



Российская Академия Наук

Российская академия наук
Rosyjska Akademia Nauk



Польская академия наук
Polska Akademia Nauk

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

WSPÓŁPRACA NAUKOWA MIĘDZY ROSYJSKĄ AKADEMIĄ NAUK I POLSKĄ AKADEMIĄ NAUK W DZIEDZINIE PODSTAWOWYCH BADAŃ KOSMICZNYCH

РЕЗУЛЬТАТЫ СОВМЕСТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
2011–2015
WYNIKI WSPÓLNYCH BADAŃ
2011–2015

МОСКВА
2016

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

**WSPÓŁPRACA NAUKOWA MIĘDZY ROSYJSKĄ AKADEMIĄ NAUK
I POLSKĄ AKADEMIĄ NAUK W DZIEDZINIE PODSTAWOWYCH
BADAŃ KOSMICZNYCH**

РЕЗУЛЬТАТЫ СОВМЕСТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ (2011–2015)

WYNIKI WSPÓLNYCH BADAŃ (2011–2015)

В рамках Соглашения о научном сотрудничестве между Российской академией наук (РАН) и Польской академией наук (ПАН) в области фундаментальных космических исследований (ФКИ) в 2012 г. был утвержден перечень совместных российско-польских космических проектов. В данном издании приведены результаты исследований, полученные за период 2011–2015 гг.

составитель *Романцова Т.В.*
редактор: *Корниленко В.С.*
компьютерная верстка: *Титова А.Ю.*
дизайн обложки: *Давыдов В.М.*

Издание подготовлено издательским отделом Института космических исследований Российской академии наук, 2016

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН), 2016

СОДЕРЖАНИЕ ZAWARTOŚĆ

ПРЕДИСЛОВИЕ WSTĘP	5
1 ХЕМИКС – РЕНТГЕНОВСКИЙ СПЕКТРОМЕТР БРЭГГА ДЛЯ СОЛНЕЧНО-ГЕЛИОСФЕРНОЙ МИССИИ ИНТЕРГЕЛИОЗОНД CHEMIX: RENTGENOWSKI SPEKTROMETR BRAGGA NA MIĘDZYPLANETARNĄ MISJĘ INTERHELIOPROBE	33
2 РЕНТГЕНОВСКИЙ ТЕЛЕСКОП «СОРЕНТО» TELESKOP RENTGENOWSKI «SORENTO»	56
3 РЕНТГЕНОВСКАЯ СПЕКТРОФОТОМЕТРИЯ СОЛНЦА (РЕСИК) SPEKTROSKOPIA RENTGENOWSKA SŁOŃCA (RESIK)	69
4 «СОЛЬПЕКС»: СПЕКТРОМЕТРОПОЛЯРИМЕТР МЯГКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА «SOLPEX»: SPEKTROPOLARIMETR MIĘKKIEGO PROMIENIOWANIA RENTGENOWSKIEGO SŁOŃCA	84
5 ТРАНЗИЕНТ TRANZYT	94
6 ИЗЛУЧЕНИЕ PROMIENIOWANIE	99
7 ИОНОСФЕРА: МОДЕЛИРОВАНИЕ ИОНОСФЕРНОЙ ПОГОДЫ ДЛЯ РАДИОСВЯЗИ JONOSFERA: MODELOWANIE POGODY JONOSFERYCZNEJ DLA ŁĄCZNOŚCI RADIOWEJ	114
8 ГЛОНАСС/GPS МОНИТОРИНГ ИОНОСФЕРЫ MONITORING JONOSFERY PRZY UŻYCIU OBSERWACJI GPS/GLONASS	132

9	ИНЖЕКЦИЯ	
	INIEKCJA.....	149
10	ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАЗМЕННО-ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ	
	В ИОНОСФЕРЕ И МАГНИТОСФЕРЕ (ПВО)	
	BADANIA PLAZMOWO-FALOWYCH PROCESÓW	
	W JONOSFERZE I MAGNETOSFERZE (PWO).....	159
11	ТЕРМО-ЛР	
	THERMO-LR.....	181
12	АСИМПТОТИКА	
	ASYMPTOTYKA	195
13	ТУРБУЛЕНТНОСТЬ И ПЫЛЕВАЯ ПЛАЗМА	
	TURBULENCJA PLAZMA PYŁOWA	215

ПРЕДИСЛОВИЕ

**РОССИЙСКО-ПОЛЬСКИЕ
КОСМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ:
ВЧЕРА, СЕГОДНЯ, ЗАВТРА**

В следующем году исполняется 60 лет со дня начала сотрудничества ученых России и Польши по исследованию проблем космической физики. И в преддверии этой даты хочется еще раз обратиться к славной истории наших совместных космических исследований, многие страницы которой написаны благодаря общим усилиям ученых этих двух стран.

вчера

Сотрудничество стран Восточной Европы, в частности России и Польши, в изучении космоса началось еще в октябре 1957 года, когда совместные наблюдения велись за полетом первого в мире советского искусственного спутника Земли. Исследования с помощью ракет и космических аппаратов из-за их сложности и стоимости тогда еще были доступны только двум странам. Но освоение космоса, возможность непосредственного изучения межпланетного пространства должны были стать достоянием всех государств, поэтому в апреле 1967 года специалистами социалистических стран была принята

WSTĘP

**POLSKO-ROSYJSKIE
BADANIA: W CZORAJ,
DZIŚ, JUTRO**

W przyszłym roku mija 60 rocznica od rozpoczęcia polsko-rosyjskiej współpracy naukowej w dziedzinie problemów fizyki kosmicznej. W oczekiwaniu na ten dzień należy po raz kolejny odwołać się do historii naszych wspólnych badań kosmicznych, w której wiele stron napisano dzięki wysiłkom naukowców z obu krajów.

wczoraj

Współpraca w Europie Wschodniej, zwłaszcza w Rosji i Polsce, w badaniach kosmosu rozpoczęła się już w październiku 1957 roku, gdy wspólne obserwacje wiodły za pierwszym lotem pierwszego na świecie radzieckiego sztucznego satelity Ziemi. Badania prowadzone przy pomocy rakiet i statków kosmicznych z powodu ich złożoności i kosztów dostępne były wtedy tylko dla niektórych krajów, możliwość bezpośredniego badania przestrzeni międzyplanetarnej powinny mieć wszystkie państwa, dlatego w kwietniu 1967 roku, eksperci z krajów socjalistycznych przyjęli tzw. „Program wspólnej pracy” w zakresie badań

Программа по совместным работам в области исследования и использования космического пространства в мирных целях. Эта дата считается началом практической реализации программы ИНТЕРКОСМОС, предусматривающей участие граждан этих стран в пилотируемых полетах на советских космических кораблях и орбитальной станции вместе с советскими космонавтами. В каждой из девяти стран-участниц программы – НРБ, ВНР, ГДР, Кубе, МНР, ЧССР, СРР, СССР и ПНР в том числе – был создан координационный орган, отвечающий за выполнение программы сотрудничества в целом. Позже по программе ИНТЕРКОСМОС присоединились Франция и Швеция.

В соответствии с этой программой Советский Союз безвозмездно предоставлял для космических исследований свою технику – ракеты и спутники, на которые устанавливалась научная аппаратура, созданная учеными и специалистами государств-участников.

Польша стала одним из активных участников программы. Ответственным за деятельность ИНТЕРКОСМОСа с ее стороны был профессор астрономии Стефан Пиотровский, со стороны СССР – академик Борис Петров.

Для программы пришлось разработать единую телеметрическую систему, которая позволяла принимать и обрабатывать научную информацию наземными станциями стран-участниц.

Участие в ИНТЕРКОСМОСе позволило польским ученым выполнить ряд исследований по физике околоземного космического пространства и Солнца, а также контролируемые эксперименты в области физики плазмы и технологии материалов. Все эти эксперименты готовились разными на-

и использовании пространства космической до целей мирных. Дата установления программы считается началом практической реализации программы Интеркосмос, который гарантировал, что граждане этих стран могут брать участие в запусковых полетах до советского корабля космического и станции орбитальной вместе с советскими космонавтами. В каждом из девяти стран-участниц в программе – Болгария, Венгрия, НРД, Куба, Монголия и Чехословакия, Румыния, ЗСРР и Польша – функционировал орган координирующий, ответственный за осуществление программы сотрудничества, как единой. В более позднее время до программы ИНТЕРКОСМОС присоединились также Франция и Швеция.

Согласно с этой программой ЗСРР бесплатно предоставлял свою технику – строительство ракет и спутников, которая возникла из инструментов научных разработанных через ученых и специалистов из Государств-Стран.

Польша стала одним из наиболее активных участников программы. За активность ИНТЕРКОСМОСа с польской стороны ответственным был профессор астрономии Стефан Пиотровский, а из Союза Советского – Академик Борис Петров.

Для программы важным было создание единой системы телеметрической, которая позволяла бы на прием и преобразование информации научных до станций наземных стран-участниц.

Участие в ИНТЕРКОСМОСе позволило польским ученым на осуществление ряда исследований над физикой околоземного пространства космической а Солнцем, а также контролируемые эксперименты в области физики плазмы и технологии материалов. Все эти эксперименты были подготовлены через разные гру-

учными группами из институтов Польской академии наук (ПАН), а также из польских университетов при активном участии советских ученых.

19 апреля 1973 г. в Советском Союзе был произведен запуск девятого спутника серии «ИНТЕРКОСМОС». В честь великого польского ученого Николая Коперника, 500-летие со дня рождения которого торжественно отмечалось в 1973 г., спутник получил название «ИНТЕРКОСМОС-КОПЕРНИК-500».

