnych prac studialnych na temat szczegółowej analizy kształtu orbit i ich ewolucji w czasie. System wielu satelitów może być tak konfigurowany, żeby każdy z indywidualnych satelitów, obok zadań wspólnych, realizował samodzielne zadania służące badaniu oddziel-

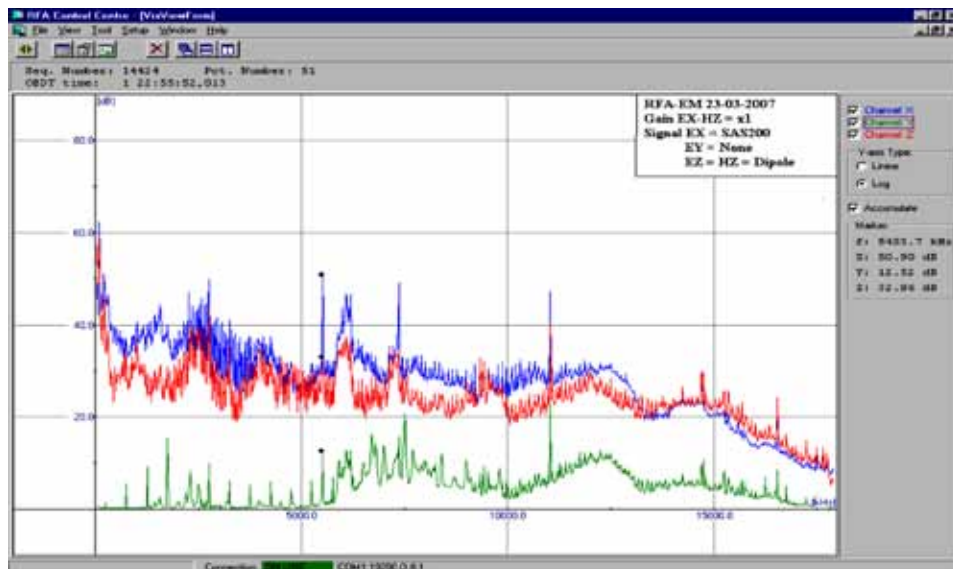


Рис. 3. Примеры спектров электрической и магнитной компонент

Rys. 3. Przykład z pomiarów z naziemnych testów

образом, чтобы каждый КА, наряду с общими задачами, решал самостоятельные задачи по изучению отдельных областей ионосферы и магнитосферы, а также чтобы КА в различных сочетаниях могли участвовать в координированных прямых измерениях с аппаратами, работающими в других проектах. Кроме того, для выполнения прямых измерений возможно использование исследовательских КА, имеющих другие основные цели, например, КА для астрофизических исследований или автоматические межпланетные станции. Поэтому при реализации КЭ ОБСТАНОВКА, 1-й этап участники должны учитывать планы реализации и других космических проектов в ближайшие годы, как в России (РЕЛЕК, РАДИОАСТРОН, ЧИБИС-М и др.), так и за рубежом (CLUSTER, THEMIS, ASIM, TARANIS). Совместно с иностранными участниками КЭ ОБСТАНОВКА, 1-й этап формируется программа скоординированных наземных наблюдений.

ных областей ионосферы и магнитосферы, а также бы спутники в различных конфигурациях могли участвовать в скоординированных измерениях с аппаратами, работающими в других проектах. Кроме того, для проведения скоординированных измерений можно также использовать спутники-исследователи, имеющие другие основные задачи, например, спутники астрофизические или автоматические межпланетные. В связи с этим, при реализации эксперимента космического ОБСТАНОВКА, этап 1-й, участники должны учитывать планы реализации других проектов в ближайшие годы, как российских (РЕЛЕК, РАДИОАСТРОН, ЧИБИС-М) и зарубежных (CLUSTER, THEMIS, ASIM, TARANIS). Вместе с российскими участниками эксперимента ОБСТАНОВКА этап 1-й формируется программа скоординированных наземных наблюдений.

Данные прибора РЧА КЭ ОБСТАНОВКА, 1-й этап будут доступны программной платформе ULISSE. Проект ULISSE базируется на совокупности достижений и ресурсов с использованием полезной нагрузки на МКС в дополнение к текущей научной деятельности. Новые инициативы направлены на повышение отдачи от научной космической деятельности. ULISSE будет повышать ценность научных данных предыдущих и будущих космических экспериментов на МКС, а также данных с других космических платформ. Это будет достигнуто расширением участия научных кругов и улучшенной информированностью широкой общественности.

Основной задачей проекта ULISSE является получение максимума информации по научным экспериментам, проводимым на МКС. Для этой цели предусматриваются следующие мероприятия:

- создание мощной базы данных, обеспечивающей эффективный и простой доступ к накопленным научным базам данных;
- внедрение инновационных методов получения и описания гетерогенных данных с использованием интерактивной обучающей системы для понимания происходящих процессов;
- создание инструментов для архивации, доступа, взаимодействия и обработки данных, полученных из различных источников;
- мобилизация квалифицированных специалистов для решения конкретных задач, для анализа и интерпретации данных в разных научных областях.

Научно-методические вопросы КЭ ОБСТАНОВКА, 1-й этап российские и польские ученые представили в ряде совместных публикаций и докладов на международных конференциях (<http://>

Dane pozyskane w radio-analizatora RFA w ramach eksperymentu OBSTANOVKA będzie uzyskać za pomocą platformy programowej programu ULISSE. Projekt ULISSE ma na celu waloryzację i eksploatację danych pochodzących z eksperymentów naukowych przeprowadzonych przede wszystkim na międzynarodowej stacji kosmicznej MKS, ale także podczas innych eksperymentów kosmicznych. Dzięki tej inicjatywie będzie możliwe większe zaangażowanie szerokiej społeczności naukowej w prace wykorzystujące rezultaty eksperymentów przeprowadzonych na MKS, a także przyczyni się do zwiększenia świadomości społeczeństwa o stanie najbliższego otoczenia Ziemi, jak i o możliwościach wykorzystania przestrzeni okołoziemskiej.

Podstawowymi celami projektu ULISSE jest uzyskanie z maksimum informacji z przeprowadzanych eksperymentów naukowych na MKS w tym celu przewiduje się następujące działania:

- udostępnienie wydajnego i łatwego dostępu do opisu naukowego zgromadzonych baz danych;
- wprowadzenie innowacyjnego procesu zdobywania i opisywania różnego typu danych za pomocą interaktywnego systemu wiedzy i wnioskowaniu o zachodzących procesach;
- opracowanie narzędzi softwarowych do archiwizacji, dostępu, wymiany danych z różnorodnych Multi-dyscyplinarnych baz źródłowych, a także opracowanie jasnego sposobu waloryzacji danych;
- zmobilizowanie najlepszych specjalistów z poszczególnych domen wiedzy do wykonania analizy i interpretacji danych w pojedynczych — Multi-dyscyplinarnych

Rosyjscy i polscy badacze przedstawili naukowo- metodyczne zagadnienia Eksperymentu Kosmicznego OBSTANOVKA, etap 1-szy w szeregu wspólnych publikacji i wykładów na konferencjach międzynaro-



Рис. 4. Веб-страница проекта ОБСТАНОВКА в базе данных ULISSE

Rys. 4. Strona serwisowa projektu ULISSE dla projektu OBSTANOVKA

www.iki.rssi.ru/obstanovka/eng/index.htm (рис. 4).

Серия работ по тематике «Спутниково-ые исследования по солнечно-земной физике» была представлена в 2004 году на соискание премий РАН и ПАН.

dowych (<http://www.iki.rssi.ru/obstanovka/eng/index.htm>) (rys. 4).

Seria prac z tematyki “Satelitarne badania w dziedzinie fizyki układu Słońce- Ziemia” była przedstawiona w 2004 roku do nagrody PAN RAN.

ЛИТЕРАТУРА

- Juchniewicz J., Klimov S., Rothkaehl H., Stasiewicz K.* (2004) The electromagnetic emissions related to the interactions between large object (ISS) and surrounding ionospheric plasma // Near-Earth and Interplanetary Space Physics. 2004. P. 27–28.
- Klimov S. I. et al.* (1999) Research of the possibility to use MIR and International Space Station infrastructure for geophysical and antropogenic electromagnetic exploration // Geophysical Research Abstr. 1999. V. 1. N. 3. P. 633.
- Klimov S. I. et al.* (2002) INTERBALL-1 and MIR Orbital Station coordinated magnetic field and energetic particles measurements // Advances in Space Research. 2002. V. 30. N. 7. P. 1847–1853.
- Klimov S. I. et al.* (2003a) The Plasma-Wave Complex of scientific instrumentation for wave and plasma parameters measurements in the frame of Russian Segment of ISS // ESA Space Weather Workshop: Developing a European Space Weather Service Network: Proc. SWENET. The Netherlands. 2003.
- Klimov S. I. et al.* (2003b) OBSTANOVKA experiment for space weather research on board the Russian segment of the ISS // Proc: 54th Intern. Astronautical Congress. 2003. Bremen. Germany.
- Klimov S. I., Juchniewicz J., Rothkaehl H.* (2004) Researches of influence of space weather on a condition of middle latitude and near-equator ionosphere // Near-Earth and Interplanetary Space Physics. 2004. P. 29–32.

BIBLIOGRAFIA

- Panaszyuk M. I. et al.* (2003) Transient Luminous Event Phenomena and Energetic Particles Impacting the Upper Atmosphere: Russian Space Experiment Programs. AGU Chapman Conference on the Effects of Thunderstorms and Lightning in the Upper Atmosphere // Proc. Penn State University. State College. PA USA. 2009. P. 37.
- Rothkaehl H., Morawski M., Puccio W., Bergman J., Klimov S. I.* (2011) Diagnostics of Space Plasma on Board International Space Station — ISS // Contributions to Plasma Physics. 2011. V. 51. N. 2–3. P. 1–7.

Project PWC is the component part of the space experiment (SE) OBSTANOVKA 1st stage, planned for the realization in 2011 on board the Russian segment of the International Space Station (RS ISS). SE is international project with the participation of scientists and specialists of England, Bulgaria, Hungary, Poland, Russia, Ukraine and Sweden within the framework “Long-range program of applied-scientific studies and experiments, planned on the RS ISS” (version 2008), by the being appeared component part of the Russian Federal Space Program. The specialists CBK PAN conducted development, production, ground autonomous tests of the RFA instrument (radio-frequency analyzer). Especially should be noted carried out in CBK PAN development, production and tests automatically revealing in space antennas: electrical RFA-AD (3 orthogonal dipoles) and the magnetic RFA-AM (3 orthogonal loop), which ensure the measurement of total flux and direction of electromagnetic energy. Instrument RFA is integrated into the plasma-wave complex PWC (Russia). The designation of the PWC consists of the guarantee of physical measurements of the parameters of thermal plasma, electrical and magnetic field, the spectra of epithermal electrons, electromagnetic waves in the neighbor zone (not further 3 m of the surface), or variations in the electric potential of the ISS.

11 ФОБОС

Руководитель проекта
с российской стороны:

О. КОЗЛОВ

Руководитель проекта
с польской стороны:

Ю. ГРИГОРЧУК

Работа посвящена презентации возможностей прибора **СНОМИК**, а также научным целям эксперимента и результатам функциональных испытаний. Прибор **СНОМИК** — один из трех приборов на посадочном модуле, предназначенный для забора образцов грунта с поверхности Фобоса, — специально разработан для забора каменистого грунта. Кроме забора грунта, пенетратор произведет тепловой и механический анализ реголита Фобоса.

Измерение физических свойств планетных тел позволяет определить большое число характеристик, важных для ученых различных областей. Например, эффективная теплопроводность реголита обеспечивает лучшее понимание процессов, происходящих внутри объекта. Химический и минералогический состав дают возможность точнее определить происхождение и эволюцию спутников планет. Такие характеристики планетных тел могут быть найдены тремя различными методами измерений: анализ *in-situ*, анализ образца грунта в лабораторных условиях на Земле и дистанционное зондирование. Научные миссии, которые позволяют проводить все виды исследований, обеспечивают не только получение научных данных, но и взаимную калибровку приборов.

Российский проект **ФОБОС-GRUNT** — один из немногих, который позволяет использовать все методы измерений. Космический аппарат (КА) будет оборудован приборами дистанционного зондирования, такими как спектрометр, длинноволновый радар, пылемер; приборами для анализа *in-situ*: газохроматографом, сейсмометром, термодетектором и другими измерительными приборами, а также мани-

11 FOBOS

Kierownik projektu
ze strony Rosji:

O. KOZLOV

Kierownik projektu
ze strony Polski:

J. GRYGORCZUK

Prace przedstawione w artykule skupiają się na prezentacji możliwości instrumentu **CHOMIK**, celi naukowych doświadczenia i wyników testów funkcjonalnych. Instrument **CHOMIK** będzie jednym z trzech instrumentów na pokładzie lądownika wyznaczonych do pobierania próbek podłoża Fobosa, przeznaczony specjalnie do pobierania próbek powierzchni kamiennej. Oprócz pobierania próbek penetратор przeprowadzi również termiczne i mechaniczne pomiary regolitu Fobosa.

Pomiary właściwości fizycznych ciał niebieskich pozwalają na określenie wielu parametrów ważnych dla naukowców pracujących w różnych dziedzinach. Na przykład efektywna przewodność cieplna regolitu może pomóc lepiej zrozumieć procesy zachodzące we wnętrzu tych obiektów. Określenie składu chemicznego i mineralogicznego daje nam szansę na lepsze zrozumienie pochodzenia i ewolucji satelitów planet. W zasadzie takie parametry mogą być ustalone na podstawie trzech pomiarów: pomiarów *in-situ*, pomiarów próbek w warunkach laboratoryjnych na Ziemi, oraz zdalnych pomiarów za pomocą sensorów. Misje naukowe, które pozwalają nam na wykonywanie wszelkiego rodzaju pomiarów, dają nam możliwość nie tylko określenia parametrów, ale także kalibracji instrumentów.

Rosyjska misja **FOBOS-GRUNT** jest jedną z niewielu, która pozwala na wykonanie wszystkich wymienionych powyżej rodzajów pomiarów. Statek kosmiczny będzie wyposażony w instrumenty do zdalnych pomiarów takie jak: spektrometry, radar do pomiaru długich fal i koniskop do pomiaru pyłu w atmosferze; przyrządy do pomiarów *in-situ*: chromatograf gazowy, sejsmometr, termodetektor i inne; a także ramię robota i urządzenie do pobierania próbek.