Спутник был выведен на орбиту со следующими начальными значениями параметров: высота в перигее 202 км, высота в апогее 1551 км, наклонение $48,5^\circ$, период обращения 102,2 мин.

Цель запуска – исследование радиоизлучения Солнца с длинами волн в диапазоне 50–500 м и изучение характеристик ионосферы Земли.

На космическом аппарате была установлен радиоспектрометр, разработанный и изготовленный в Польше. С помощью него исследовалось спорадическое радиоизлучение Солнца. Высокочастотный зонд исследовал ионосферу, ее неоднородности и изменения параметров под влиянием солнечных вспышек. Низкочастотный зонд давал возможность определять «возмущения», которые вызывал сам спутник в окружающей среде.

Одновременно со спутниковыми измерениями гелио- и геофизические обсерватории Польши, Советского Союза и других стран – участниц программы ИНТЕРКОСМОС проводили наземные наблюдения Солнца и ионосферы в широком диапазоне частот.

Установленное на спутнике оборудование безотказно работало до момента входа в плотные слои атмосферы. Научные данные были зарегистриро-

ваны в польских институтах Академии Наук (ПАН), а также в польских университетах с активным участием польских ученых.

19 kwietnia 1973 roku w ZSRR nastąpiło wystrzelenie dziewiątego satelity z serii „INTERKOSMOS”. Na cześć wielkiego polskiego uczonego Mikołaja Kopernika, którego 500. rocznicę urodzin obchodzono 1973 roku, satelita został nazwany „INTERKOSMOS-KOPERNIK-500”.

Satelita został wystrzelony na orbitę z następującymi początkowymi wartościami parametrów: wysokość perygeum 202 km i apogeum 1551 km, nachylenie $48,5^\circ$, okres obiegu 102,2 minut.

Cel wystrzelenia satelity – badanie emisji radiowej Słońca przy długości fali w zakresie od 50-500 m oraz badania charakterystyk jonosfery Ziemi.

Na urządzeniu zainstalowano radiospektrometr, zaprojektowany i wyprodukowany w Polsce. Przy jego pomocy badano sporadyczne emisje promieniowania radiowego Słońca. Sonda wysokiej częstotliwości badała jonosferę, jej niejednorodność i zmiany ustawienia pod wpływem rozbłysków słonecznych. Sonda o niskiej częstotliwości pozwoliła zaobserwować „perturbacje”, które powodował sam satelita w otaczającym środowisku.

Jednocześnie z pomiarami satelitarnymi, heliofizyczne i geofizyczne obserwatoria Polski, ZSRR i innych państw-uczestników programu INTERKOSMOS prowadzili naziemne obserwacje Słońca i jonosfery w szerokim zakresie częstotliwości.

Urządzenia na satelicie działały bez zarzutu do czasu wejścia w gęste warstwy atmosfery. Dane naukowe były zarejestrowane na 540 orbitach wokół

ваны на 540 витках вокруг Земли. Одним из интересных результатов стало открытие значительной поляризации всплесков радиоизлучения Солнца в диапазоне 2...4 МГц. Были зарегистрированы и неполяризованные всплески.

В процессе измерений на спутнике «ИНТЕРКОСМОС-КОПЕРНИК-500» был открыт новый (третий) тип естественных радиосумов в земной ионосфере, которые самопроизвольно возникают в высокотемпературной замагниченной плазме. Ранее волны такого типа наблюдались при проведении активных спутниковых экспериментов, но не было известно, что они могут возникать в естественных условиях, без искусственного возбуждения.

Эксперименты на спутнике «ИНТЕРКОСМОС-КОПЕРНИК-500» стали первыми в серии советско-польских исследований волновых явлений в диапазоне низких частот. Для спутника «ИНТЕРКОСМОС-19» (эксперимент «ИОНОЗОНД») Центром космических исследований Польши был изготовлен модифицированный радиоспектрометр ИРС-1, предназначенный для изучения как пассивных, так и искусственно возбуждаемых плазменных резонансов в ионосфере.

Полеты спутников «ИНТЕРКОСМОС-КОПЕРНИК-500» и «ИНТЕРКОСМОС-19» позволили выполнить непрерывные измерения электромагнитного излучения в околоземном пространстве в широком диапазоне частот в течение длительного времени и в различных геофизических условиях. Была получена, в частности, обширная информация по физике резонансов в ионосферной плазме, представляющих собой усиление электромагнитного излучения в определенных диапазонах.

Ziemi. Ciekawym wynikiem było odkrycie dużych serii polaryzacji słonecznego promieniowania radiowego w zakresie 2...4 MHz. Odnotowano też niespolaryzowane wybuchy.

Podczas pomiarów na satelicie „INTERKOSMOS-KOPERNIK-500” odkryto nowy (trzeci) rodzaj naturalnego szumu radiowego w jonosferze Ziemi, która spontanicznie powstaje w wysokiej temperaturze namagnetyzowanej plazmy. Dotychczas ten rodzaj fal obserwowano przy okazji aktywnych satelitarnych eksperymentów, ale nie było wtedy wiadomo, że mogą one wystąpić w warunkach naturalnych, bez sztucznej stymulacji.

Eksperymenty na satelicie „INTERKOSMOS-KOPERNIK-500” były pierwszymi z serii sowiecko-polskich badań zjawisk falowych w zakresie niskich częstotliwości. Dla satelity „INTERKOSMOS-19” (eksperyment „JONOSONDA”), w Centrum Badań Kosmicznych PAN w Polsce powstał zmodyfikowany IRS-1, spektrometr radiowy, przeznaczony do studiowania zarówno pasywnych, i sztucznie wzbudzanych plazmowych rezonansów w jonosferze.

Loty satelitów „INTERCOSMOS-KOPERNIK-500” i „INTERCOSMOS-19” pozwoliły na wykonywanie ciągłych pomiarów promieniowania elektromagnetycznego w przestrzeni w pobliżu Ziemi, w szerokim zakresie częstotliwości, przez długi czas w różnych warunkach geofizycznych. Pozyskano w szczególności wiele informacji na temat fizyki rezonansów w jonosferycznej plazmie, stanowiących wzmocnienie promieniowania elektromagnetycznego w pewnych zakresach. To pozwoliło lepiej zbadać mechanizm

Это позволило полнее изучить механизм возникновения резонансов и создать карту электромагнитных шумов, имеющих большое значение для прогноза коротковолновой радиосвязи.

В эксперименте «ИОНОЗОНД» имела возможность не только измерять естественное электромагнитное излучение, но и изучать волны, искусственно генерируемые в ионосферной плазме. Генератором был бортовой передатчик бортового ионозонда ИС-338, созданного советскими специалистами. Ионозонд излучал волны, которые возбуждали окружающую спутник плазму, а генерируемые плазменные волны регистрировались польским прибором. Это был типичный контролируемый плазменный эксперимент, позволяющий в естественной плазменной лаборатории (без ограничивающих плазму стенок, как это обычно бывает в земных лабораториях) изучать условия генерации волн, нелинейные эффекты их взаимодействия и т.п. Поскольку вдоль орбиты спутника параметры плазмы изменялись, менялись и условия взаимодействия ее с волнами, что создавало хорошие возможности для анализа.

Советско-польское сотрудничество по исследованию плазменных волн в околоземной комической среде продолжалось в ряде последующих экспериментов на спутниках: «АКТИВНЫЙ» («ИНТЕРКОСМОС-24»), АПЭКС («ИНТЕРКОСМОС-25»), «ИОНОЗОНД» и КОРОНАС-И («КОСМОС-1809»). В результате сотрудничества было сформировано новое направление космических исследований – высокочастотная спектрометрия космической плазмы.

Впервые в рамках экспериментов «АКТИВНЫЙ» и АПЭКС применя-

лись явления резонанса и створzyć mapę zakłóceń elektromagnetycznych, które są istotne dla prognozy radiowej na falach krótkich.

W doświadczeniu „JONOSONDA” była możliwość pomiarów nie tylko naturalnego promieniowania elektromagnetycznego, ale także do badania fal generowanych sztucznie w jonosferycznej plazmie. Generatorem na pokładzie był nadajnik jonosondy IC-338, stworzony przez specjalistów radzieckich. Jonosonda wytwarzała fale, które pobudzały otaczającą satelitę plazmę, wygenerowane fale plazmowe zarejestrowano polskim urządzeniem. Był to typowy kontrolowany Eksperyment plazmowy, dzięki czemu w naturalnym laboratorium plazmowym (bez ograniczania plazmy ścianki, jak to zwykle bywa w laboratoriach lądowych) możliwe było badanie warunków do tworzenia się fal, nieliniowych efektów ich interakcji itp. Ponieważ orbita satelity wzdłuż parametrów plazmy zmieniała się, zmieniały się warunki jej interakcji z falami, tworząc dobre warunki do ich analizy.

Sowiecko-polska współpraca w badaniach fal plazmowych w przestrzeni środowiska bliskiej Ziemi przedłużyła się w kilku kolejnych eksperymentach na satelitach: „ACTIVE” („INTERKOMOS-24”), APEX („INTERKOMOS-25”), „JONOSONDA” i KORONAS-I („KOMOS 1809”). W wyniku współpracy został utworzony nowy kierunek w przestrzeni kosmicznej – spektrometria wysokiej częstotliwości kosmicznej plazmy.

Po raz pierwszy w ramach eksperymentów „AKTYWNY” i APEX

лась технология многоспутниковых измерений, когда от основного чешского космического аппарата отделялся субспутник типа «МАГИОН», на котором стояли польские высокочастотные радиоспектрометры. Такая технология позволяла разделять вариации плазменных параметров во времени и пространстве. В частности, на субспутнике «МАГИОН-3», отделявшемся от основного аппарата, в комплексе с радиоспектрометром ВЧВК совместного польско-советского производства, установленным на спутнике АПЭКС, были проведены детальные исследования главного ионосферного провала.