пулятором и грунтозаборным устройством. КА «Фобос-Грунт» планируется запустить в ноябре 2011 года ракетно-космическим аппаратом «Зенит». Через 11 месяцев космический аппарат должен достичь марсианской орбиты, а в начале 2013 года совершить посадку на Фобосе. Спустя месяц работы возвратная ракета стартует с Фобоса и должна будет доставить на Землю капсулу с образцами грунта. 11-килограммовая возвратная капсула совершит посадку на территории Казахстана в середине 2014 года.

Уникальный геологический пене-тратор СНОМІК (рис. 1) для проекта ФОБОС-ГРУНТ разрабатывается и

Według obecnych planów, sonda wystartuje w listopadzie 2011 roku na pokładzie rakiety nośnej Zenit. Około roku później (11 miesięcy) pojazd wejdzie na orbitę wokółmarsjańską. Lądowanie na Fobosie jest przewidziane na początek 2013 roku. Po miesiącu w kierunku Ziemi wystartuje moduł powrotny z kapsułą zawierającą próbkę gruntu zamkniętą w specjalnym pojemniku. Kapsuła powrotna o masie ok. 11 kg z pojemnikiem wylądjuje w Kazachstanie w połowie 2014 roku.

W Laboratorium Mechatroniki i Robotyki Satelitarnej Centrum Badań Kosmicznych PAN w Warszawie powstaje CHOMIK



Рис. 1. Прибор СНОМІК, образец STM

Rys. 1. Instrument CHOMIK STM

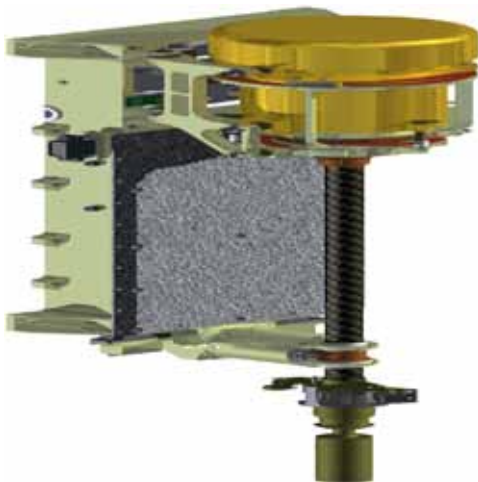


Рис. 2. Прибор СНОМІК

Rys. 2. Instrument CHOMIK

изготавливается в Лаборатории космической мехатроники и робототехники в Центре космических исследований Польской академии наук в Варшаве. С функциональной точки зрения прибор ЧНОМІК основан на хорошо известном приборе MUPUS, разработанном для проекта РОЗЕТТА с целью исследования кометы 67P/Чурюмова – Герасименко.

Прибор ЧНОМІК (рис. 2, см. с. 115) — один из трех приборов на посадочном модуле, предназначенных для забора образцов грунта с поверхности Фобоса — специально разработан для забора каменистого грунта. Кроме забора грунта, пенетратор произведет тепловой и механический анализ реголита Фобоса. Решение всех этих задач играет важную роль для будущих исследований космических объектов.

(rys. 1), unikatowy penetrator geologiczny przeznaczony dla misji kosmicznej FO-BOS-GRUNT. Funkcjonalnie CHOMIK bazuje na instrumencie MUPUS stworzonego na misję ROSETTA do komety 67P/Czuriumow – Gierasimienko. Do najważniejszych celów misji należy dostarczenie na Ziemię próbki materiału z powierzchni Fobosa, satelity Marsa. Materiał zostanie pobrany za pomocą polskiego penetratora i umieszczony w pojemniku, a ten we wnętrzu rosyjskiej kapsuły powrotnej wylądować w 2014 roku w Kazachstanie.

Instrument CHOMIK (rys. 2) będzie jednym z trzech instrumentów na pokładzie lądownika wyznaczonych do pobierania próbek podłoża Fobosa, przeznaczony specjalnie do pobierania próbek powierzchni kamiennej. Oprócz pobierania próbek penetrator przeprowadzi również termiczne i mechaniczne pomiary regolitu Fobosa. Wszystkie te zadania odgrywają bardzo ważną rolę w przyszłych planach eksploracji ciał kosmicznych.

The work presented in the paper is focused on the presentation of CHOMIK instrument capabilities, scientific goals of the experiment and results from functional tests. The CHOMIK instrument is one of three instrument on the lander designated to collect sample from Phobos ground, specially design for sampling the stony surface. Apart from sampling the penetrator will perform thermal and mechanical measurements of Phobos' regolith.

12 ТУРБУЛЕНТНОСТЬ

Руководитель проекта
с российской стороны:

A. ВОЛОКИТИН

Руководитель проекта
с польской стороны:

В. АТАМАНИУК

Представлены результаты теоретических исследований маломодовой турбулентности в слабонеоднородной и столкновительной плазме. Рассмотрены различные режимы стабилизации неустойчивости в результате нелинейного взаимодействия неустойчивых и затухающих колебаний плазмы при небольшом превышении порога.

Нередко можно наблюдать турбулентность непосредственно — волнение на море, бурное течение рек, грозовые облака и т. д. Математическое описание этих и других явлений турбулентности — важная научная задача, для решения которой прилагаются большие усилия. Несмотря на имеющиеся большие достижения (теория Колмогорова — Обухова, другие современные подходы, основанные на более детальном статистическом описании и результатах численного моделирования), эта важная в практическом отношении проблема остается не полностью раскрытой даже в классическом случае гидродинамики. Тем более сложным оказывается описание турбулентности в плазме и других комплексных средах. В круге вопросов, встающих при анализе турбулентности, отдельно стоит проблема ее возникновения и развития. Львом Ландау [*Landau, Lifshitz, 1987*] был предложен подход, в котором развитие турбулентности происходит в результате последовательности нарушений устойчивости стационарных состояний системы, происходящих при росте превышения некоторого порога неустойчивости. То есть предполагается, что существующее состояние становится неустойчивым, если некоторый параметр, например поток тепла через жидкость в поле тяжести, превышает некоторое пороговое значение. Если

12 TURBULENCJA

Prowadzący projekt
ze strony Rosyjskiej:

A. VOLOKITIN

Prowadzący projekt
ze strony Polskiej:

B. ATAMANIUK

Przedstawiono wyniki badań teoretycznych kilku-modowej (małomodowej) turbulencji w słabo niejednorodnej, zderzeniowej plazmie. Przy niewielkim przekroczeniu progu niestabilności zbadano różne reżimy stabilizacji w wyniku nieliniowego oddziaływania niestabilnych i tłumionych drgań plazmy.

Turbulencję często można obserwować bezpośrednio — burze na morzu, burzliwe przepływy rzek, chmury burzowe, itp. Matematyczny opis tych i innych zjawisk turbulencji jest ważnym zadaniem naukowym, do rozwiązania, którego naukowcy wkładają dużo wysiłku. Pomimo wielkich osiągnięć (Kołmogorowa — Obuchowa i inne współczesne rozwiązania oparte na bardziej szczegółowym opisie statystycznym i wynikach symulacji numerycznej) to praktycznie ważne zagadnienie jest ciągle zagadkowe, nawet w klasycznej hydrodynamice. Trudniejszym problemem jest opis turbulencji w plazmie i innych złożonych ośrodkach. Odrębnym zagadnieniem wynikającym z analizy turbulencji jest jej pochodzenie i rozwój. L. Landau [*Landau, Lifshitz, 1987*] zaproponował podejście, w którym rozwój niestabilności jest wynikiem sekwencji naruszenia stabilności stanów stacjonarnych układu, występujących przy przekroczeniu progu pewnego niestabilności. Oznacz to, że zakłada się, że aktualny stan staje się niestabilny, gdy jakiś parametr, na przykład przepływ ciepła przez ciecz w polu grawitacyjnym, przekracza określoną wartość progową. Jeśli przekroczenie tego progu jest niewielkie to powstaje nowy, słabo nieliniowy stan układu z okresowymi wahaniami parametrów ośrodka. Gdy przekroczenie progu niestabilności zwiększa się, taki stan staje się niestabilny i pojawiają się nowe typy drgań nieliniowo sprzężone z pierwszym modem Można założyć,

это превышение не велико, то возникает новое, слабо нелинейное состояние, в котором есть периодические колебания параметров среды. С повышением параметра надпороговости такое состояние оказывается неустойчивым, и появляются новые моды колебаний, нелинейно связанных с первой модой. Можно предположить, что с ростом надпороговости происходит постепенное увеличение числа мод колебаний, сосуществующих в среде, однако их число остается конечным при определенных условиях. Возможны различные режимы таких маломодовых состояний, в том числе при которых амплитуды и фазы колебаний меняются хаотически. Данная картина развития турбулентности представляет интерес для анализа физических процессов в лабораторной плазме, которые нередко происходят в условиях слабого нарушения равновесия, в околопороговой области неустойчивости. Тем более это справедливо в естественных условиях околоземной и космической плазмы. При этом стабилизация неустойчивости может происходить вследствие как восстановления равновесия (квазилинейной релаксации), так и развития нелинейных процессов перераспределения энергии колебаний к затухающим модам. Специфика таких маломодовых режимов требует особого изучения и, хотя данной проблеме посвящено немало работ, некоторые вопросы остались невыясненными. Изучение характерных свойств такой маломодовой турбулентности является задачей данного проекта.

НЕЛИНЕЙНЫЕ РЕЖИМЫ. КОРОТКИЕ КАСКАДЫ

Во многих случаях для описания слабонелинейных колебаний среды можно воспользоваться уравнениями вида:

$$i \frac{\partial}{\partial t} C_k = \sum_{k=k_1+k_2} V_{kk_1k_2} C_{k_1} C_{k_2} e^{i(\omega_k - \omega_{k_1} - \omega_{k_2})t}, \quad (1)$$

же wraz ze wzrostem progu niestabilności, stopniowo rośnie w ośrodku ilość typów (modów) drgań, jednak w określonych warunkach ich ilość pozostaje skończona. Istnieje wiele typów takich stanów, między innymi i takie, w których amplitudy i fazy są chaotyczne. Taki obraz rozwoju niestabilności jest interesujący zarówno z punktu widzenia plazmy laboratoryjnej, która często ma miejsce przy niewielkim przekroczeniu progu niestabilności, jak i w rzeczywistych warunkach plazmy kosmicznej i okołozemskiej. W tym przypadku stabilizacja niestabilności może być zarówno wynikiem dochodzenia do stanu równowagi (kwasi-liniowa relaksacja), jak i wynikiem rozwoju procesów nieliniowej redystrybucji energii drgań do modów tłumionych. Specyfika tego typu drgań wymaga specjalnych badań, i mimo tego, że tym zagadnieniom poświęcone jest nie mało prac, pewne ważne zagadnienia pozostały nierozstrzygnięte. Celem tego projektu jest badanie tego typu zagadnień.

REŻIMY NIELINIOWE. KRÓTKIE KASKADY

Często słabo nieliniowe drgania ośrodka można opisać równaniami postaci:

где предполагается, что система близка к гамилтоновской и ее можно описывать с помощью нормальных амплитуд колебаний. Здесь $V_{k_1 k_2 k_3}$ — матричный элемент взаимодействия волн, обладающий необходимыми свойствами симметрии [Галеев, Сагдеев, 1973].

В этом случае можно привести ряд примеров систем, описывающих маломодовую турбулентность. Первый, классический, случай трехволнового взаимодействия в активной среде описывается уравнениями ($\gamma_1 > 0, \gamma_{2,3} < 0$):

$$\begin{aligned} i \left(\frac{\partial}{\partial t} - \gamma_1 \right) C_1 &= -V C_2 C_3 e^{i(\omega_1 - \omega_2 - \omega_3)t}, \\ i \left(\frac{\partial}{\partial t} - \gamma_2 \right) C_2 &= -V C_2 C_3^* e^{-i(\omega_1 - \omega_2 - \omega_3)t}, \\ i \left(\frac{\partial}{\partial t} - \gamma_3 \right) C_3 &= -V C_2 C_2^* e^{-i(\omega_1 - \omega_2 - \omega_3)t} \end{aligned}$$

и хорошо изучен [Gol'tsova et al., 1975; Dubrovin et al., 1978; Atamaniuk, Volokitin, 2001]. В частности, были исследованы условия (зависящие от $\gamma_{1,2,3}$ и V) существования и свойства стационарных и периодических режимов, а также условия перехода к стохастическому режиму. Там же показан пример численного решения этих уравнений, при котором динамика амплитуд волн состоит из случайной последовательности пиков. Конкретным примером является стабилизация токовой неустойчивости [Atamaniuk, Volokitin, 2001], при которой только в исключительных случаях, в частности требующих наличия достаточно большой расстройки частот взаимодействующих волн, устанавливаются постоянные амплитуды волн тройки взаимодействующих волн. В общей ситуации развиваются различные режимы, характеризующиеся быстрыми колебаниями амплитуд волн. Обмен энергией волн в триplete зависит от соотношения темпов затухания и неустойчивости и происходит либо в периодическом режиме (возможно,

gdzie zakłada się, że układ zbliżony jest do układu Hamiltonowskiego i może być opisany przy pomocy amplitud drgań kanonicznych. $V_{k_1 k_2 k_3}$ macierz oddziaływania fal z pożądanymi własnościami symetrii [Галеев, Сагдеев, 1973].

Dla tego przypadku można pokazać szereg przykładów opisujących małowodową turbulencję. Pierwszy klasyczny przykład oddziaływania trzech w fal w aktywnym ośrodku ($\gamma_1 > 0, \gamma_{2,3} < 0$) opisany jest równaniami:

dobrze zbadanym w [Gol'tsova et al., 1975; Dubrovin et al., 1978; Atamaniuk, Volokitin, 2001]. W szczególności zbadane zostały warunki (w zależności $\gamma_{1,2,3}$ i V) istnienia i własności reżimów stacjonarnych i okresowych, oraz warunki przejścia do stanów chaotycznych. Na rysunku pokazane są przykłady rozwiązań numerycznych tych równań, w którym ewolucja fal składa się z losowych pików. Konkretnym przykładem jest stabilizacja prądowej niestabilności, [Atamaniuk, Volokitin, 2001], dla której tylko w wyjątkowych przypadkach, w szczególności przy dostatecznie dużym rozstrojeniu częstości oddziałujących fal, ustanawiają się stałe amplitudy trzech oddziałujących fal. W ogólnej sytuacji rozwijają się różne reżimy z amplitudami silnie zmieniającymi się w czasie. Wymiana energii w „tryplecie” zależy od stosunków szybkości tłumienia i niestabilności i zachodzi albo w reżimie okresowym (może być w wielo-okresowym) albo w przypadku, gdy sekwencje losowych intensywnych rozbłysków amplitud fal są na przemian z długimi okresami akumulacji energii (amplitudy niestabilnych fal rosną wykładni-

многопериодическом), либо в виде случайной последовательности интенсивных всплесков амплитуд волн, перемежающихся с более продолжительными периодами накопления энергии (экспоненциального роста амплитуды неустойчивой волны). Средняя энергия волн и потоки энергии в плазму в таких колебательных режимах сильно отличаются от достигаемых в стационарном состоянии.

Можно указать на другие изученные случаи турбулентности с малым (2...4) числом волн. Так, в работе [(Meunier et al., 1982)] рассматривалась система, описывающая нелинейное взаимодействие двух волн:

$$\begin{aligned} i \left(\frac{\partial}{\partial t} - \gamma_0 \right) C_0 &= VC_1^2 e^{-i(\omega_0 - 2\omega_1)t}, \\ i \left(\frac{\partial}{\partial t} - \gamma_1 \right) C_1 &= VC_0 C_1^* e^{-i(\omega_0 - 2\omega_1)t}. \end{aligned}$$

Здесь три независимые переменные и два параметра γ_1/γ_0 и $(\omega_0 - 2\omega_1)/\gamma_0$. В работе [Lefebvre, Krasnoselskikh, 2001] изучалась четырехволновая система:

$$\begin{aligned} i \left(\frac{\partial}{\partial t} - \gamma_1 \right) C_1 &= VC_0^* C_2 e^{-i(\omega_0 - \omega_1 - \omega_2)t}, \\ i \left(\frac{\partial}{\partial t} - \gamma_2 \right) C_2 &= VC_1 C_2 e^{-i(\omega_0 - \omega_1 - \omega_2)t} + VC_3 C_0^* e^{-i(\omega_0 - \omega_2 - \omega_3)t}, \\ i \left(\frac{\partial}{\partial t} - \gamma_3 \right) C_3 &= VC_0 C_2 e^{-i(\omega_0 - \omega_2 - \omega_3)t}, \\ i \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial}{\partial t} - \gamma_0 \right) C_0 &= VC_0 C_1^* e^{-i(\omega_0 - \omega_1 - \omega_2)t}. \end{aligned}$$

Все эти три (а возможно и другие) случая показывают переходы от стационарного к периодическим, много (квази)периодическим и стохастическим режимам.

Конечно, возможно и рождение новых волн или появление второго,

что). W tych reżimach, średnia energia fal i strumieni energii w plazmie jest bardzo różna od wartości osiągniętych w stanie stacjonarnym.

Można pokazać inne badane przypadki małowodowej (2...4 fal) turbulencji. Na przykład w pracy [Meunier et al., 1982] rozważany był układ:

Opisujący nieliniowe oddziaływanie dwóch fal. Mamy tu trzy zmienne niezależne i dwa parametry γ_1/γ_0 i $(\omega_0 - 2\omega_1)/\gamma_0$. W pracy [Lefebvre, Krasnoselskikh, 2001] badany był przypadek układu czterech fal:

Wszystkie trzy (i ewentualnie inne) przypadki pokazują przejścia od reżimów stacjonarnych do periodycznych, wielo (kwazi) periodycznych i chaotycznych.

Oczywiście, możliwe jest powstawanie nowych fal, pojawianie się kolejnych ka-

третьего и т. д. каскадов. На рис. 1 схематически представлен пример двухступенчатого, не пересекающегося каскада из трех триплетов взаимодействующих волн, удовлетворяющих условиям пространственного резонанса: $k_1 = k_2 + k_3$, $k_2 = k_4 + k_5$, $k_3 = k_6 + k_7$, все волновые вектора различны.

Соответствующая система уравнений имеет вид:

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial}{\partial t} - \gamma_1 \right) C_2 &= iV_1 C_2 C_3, \\ \left(\frac{\partial}{\partial t} - \gamma_2 + i\delta\omega_2 \right) C_2 &= iV_1 C_1 C_3^* + iV_2 C_4 C_5, \\ \left(\frac{\partial}{\partial t} - \gamma_3 + i\delta\omega_3 \right) C_3 &= iV_1 C_1 C_2^* + iV_3 C_6 C_7, \\ \left(\frac{\partial}{\partial t} - \gamma_4 + i\delta\omega_4 \right) C_4 &= iV_2 C_2 C_5^*, \\ \left(\frac{\partial}{\partial t} - \gamma_5 + i\delta\omega_5 \right) C_5 &= iV_2 C_2 C_4^*, \\ \left(\frac{\partial}{\partial t} - \gamma_6 + i\delta\omega_6 \right) C_6 &= iV_3 C_3 C_7^*, \\ \left(\frac{\partial}{\partial t} - \gamma_7 + i\delta\omega_7 \right) C_6 &= iV_3 C_3 C_6^*. \end{aligned}$$

skad fal. Na rys. 1 pokazany jest schematycznie przykład dwustopniowej kaskady, która nie przecina się z kaskadą złożoną z trzech trypletów oddziałujących fal, które spełniają warunki przestrzennego rezonansu: $k_1 = k_2 + k_3$, $k_2 = k_4 + k_5$, $k_3 = k_6 + k_7$, wszystkie wektory falowe są różne.

Odpowiedni układ równań ma posta:

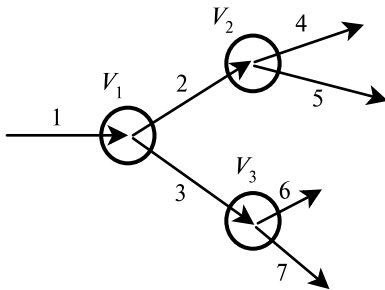


Рис. 1. Пример двухступенчатого, не пересекающегося каскада из трех триплетов взаимодействующих волн

Rys. 1. Przykład dwustopniowej kaskady, która nie przecina się z kaskadą złożoną z trzech trypletów oddziałujących fal

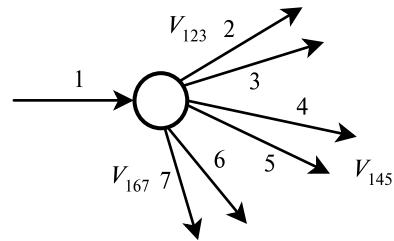


Рис. 2. Пример одноступенчатого каскада с несколькими ветвями

Rys. 2. Przykład dla przypadku jedno poziomowej kaskady z kilkoma gałęziami

Естественно, этот класс нелинейных систем можно расширить, добавляя либо третью ступень, либо ветви к ступени, например, как показано на рис. 2 (см. с. 121) для случая одноступенчатого каскада с несколькими ветвями.

Одним из главных вопросов является выяснение условий, при которых можно ограничиться конечным числом волн (или лучше — триплетов). Ответ на него может быть получен с помощью численного моделирования. Результаты такого моделирования для случая трех триплетов приведены на рис. 3.

На рис. 3 показаны динамика амплитуд волн, зависимость от времени энергии, поступающей в плазму, и средние «числа квантов» соответствующих

Оczywiście rozważny przypadek można rozszerzyć albo poprzez dodanie trzeciego poziomu kaskady albo poprzez dodanie gałęzi, np. tak, jak to zostało pokazane na rys. 2 dla przypadku jedno poziomowej kaskady z kilkoma gałęziami

Jednym z głównych problemów jest znalezienie warunków, w których można ograniczyć się do skończonej liczby fal (lub dokładniej — trypletów). Odpowiedź na to można uzyskać poprzez symulację numeryczną. Wyniki takiej symulacji dla przypadku trzech trypletów są pokazane na rys. 3.

W tym przypadku, na tle pierwszego, głównego trypletu energia pozostałych nie wzrasta natomiast występują niewielkie fluktuacje, tzn. mamy klasyczny przy-

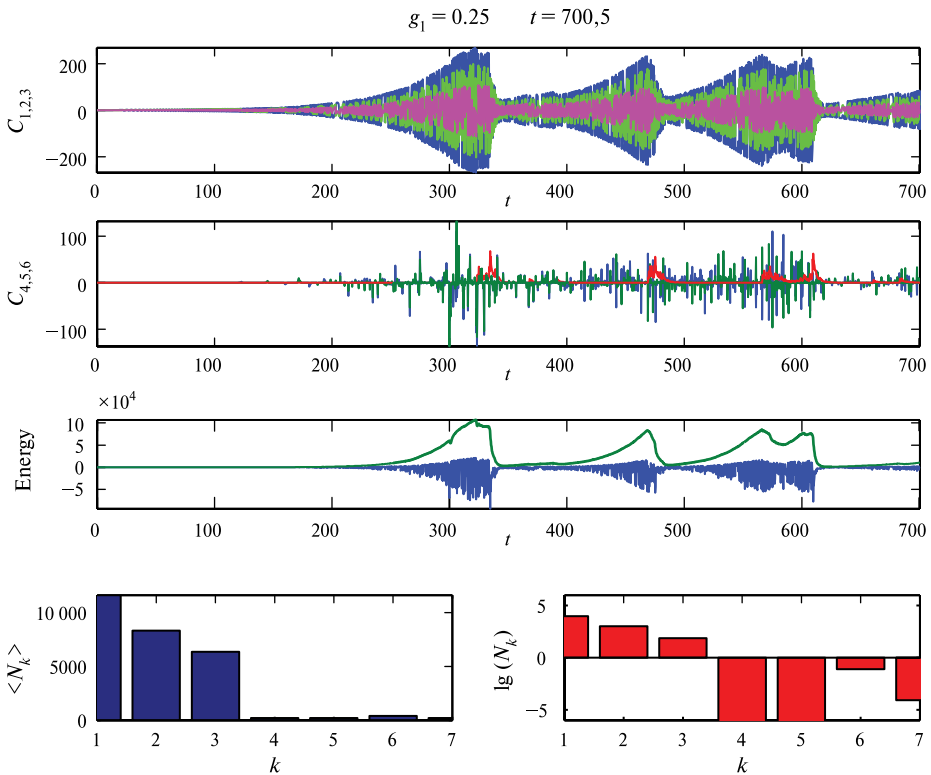


Рис. 3. Численное решение уравнений каскада из двух триплетов при $\gamma = 0,25$, другие параметры не указаны

Rys. 3. Symulacji numeryczną dla przypadku trzech trypletów

волн. В данном случае на фоне основного триплета энергия других не нарастает, а испытывает небольшие флуктуации, то есть реализуется классический случай взаимодействия трех волн. В другом случае (рис. 4) амплитуды волн других триплетов малы, но полностью пренебречь ими нельзя. Такая ситуация является достаточно общей, при данных условиях (физические параметры, γ и V) доминируют несколько триплетов, а все другие волны создают некий континуум и являются источником шума, который можно рассматривать как случайный. Одно из необходимых условий этого выполняется, если на фоне основного набора

padek oddziaływania trzech fal. W innym przypadku (rys. 4) amplitudy trypletów są małe, niemniej nie można ich całkowicie zaniedbać. Taka sytuacja jest dość powszechna, w danych warunkach (fizycznych parametrów) dominuje kilka trypletów, pozostałe tworzą pewne kontinuum będące źródłem szumu, który można traktować jak parametr losowy. Dlatego tego, konieczne jest spełnienie warunku, aby na tle podstawowego zestawu trypletów, energia pozostałych nie rosła a jedynie miała niewielkie fluktuacje.

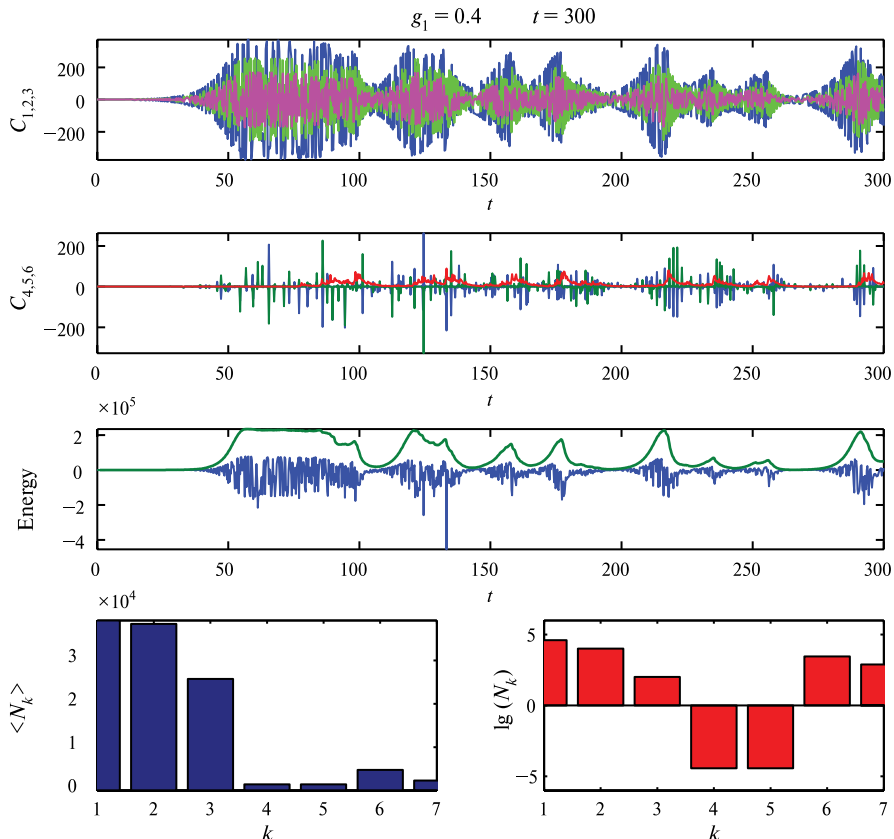


Рис. 4. Численное решение уравнений каскада из двух триплетов

Rys. 4. Symulacji numeryczną dla przypadku dwóch trypletów

триплетов энергия других не нарастает, а испытывает небольшие флуктуации.