В период проведения спутникового эксперимента астрофизические и геофизические обсерватории стран Восточной Европы по согласованной программе проводили синхронные наблюдения в различных диапазонах длин волн за Солнцем и за состоянием земной ионосферы. Исследования велись по многолетней комплексной программе. Такой подход позволял накапливать фактический материал систематически, сопоставлять его с ранее полученными данными и на фундаментальной основе развивать космическую физику.

Помимо запусков спутников программа ИНТЕРКОСМОС включала в себя и пилотируемые полеты. Первые три полета отводились для граждан ГДР, ПНР и ЧССР – стран, с самого начала участвовавших в разработке аппаратуры и экспериментов для спутников, и которые могли максимально быстро подготовить программы исследований для своих космонавтов.

Так 27 июня 1978 года в рамках все той же программы на корабле «СОЮЗ-30» в космос отправился пер-

выкорzystано wiele pomiarów satelitarnych, kiedy od głównego statku kosmicznego oddzielił się sub-satelita typu „MAGION”, na którym zainstalowane były polskie spektrometry wysokiej częstotliwości. Taka technologia pozwoliła rozdzielić zmienność plazmowych parametrów w czasie i przestrzeni. W szczególności na sub-satelicie „MAGION 3”, oddzielonego od głównej jednostki, w połączeniu z radiospektrometrem RFVC wspólnej produkcji polsko-radzieckiej, zainstalowanym na satelicie APEX, przeprowadzono szczegółowe badania głównego rowu jonosferycznego.

Podczas przeprowadzenia satelitarnego eksperymentu astrofizyczne i geofizyczne obserwatoria w Europie Wschodniej, zgodnie z ustalonym programem, prowadziły jednoczesne obserwacje w różnych zakresach długości fal Słońca i stanu jonosfery Ziemi. Badania przeprowadzono w ramach wieloletniego zintegrowanego programu. Takie podejście pozwoliło systematycznie gromadzić rzeczywisty materiał i następnie porównywać go z poprzednimi danymi, dając podstawę do rozwoju fizyki przestrzeni kosmicznej.

Oprócz wystrzelenia satelitów, program INTERKOSMOS włączał także misje załogowe. Pierwsze trzy loty były możliwe dla obywateli NRD, Polski i Czechosłowacji – krajów zaangażowanych od początku w rozwój sprzętu i eksperymentów na satelitach, i które mogłyby tak szybko, jak to możliwe, przygotować program badań dla swoich astronautów.

27 czerwca 1978 roku w ramach tego właśnie programu na pokładzie „SOJUZ-30” był wyniesiony pierw-

вый польский космонавт Мирослав Гермашевский.

Во время полета он выполнил одиннадцать экспериментов, пять из которых были подготовлены самостоятельно польской стороной. Оригинальным польским экспериментом было, в частности, исследование работы сердца космонавта на отдельных стадиях полета, проводимое с помощью сконструированного в Польше аппарата – кардиолидера. Другой польский прибор, электрогустометр, позволял исследовать с помощью слабых электрических сигналов порог восприимчивости вкусовых рецепторов космонавта. Так же в условиях космического полета изучалось влияние на организм ускорения, гипоксии и невесомости в сочетании с длительным воздействием космической радиации.

Третий эксперимент – «Сирена» заключался в сплавлении, а затем отвердевании в состоянии невесомости, в строго определенных условиях охлаждения, кристалла теллурида ртути и кадмия. Этот сплав имел большое значение для полупроводниковой техники, так как обладал уникальными свойствами, в частности реагировал на инфракрасное излучение в определенном интервале длин волн.

В рамках программы ИНТЕРКОС-МОС в Польше проводилось синхронное дистанционное зондирование земной поверхности, заключающееся в сборе информации с трех уровней. Во время своего полета М. Гермашевский выполнил фотосъемку нескольких районов Польши. Одновременно проводилась аэрофотосъемка этих районов с борта советской летающей лаборатории АН-30, а группа польских специалистов осуществляла синхронные наземные подспутниковые

съемки польского космонавта Mirosław Hermaszewski.

Podczas lotu przeprowadził 11 eksperymentów, z których pięć zostało sporządzone samodzielnie przez stronę polską. Oryginalnym polskim eksperymentem były w szczególności badania pracy serca kosmonauty w poszczególnych fazach lotu, przeprowadzone za pomocą urządzenia skonstruowanego w Polsce – kardiolidera. Inny polski przyrząd, elektrogustometr pozwolił zbadać za pomocą słabych elektrycznych sygnałów progę wrażliwości receptorów smaku astronauty. Także w warunkach kosmicznych badano wpływ na organizm przyspieszenia, niedotlenienia i nieważkości, w połączeniu z dłuższym wystawieniem na działanie promieniowania kosmicznego.

Na trzeci eksperyment – „Syrena” składało się stapianie i utwardzanie w warunkach nieważkości, w ściśle określonych warunkach chłodzenia Tellurku rtęci i kadmu. Ten stop miał ogromne znaczenie w technice półprzewodników, ponieważ ma on unikalne własności, w szczególności reaguje w określonym zakresie częstotliwości fal elektromagnetycznych na promieniowanie podczerwone

W ramach programu INTERKOS-MOS w Polsce przeprowadzono synchroniczne zdalne sondowanie powierzchni Ziemi, złożone z zebrania informacji z trzech poziomów. Hermaszewski w czasie swojego lotu zrobił zdjęcia kilku rejonów Polski. Równocześnie zrobione były zdjęcia tych rejonów z pokładu sowieckiego laboratorium AN-30 i subsatelitarne zdjęcia naziemne robione przez polskich ekspertów.

измерения. Сравнительный анализ полученных материалов позволил сделать вывод о целесообразности использования дистанционного зондирования из космоса в различных областях хозяйственной деятельности в Польше.

Полет Мирослава Гермашевского в программе был вторым запуском с человеком на борту. Всего в рамках пилотируемой программы было осуществлено 9 совместных полетов, проведено 8 стыковок со станцией.

Позже совместная работа велась по созданию научной аппаратуры для серии биоспутников КОСМОС. Так на «КОСМОСЕ-782», запущенном 25 ноября 1975 года было проведено 14 экспериментов, подготовленных учеными СССР, США, Польши, Румынии Франции, Чехословакии и Венгрии. Международными были и «КОСМОС-936 и -1192».

В «дальнем» космосе сотрудничество началось с совместного волнового эксперимента на спутнике «ПРОГНОЗ-8», где помимо прочей аппаратуры был установлен польский ультранизкочастотный анализатор для измерения флуктуаций электрических и магнитных полей, а также потоков плазмы, а также ряд других научно-исследовательских приборов. В эксперименте впервые удалось освоить низкочастотную нишу (включая окрестности протонно-циклотронной частоты), которая была недоступна в экспериментах на западных космических аппаратах, несмотря на то, что основная энергетика процессов переноса через магнитосферные границы связана именно с этим диапазоном. У российско-польского коллектива ученых не было бортовых компьютеров для обработки и сжатия исключи-

Lot Mirosława Hermaszewskiego był drugim z serii lotów z człowiekiem na pokładzie. W ramach tego programu odbyło się 9 wspólnych lotów, z czego 8 dokowało ze stacją.

Późniejsza współpraca polegała na stworzeniu aparatury naukowej dla biosatelitów serii COSMOS. Na pokładzie „KOSMOS-782” wyniesionego 25 listopada 1975 roku przeprowadzono 14 eksperymentów, przygotowanych przez naukowców z ZSRR, USA, Polski, Francji, Rumunii, Czechosłowacji i Węgrzech. Mianem międzynarodowych określono również „KOSMOS-936 oraz -1192”.

W „dalekim” kosmosie współpracę rozpoczęto od wspólnego eksperymentu falowego na satelicie „PROGNOZ-8”, gdzie oprócz pozostałych urządzeń został zainstalowany polski ultra niskoczęstotliwościowy, częstotliwościowy analizator fluktuacji pól elektrycznych i magnetycznych oraz przepływów plazmy, a także szereg innych pomiarowych instrumentów badawczych. W eksperymencie najpierw udało się wyodrębnić niszę niskiej częstotliwości (włączając protonowe – cyklotronowe częstotliwości), która nie była dostępna na zachodnich urządzeniach kosmicznych, pomimo faktu, że główna energetyka procesów transportu przez granice magnetosfery związana jest z właśnie tym zakresem. W rosyjsko-polskim zespole naukowców nie było komputerów pokładowych do przetwarzania i kompresji wyjątkowo pojemnych informacji falowych. Polscy specjaliści zaproponowali unikalną, opatentowaną metodę przetwarzania, zapisanych w pokładowej analogowej pamięci sygnałów, poprzez

тельно емкой волновой информации. Но польские специалисты предложили уникальный, позже запатентованный метод обработки записанных в бортовой аналоговой памяти сигналов путем их воспроизведения с большой скоростью и анализа стандартными перестраиваемыми фильтрами на более высоких частотах. Ряд совместных экспериментов позже был проведен на аппарате «ПРОГНОЗ-10».

Крупной вехой в исследованиях космоса стал проект ВЕНЕРА-ГАЛЛЕЙ, в котором над созданием комплекса научной аппаратуры в кооперации трудились специалисты СССР, ФРГ, Франции, Австрии, ГДР, Венгрии, Польши, Чехословакии, Болгарии и США. Для координации работ с директором ИКИ АН СССР академиком Р.З. Сагдеевым во главе был создан Международный научно-технический комитет. В этом (2016) году мы отмечаем 30-летие этой чрезвычайно успешной международной экспедиции.