СИСТЕМЫ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ТИПА

Одним из частных примеров случаев, для которых представление о маломодовой турбулентности плодотворно, является неустойчивость Фарли-Бунемана. Эта неустойчивость развивается в *E*-области нижней ионосферы — вследствие сложных процессов взаимодействия солнечного ветра с магнитосферой Земли возникает электроструя (electrojet) и соответствующее квазипостоянное электрическое поле. Если величина этого поля превышает некоторое пороговое значение, развивается неустойчивость, обусловленная протеканием электрического тока поперек магнитного поля в столкновительной плазме. Линейная теория [Farley, 1963] позволила объяснить ряд наблюдаемых свойств возникающих в нижней ионосфере мелкомасштабных неоднородностей. Наиболее быстро возбуждаются короткие волны, распространяющиеся почти перпендикулярно внешнему магнитному полю. Продолжает рассматриваться вопрос о влиянии теплопроводности, кинетических эффектов и нарушения квазинейтральности на инкременты и пороги неустойчивости. Однако чтобы объяснить глубину модуляции плотности и другие свойства спектра неоднородностей, необходимо установить механизм стабилизации неустойчивости. В работах [Sudan, 1983; Machida, Goertz, 1988] было предположено, что неустойчивость Фарли-Бунемана насыщается вследствие нелинейного взаимодействия неустойчивых мод с затухающими и был предложен конкретный механизм нелинейности. Очевидно, что поскольку характерные времена колебаний плотности превышают циклотронный период, то именно векторная нелинейность, обусловленная нелинейностью дрейфого движения электронов, играет опреде-

UKŁADY TYPU HYDRODYNAMICZNEGO

Jednym ze szczególnych przypadków, dla których idea małomodowej turbulencji jest efektywna jest niestabilność Farley-Bunemana. Rozwija się ona w warstwie *E* dolnej jonosfery, w wyniku złożonych procesów oddziaływania wiatru słonecznego z magnetosferą Ziemi powstaje strumień elektryczny (electrojet) i odpowiadające mu kwasi stałe pole elektryczne. Jeśli wartość tego pola przekracza pewną wartość progową, rozwija się, w zderzeniowej plazmie, niestabilność spowodowana poprzecznym do pola magnetycznego prądem elektrycznym. Teoria liniowa [Farley, 1963] wyjaśniła cały szereg obserwacji drobno-skalowych niejednorodności w dolnej jonosferze. Najszybciej wzbudzone są krótkie fale rozchodzące się prawie prostopadle do zewnętrznego pola magnetycznego. Pozostaje dalsza analiza dotycząca roli efektów cieplnych, kinetycznych, naruszenia kwasi-neutralności na tempa wzrostu (inkrementów) amplitud i progów niestabilności. W pracach [Sudan, 1983; Machida, Goertz, 1988] opisano, że niestabilność Farley-Bunemana nasycy się w wyniku oddziaływania modów nieliniowych z tłumionymi, zaproponowano konkretny mechanizm nieliniowości. Jest oczywiste, że ponieważ charakterystyczny czas fluktuacji gęstości przewyższa okres drgań cyklotronowych, to zasadniczą rolę w ustaleniu niejednorodności widma plazmy lub fal elektrostatycznych w słabo zderzeniowej plazmie, odgrywa nieliniowość wektorowa, uwarunkowana dryfem elektronów [Sudan, 1983; Machida, Goertz, 1988; Oppenheim, Otani, 1995].

ляющую роль в установлении спектра неоднородностей плазмы или электростатических волн в слабостолкновительной плазме [Sudan, 1983; Machida, Goertz, 1988; Oppenheim, Otani, 1995].

Надо заметить, что, кроме классического механизма неустойчивости Фарли-Бунемана, связанной с протеканием электрического тока, в замагниченной слабостолкновительной плазме могут развиваться плазменные неоднородности типа дрейфовых волн, связанные с крупномасштабными градиентами плотности и температуры плазмы. Несмотря на различие неустойчивостей, приводящих к росту электростатических колебаний, механизмы их нелинейных взаимодействий те же, что и для случая неустойчивости Фарли-Бунемана, и типичны для нелинейного взаимодействия дрейфовых волн в плазме. Учитывая существенную роль диссипативных процессов в этих случаях, представляется обоснованным предполагать, что развивающийся спектр (турбулентность) колебаний плотности может быть представлен конечным числом мод. Тогда развивающаяся маломодовая турбулентность может быть эффективно описана с помощью систем уравнений гидродинамического типа для амплитуд колебаний с учетом эффектов раскачки и затухания. К данному типу систем можно отнести и известный аттрактор Лоренца. Уравнения, которые описывают динамику колебаний неоднородности плотности плазмы при учете существенной роли столкновений, не близки к гамильтоновским, хотя и содержат квадратичные нелинейные слагаемые. Тем не менее, учитывая характерные для этих колебаний дисперсионные свойства и доминирование столкновительных эффектов, удается свести уравнения к виду (1), с единственным, но существенным отличием, заключающимся в том, что матричные элементы не удовлетворяют каноническим свойствам симметрии. К преимуществу

Należy zauważyć, że oprócz klasycznego mechanizmu niestabilności Farley-Bunemana, związanego przepływem prądu elektrycznego, w namagnesowanej, słabo zderzeniowej plazmie mogą rozwijać się niestabilności dryfowe związane z dużymi gradientami gęstości i temperatury plazmy. Mimo, że do wzrostu drgań elektrostacyjnych mogą prowadzić niestabilności różnego typu, mechanizmy ich nieliniowego oddziaływania są takie same jak w przypadku niestabilności Farley-Bunemana, typowe dla nieliniowego oddziaływania fal dryftowych w plazmie. Uwzględniając w tych przypadkach istotną rolę procesów tłumienia, wydaje się być uzasadnione przypuszczenie, że rozwijające się widmo drgań gęstości (turbulencja) może być reprezentowane przez skończoną liczbę fal. Wtedy rozwijająca się małomodowa turbulencja może być efektywnie opisywana układem równań typu hydrodynamicznego na amplitudy drgań z uwzględnieniem efektów narastania i tłumienia. Do tego układów zalicza się również znany traktor Lorenza. Równania opisujące dynamikę drgań gęstości niejednorodnej plazmy uwzględniające zderzenia, są dalekie od równań typu hamiltonowskiego, chociaż wyrazy nieliniowe są kwadratowe. Niemniej jednak, uwzględniając charakterystyczne dla tych drgań własności dyspersyjne i dominującą rolę efektów zderzeniowych, udaje się doprowadzić te równania do postaci (1), z jedną, ale istotną różnicą — elementy macierzowe nie mają kanonicznych własności symetrii. Zaletą tego podejścia jest przejrzystość i prostota analizy rezultatów wyników symulacji, możliwość szybkiej modyfikacji układu, jeśli włączenie dodatkowych efektów można wprowadzić poprzez zmianę odpowiednich współczynników i/lub zwiększenie liczby modów(fal). W szczególności uwzględnienie tłumienia Landaua na jonach sprowadza się do dodania odpo-

такого подхода относятся наглядность и простота анализа результатов моделирования, возможность быстрой модификации системы, когда включение дополнительных эффектов производится изменением соответствующих коэффициентов уравнений и/или увеличением числа мод. В частности, учет затухания Ландау на ионах в линейном приближении производится добавлением соответствующего линейного слагаемого в уравнение движения ионов. Следует заметить, что, рассматривая дрейфовые колебания в столкновительной неоднородной плазме, также можно прийти к уравнениям данного типа.

Таким образом, можно заключить, что во многих интересных случаях возможно описывать турбулентные состояния активной среды, в которой существенны эффекты как неустойчивости, так и эффекты диссипации волн, используя универсальный формализм теории маломодовой неустойчивости, базирующейся в значительной мере на результатах численного моделирования.

вiedniego liniowego wyrazu w równaniu ruchu jonów. Należy zauważyć, że biorąc pod uwagę drgania dryfowe w zderzeniowej niejednorodnej plazmie można dojść do tego typu.

Zatem możemy stwierdzić, że w wielu interesujących przypadkach, opisanie stanu aktywnego turbuletnego ośrodka, w którym istotne są zarówno efekty niestabilności jak i tłumienia fal może być opisane przy wykorzystaniu uniwersalnego formalizmu teorii małomodowej niestabilności, która w dużej mierze opiera się na rezultatach numerycznej symulacji.

ЛИТЕРАТУРА

- Галеев А. А., Сагдеев Р. З. (1973) Нелинейная теория плазмы // Вопросы теории плазмы / Под ред. М. А. Леонтовича. Вып. 7. М.: Атомиздат, 1973. С. 3–145.
- Atamaniuk B., Volokitin A. S. (2001) Plasma Instability Suppression of the Current Instability by Decay Processes // Plasma Physics Reports. 2001. V. 27. P. 598.
- Dubrovin V. I., Kogan V. R., Rabinovich M. I. (1978) // Fizika Plazmy. 1978. V. 4. P. 1174 [Soviet J. Plasma Physics. 1978. V. 4. P. 658].
- Gol'tsova Yu. K., Rabinovich M. I., Reutov V. P. (1975) // Fizika Plazmy. 1975. V. 1. P. 594 [Soviet J. Plasma Physics. 1975. V. 1. P. 329].
- Farley D. (1963) A plasma instability resulting in field aligned irregularities in the ionosphere // J. Geophysical Research. 1963. V. 68. P. 6083–6097.
- Landau L. D., Lifshitz E. M. (1987) Fluid Mechanics. Addison-Wesley Publishing Co, Reading, MA. 1987.
- Lefebvre B., Krasnoselskikh V. (2001) Nonlinear Interaction of Four Electrostatic Waves in a Plasma // Physica D. 2001. V. 152–153. P. 742–751.
- Machida S., Goertz C. K. (1988) Computer simulation of the Farley-Buneman instability and anomalous electron heating in the auroral ionosphere // J. Geophysical Research. 1988. V. 93. P. 9993.
- Meunier C., Bussak M., Laval G. (1982) // Physica D. 1982. V. 4. P. 236.

BIBLIOGRAFIA

- Oppenheim M., Otani N., Ronchi C.* (1985) Hybrid simulations of the saturated Farley-Buneman instability in the ionosphere // *Geophysical Research Letters*. 1985. V. 22. N. 4. P. 353–356. doi: 10.1029/94GL03277.
- Sudan R. N.* (1983) Unified Theory of Type I and Type II Irregularities in the Equatorial Electrojet // *J. Geophysical Research*. 1983. V. 88. P. 4853–4860.

Results of theoretical investigations of few mode turbulence in weakly inhomogeneous and collisional plasma are presented. Various regimes of stabilization of growth of unstable waves in result of its non-linear interaction with damping oscillations of plasma at condition of small excess of a threshold are considered.

13 ПЫЛЕВАЯ ПЛАЗМА

Руководитель проекта
с российской стороны:

С. ПОПЕЛЬ

Руководитель проекта
с польской стороны:

Б. АТАМАНЮК

Представлены результаты исследований по выявлению роли пылевой плазмы и изучению плазменно-пылевых процессов в плазменной гелиогеофизике и космической погоде. Основное внимание уделено описанию пыли в магнитосфере Земли, влиянию заряженных наномасштабных частиц на ионосферу Земли и формированию серебристых облаков и полярных мезосферных радиотражений, наблюдательным проявлениям коллективных процессов в запыленной ионосфере, процессам формирования временных атмосфер у космических тел, не имеющих собственной атмосферы, таких как Луна, Меркурий, астероиды, кометы и др. В большинстве описываемых ситуаций существенную роль играет взаимодействие солнечного излучения с мелкодисперсными частицами.

Трудно представить себе заполненную плазмой область Солнечной системы, свободную от мелкодисперсных (нано- и микро-) пылевых частиц. В частности, плазменно-пылевыми системами являются солнечный ветер, ионосферы и магнитосферы планет, планетарные кольца, кометы, межпланетные плазменно-пылевые облака. Пожалуй, лишь внутренняя гелиосфера — исключение из этого правила. В результате взаимодействия нано- и микропылевых частиц с электронами и ионами окружающей плазмы, а также вследствие воздействия солнечного излучения они приобретают электрический заряд и становятся одним из важных компонентов плазмы, существенно влияющих на ее свойства и динамику. Плазму, содержащую заряженные пылевые нано- и микрочастицы, принято называть пылевой, если при этом сказывается участие пылевых частиц в коллективных плазменных процессах.

13 PLAZMA PYŁOWA

Kierownik projektu
ze strony Rosji:

S. POPEL

Kierownik projektu
ze strony Polski:

B. ATAMANIUK

Представлено wyniki badań określające rolę plazmy pyłowej i plazmowo-pyłowych procesów w fizyce Słońca i pogodzie kosmicznej. Położony został nacisk na opis pyłu w magnetosferze Ziemi, wpływu naładowanych nanocząstek na jonosferę Ziemi i formowanie się srebrzystych obłoków w polarnych obszarach mezosfery, obserwacyjnych aspektów kolektywnych procesów w plazmie pyłowej, procesów formowania się chwilowych atmosfer ciał kosmicznych nie mających własnych atmosfer, takich jak Księżyc, Merkury, aстероиды, кометы i inne. W większości opisanych sytuacji istotną rolę odgrywa oddziaływanie wiatru słonecznego ze słabo rozproszonymi cząstkami.

Trudno sobie wyobrazić wypełniony plazmą obszar układu słonecznego bez drobno rozproszonych (nano i mikro) cząstek pyłu. W szczególności układami plazmowo-pyłowymi są: wiatr słoneczny, jonosfery i magnetosfery planet, pierścienie planetarne, komety, plazmowo-pyłowe międzyplanetarne obłoki. Wyjątkiem od tej zasady jest być może tylko wewnętrzna Heliosfera. W wyniku oddziaływania z elektronami i jonami otaczającej plazmy, jak również na skutek oddziaływania promieniowania słonecznego, nано- i mikrocząstki zostają naładowane elektrycznie i stają się ważnym składnikiem plazmy, istotnie wpływając na jej własności dynamiczne. Plazmę zawierającą naładowane nано- i mikrocząstki pyłu nazywa się plazmą pyłową, jeśli cząstki pyłu oddziałują kolektywnie z plazmą. Możliwa jest również inna sytuacja, w której cząsteczki pyłu zachowują się jak cząstki próbne. Taki układ określamy, jako „pył w plazmie”. W odniesieniu do plazmy przestrzeni kosmicznej często uży-

Указанной ситуации противопоставляют возможность, когда пылевые частицы ведут себя в плазме как тестовые. В этом случае используется термин «пыль в плазме». Однако в применении к космической плазме часто используется понятие «пылевая плазма» и в ситуации, когда заряженные пылевые частицы приводят к тем или иным физическим и/или динамическим последствиям.

В науках о Земле и других планетах нано- и микрокомпоненты выступают в качестве основных элементов их структуры, и поэтому исследования нано- и микрообъектов могут привести к расширению наших представлений о фундаментальных процессах геологии и планетообразования. Так, например, протопланетная пыль имеет размеры от 10 до 150 нм. Она относится к хондритам класса C1. Если провести дифференциацию углистых хондритов, то получаются минералы, входящие в состав мантии Земли. Можно сделать вывод, что, по крайней мере, планеты земной группы Солнечной системы произошли из наномасштабных частиц, состав которых отвечает углистым хондритам. Имеются серьезные аргументы в пользу предположения о том, что Солнечная система в свое время сформировалась из плазмы, содержащей заряженные пылевые частицы. Нано- и микромаштабные частицы обнаруживаются в плазме ионосфер и магнитосфер планет Солнечной системы. В атмосфере Земли частицы поднимаются на ионосферные высоты не только с ее поверхности, но непосредственно образуются там в результате конденсации паров воды и испаренного метеорного вещества. Они участвуют в формировании серебристых облаков и полярных мезосферных радиотражений. В магнитосфере Земли присутствуют нано- и микромаштабные частицы естественного и антропогенного происхождения, влияющие на характер процессов переноса в плазме. Таким

ва się określenia „plazma pyłowa” również w przypadkach, gdy naładowane cząstki pyłu wywołują bezpośrednie fizyczne lub dynamiczne skutki.

Komponenty o nono i mikrorozmiarach są zasadniczymi elementami struktury Ziemi i innych planet, ich badanie jest konieczne do lepszego zrozumienia procesów geologicznych i procesów powstawania planet. Na przykład protoplanetarny pył ma od 10 do 150 nm. i należy do klasy C1 chondrytów. Jeśli przeprowadzimy zróżnicowanie chondrytów węglistych to otrzymamy minerały wchodzące w skład płaszcza Ziemi. Można stwierdzić, że przynajmniej planety ziemskiego Układu Słonecznego powstały z nanocząstek o składzie odpowiadającym chondrytom węglistym. Istnieją poważne argumenty przemawiające za założeniem, że Układ Słoneczny powstał z plazmy zawierającej naładowane cząstki pyłu. W plazmie jonosfer i magnetosfer planet Układu Słonecznego wykryte zostały nano i mikrocząstki. Cząsteczki znajdujące się w jonosferze pochodzą nie tylko z powierzchni Ziemi i ziemskiej atmosfery, powstają one bezpośrednio w jonosferze wyniku kondensacji pary wodnej i odparowywania meteoroidów. Biorą one udział w tworzeniu się srebrzystych obłoków i odpowiadają za odbicia fal radiowych od mezosfery. W magnetosferze Ziemi mamy nano- i mikrocząstki pochodzenia zarówno naturalnego jak i antropogenicznego, które wpływają na procesy transportu w plazmie. Tak więc badanie, w Układzie Słonecznym, jonosferach i magnetosferach Ziemi i innych planet, drobnych cząstek pyłu i plazmy pyłowej może dostarczyć nowych informacji na temat ośrodka międzygwiazdowego, mechanizmów powstawania planet i o wpływie procesów zachodzących na Słońcu na zjawiska geofizyczne.

образом, изучение мелкодисперсных частиц и пылевой плазмы в Солнечной системе, ионосферах и магнитосферах Земли и других планет может дать новую информацию о межзвездном веществе, механизмах планетообразования, о влиянии процессов, происходящих на Солнце, на геофизические явления.

ПЫЛЬ В МАГНИТОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Основные исследования межпланетной пыли проводятся по данным наблюдений в магнитосфере Земли [Izvekova, Popel, 2010]. При этом часто предполагается существование некоторой условной плотности вещества пылевых частиц, единой для всей межпланетной пыли. Следует, однако, иметь в виду, что плотность вещества пыли изменяется в достаточно широком диапазоне величин. Более того, часто пылевые частицы имеют столь сложную форму, что введение понятия плотности для таких частиц затруднено. Параметры, полученные на основе детального анализа размеров и плотности пылевых частиц вблизи кометы Галлея, частиц из микрократеров на Луне, потоков метеороидов, межпланетных пылевых частиц, собранных космическими аппаратами, широко используются для исследования зарядки и динамики пылевых частиц в магнитосфере Земли и Солнечной системе. В таблице приведены размеры R и плотности ρ микромасштабных пылевых частиц.

Размеры и плотности микромасштабных частиц космической пыли
Wymiary i gęstość mikrocząstek pyłu kosmicznego

R (cm)	$1,00 \cdot 10^{-5}$	$1,44 \cdot 10^{-5}$	$1,77 \cdot 10^{-5}$	$2,04 \cdot 10^{-5}$	$2,98 \cdot 10^{-5}$
ρ (g/cm ³)	2,9	2,85	2,82	2,80	2,72
R (cm)	$4,51 \cdot 10^{-5}$	$6,63 \cdot 10^{-5}$	$1,02 \cdot 10^{-4}$	$2,36 \cdot 10^{-4}$	$5,57 \cdot 10^{-4}$
ρ (g/cm ³)	2,59	2,45	2,26	1,8	1,38

Элементный состав частиц межпланетной пыли и микрометеороидов часто похож на состав углеродистых метеоритов хондритных классов C1 и C2 и

PYŁ W MAGNETOSFERZE ZIEMI

Podstawowe badania pyłu międzyplanetarnego przeprowadza się zgodnie z danymi pochodzącymi z obserwacji magnetosfery Ziemi [Izvekova, Popel, 2010]. Często przyjmuje się istnienie pewnej umownej gęstości cząstek pyłu takiej samej dla całego międzyplanetarnego pyłu należy jednak brać pod uwagę, że gęstość pyłu zmienia się w szerokim zakresie wartości. Co więcej, bardzo często kształt cząsteczek pyłu jest na tyle złożony i różnorodny, że trudne jest wprowadzenie pojęcia gęstości. Szczegółowa analiza rozmiarów i gęstości cząsteczek pyłu w pobliżu komety Halleya, mikrokraterów na Księżycu, zebranych przez sondy kosmiczne pozwala uzyskać parametry powszechnie używane do badania procesów ładowania i dynamiki cząstek pyłowych występujących w magnetosferze Ziemi i Układzie Słonecznym. W tabeli 1 podane są rozmiary R i gęstości ρ mikroskalowych cząsteczek pyłu.

Podstawowy skład cząstek pyłu międzyplanetarnego i mikroметеоритów jest często podobny do składu chondrytów węglanych klas C1 i C2 i zawiera takie element,

включает такие элементы как Mg, Al, Si, S, Ca, Cr, Mn, Fe, Ni. Вместе с тем часто встречаемые среди частиц межпланетной пыли нано- и микромасштабные оливиновые скопления, а также сферулы металла (или его производных) диаметром от 100 до 500 нм, впаянные в силикатное стекло (так называемые частицы GEMS — glass with embedded metal and sulphides), не наблюдались в качестве вещества микрометеороидов.

Зарядка пылевых частиц в космосе осуществляется различными способами. Что касается частиц межпланетной пыли, основными механизмами зарядки являются поглощение пылевыми частицами электронов и ионов окружающей плазмы, вторичная эмиссия электронов (электронным или ионным ударом), фотоэффект, а также столкновения пылевых частиц между собой.

При прохождении пылевой частицей различных областей окружающей плазмы ее заряд не остается постоянным. Основным эффектом, связанным с процессом зарядки пылевых частиц (и, как следствие, их переменными зарядами), является диффузия орбит пылевых частиц. Систематические вариации заряда, обусловленные градиентами параметров плазмы, а также модуляция токов плазмы, возникающая вследствие модуляции скоростей пылевых частиц относительно потоков плазмы, могут приводить для разных условий к процессам переноса частиц внутри магнитосферы, выбросам частиц из нее, а также захвату магнитосферой нано- и микрочастиц из окружающего пространства.

На процесс переноса пылевых частиц в магнитосфере может влиять также большая величина их заряда, достигающая $4 \cdot 10^5$ зарядов электронов. При этом продольная (вдоль магнитного поля) диффузия пылевых частиц может существенно (в десятки раз) превосходить обычную диффузию броуновской частицы, тогда как диффузия поперек магнитного поля, как правило,

как Mg, Al, Si, S, Ca, Cr, Mn, Fe, Ni. W cząstkach pyłu międzyplanetarnego często spotyka się zgrupowania (klastery) nano- mikroskalowych oliwin i metalowe (lub jego pochodne) kulki (spherules) o średnicach od 100 do 500 nm wtopione w szkło kwarcowe (tak zwane GEMS — glass with embedded metal and sulphides), niezaobserwowane, jako składniki mikrometeorytów.

Ładowanie cząsteczek pyłu w przestrzeni kosmicznej zachodzi na różne sposoby. W odniesieniu do pyłu międzyplanetarnego, podstawowymi mechanizmami ładowania są: absorpcja elektronów i jonów otaczającej plazmy przez cząsteczki pyłu, wtórna emisja wtórniczna emisja elektronów (w wyniku uderzenia elektronu lub jonu), efekt fotoelektryczny, jak również w wyniku zderzeń cząsteczek pyłu między sobą.

Podczas przechodzenia cząstek pyłu przez różne obszary otaczającej plazmy ich ładunek nie pozostaje stały. Głównym efektem, związanym z procesem ładowania cząstek pyłu (i w konsekwencji, ich zmiennymi ładunkami), jest dyfuzja orbit naładowanych cząstek pyłu. Systematyczne zmiany ładunku uwarunkowane są gradientami parametrów plazmy, modulacja prądów w plazmie, powstająca w wyniku modulacji prędkości cząsteczek pyłu względem strumieni plazmy, może dla różnych warunków prowadzić do procesów transportu cząstek wewnątrz magnetosfery, emisji cząstek z magnetosfery jak również do przechwytywania nano- i mikrocząstek z otaczającej przestrzeni

Proces transportu cząstek pyłu może również zależeć od wielkości ich ładunku, osiągającego $4 \cdot 10^5$ ładunku elektronu. W tym samym czasie podłużna (wzdłuż pola magnetycznego) dyfuzja cząstek pyłu może istotnie (dziesiątki razy) przewyższać zwykłą dyfuzję Browna cząstek, podczas gdy dyfuzja w poprzek pola magnetycznego jest taka sama jak w zwykłej namagnesowanej elektronowo-jonowej plazmie.

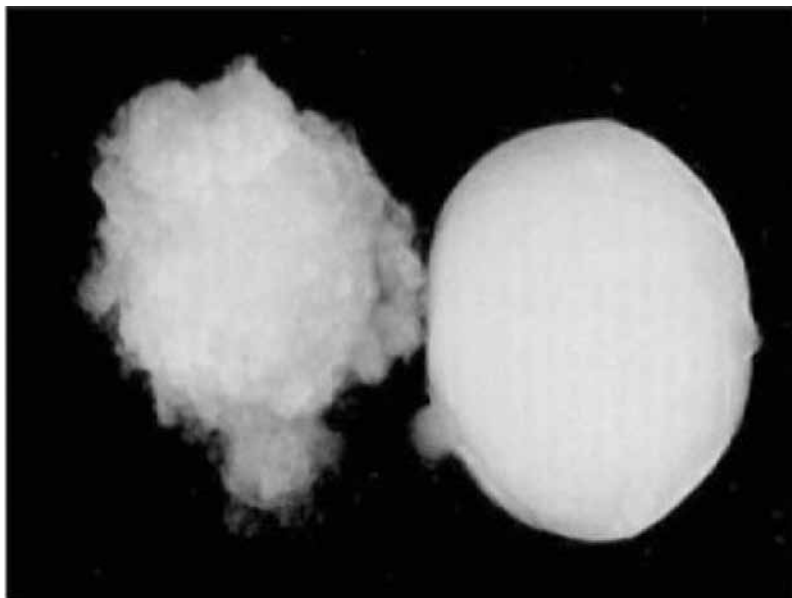


Рис. 1. Хондритная частица межпланетной пыли, прикрепленная к сферуле техногенного происхождения, состоящей из оксида алюминия (диаметр каждой частицы имеет диаметр ~6 мкм; фото указывает на существование механизма загрязнения частиц межпланетной пыли техногенным веществом, обнаруженным в стратосфере Земли)

Rys. 1. Zdjęcie cząstki (chondrytu) pyłu międzyplanetarnego dołączone do kulki pochodzenia technogennej złożonej z tlenku glinu. Każda cząstka ma średnicę około 6 mikronów. Zdjęcie wskazuje na istnienie mechanizmu zanieczyszczania pyłu międzyplanetarnego technogennymi substancjami znajdującymi się w stratosferze Ziemi

проходит так же, как и в обычной замагниченной электронно-ионной плазме.

Следует отметить, что определенная роль в магнитосфере может принадлежать антропогенным частицам. На рис. 1 изображена хондритная частица межпланетной пыли, прикрепленная к сферуле техногенного происхождения, состоящей из оксида алюминия (каждая диаметром приблизительно 6 мкм).

ЗАРЯЖЕННАЯ ПЫЛЬ В ИОНОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

Поток метеорного вещества на Землю составляет несколько десятков тонн в день. Выпадают преимущественно сантиметровые тела, которые сгорают (испаряются) на высотах 70...120 км. Пары метеорного вещества конденса-

Należy zauważyć, że w magnetosferze pewną rolę mogą odgrywać cząstki pochodzenia antropogenicznego. Rys. 1 przedstawia obraz pokazujący cząstkę chondrytu pyłu międzyplanetarnego, dołączoną do kulki, pochodzenia technogennej, składającej z tlenku glinu (każda o średnicy ok. 6 mikronów).