Несмотря на военное положение в Польше, разрыв многих контактов, прекращение поставок, сложенный труд учёных и инженеров дал возможность подготовить и реализовать на борту межпланетных станций «ВЕГА-1 и -2» совместный эксперимент. В группе приборов для проведения электромагнитных экспериментов был установлен польско-советско-чехословацкий анализатор плазменных низкочастотных волн АПВ-Н. Созданная аппаратура не только выдержала «удары» кометной пыли, но и проработала дольше, чем ее западный аналог – высокочастотный АПВ-В. С помощью АПВ-Н были получены уникальные научные результаты. Важность измерений плазменных волн в крайне низкочастотном диапа-

их оттворение z dużą prędkością a następnie ich analizy przez przestrojone na wyższe częstotliwości standardowe filtry.

Wiele wspólnych eksperymentów w późniejszym czasie przeprowadzono na „PROGNOZIE 10”.

Ważnym krokiem w badaniach kosmicznych był projekt WENUS HALLEYA, w którym nad budowaniem kompleksu aparatury naukowej współpracowali eksperci z ZSRR, Niemiec, Francji, Austrii, NRD, Węgier, Polski, Czechosłowacji, Bułgarii i Stanów Zjednoczonych. Aby koordynować pracę wspólnie z dyrektorem IKI AN ZSRR, utworzono Międzynarodowy Naukowo-Techniczny Komitet z akademikiem R. Sagdeevem na czele. W tym roku (2016) obchodzimy 30. rocznicę tej bardzo udanej międzynarodowej ekspedycji.

Mimo stanu wojennego w Polsce, zerwania wielu kontaktów, odpowiednio skoordynowana praca naukowców i inżynierów pozwoliła przygotować i wdrożyć na pokładzie stacji międzyplanetarnych „VEGA-1 i -2” wspólny eksperyment. W grupie urządzeń do eksperymentów elektromagnetycznych został zainstalowany polsko-sowiecko-czechosłowacki analizator fal plazmowych o niskiej częstotliwości ARV-N. Przygotowane instrumenty nie tylko wytrzymały „trafienia” pyłu komety, ale pracowały dłużej niż jego odpowiednik zachodni – wysokiej częstotliwości APV-B. Z pomocą APV-N pozyskano unikalne naukowe wyniki. Znaczenie pomiarów fal plazmowych w zakresie skrajnie niskich częstotliwości jest spowodowane głównie przez

зоне была обусловлена, прежде всего тем, что во взаимодействии солнечного ветра с кометой основную роль играет взаимодействие между ионами солнечного ветра и ионизованными атомами и молекулами кометной атмосферы, которые движутся друг относительно друга со скоростями, много превышающими тепловые скорости ионов. В этом случае возбуждается целый спектр плазменных волн с частотами от ионно-циклотронной до ионно-плазменной, которые как раз и попадали в диапазон измерений АПВ-Н.

Приборы АПВ-Н и АПВ-В дополняли друг друга и в исследованиях необычной ударной волны, и в открытии принципиально новой границы взаимодействия – кометопазузы. Вместе с тем польский блок электроники выполнил две дополнительные задачи: обработал и подготовил к передаче по телеметрическим каналам данные плазменного прибора БД-3, задачей которого было разделение потоков кометных и солнечных ионов, а также данные прибора-счетчика пыли СП-1, созданного в АН СССР. При обработке информация по «тяжелой» пыли с СП-1 была сопоставлена с данными от пылевых плазменных импульсов с АПВ-Н. В результате получили непрерывное по массе распределение пыли вокруг кометы, причем далеко за пределами чувствительности счетчиков пыли.

Еще большой успех, чем у ВЕНЕРЫ-ГАЛЛЕЯ, обещал принести проект ФОБОС, где в кооперации трудились ученые 13 стран. К сожалению, из-за ошибки оператора был потерян «ФОБОС-1», а спустя несколько месяцев на «ФОБОСЕ-2» польско-советская часть АПВ-Ф погибла при торможении у Марса, однако польский блок элек-

тронный факт, że we wzajemnym oddziaływaniu wiatru słonecznego i komety istotną rolę odgrywają oddziaływania pomiędzy jonami wiatru słonecznego i atomów zjonizowanych i cząsteczek w atmosferze komety, które poruszają się względem siebie z prędkościami znacznie większymi niż prędkości termiczne jonów. W tym przypadku pobudzone jest całe spektrum fal plazmowych o częstotliwościach od jonowo-cyklotronowych do jonowo-plazmowych, które są zgodne z zakresem pomiarowym APV-H.

Urządzenia APV-H i AP-B uzupełniały się wzajemnie, i w badaniach nietypowych fal uderzeniowych, i w odkryciu nowej granicy wzajemnego oddziaływania – kometopazuzy. Jednocześnie polski blok elektroniczny zrealizował dwa dodatkowe zadania: opracowano i przygotowano do transmisji przez telemetryczny kanał dane przyrządu plazmowego DB-3, którego zadaniem było rozdzielić strumienie jonów komet i jonów słonecznych, a także dane przyrządu-licznika SP-1, zbudowanego w Akademii Nauk ZSRR. Podczas przetwarzania danych informacje o „ciężkich” pyłach z SPV-1 porównano z danymi z impulsów plazmowych pyłu z APV-H. W rezultacie otrzymano ciągły rozkład masy pyłu wokół komety, który był daleko poza zakresem czułości liczników pyłu.

Jeszcze większy sukces, niż w przypadku WENUS HALLEYA, miał przynieść projekt Phobos, przy którym wspólnie pracowali naukowcy z 13 krajów. Niestety z powodu błędu ludzkiego został utracony „PHOBOS-1”, a kilka miesięcy później na „PHOBOS-2” polsko-radziecka część AR-F została uszkodzona podczas hamowania na Marsie, jednak

троники обеспечил передачу с борта станции на Землю первой волновой информации из окрестности Марса и Фобоса, полученной европейской частью волнового комплекса, установленного на «ФОБОСЕ-2».

Российско-польское сотрудничество в космосе не прекращалось и в трудные для российской науки – 1990-е и начало 2000-х годов. В сравнении с космической программой Советского Союза российская программа была весьма скромна, однако, и в тех немногих реализованных в то время проектах (ИНТЕРБОЛ, КОРОНАС-И, КОРОНАС-Ф, КОРОНАС-ФОТОН) российско-польская компонента присутствовала всегда и в большинстве случаев становилась одним из ключевых элементов космических проектов.

Вместе с представителями еще 19 стран польские ученые принимали непосредственное участие в научных исследованиях многоспутникового проекта ИНТЕРБОЛ. Целью его было исследование физических процессов в магнитосфере Земли во время суббурь – диссипации энергии, запасенной в хвосте магнитосферы, в зонах полярных сияний, ионосфере и кольцевом токе. Система из двух основных аппаратов и двух субспутников позволила детально исследовать процессы одновременно в различных областях магнитосферы и разделить пространственные и временные вариации измеряемых параметров.

Эксперимент ПОЛРАД, осуществленный на борту спутника «ИНТЕРБОЛ-2» («Авроральный зонд»), стал одним из наиболее удачных экспериментов проекта. Эксперимент был нацелен на изучение аврорального километрового излучения Земли – одного

польский блок электроничный zabezpieczył przekazanie pierwszych falowych danych z pokładu stacji na Ziemię z okolic Marса i Fobosa, otrzymaną przez europejską część комплексу фалowego umieszczonego на „PHOBOS-2”.

Współpracy polsko-rosyjskiej w badaniach kosmicznych nie zaprzestano w trudnych czasach dla rosyjskiej nauki – 1990 i na początku 2000 r. W porównaniu z programem kosmicznym ZSRR, program rosyjski był bardzo skromny, jednak w nielicznych realizowanych projektach czasowych (INTERBALL, CORONAS-I, CORONAS-F, CORONAS-PHOTON) rosyjsko-polskie komponenty w większości przypadków okazały się kluczowymi elementami projektów kosmicznych.

Wspólnie z przedstawicielami 19 innych krajów, polscy naukowcy zostali zaangażowani bezpośrednio w multisatelitarny projekt badawczy INTERBALL. Celem projektu było zbadanie procesów fizycznych zachodzących w ziemskiej magnetosferze podczas subbурь – rozpraszania energii, zgromadzonej w magnetosferze, w obszarach zorzy polarnych, jonosfery i prądu pierścieniowego. System złożony z dwóch głównych jednostek i dwóch sub-satelitów pozwolił badać szczegółowo procesy zachodzące w tym samym czasie w różnych regionach magnetosfery i rozdzielić przestrzenne od czasowych zmian mierzonych parametrów.

Eksperyment POLRAD przeprowadzony na pokładzie satelity „INTERBALL-2” („Sonda Zorza Polarna”) stał się jednym z najbardziej udanych eksperymentów projektu. Eksperyment miał na celu zbadanie zorzy kilometrowego promieniowania Ziemi – jednego z naj-

из наиболее загадочных и ярких явлений в земной магнитосфере. Мощное радиоизлучение Земли, происходящее за счет очень эффективного преобразования энергии потоков солнечной плазмы, вторгающихся в авроральную магнитосферу Земли, делает Землю космическим радиомаяком, излучение которого можно зарегистрировать и в других звездных системах. Оригинальный спектрополяриметр ПОЛЬРАД позволил получить не только амплитудно-частотные характеристики аврорального километрового радиоизлучения (АКР), но и определить поляризацию этого излучения. По результатам измерений были определены свойства и местоположение источника АКР, сезонная зависимость интенсивности АКР, а также его связь с восходящими потоками ионосферной плазмы. Впервые были найдены, зарегистрированы и проанализированы широкополосные всплески АКР с быстрым изменением по частоте и сверхтонкая структура этих всплесков. Мощность излучения этих структур превышает среднюю интенсивность излучения на два порядка.