NAŁADOWANY PYŁ W JONOSFERZE ZIEMI

Strumień meteoroidów lecących do Ziemi to kilkadziesiąt ton na dobę. Spadają głównie ciała centymetrowe, które są spalane (odparowywane) na wysokościach 70...120 km. Pary te kondensują, co prowadzi do pojawienia się w jonosferze drob-

руются, приводя к появлению в ионосфере мелкодисперсных (smoke) нано частиц с концентрациями, как правило, превышающими 10 см^{-3} . Наибольшие концентрации таких частиц — бóльшие или порядка 10^4 см^{-3} — достигаются на высотах 80...90 км. Наночастицы могут также попадать в ионосферу из нижней атмосферы вследствие конвективного переноса частиц сажи от лесных пожаров и частиц вулканического происхождения. В результате в нижней ионосфере на высотах 80...120 км всегда присутствуют мелкодисперсные частицы с характерным размером, равным нескольким нанометрам. Следует отметить, что данные наблюдений о наночастицах в нижней ионосфере практически отсутствуют, поскольку оптические методы не дают возможности их детектировать. Информацию о составе и распределении по размерам таких частиц могут дать только пролетные ракетные эксперименты, поэтому указанные числа отражают лишь модельные представления о мезосферной пылевой компоненте. Считается, что наночастицы играют важную роль в ряде явлений в мезосфере. В летней полярной мезосфере с конца мая по конец августа на высотах около 80...90 км температура окружающего воздуха опускается ниже 150 К, и пары воды, присутствующие на этих высотах, становятся пересыщенными. В этих условиях происходит рост мелкодисперсных частиц в окружающем пересыщенном водяном паре. Достигая определенного размера, выросшие наночастицы начинают определять ионизационные свойства ионосферы в области своей локализации. Важной особенностью летней полярной ионосферы является наличие очень тонких (по сравнению со шкалой высот атмосферы) пылевых слоев, расположенных на высотах 80...85 км и известных как серебристые облака, и на высотах 85...95 км, называемых полярными мезосферными радиоотражениями (Polar Mesosphere Summer Echoes).

no rozproszonych (dymu), nanocząstek, których koncentracja z reguły przekracza 10 см^{-3} . Największe koncentracje takich cząstek, rzędu 10^4 см^{-3} lub większe, osiągnięte jest na wysokościach 80...90 km. Nanocząstki mogą przedostawać się do jonosfery z dolnych części atmosfery w wyniku konwekcji cząstek sadzy pochodzących z pożarów lasów cząstek pochodzenia wulkanicznego. W rezultacie, w dolnej części jonosfery, na wysokościach 80...120 km zawsze znajdują się drobne cząstki o rozmiarach rzędu kilku nanometrów. Należy zauważyć, dane obserwacyjne nanocząstek w dolnej jonosferze praktycznie nie istnieją, ponieważ optyczne metody nie pozwalają na ich wykrycie. Informacje dotyczące składu i rozkładu rozmiarów takich cząstek mogą dostarczyć tylko eksperymenty rakietowe, dlatego podane liczby odzwierciedlają jedynie modelowe przedstawienie o pyłowej składowej mезосфery. Uważa się, że nanocząstki odgrywają ważną rolę w wielu zjawiskach zachodzących w mезосferze. W letniej polarnej mезосferze, od końca maja do końca sierpnia, na wysokościach ok 80...90 km temperatura otoczenia spada 150 K, wtedy pary obecna na tych wysokościach stają się przesycone. W tych warunkach następuje wzrost drobnych cząstek w otaczającej przesyconej parze. Po osiągnięciu określonych rozmiarów, nanocząstki w obszarach swojej lokalizacji zaczynają określać jonizacyjne właściwości jonosfery. Ważną cechą letniej polarnej jonosfery jest obecność cienkich (w stosunku do wysokości atmosfery) warstw pyłu, znajdujących się na wysokościach 80...85 km znane, jako srebrzyste obłoki, a na wysokościach 85...95 km, nazywane są polarnymi mезосферycznymi odbiciami radiowym (Polar Mesosphere Summer Echoes).

Систематизация наблюдательных данных о поведении заряженной компоненты в полярной летней мезосфере позволяет выделить пять характерных случаев [Popel, 2010a–c]:

- наблюдались значительные понижения концентрации (bite-outs) электронов и положительных ионов на высотах 80...85 км;
- наблюдались значительные понижения концентрации электронов без заметных изменений в концентрации и составе положительных ионов;
- в области локализации серебристых облаков наблюдалось заметное увеличение концентрации электронов, при этом концентрации ионов и их состав не изменялись;
- наблюдалось заметное увеличение концентрации положительных ионов с одновременным понижением концентрации электронов;
- не наблюдалось заметных изменений в концентрациях электронов и положительных ионов, при этом отмечались сильные радиоотражения от мезосферы (на высотах 85...90 км) для частот радара 50...1000 МГц.

Присутствие заряженных наномасштабных частиц в нижней ионосфере позволяет объяснить указанные наблюдательные данные, а также существование пылевых слоев с резкими границами на высотах 80...85 км. На рис. 2 (см. с. 135) представлена зависимость размера (r_d) наномасштабных частиц от высоты (h_d) и времени (t) в летней полярной мезосфере. В качестве начального высотного профиля пылевых частиц использовался модельный, в котором частицы радиусом 10 нм имели гауссовское распределение по высотам с максимумом на высоте 90 км и характерным масштабом изменения по высотам 7,5 км. Рисунок иллюстрирует формирование в течение нескольких часов на высотах около 80 км слоя пылевых частиц (их концентрация варьи-

Systematyczne obserwacje danych o naładowanej składowej, letniej polarnej mезosfery pozwala wyróżnić pięć charakterystycznych przypadków [Popel, 2010a–c]:

- na wysokościach 80...85 km obserwuje się znaczny spadek koncentracji (bite-outs) elektronów i dodatnich jonów;
- obserwowany jest znaczny spadek koncentracji elektronów bez istotnej zmiany koncentracji i składu jonów;
- w obszarach lokalizacji srebrzystych obłoków obserwowany był znaczny wzrost koncentracji bez istotnej zmiany koncentracji i składu jonów;
- obserwowany był znaczny wzrost koncentracji dodatnich jonów z jednoczesnym spadkiem koncentracji elektronów;
- nie zaobserwowano znacznych zmian w koncentracjach elektronów i dodatnich jonów, równocześnie zaobserwowano silne odbicia fal radiowych od mезosfery (na wysokościach 85...90 km) dla częstotliwości radaru 50...1000 MHz.

Obecność naładowanych nanocząstek w dolnej jonosferze pozwala objaśnić przytoczone dane obserwacyjne. Ich obecność pozwala również wyjaśnić istnienie cienkich, o ostrych granicach, warstw pyłu na wysokościach 80...85 км. Rys. 2 przedstawia zależność (r_d) nanocząstki od wysokości (h_d) i czasu (t) w letniej polarnej mезosferze. Jako początkowy profil pionowy cząstek pyłu przyjęty został rozkład modelowy, w którym cząstki o promieniach 10nm mają rozkład Gaussa z maksimum na wysokości 90 км i charakterystycznej skali zmian na wysokościach 7.5 км. Rysunek przedstawia tworzenia się, w ciągu kilku godzin, na wysokości około 80 км warstwy pyłu (o koncentracji w zakresie od 10 do 1000 cm^{-3}) o charakterystycznych rozmiarach nieprzekraczających 500 nm. Na rysunku widoczny jest wzrost cząstek

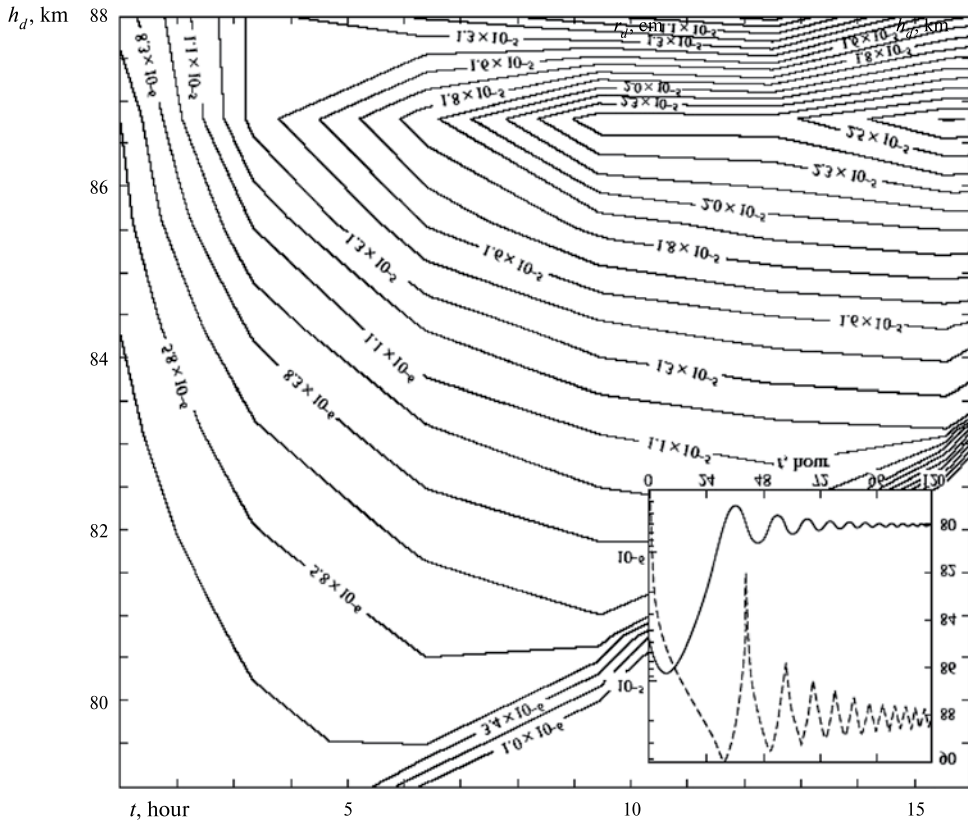


Рис. 2. Зависимость размера пылевой частицы от времени и высоты в летней полярной мезосфере. Сплошная (штриховая) кривая характеризует зависимость высоты (радиуса) пылевой частицы от времени

Rys. 2. Zależność rozmiaru cząstki pyłu od czasu i wysokości w letniej polarnej mezosferze. Krzywa ciągła (przerywana) charakteryzuje zależność wysokości (promienia) cząstki pyłowej od czasu

руется в пределах от 10 до 1000 см^{-3}) с характерным размером, не превышающим 500 нм . На рисунке видно также увеличение размеров частиц при их седиментации в мезосфере. Наличие восходящих потоков воздуха приводит к увеличению времени жизни частицы в мезосфере и соответственно к увеличению характерного размера частицы.

Во время выпадения высокоскоростных метеорных потоков Персеиды, Леониды, Ориониды, Геминиды в спектре излучения ионосферы, кроме известных типов помех, присутствуют максимумы (так называемые «пылевые»

podczas ich sedymtacji w mezosferze. Obecność wznoszących prądów powietrza prowadzi do wydłużenia czasu życia cząstek w mezosferze, co prowadzi do zwiększenia ich charakterystycznych rozmiarów.

Podczas wysypywania się szybkich me-teorytów, deszczu meteorów Perseidy, Leonidy, Orionidy, Geminidy, w widmie promieniowania jonosfery, oprócz znanych typów zakłóceń pojawiają się maksy-ma w zakresie $12..50 \text{ Hz}$ (tak zwane linie pyłowe,

линии) в диапазоне частот 12...50 Гц, которые меняют свою частоту и амплитуду, возле них появляются и исчезают сателлиты, меняется форма пика и т. п. Оказывается, что во время выпадения высокоскоростных метеорных потоков Персеиды, Леониды, Ориониды, Геминиды происходит испарение метеороидов на высотах 70...120 км в зависимости от размеров каждого из них и их начальной скорости. Пары метеорного вещества конденсируются, приводя к появлению наномасштабных (пылевых) частиц космического происхождения. В результате некомпенсированного электронного и ионного токов, а также фотоэффекта, возбуждённого солнечным излучением, частицы приобретают электрические заряды. При распространении электромагнитной волны в запылённой нижней ионосфере Земли в результате модуляционного взаимодействия возбуждаются электростатические низкочастотные колебания с характерными частотами, близкими к частотам пылевых звуковых волн, что может приводить к модуляции электромагнитных волн. Именно низкочастотная составляющая промодулированной волны на фоне ионосферных шумов и фиксируется у поверхности Земли. Наблюдения низкочастотных флуктуаций радишумов ионосферы, включающих устойчивые спектральные «пылевые» линии, могут служить косвенным подтверждением существования пылевой звуковой моды в запылённой ионосфере Земли [Popel, 2010a—c].

Эффект возбуждения специфических низкочастотных флуктуаций радишумов ионосферы во время выпадения высокоскоростных метеорных потоков может сопровождаться генерацией достаточно интенсивных инфразвуковых волн, представляющих собой упругие волны, аналогичные звуковым, но с частотами, меньшими частот, слышимых человеком. Обычно за верхнюю границу инфразвуковой области принимают частоты 16...25 Гц. Таким обра-

зменяяе своей частотой и амплитудой, обок них появляются и исчезают сателлиты, меняется их форма пика и т. п. Оказывается, что во время выпадения быстрых дождей метеороидов Персеиды, Леониды, Ориониды, Геминиды, на высотах 70...120 км, в зависимости от их размеров и скорости, происходит их испарение. Пары те подвергаются конденсации, что приводит к появлению наночастиц пыли космического происхождения. В результате существования некомпенсированных токов электронов и ионов, действия эффекта фотоэлектрического, возбуждённого излучением солнечным, частицы становятся электрически заряженными. Во время распространения волн электромагнитных, в запылённой нижней ионосфере, в результате взаимодействия модуляционного возбуждаются низкочастотные волны с частотами, близкими к частотам пылевых звуковых волн, что может приводить к модуляции электромагнитных волн. Именно низкочастотная составляющая промодулированной волны на фоне ионосферных шумов и фиксируется у поверхности Земли. Наблюдения низкочастотных флуктуаций радишумов ионосферы, включающих устойчивые спектральные «пылевые» линии, могут служить косвенным подтверждением существования пылевой звуковой моды в запылённой ионосфере Земли [Popel, 2010a—c].