Совместные российско-польские исследования были представлены на выставке, открытой в ИКИ РАН послом Польской республики (фото 1, 2).

bardziej tajemniczych i zaskakujących zjawisk w ziemskiej magnetosferze. Potężna emisja radiowa z Ziemi, powstająca w wyniku konwersji strumieni słonecznej plazmy, wchodzących w zorzową magnetosferę Ziemi, sprawia, że Ziemia jest kosmiczną radiową „latarnią” sygnalizacyjną, promieniowanie której można zarejestrować w innych systemach gwiazdnych. Oryginalny spektropolarometr POLRAD pozwolił uzyskać nie tylko charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe emisji radiowej (AKR), ale również określić polaryzację promieniowania. W efekcie dzięki pomiarom określono właściwości i położenie źródła AKR, zależność intensywności АКР, a także jego związek z prądem jonosferycznej plazmy. Po raz pierwszy były rejestrowane i analizowane wybuchy szerokopasmowe AKR z szybkimi zmianami częstotliwości i subtelną strukturą tych wybuchów. Moc promieniowania tych struktur przewyższa dwukrotnie średnią intensywność emisji.

Wspólne rosyjsko-polski badania zostały zaprezentowane na wystawie, otwartej w ИКИ РАН przez Ambasadora Rzeczypospolitej Polskiej (fot 1, 2).



фото 1



фото 2

В экспериментах, представленных на выставке, были получены новые данные об окружающем Землю космическом пространстве, результаты исследований в области солнечно-земной физики, в том числе, о короне Солнца, солнечном ветре, механизмах его генерации и его взаимодействии с плазменной оболочкой Земли. Особенностью этих исследований был комплексный мультидисциплинарный характер, затрагивающий фундаментальные проблемы астрофизики, физики плазмы и магнитной гидродинамики. Такой подход позволяет получать качественно новые знания о физических механизмах на протяжении всей логической цепочки передачи массы и энергии от Солнца к Земле посредством солнечного ветра, а также об отклике различных физических составляющих околоземного пространства на состояние межпланетной среды.

Полученные результаты не утратили своей актуальности, часто цитируются и все еще представляют интерес для исследования.

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 рамках сотрудничества по проекту КОРОНАС-Ф польскими учеными были созданы рентгеновские приборы: спектрофотометр ДИАГЕНЕСС и спектрометр РЕСИК. Рентгеновские спектры солнечного излучения, полученные с их помощью, по спектральному и временному разрешению соответствовали самым лучшим наблюдениям, выпол-

W badaniach prezentowanych na wystawie, przedstawiono nowe dane o otaczającej przestrzeni ziemskiej, wyniki badań w dziedzinie fizyki słonecznej naziemnej, w tym korony słonecznej, wiatru słonecznego, mechanizmach jego wytwarzania i jego interakcji z plazmowej otoczki Ziemi. Cechą charakterystyczną tych badań był złożony wielodyscyplinarny charakter, dotyczący podstawowych problemów z dziedziny astrofizyki, fizyki plazmy i magnetohydrodynamiki. Takie podejście pozwala na uzyskanie jakościowo nowej wiedzy na temat mechanizmów fizycznych w całej logice łańcucha przekazu masy i energii od Słońca do Ziemi przez wiatr słoneczny, a także reakcję różnych komponentów fizycznych na stan okołozemskiej przestrzeni międzyplanetarnej.

Wyniki nie straciły znaczenia, są często cytowane i nadal są interesujące jako badania.

Momentem przełomowym dla współpracy rosyjsko-polskiej były lata od 2000 roku. W dwóch głównych rosyjskich misjach naukowych tej dekady – CORONAS-F i CORONAS – FOTON – przeprowadzono unikalne rosyjsko-polskie eksperymenty na widmie promieniowania rentgenowskiego Słońca.

W ramach współpracy w projekcie CORONAS-F polscy naukowcy opracowali sprzęt rentgenowski: spektrofotometr DIOGENESS i spektrometr RESIK. Rентгеновские widma promieniowania słonecznego otrzymane dzięki tym urządzeniom pod względem spektralnej i czasowej rozdzielczości odpowiadały najlepszym obserwacjom. Rosyjscy

ненным в мире до этого. Российскими специалистами разработаны система сбора научной информации для этих приборов, обслуживающая также и весь остальной научный комплекс космического аппарата, а также программы управления приборами. Исследования в этой области солнечной физики проводились Центром космической исследований ПАН совместно с ИЗМИРАН.

ДИАГЕНЕСС позволял получать спектры вспышек, имевших балл выше M2, тогда как при больших потоках рентгеновского излучения детекторы приборов других космических аппаратов насыщались и не позволяли измерять излучение таких мощных вспышек. За время работы спутника российско-польским научным комплексом была осуществлена достаточно полная диагностика вспышечной плазмы. В солнечном спектре обнаружено несколько новых спектральных линий. Впервые выявлены эффекты, связанные с электронными переходами в ионах аргона и серы. Диагностированы неравновесные плазменные процессы во время солнечных вспышек: процессы столкновительного возбуждения атомов, возбуждения внутренних оболочек атомов и рекомбинации, эффекты изменения ширины спектральных линий за счет наличия заметной плазменной турбулентности, прослежены временные изменения физических характеристик горячей солнечной плазмы – температуры, меры эмиссии и т.д. Впервые по рентгеновским наблюдениям определено абсолютное содержание калия в плазме солнечных вспышек, абсолютное и относительное содержание аргона и серы.

Изогнутая форма кристаллов брегговского кристаллического спектрометра РЕСИК, с полем зрения,

specjaliści opracowali system zbierania danych naukowych dla tych urządzeń, obsługujący także cały naukowy kompleks urządzenia kosmicznego, a także programy zarządzania przyrządami. Badania w dziedzinie fizyki słonecznej przeprowadzono w Centrum Badań Kosmicznych PAN we współpracy z IZMIRAN.

DIOGENESS pozwolił otrzymać widma rozbłysków powyżej M2, podczas gdy na innych satelitach, przy tak dużych poziomach promieniowania rentgenowskiego, detektory przyrządów nasycaly się i nie były zdolne do dokonywania pomiarów tak silnych rozbłysków. W czasie działania satelity wykonano dostatecznie pełną diagnostykę rozbłysków plazmy. W widmie słonecznym odkryto kilka nowych linii widmowych. Po raz pierwszy pokazane zostały efekty związane z przejściami elektronowymi w jonach argonu i siarki. Zdiagnozowano nierównowagowe procesy plazmowe podczas rozbłysków słonecznych, procesy zderzeniowego wzbudzenia atomów, wzbudzenia wewnętrznych powłok atomowych i rekombinacji, efekty zmiany szerokości linii widmowych w wyniku obecności plazmowej turbulencji, śledzono zmiany charakterystyk fizycznych gorącej plazmy słonecznej – temperatury poziomy emisji itd. Po raz pierwszy w wyniku rentgenowskich obserwacji określono bezwzględną zawartość potasu w plazmie rozbłysków słonecznych, oraz absolutne i względne zawartości argonu i siarki.

Zaokrąglony kształt kryształu Bragg-a krysztalicznego spektrometru RESIK, z polem widzenia obejmującym całe Słońce, pozwoliły zarejestrować rentgenowskie widma gorącej plazmy korony,

охватывающим все Солнце, позволила регистрировались рентгеновские спектры горячей плазмы короны, активных областей и вспышек одновременно во всех длинах волн. Активное время наблюдений продолжалось с августа 2001 до мая 2003 года.

Российско-польский эксперимент СПРУТ-1У, проведенный на орбитальном комплексе «МИР», показал, что с применением современной плазменно-волновой аппаратуры, обладающей широкими динамическими диапазонами и высокой чувствительностью можно уверенно регистрировать эффекты, связанные с развитием геомагнитных возмущений.

сегодня

Совместные российско- польские исследования проблем космоса активно ведутся и сейчас. Продолжаются обработка и интерпретация результатов совместных экспериментов, о которых говорилось в предыдущем разделе, продолжают работы по теоретическому моделированию и подготовке новых совместных космических экспериментов. Большая часть этих работ ведется в рамках российско- польской межкаademicмической рабочей группы по космосу.

Цель работ по ТЕРМО-ЛР, одного из таких готовящихся экспериментов, – исследование свойств реголита, внутреннего теплового потока и геологии малых и планетных тел Солнечной системы.

Основные научные задачи эксперимента заключаются в:

- измерении температуры на поверхности в лунных полярных широтах в течение полной лунации и оценке вклада в температуру каждого из

активных регионов и przewyższeń jednocześnie we wszystkich długościach fal. Aktywny czas obserwacji trwał od sierpnia 2001 do maja 2003 roku.

Rosyjsko-polski eksperyment „SPRUG-1U” przeprowadzony na rosyjskim kompleksie orbitalnym „MIR” udowodnił, że zastosowanie współczesnej plazmowo-falowej aparatury, mającej duży zakres dynamiczny i dużą czułość, może niezawodnie rejestrować efekty związane z rozwojem zaburzeń geomagnetycznych.

dzisiaj

Również teraz wspólne polsko-rosyjskie badania przestrzeni kosmicznej są aktywnie prowadzone. Kontynuowane jest opracowywanie, interpretowanie danych uzyskanych w eksperymentach opisanych w poprzedniej części, kontynuowane są prace teoretyczne, symulacje i przygotowania nowych eksperymentów. Większa część tych prac prowadzona jest w ramach polsko-rosyjskiej grupy roboczej do spraw podstawowych badań kosmicznych PAN-RAN.

Jednym z takich przygotowywanych eksperymentów jest TЕРМО-LR, którego celem będzie zbadanie reholitu, wewnętrznego przepływu ciepła i własności geologicznych małych planet Układu Słonecznego.

Główne cele naukowe eksperymentu to:

- pomiar temperatury na księżycowych biegunach w pełnym cyklu lunacji i ocena wkładu do całkowitej temperatury każdego z głównych czyn-

основных факторов (внутренний тепловой поток, солнечный ветер, отраженное излучение от близрасположенных освещенных участков и латеральная кондуктивная теплопроводность) в зависимости от степени освещенности;

- измерении и исследовании зависимости теплофизических свойств реголита в полярных областях от трех основных факторов – от состава реголита, содержания и состава летучих и экстремального температурного режима;
- исследовании внутреннего теплового потока Луны (задача имеет фундаментальное значение и необходима для понимания происхождения, состава, внутреннего строения и эволюции Луны, поскольку современную модель Луны).

Уникальногрунтозаборное устройство пенетрационного типа СНОМІК, разработанное ЦКИ ПАН было установлено на российской межпланетной станции ФОБОС-ГРУНТ. Оно должно было обеспечивать диверсификацию методов забора грунта одним из пенетраторов. Станция была запущена 9 ноября 2011 года, но к величайшему сожалению, в результате нештатной ситуации так и не смогла покинуть земную орбиту. На борту было установлено два российско-польских эксперимента: ТЕРМОФОБ и СНОМІК.

Задачей эксперимента ТЕРМОФОБ (ИПМ; ГЕОХИ РАН; ЦКИ ПАН) было выяснение термофизических свойств грунта марсианского спутника методом активной термометрии.

Теплофизические характеристики грунта должны были определяться по динамике изменения температуры в пограничной области грунта с использованием электрических нагревателей

ników (wewnętrzny strumienia ciepła, wiatru słonecznego, odbitego promieniowania, promieniowania otaczających oświetlonych obszarów i przewodności poprzecznej) w zależności od stopnia oświetlenia.

- pomiar i badania zależności termicznych regolitu w obszarach polarnych od trzech głównych czynników – składu regolitu, zawartości składników lotnych, i ekstremalnych temperatur;
- badanie wewnętrznego strumienia cieplnego księżyca (zadanie o fundamentalnym znaczeniu dla zrozumienia pochodzenia, składu i ewolucji Księżyca, jako nowoczesnego modelu Księżyca).

Unikalne urządzenie penetrujące typu СНОМІК, skonstruowane w CBK PAN umieszczone zostało na rosyjskiej stacji międzyplanetarnej FОBOS-GRUNT. Powinno ono zabezpieczać dywersyfikację metod pobierania próbek gruntu przez penetrator. Stacja była wystrzelona 9 listopada 2011 roku, niestety w wyniku awarii nie opuściła ziemskiej orbity. Na pokładzie tego satelity były przygotowane dwa polsko-rosyjskie eksperymenty: ТЕРМОФОБ i СНОМОКН.

Celem eksperymentu ТЕРМОФОБ (ІРМ, Instytut Vernadskiego, CBK PAN) było wyjaśnienie termofizycznych własności gruntu przy użyciu aktywnej metody termometrii satelitarnej.

Termiczne charakterystyki gruntu powinny być określone przez dynamikę zmian temperatury w powierzchniowej warstwie gruntu przy użyciu małej mocy podgrzewaczy elektrycznych przy wspor-

малой мощности в местах расположения опор посадочного аппарата. Этот эксперимент должен был дать важные сведения о физических свойствах поверхности Фобоса.

Прекрасные результаты по температурным показателям дал прибор MUPUS (Multi-Purpose Sensors for Surface and Subsurface Science), послуживший прототипом для прибора СНОМІК. Это польское устройство для измерения теплопроводности ядра кометы Чурюмова – Герасименко, было установлено на спускаемом модуле «ФИЛЫ» проекта РОЗЕТТА Европейского космического агентства. От России в этом проекте не было ни одного научного прибора, но в разработке прибора ROMAP принял участие сотрудник ИКИ РАН Анатолий Ремизов.

Совместным стало участие России и Польши в космическом эксперименте «ВАРИАНТ», который был осуществлен в начале 2005 года на украинском спутнике дистанционного зондирования Земли «СИЧ-1М», на котором были установлены российский цилиндр Фарадея FC, и польский блок ССНИ VLF-1. Целью эксперимента было исследование тонкой структуры электромагнитных полей и токов в ионосферной плазме.

Запуск спутника состоялся 24 декабря 2004 года с космодрома Плесецк.

Из-за аварии двигателей третьей ступени ракетоносителя «ЦИКЛОН-3», спутник вышел на незапланированную орбиту, в результате чего «ВАРИАНТ» стал единственным из запланированных экспериментов, проведение которого в таких условиях не потеряло смысл. Более того, несмотря на аварийную ситуацию, которая сложилась на борту, была достигнута исключительно высокая электромагнитная чистота спутника.

nikach lądownika. Ten eksperyment powinien dać nam ważne informacje na temat powierzchni Fobosa.

Bardzo dobre wyniki dla danego wskazania temperatury dał przyrząd MUPUS (Multi-Purpose Sensors for Surface and Subsurface Science), który był prototypem dla przyrządu CHOMIK. Ten polski przyrząd stworzony do pomiaru przewodnictwa cieplnego jądra komety Czuriumowa – Gerasimienko umieszczony został na lądowniku „FILA” misji Europejskiej Agencji Kosmicznej. I mimo że w tej misji kosmicznej nie było ani jednego rosyjskiego przyrządu, to w opracowaniu naukowego przyrządu ROMAP uczestniczył pracownik IKI RAN Anatolii Remizov.

Wspólnym było uczestnictwo Rosji i Polski w eksperymencie „WARIANT”, przeprowadzonym metodami teledetekcji satelitarnej w przestrzeni okołozemskiej na początku 2005 roku na ukraińskim spudniku „SICZ-1M” – była tam zainstalowana puszka Faradaya FC i oraz polski blok SSNI VLF-1. Celem eksperymentu były badania subtelnej struktury pól elektromagnetycznych i prądów w plazmie jonosferycznej

Start satelity miał miejsce 24 grudnia 2004 roku z kosmodromu Plisiec.

W wyniku awarii trzeciego nośnika rakiety nośnej „CYKLON-3” satelita wyszedł na niewłaściwą orbitę; jedynym możliwym do przeprowadzenia w tych warunkach eksperymentem okazał się „WARIANT”. Co więcej, pomimo zaistniałej awaryjnej sytuacji, możliwe było wykonanie bardzo dobrych niezaburzonych pomiarów elektromagnetycznych.

Спутник «СИЧ-1М» сгорел в плотных слоях атмосферы в апреле 2006 года, срок его жизни составил 477 суток.

Большая работа проводилась и проводится в рамках двухсторонней российско-польской рабочей группы по межакадемическому сотрудничеству в космических исследованиях.

Применительно к условиям ионосферной и магнитосферной плазмы в российско-польском проекте «ТУРБУЛЕНТНОСТЬ» (ИЗМИРАН и ЦКИ ПАН) теоретически изучались режимы маломодовой плазменной турбулентности, связанной с развитием стохастичности при взаимодействии малого конечного числа волн в активной среде. В условиях, когда число волн, эффективно представляющих турбулентное состояние, остается конечным, предлагаемые методы теоретического исследования позволяют избежать трудностей трехмерного моделирования и осуществить полное исследование нелинейных режимов стабилизации различных плазменных неустойчивостей. Теоретическое исследование этих процессов способствует пониманию фундаментальной проблемы становления турбулентности в плазме, а также служит основой для разработки новых математических методов анализа наблюдений волновых процессов в плазме.

Совместный проект ИЗМИРАН и ЦКИ ПАН «АСИМПТОТИКА» посвящен развитию аналитических и вычислительных методов теории дифракции и распространения волн, основанных на параболическом уравнении Леонтовича – Фока и теории псевдодифференциальных операторов. Проект нацелен на решение практических задач

Satelita „SICZ-1M” spłonął w gęstych warstwach atmosfery w kwietniu 2006 roku – działał przez 477 doby.

Wiele prac było prowadzonych przy współpracy między PAN a RAN w ramach Polsko-rosyjskiej grupy roboczej do podstawowych badań kosmicznych i satelitarnych.

Badania jonosferycznej i magnetycznej plazmy były prowadzone w ramach polsko-rosyjskiego projektu „TURBULENCJA” (IZMIRAN – CBK PAN); zbadano teoretycznie reżimy małomodowej turbulencji, związanej z stochastyzacją ośrodka c w czasie oddziaływania w ośrodku aktywnym niedużej skończonej liczby fal. Gdy liczba fal reprezentujących efektywnie stan turbulentny pozostaje skończona, zaproponowane metody pozwalają uniknąć trudności związanych z modelowaniem trójwymiarowym i pozwalają przeprowadzić pełną analizę reżimów nieliniowej różnych plazmowych niestabilności. Teoretyczna analiza tych procesów pozwala zrozumieć podstawowy problem, jakim jest powstawanie turbulencji w plazmie, a także może być podstawą do rozwoju nowych metod matematycznych analizy procesów falowych w plazmie. Teoretyczna analiza tych procesów przyczynia się do zrozumienia podstawowego problemu powstawania turbulencji w plazmie, a także podstawę do rozwoju nowych metod matematycznych analizy obserwacji falowych procesów w plazmie.