Эффект возбуждения специфических низкочастотных флуктуаций радишумов ионосферы во время выпадения быстрых дождей метеороидов Персеиды, Леониды, Ориониды, Геминиды, на высотах 70...120 км, в зависимости от их размеров и скорости, происходит их испарение. Пары те подвергаются конденсации, что приводит к появлению наночастиц пыли космического происхождения. В результате существования некомпенсированных токов электронов и ионов, действия эффекта фотоэлектрического, возбуждённого излучением солнечным, частицы становятся электрически заряженными. Во время распространения волн электромагнитных, в запылённой нижней ионосфере, в результате взаимодействия модуляционного возбуждаются низкочастотные волны с частотами, близкими к частотам пылевых звуковых волн, что может приводить к модуляции электромагнитных волн. Именно низкочастотная составляющая промодулированной волны на фоне ионосферных шумов и фиксируется у поверхности Земли. Наблюдения низкочастотных флуктуаций радишумов ионосферы, включающих устойчивые спектральные «пылевые» линии, могут служить косвенным подтверждением существования пылевой звуковой моды в запылённой ионосфере Земли [Popel, 2010a—c].

зом, частотные диапазоны для инфразвуковых и пылевых звуковых волн в нижней ионосфере в значительной степени перекрываются. Генерация инфразвуковых волн происходит в результате взаимодействия пылевых звуковых возмущений, возбуждаемых во время выпадения высокоскоростных метеорных потоков, с нейтральной компонентой ионосферной плазмы. Особенностью распространения инфразвуковых волн в атмосфере Земли является очень слабое их затухание, позволяющее им распространяться на большие (тысячи километров) расстояния. На рис. 3 представлены амплитудно-частотные области, характеризующие инфразвуковые волны у поверхности Земли от различных источников. Эти области указывает на важную роль инфразвуковых волн, происхождение которых связано с возбуждением пылевых звуковых

infradźwięków i fal pyłowych akustycznych w znacznym stopniu na siebie zachodzą. Generacja fal infradźwiękowych jest wynikiem oddziaływania fal pyłowo akustycznych, wzbudzanych podczas szybkiego deszczu meteorów, z neutralną składową plazmy jonosferycznej szczególną cechą fal infradźwiękowych w atmosferze Ziemi jest ich bardzo słabe tłumienie, które pozwala na ich rozprzestrzenianie się na ogromne (rzędu tysięcy kilometrów) odległości. Rys. 3 przedstawia obszary amplitudowo-częstotliwościowych, charakterystyk fal infradźwiękowych przy powierzchni Ziemi pochodzących z różnych źródeł, wskazują one na ważną rolę fal infradźwiękowych, których pochodzenia związane jest z zaburzeniami pyłowo-akustycznymi w dolnej jonosferze Ziemi w czasie deszczu meteoroidów (obszar ograniczony krzywą 7).

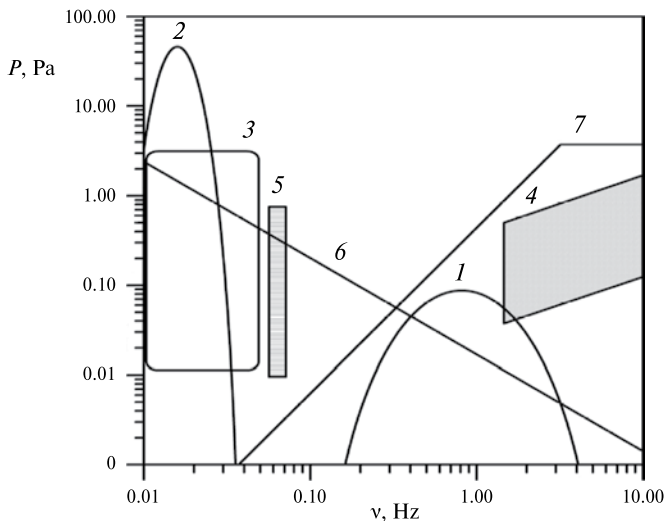


Рис. 3. Амплитудно-частотные области, характеризующие инфразвук у поверхности Земли от следующих источников: малые 1 и большие 2 взрывы; волны Рэлея при землетрясениях, магнитные бури, ураганы, смерчи 3; авиация, грозы 4; микробаромы 5; локальный турбулентный шум 6; пылевые звуковые возмущения 7

Rys. 3. Obszary amplitudowa-częstotliwościowe, charakteryzujące infradźwięk przy powierzchni Ziemi, pochodzący ze źródeł: małe 1 i duże 2 wybuchy, fale Rayleigha podczas trzęsień Ziemi, burze magnetyczne, tornada 3, lotnictwo, burze 4, mikrobaromy 5, turbulencje lokalne szumy 6, zaburzenia pyłowo-dźwiękowe 7

возмущений в нижней ионосфере Земли во время метеорных потоков (область, ограниченная кривой 7).

Еще одним эффектом, который сопровождает возбуждение пылевых звуковых возмущений во время выпадения высокоскоростных метеорных потоков и может наблюдаться с поверхности Земли, является усиление относительной интенсивности зелёного излучения ночного неба до 7 %. Этот эффект связан с возможностью возбуждения пылевыми звуковыми возмущениями акустико-гравитационных волн, которые имеют характерные частоты порядка нескольких десятков герц и фазовые скорости, существенно меньшие скорости звука. На высотах 110...120 км, где температура имеет высокий градиент, в результате развития конвективной неустойчивости происходит рост амплитуд акустико-гравитационных волн. При достижении значений амплитуд порядка фонового давления окружающей среды (на этих высотах) волновой процесс переходит на нелинейный режим. В результате конкуренции нелинейности и дисперсионного расплывания образуются локализованные нелинейные вихревые структуры. Основным источником возбуждения зелёной линии на высотах 80...120 км являются химические реакции в соответствии с механизмом Барта–Хильдебранта. Зависимость интенсивности излучения зелёной линии может быть представлена как третья степень от концентрации атомарного кислорода. Изменение концентрации атомарного кислорода вызвано присутствием стационарных локализованных нелинейных вихревых структур. Наличие таких вихрей приводит к конвективному перемешиванию кислорода по вертикали и, следовательно, к повышению концентрации атомарного кислорода на уровне светящегося слоя атмосферы (110...120 км) [Popel, 2010a–c].

Динамика вихрей в атмосфере тесно связана с поведением нано- и ми-

Innym efektem, który towarzyszy wzbudzeniu zaburzeń pyłowo-akustycznych w czasie wysypywania się szybkich strumieni deszczu meteoroidów i może być obserwowany jest z powierzchni Ziemi jest względne zwiększenie intensywności (do 7 %) zielonego promieniowania nocnego nieba. Efekt ten związany jest z możliwością wzbudzenia przez fale pyłowo-akustyczne fal grawitacyjno-akustycznych, których charakterystyczne częstotliwości są rzędu kilkudziesięciu Hz, a ich prędkości fazowe są znacznie mniejsze od prędkości dźwięku. Na wysokościach rzędu 110...120 km, gdzie jest wysoki gradient temperatury, w wyniku rozwoju niestabilności konwekcyjnej rośnie amplituda fal akustyczno-grawitacyjnych. Po osiągnięciu wartości amplitud rzędu fononowego ciśnienia tła (na tych wysokościach) proces falowy staje się nieliniowy. W wyniku konkurencji procesów nieliniowych i dyspersyjnych powstają zlokalizowane struktury wirowe. Głównym źródłem wzbudzenia zielonej linii na wysokościach 80...120 km są reakcje chemiczne zachodzące zgodnie z mechanizmem Barta–Hildebranta. Intensywność promieniowania zielonej linii zależy od trzeciej potęgi koncentracji atomowego tlenu. Zmiany stężenia koncentracji atomowego tlenu może być spowodowane obecnością stacjonarnych zlokalizowanych struktur wirowych. Obecność tego typu wirów może prowadzić do konwekcji pionowej tlenu a w konsekwencji do podwyższonej koncentracji atomowego tlenu na poziomie świecącego słońca w atmosferze (110...120 km) [Popel, 2010a–c].

Dynamika wicherów w atmosferze jest ściśle związana zachowaniem się nано- i

кромасштабных частиц. Возбуждение акустико-гравитационных вихрей на высотах 110...130 км в результате развития акустико-гравитационной неустойчивости, связанной с ненулевым балансом тепловых потоков, вызванных солнечным излучением, конденсацией паров воды, инфракрасным излучением в атмосфере, а также теплопроводностью, приводит к существенному перемешиванию и транспорту пылевых частиц на высотах 110...120 км [Popel et al., 2010]. Еще одним способом переноса пылевых частиц в ионосфере являются вертикальные потоки (стримеры), которые формируются пылевыми вихрями в результате развития параметрической неустойчивости.

ПЫЛЕВАЯ ПЛАЗМА И ВРЕМЕННЫЕ АТМОСФЕРЫ КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛ

Временные атмосферы у космических тел, не имеющих собственных атмосфер, таких как Луна, Меркурий, астероиды, кометы и др., возникают в результате соударений метеороидов или космических аппаратов с этими телами [Popel, 2010c]. Видимая временная атмосфера была обнаружена у поверхности Луны. Ударно-волновые явления, обусловленные указанными соударениями, сопровождаются рядом физических процессов, включающих: электромагнитное излучение (в частности, в оптическом диапазоне), которое в случае соударений достаточно больших метеороидов может наблюдаться даже с поверхности Земли; формирование бесстолкновительного ударно-волнового фронта, связанного с возбуждением турбулентности в плазме плюма метеороида; выталкивание межпланетного магнитного поля из области плюма; образование микромасштабных частиц и их зарядку; нагрев электронов и их ускорение в результате взаимодействия с плазменной турбулентностью; ультрафиолетовое и рентгеновское излучение. На рис. 4 (см. с. 140) представлена схема, характеризующая

mikrocząstek. Wzbudzenie wirów akustyczno-grawitacyjnych na wysokościach 110...130 km w wyniku rozwoju grawitacyjno-akustycznej niestabilności, związane jest z niezerowym bilansem strumieni ciepła, spowodowanych wpływem promieniowania słonecznego, kondensacją par wody, promieniowaniem podczerwonym w atmosferze, przewodnictwem cieplnym, prowadzi do silnego mieszania i transportu cząstek pyłu na wysokości 110...120 km [Popel et al., 2010]. Inną metodą transportu cząstek pyłu są prostopadłe strumienie (streamery) w jonosferze, które formowane są przez wiry pyłowe powstające w wyniku niestabilności parametrycznej.

PLAZMA PYŁOWA I TYMCZASOWE ATMOSFERY CIAŁ KOSMICZNYCH

Tymczasowe atmosfery ciał kosmicznych, niemające własnych atmosfer, takich jak Księżyc, Merkury, asteroidy, komety i inne, powstają w wyniku ich zderzeń z meteoroidami lub statkami kosmicznymi [Popel, 2010c]. Widoczną tymczasową atmosferę wykryto na powierzchni Księżyca. Fali uderzeniowej towarzyszy szereg procesów fizycznych w tym promieniowanie elektromagnetyczne (w szczególności w zakresie widma optycznego), które w przypadku kolizji z dostatecznie dużymi meteoroidami można obserwować nawet z powierzchni Ziemi; formowanie bezzderzeniowego frontu czoła fali uderzeniowej związane ze wzbudzeniem turbulencji w smudze plazmy meteorytu; wyrzucanie międzyplanetarnego magnetycznego pola z obszaru smugi; powstawanie i ładowanie mikrocząstek; grzanie elektronów i ich przyśpieszenie w wyniku oddziaływania z turbulentną plazmą; promieniowanie ultrafioletowe i rentgenowskie. Rys. 4 ilustruje schematycznie procesy powstające w wyniku zderzenia powierzchni Księżyca z dużym meteoroidem.

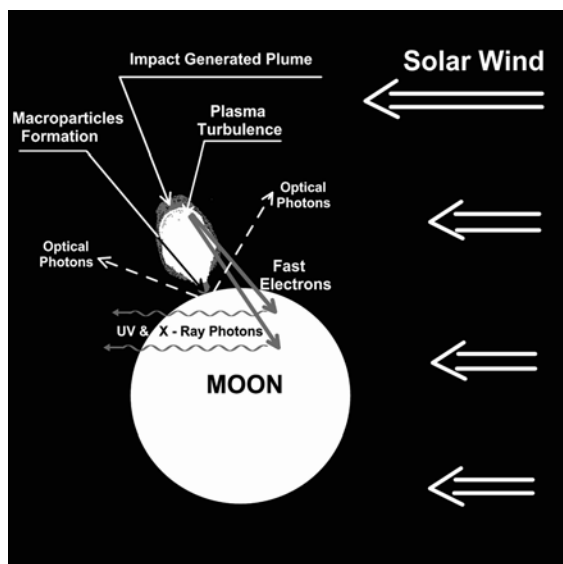


Рис. 4. Процессы при соударении крупного метеороида с поверхностью Луны: оптические фотоны, возникающие при ударе, плум метеороида и его эволюция, формирование микрочастиц в плюме, плазменная турбулентность в области взаимодействия солнечного ветра с плумом, генерация быстрых электронов, ультрафиолетовых и рентгеновских фотонов

Rys. 4. Procesy zachodzące przy zderzeniu powierzchni Księżyca z dużym meteorem, optyczne fotony powstające podczas uderzenia, smuga meteorytu i jego ewolucja, formowanie się makrocząstek w smudze, plazmowa turbulencja w obszarze oddziaływania wiatru słonecznego ze smugą, generacja szybkich elektronów, ultrafioletowych i rentgenowskich fotonów

указанные процессы при соударении достаточно крупного метеороида с поверхностью Луны.

При ударе о поверхность Луны метеороида размером 10 см, движущегося со скоростью 20 км/с, образуемый при ударе плум, состоящий из испаренного вещества, имеет коническую форму. За время около 2,5 с высота плума достигает 10 км, его радиус — 5 км, а характерная плотность становится порядка 10^{-15} г/см³, после чего начинается бесстолкновительная фаза эволюции плума. При расширении плума в области наличия солнечного ветра молекулы пара ионизируются, и образуется плазма.