Celem wspólnego projektu „ASYMPTOTYKA” pomiędzy IZMIRAN i CBK PAN jest opracowanie metod analitycznych i numerycznych, opisujących procesy falowe w ośrodkach niejednorodnych, przy zastosowaniu propagacji fal radiowych i radiowego sondowania, bazujących na parabolicznych równaniach Leontowicza – Focka i teorii operatorów pseudoróżnic-

распространения электромагнитных волн в реальных неоднородных средах. В ходе его выполнения была получена концепция фазового синхронизма в общей теории дифракции, выведены численные алгоритмы расчета распространения радиоимпульсов вдоль земной поверхности, проведено численное моделирование динамики многосолитонных волновых пучков, получено решение обратной задачи радиозондирования слоистой подповерхностной среды и модельная задача импульсного зондирования ионосферы.

Основная цель совместного проекта «ИОНОСФЕРА» – предоставление в реальном времени ионосферных параметров, характеризующих «космическую погоду» в ионосфере. ЦКИ ПАН выполняет здесь роль Центра рассылки ионосферных данных в Европе (ЦРИД). Интернет-страница ИЗМИРАН предоставляет данные 30 ионозондов и индексы магнитных бурь. Каталог возмущений в ионосфере зеркально отображается на обоих сайтах.

В рамках совместного проекта ИКИ-ЦКИ ПАН «ЗОНДИРОВАНИЕ», продолжается сотрудничество по исследованию ионосферы методами активного зондирования и ВЧ-радиоспектрометрии, начатое в 1994 г. на спутнике КОРОНАС-И, где был установлен солнечный радиоспектрометр СОПС-А с импульсным передатчиком, позволявший получать ионограммы вертикального зондирования ионосферы. В настоящее время разработан и изготовлен спутниковый ионозонд ЛА-ЭРТ для многоспутникового проекта «ИОНОЗОНД» в рамках Федеральной космической программы 2016–2025. Эксперимент позволит одновременно получать информацию о вертикальных

кочных. Celem projektu jest rozwiązywanie praktycznych zagadnień związanych z rozchodzeniem się fal w rzeczywistych ośrodkach niejednorodnych. W trakcie jego realizacji została wyjaśniona zasada synchronizacji fazowej w ogólnej teorii dyfrakcji, wyprowadzone zostały numeryczne algorytmy obliczania rozchodzenia się impulsów radiowych wzdłuż powierzchni Ziemi, przeprowadzono modelowanie numeryczne dynamiki wielosolitonowych wiązek falowych, otrzymano rozwiązanie zagadnienia odwrotnego sondowania elektromagnetycznego warstwowego obszaru podpowierzchniowego oraz modelowego problemu impulsowego sondowania jonosfery.

Celem projektu prowadzonego przez IZMIRAN i Centrum Badań Kosmicznych PAN jest przedstawienie parametrów jonosferycznych charakteryzujących pogodę kosmiczną w czasie rzeczywistym. CBK PAN spełnia rolę „Centrum” rozsyłania danych jonosferycznych w Europie (IDCE). Na stronie internetowej IZMIRANu przedstawione są dane z 30 jonosond i indeksy burz magnetycznych. Katalog zaburzeń jonosferycznych jest przedstawiony na obydwu stronach internetowych.

W ramach wspólnego projektu „SONDOWANIA” CBK PAN-IKI RAN, kontynuowana jest współpraca w zakresie badań jonosfery metodą aktywnego sondowania i mikrofalowej spektrometrii, badania te zapoczątkowano na satelicie CORONAS-I w roku 1994 – był tam zainstalowany słoneczny radiospektrometr SORS-A z nadajnikiem impulsów, co pozwoliło na uzyskanie jonogramów pionowego sondowania jonosfery. Aktualnie w ramach wielo-satelitarnego federalnego programu kosmicznego „JONOSONDA” na lata 2016–2025 została opracowana i wyprodukowana satelitarna jonosonda

профилях электронной концентрации в глобальном масштабе, исследовать плазменные резонансы, возбуждаемые импульсным излучением передатчика ионозонда (в том числе, и нелинейные процессы), а также проводить глобальную ВЧ-радиоспектрометрию космической плазмы.

Цель совместного проекта «ИНЖЕКЦИЯ» – изучение пучково-плазменной неустойчивости, вызванной инжекцией заряженных частиц или напуском нейтрального газа. Основное внимание уделялось инъекции в невозмущенную плазму немодулированных и модулированных электронных и ионных пучков различных энергий и анализу лабораторных и натурных исследований для разработки предложений по эксперименту на российском сегменте МКС. Результаты исследований по проекту важны для диагностики физических процессов, протекающих в ионосферной плазме в естественных условиях высыпания энергичных частиц в периоды магнитных бурь.

Российско-польский проект «СТРУКТУРА» (ИКИ РАН и ЦКИ ПАН), направленный на исследование структуры плазменно-волновых процессов на магнитосферных границах, связанных с проявлением солнечно-магнитосферно-земных связей. В основе проекта лежат данные, ранее полученные в ходе исследований на высокоапогейных спутниках, в том числе выполненных на «ПРОГНОЗАХ-8, -10» и паре «ИНТЕРБОЛ-1» – «МАГИОН-4». Основным достижением стало обнаружение на внешних магнитосферных границах плазменных струй и магнитных барьеров, в которых концентрируется кинетическая и магнитная энергия. В свою очередь это обеспечивает

LAERT. Eksperyment umożliwi jednoczesne otrzymywanie w skali globalnej informacji o pionowych profilach gęstości elektronowej, badania rezonansów plazmowych (w tym również procesy nieliniowe) wzbudzanych impulsowym promieniowaniem nadajnika jonosondy, a także zrobienie globalnej wysokoczęstotliwościowej (HF) radiospektrometrii plazmy okołoziemskiej.

Celem wspólnego projektu „INIEKCJA” jest badanie plazmowo-strumieniowej niestabilności, spowodowane injekcją naładowanych cząstek w zimną plazmę jonosfery. Główny nacisk został położony na injekcję niemodulowanych i modulowanych elektronów o różnych energiach w niezaburzoną plazmę w warunkach laboratoryjnych i naturalnych, w celu opracowania propozycji eksperymentu na Rosyjskim module MKS. Wyniki badań projektu są ważne dla diagnostyki procesów fizycznych, zachodzących w plazmie jonosfery w czasie wysypywania się wysokoenergetycznych cząstek podczas burz magnetycznych.

Celem polsko-rosyjskiego projektu „STRUKTURA” (IKI RAN i CBK PAN) jest eksperymentalne badanie subtelnej struktury procesów falowych w warstwach granicznych magnetosfery, związanych z oddziaływaniami w układzie: Słońce–Magnetosfera–Jonosfera–Atmosfera. Projekt bazuje na danych otrzymanych wcześniej z satelitów o wysokim apogeum, w tym danych z „PROGNOZ-8 i -10”, „INTERBALL-1” i jego subsatelity „MAGION 4”. Najważniejszym wynikiem tych badań jest odkrycie drobnoskalowych struktur na zewnętrznych granicach magnetosfery — strumieni plazmowych i barier magnetycznych, w których skupia się kinetyczna i magnetyczna energia. Zapewnia to nielokalne i silnie

локальное и существенно нелинейное взаимодействие плазмы солнечного ветра с геомагнитным препятствием.

Совместный проект ученых ИКИ РАН и Польши «НЕЙТРАЛ» посвящен исследованию границы гелиосферы – области, где солнечный ветер сталкивается с локальной межзвездной средой, – и определению параметров этой среды, в том числе свойств плазмы на границе гелиосферы.

В 2009 году в рамках проекта «НЕЙТРАЛ» с космического аппарата Interstellar Boundary Explorer (КА IBEX) были получены первые полные карты неба в потоках энергичных атомов гелиосферного происхождения в диапазоне энергий от 200 эВ до 6 кэВ. Так был обнаружен пояс энергичных нейтральных атомов, где потоки нейтральных энергичных частиц в несколько раз превышают потоки из остальных областей. Существование такого пояса не было предсказано ни в одной из моделей внешней гелиосферы.

Российско-польский проект «ИЗЛУЧЕНИЕ» направлен на изучение одного из самых мощных и загадочных явлений внутренней магнитосферы Земли – аврорального километрового излучения (АКР). Проект базируется продолжением анализа результатов измерений, полученных спектрополяриметром ПОЛЬРАД на борту спутника «ИНТЕРБОЛ-2» («Авроральный зонд»). Полученные трехлетние измерения уникальны, поскольку позволили получить не только амплитудно-частотные характеристики излучения, но и поляризацию этого излучения.

Российско-польское сотрудничество не осталось в стороне и от исследований на борту Международной космической станции. Намеченный

нелинейное oddziaływanie plazmy wiatru słonecznego z geomagnetyczną barierą.

Wspólny projekt IКИ RAN i Polski – NEUTRAŁ – poświęcony jest badaniu właściwości granicy heliosfery tj. obszaru, gdzie wiatr słoneczny oddziałuje z lokalną materią międzygwiazdową, określenie parametrów tego ośrodka, w tym własności plazmy na granicy heliosfery.

W 2009 roku w ramach projektu „NEUTRAŁ” z sondy Interstellar Boundary Explorer (IBEX SC) otrzymano pierwszą pełną mapę nieba w przepływie wysokoenergetycznych atomów pochodzenia litosferycznego w zakresie energii od 200 eV do 6 keV. W ten sposób odkryto wstęgę wysokoenergetycznych atomów ENA, w tym obszarze strumienie wysokoenergetycznych cząstek neutralnych są kilkakrotnie silniejsze od strumieni z pozostałych obszarów nieba. Istnienie takiego pasma nie było przewidywane przez żaden z istniejących modeli zewnętrznej heliosfery.