Кроме электронов, ионов и нейтралов в плазме плума присутствуют макрочастицы. Первый тип макрочастиц (мелкие капли) создается в результате

При удере meteorytu o rozmiarze 10 cm i prędkości 20 km/s, o powierzchnię Księżyca, powstająca smuga, złożona z odparowanych substancji ma kształt stożkowy. W czasie około 2.5 s smuga osiąga wysokość 10 km, średnica — 5 km, a charakterystyczna gęstość jest rzędu 10^{-15} g/cm³, następnie zaczyna się bezzdarzeniowa faza ewolucji smugi. Podczas ekspansji smugi, w obszarze wiatru słonecznego, molekuly pary jonizują się i powstaje plazma.

Oprócz elektronów, jonów, i cząstek neutralnych w smudze obecne są mikrocząstki. Pierwszy typ cząstek (małe krople) powstają w wyniku kondensacji, któ-

процесса конденсации, который имеет место при расширении вещества плюма. Все такие капли имеют приблизительно одинаковый размер — $a \approx 3$ мкм. Степень конденсации составляет приблизительно 0,2...0,3. Капли поднимаются вместе с веществом плюма со скоростью 3...5 км/с. Указанное значение превосходит первую космическую скорость для Луны, равную 2,3 км/с. Таким образом, капли в итоге покидают поверхность Луны. Второй тип макрочастиц (пыль) выбрасывается из воронки, образованной в результате соударения метеороида, и окружающего ее слоя реголита. Типичный размер частиц лунной пыли — около 30 мкм, а скорость частиц — 0,3...1 км/с. Для десятисантиметрового тела количество пыли составляет примерно $4 \cdot 10^{11}$ частиц. Сила тяжести ограничивает подъем таких частиц. Так, при скорости частиц 0,3 км/с частицы пыли останавливаются и падают обратно на поверхность Луны за время порядка 20 с. Максимальная высота подъема таких частиц — 3 км.

Зарядка частиц осуществляется за счет микроскопических токов электронов и ионов на микрочастицу и фототока. Если расширение плюма происходит на освещенной Солнцем части Луны, то максимальный заряд положительный и составляет порядка 10^4 и 10^5 зарядов электрона для мелких капель и для частиц пыли соответственно. Присутствие заряженных микрочастиц модифицирует структуру ударно-волнового фронта, которым является внешняя граница плюма, то есть граница между плазмой плюма и окружающим пространством.

Для 10-сантиметрового тела уменьшение плотности плазмы в плюме происходит до тех пор, пока его радиус (и, соответственно, размер зоны возмущения) не превосходит ~500 км. При достижении указанной величины плотности плазмы в плюме и плазмы солнечного ветра сравниваются примерно через 250 с после столкновения.

ра заходит podczas ekspansji substancji smugi. Wszystkie krople mają w przybliżeniu jednakowe rozmiary — $a \approx 3$ mikronów. Stopień kondensacji wynosi w około 0,2...0,3. Krople podnoszą się razem z substancją smugi z 3...5 km/s. Podana wartość przekracza pierwszą prędkość kosmiczną, która dla Księżyca wynosi ona 2.3 km/s. Tak, więc, krople w końcu opuszczają powierzchnię Księżyca. Drugi typ cząstek (pył) wyrzucany jest z krateru powstałego w wyniku uderzenia meteorytu w warstwę regotitu. Typowy rozmiar księżycowego pyłu — około 30 mikronów, prędkość 0,3...1 km/s. Dla ciała o rozmiarach ok. 10 cm — powstająca ilość pyłu wynosi $4 \cdot 10^{11}$ cząstek. Wzniesienie się takich cząstek jest ograniczone przez siłę ciężkości. Przy prędkości 0.3 km/s, cząstki pyłu zatrzymują się i spadają na powierzchnię Księżyca w czasie rzędu 20 s. Maksymalna wysokość osiągnięta przez te cząstki to — 3 km.

Ładowanie cząstek zachodzi w wyniku mikroskopowych prądów elektronowych i jonowych i fotoprądu. Jeśli ekspansja smugi zachodzi na oświetlonej przez Słońce części księżyca, maksymalny ładunek jest dodatni i jest rzędu 10^4 i 10^5 ładunków elektronów dla małych kropli i dla cząstek pyłu odpowiednio. Obecność naładowanych cząstek modyfikuje strukturę frontu fali uderzeniowej, która jest zewnętrzną granicą smugi, to znaczy jest to granica między plazmą smugi a otaczającą przestrzenią.

Dla 10 cm ciała zmniejszenie gęstości plazmy w smudze zachodzi do momentu gdy średnica (a więc rozmiar obszaru zaburzenia) nie przekracza 500 km. Po osiągnięciu określonej wartości gęstości plazmy w smudze i plazmy wiatru słonecznego wyrównują się, zachodzi to po około 250 s. po zderzeniu.

**ПЫЛЕВАЯ ПЛАЗМА
И КОСМИЧЕСКАЯ ПОГОДА**

Важными направлениями исследований по программе «Космическая погода» являются формирование структур в пылевой плазме, транспорт вещества и энергии [Popel et al., 2011]. Указанные эффекты усиливаются большими величинами и переменным характером зарядов пылевых частиц. Даже при относительно малых концентрациях пылевые частицы могут играть существенную роль при определении характеристик космической погоды. Нано- и микромасштабные частицы участвуют в переносе вещества и энергии между магнитосферой, ионосферой и в нейтральной атмосфере Земли [Popel et al., 2010; 2011]. Электрически заряженные микроскопические нано- и микрочастицы из межпланетного пространства, ионосферы и магнитосферы Земли воздействуют на локальные свойства околоземной и межпланетной пылевой плазмы, влияя на процессы формирования облаков и пылевых структур, радиосвязь и эффекты, связанные с глобальным потеплением. Будущие теоретические и лабораторные исследования пылевых частиц в пылевой плазме, объединенные с дистанционным зондированием и непосредственными наблюдениями в мезосфере, ионосфере, магнитосфере, солнечном ветре и солнечной атмосфере, должны привести к лучшему пониманию и лучшим предсказаниям космической погоды.

**PLAZMA PYŁOWA
I POGODA KOSMICZNA**

Ważnym kierunkiem badań w programie „Pogoda Kosmiczna” jest formowanie się struktur w plazmie pyłowej, transport i energia [Popel et al., 2011]. Efekty te są wzmacniane przez duże wartości i zmienny charakter ładunków cząstek pyłu. Nawet, przy stosunkowo małych koncentracjach, cząstki pyłowe mogą odgrywać istotną rolę przy określeniu charakterystyk kosmicznej pogody. Nano- i mikrocząstki biorą udział w transporcie materii i energii między magnetosferą, jonosferą i w neutralnej atmosferze Ziemi [Popel et al., 2010; 2011]. Elektrycznie naładowane mikroskopowe nano- i mikrocząstki z międzyplanetarnej przestrzeni, jonosfery i magnetosfery Ziemi oddziałują na lokalne własności międzyplanetarnej przestrzeni okołozemskiej, wpływając na procesy formowania się obłoków i struktur pyłowych, łączność radiową i efekty związane z globalnym ociepleniem. Przyszłe teoretyczne i laboratoryjne badania cząstek pyłu i plazmy pyłowej w połączeniu z teledetekcją i bezpośrednimi obserwacjami mezosfery, jonosfery, magnetosfery, wiatru słonecznego i słonecznej atmosfery, powinny doprowadzić do lepszego zrozumienia i lepszego przewidywania pogody kosmicznej.

ЛИТЕРАТУРА

- Izvekova Yu. N., Popel S. I. (2010) Dusty Plasmas in Earth's Magnetosphere // European Planetary Science Congress. Rome, Italy, 2010: EPSC Abstr. V. 5. EPSC2010-64.
- Popel S. I. (2010a) Dusty plasma processes in Earth's environments containing nano- and microscale grains // J. Plasma Physics. 2010. V. 76. Pts. 3–4. P. 525–537.
- Popel S. I. (2010b) Atmospheric Dust and Nonlinear Processes // Proc. 4th Intern. Conf. “Frontiers of Nonlinear Physics”. Nizhny Novgorod – St.-Petersburg, Russia, 2010. P. 357–358.
- Popel S. I. (2010c) Dusty (Complex) Plasmas: Recent Developments, Advances, and Unsolved Problems // 38th COSPAR Scientific Assembly, 2010: Abstr. Bremen, Germany, 2010. D33-0015-10.

BIBLIOGRAFIA

- Popel S. I., Izvekova Yu. N., Shukla P. K.* (2010) Nano- and Microscale Particles in Vortex Motions in Earth's Atmosphere and Ionosphere // *New Frontiers in Advanced Plasma Physics* / Ed. B. Eliasson, P. K. Shukla. American Inst. of Physics, Melville, N. Y., 2010. P. 189–200.
- Popel S. I., Kopnin S. I., Yu M. Y., Ma J. X., Feng H.* (2011) The Effect of Microscopic Charged Particulates in Space Weather // *J. Physics D: Applied Physics*. 2011. V. 44. P. 174036.

Results of investigations on dusty plasmas and study of plasma-dust processes in plasma heliogeophysics and space weather are represented. The main attention is paid to the description of dust in Earth's magnetosphere, influence of charged nanoscale particles on Earth's ionosphere and the formation of noctilucent clouds and polar mesosphere summer echoes, observations of collective phenomena in the dusty ionosphere, processes of formation of transient atmospheres of atmosphereless cosmic bodies such as the Moon, Mercury, asteroids, comets et al. In most of the situations described a significant role belongs to the interaction of the solar wind with fine particles.

ОСНОВНЫЕ ИСПОЛНИТЕЛИ

GŁÓWNI AKTORZY

1

РЕНТГЕНОВСКАЯ СПЕКТРОФОТОМЕТРИЯ СОЛНЦА (РЕСИК/ КОРОНАС-Ф)

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН), Троицк Московской области

В. Кузнецов

SPEKTROSKOPIA RENTGENOWSKA SŁOŃCA (RESIK/KORONAS-F)

Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk (CBK PAN), Wrocław
J. Sylwester

2

СПЕКТРОСКОПИЯ ДАЛЬНЕГО УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО И РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА

Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), Москва

С. Кузин

SPEKTROSKOPIA Z ZAKRESU DALEKIEGO ULTRAFIOLETU I RENTGENOWSKIEGO PROMIENIOWANIA SŁOŃCA

Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk, (CBK PAN), Wrocław,
J. Sylwester, Z. Kordylewski

3

СФИНКС

Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), Москва

С. Кузин

SPHINX

Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk (CBK PAN), Wrocław
J. Sylwester, Z. Kordylewski

4

НЕЙТРАЛ

Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва

В. Измоденов, О. Катушкина

NEUTRAŁ

Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk (CBK PAN), Warszawa
M. Bzowski

5

ИЗЛУЧЕНИЕ

Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), Москва

М. Могилевский, Т. Романцова, И. Моисеенко

PROMIENIOWANIE

Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk (CBK PAN), Toruń
J. Hanasz, R. Schreiber, M. Panchenko

6 СТРУКТУРА

Институт космических исследований Российской академии наук
(ИКИ РАН), Москва
С. Савин

STRUKTURA

Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk (CBK PAN), Warszawa
J. Węcki

7 ИОНОСФЕРА: МОДЕЛИРОВАНИЕ ИОНОСФЕРНОЙ ПОГОДЫ ДЛЯ РАДИОСВЯЗИ

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н. В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН), Троицк
Московской области
Т. Гуляева

JONOSFERA: MODELOWANIE POGODY JONOSFERYCZNEJ DLA ŁĄCZNOŚCI RADIOWEJ

Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk (CBK PAN), Warszawa
I. Stanisławska

8 ДИАГНОСТИКА ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИСТЕМ ГЛОБАЛЬНОЙ НАВИГАЦИИ

Западное отделение Института земного магнетизма, ионосферы и
распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова Российской академии наук
(ЗО ИЗМИРАН), Калининград
И. Шагмуратов, И. Захаренкова, Ю. Черняк, И. Ефишов

DIAGNOSTYKA JONOSFERY PRZY UŻYCIU OBSERWACJI GNSS

Katedry Astronomii i Geodynamiki Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego
w Olsztynie
A. Krankowski, R. Sieradzki, P. Wielgosz, A. Krypiak-Gregorczyk

9 ИНЖЕКЦИЯ

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н. В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН), Троицк
Московской области
Ю. Михайлов

INIEKCJA

Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk (CBK PAN), Warszawa
Z. Kłós

10 ПВО (ПЛАЗМЕННО-ВОЛНОВАЯ ОБСТАНОВКА)

Институт космических исследований Российской академии наук
(ИКИ РАН), Москва
**С. Климов, В. Грушин, Л. Белякова, В. Мягих, Д. Новиков, А. Беликова,
И. Добровольский**

PWO (ŚRODOWISKO PLAZMOWO-FALOWE)

Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk (CBK PAN), Warszawa
H. Rothkaehl, J. Juchniewicz, M. Morawski, M. Winkler, J. Krasowski

11 ФОБОС

Институт космических исследований Российской академии наук
(ИКИ РАН), Москва
О. Козлов, А. Захаров, Т. Козлова

FOBOS

Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk (CBK PAN), Warszawa
**J. Grygorczuk, M. Banaszekiewicz, K. Seweryn, H. Rickman, M. Morawski,
A. Cichocki, M. Ciesielska, M. Dobrowolski, B. Kędziora, J. Krasowski,
R. Wawrzaszek, L. Wisniewski**

12 ТУРБУЛЕНТНОСТЬ

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н. В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН), Троицк
Московской области
А. Волокитин

Институт космических исследований Российской академии наук
(ИКИ РАН), Москва
Л. Зеленый

TURBULENCJA

Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk (CBK PAN), Warszawa
B. Atamaniuk

13 ПЫЛЕВАЯ ПЛАЗМА

Институт космических исследований Российской академии наук
(ИКИ РАН), Москва
С. Попель, Л. Зеленый

Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н. В. Пушкова Российской академии наук (ИЗМИРАН), Троицк
Московской области
А. Волокитин

PLAZMA PYŁOWA

Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk (CBK PAN), Warszawa
B. Atamaniuk