Celem polsko-rosyjskiego projektu PROMIENIOWANIE były badania jednego z najsilniejszych i najbardziej zagadkowych zjawisk wewnętrznej magnetosfery Ziemi — zorzowego promieniowania kilometrycznego (AKR — auroral kilometric radiation). Projekt jest kontynuacją analizy wyników pomiarów uzyskanych na spektropolarymetrze POLRAD, umieszczonym na pokładzie satelity „INTERBALL-2” („Zorza polarna”). Wyniki trzyletnich pomiarów są unikalne, ponieważ pozwalają na uzyskanie nie tylko charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej promieniowania, ale również ze względu na jego polaryzację.

Rosyjsko-polska współpraca jest znacząca również w odniesieniu do badań prowadzonych na Międzynarodo-

еще в начале прошлого десятилетия, международный эксперимент (Англия, Болгария, Венгрия, Польша, Россия, Украина, Швеция) на Международной космической станции: «Плазменно-волновая обстановка вокруг МКС, воплотился в жизнь только 23 апреля 2013 года. Глобальная задача проекта – долговременные исследования плазменно-волновых процессов в ионосфере Земли.

Центром космических исследований ПАН совместно со Шведским институтом космических исследований для эксперимента был изготовлен радиочастотный анализатор РЧА. Наблюдения плазмы в международном космическом эксперименте «ОБСТАНОВКА 1-й этап» выполнялись локальными зондовыми методами при помощи 10 различных датчиков, установленных российскими космонавтами на внешней поверхности служебного модуля РС МКС, и измеряющих потенциал корпуса станции, концентрацию и температуру электронов, динамические спектры плазменных электромагнитных излучений в широком диапазоне частот (0,1 Гц – 15 МГц).

В рамках Исполнительной рабочей группы по фундаментальным космическим исследованиям (ИРГ РАН–ПАН) на базе эксперимента «ОБСТАНОВКА 1-й этап» реализуется проект ПВО (Плазменно-Волновая Обстановка), направленный на развитие совместных исследований плазменно-волновых процессов в ионосфере и магнитосфере Земли по методике высокочастотной (ВЧ) радио-спектрометрии, являющейся одним из наиболее мощных методов исследования околоземной плазмы с борта ИСЗ. Следует отметить, что из-

wej Stacji Kosmicznej. Zaplanowany jeszcze na początku minionej dekady, międzynarodowy eksperyment (Anglia, Bułgaria, Węgry, Polska, Rosja, Ukraina, Szwecja): „PLAZMOWO-FALOWE UWARUNKOWANIA WOKOŁ MKS (OBSTANOVKA- został zrealizowany dopiero 23 kwietnia 2013 roku. Główny cel projektu to długotrwałe badania plazmowo-falowych procesów w jonosferze ziemskiej.

Dla tego eksperymentu powstał analizator częstotliwości radiowej RFA, zbudowany w Centrum Badań Kosmicznych PAN, przy współpracy ze Szwedzkim Instytutem Badań Kosmicznych. Obserwacje plazmy w eksperymencie (OBSTANOVKA, 1 etap) realizowane były lokalnymi metodami sondowania przy pomocy 10 różnych czujników, które zostały zainstalowane przez rosyjskich kosmonautów na zewnętrznej powierzchni rosyjskiego segmentu modułu roboczego MКС; mierzyły one potencjał obudowy, koncentrację i temperaturę elektronów stacji, dynamiczne widma promieniowania elektromagnetycznego plazmy w szerokim zakresie widma częstotliwości (0,1 Hz – 15 MHz).

W ramach wykonawczej grupy roboczej podstawowych badań kosmicznych (IRG PAN–RAN) na bazie eksperymentu (OBSTANOVKA, 1 etap) realizowany jest projekt PWO (Środowisko plazmowo-falowe). Celem projektu są badania plazmowo-falowych procesów zachodzących w jonosferze i magnetosferze Ziemi, przy użyciu metod wysokoczęstotliwościowej (HF) spektrometrii radiowej, która jest jedną z najbardziej wydajnych metod badania plazmy okołozemskiej z pokładów sztucznych satelitów Ziemi. Należy zauważyć, że pomiar nie jest przeprowadzany na

мерения проводятся не на отдельных участках орбиты, как это делается в западных экспериментах, а в режиме мониторинга, что позволяет видеть основные структурные образования околоземной плазмы, такие как экваториальная аномалия, главный ионосферный провал, полярная шапка и др. ВЧ-радиоспектрометрия осуществляется с использованием радиочастотного анализатора (РЧА), разработанного и изготовленного ЦКИ ПАН. Сложность интерпретации полученных данных заключается в том, что на спектрах присутствует информация как о локальных процессах вблизи космического аппарата, так и о сигналах, возбуждаемых источниками, находящимися вдали от него.

Опыт, накопленный польскими и российскими исследователями, позволяет разделить эти два источника при интерпретации данных.

Приборы РЧА в проекте ПВО являются составной частью космических экспериментов:

- «ОБСТАНОВКА (1-й этап)» на борту Российского сегмента Международной космической станции (РС МКС) – 2013-2016 гг.
- «НЧА-РЧА» на борту малого космического аппарата (МКА-ПН2) РЭЛЕК («Вернов») – 2014 г.
- «ОБСТАНОВКА (2-й этап)» на борту Российского сегмента Международной космической станции (РС МКС), включенного в «Долгосрочную программу научно-прикладных исследований и экспериментов, планируемых на РС МКС на 2016–2020 гг.».

Основные результаты, полученные в ходе реализации проекта ПВО, отражены в данном буклете и активно обсуждались на многочисленных

отделенных частях орбиты, как то ма miejsce zachodnich eksperymentach, a w trybie monitorowania, co daje możliwość zaobserwowania podstawowych formacji strukturalnych w plazmie okołozemskiej, takich jak równikowa anomalia, główny rów jonosferyczny, czapa polarna i inne. Wysokoczęstotliwościowa (HF) spektrometria radiowa realizowana jest przy użyciu Analizatora Częstości Radiowych (RFA), który został zaprojektowany i wykonany w Centrum Badań Kosmicznych PAN. Otrzymane dane zawierają informacje zarówno o lokalnych procesach w pobliżu statku kosmicznego, jak i sygnały wzbudzone przez oddalone źródła, i dlatego też ich interpretacja jest trudna. Doświadczenie zdobyte przez polskich i rosyjskich naukowców pozwala na oddzielenie tych dwóch źródeł w interpretacji danych.

Radioanalizatory RFA w projekcie PWO są integralną częścią eksperymentów kosmicznych:

- „OBSTANOVKA, 1 etap” na pokładzie Rosyjskiego segmentu Międzynarodowej Stacji Kosmicznej (RS MKS) – 2013-2016 r.
- „LFA- RFA « na pokładzie małego statku kosmicznego (ICA-PN2) RELEK („Wiernow») – 2014
- „OBSTANOVKA – 2 etap” na pokładzie Rosyjskiego segmentu Międzynarodowej Stacji Kosmicznej (RS MKS), włączonego do „Wieloletniego programu eksperymentów i badań naukowo-stosowanych na (RS MKS) – 2016–2020 r.”.

Główne wyniki otrzymane w trakcie realizacji projektu PWO są przedstawiane w tym opracowaniu, były one również aktywnie dyskutowane na wielu konfe-

конференциях (фото 3, Ольштын, Польша), включая Международную научно-практическую конференцию «Научные исследования и эксперименты на МКС», (2015 г., ИКИ РАН).

Россия оказала помощь в запуске первого польского научного спутника BRITE-PL «LEM», который был выведен на орбиту 21 ноября 2013 с пусковой базы Ясный в Оренбургской области с помощью украинско-российской ракеты «ДНЕПР». Запуск был выполнен по расчетам Ракетных войск стратегического назначения Министерства обороны России. Вместе с польским спутником были выведены еще около 30 космических аппаратов разных стран и различного назначения.

rencjach, np. (fot. 3, Olsztyn, Polska) na Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji «Badania naukowe i eksperymenty na Międzynarodowej Stacji Kosmicznej» (2015 r, IKI RAN).

Rosja pomogła w wystrzeleniu pierwszego polskiego naukowego satelity BRITE-PL „LEM”; został on wprowadzony na orbitę 21 listopada 2013 roku, z bazy Jasny w rejonie Orenburskim, przy pomocy ukraińsko-rosyjskiej rakiety „DNIIEPR”. Wystrzelenie przeprowadzono zgodnie z obliczeniami Strategicznych Wojsk Raketowych Ministerstwa Obrony Rosji. Równocześnie z polskim satelitą wystrzelono około 30 innych satelitów z różnych i do różnych celów



фото 3

завтра

Немало интересных совместных российско-польских проектов задумано и в перспективе.

jutro

W przyszłości planuje się wiele interesujących, wspólnych, rosyjsko-polskich projektów.

Будущие совместные разработки ИЗМИРАН и ЦКИ ПАН включают прибор СЧЕМ-Х (брэгговский анализатор химического состава корональной плазмы), который создается для российского проекта «ИНТЕРГЕЛИОЗОНД». Этот проект осуществляется в целях исследований Солнца с близких расстояний и решения проблем нагрева солнечной короны, изучения ускорения солнечного ветра, происхождения солнечных вспышек и корональных выбросов плазмы.

Прибор СЧЕМ-Х будет иметь уникальную конструкцию. Появится возможность проводить динамическое и оперативное управление спектральным разрешением в диапазоне мягкого рентгеновского излучения, который содержит многочисленные спектральные линии, наблюдаемые в эмиссии на верхней части континуума. Регистрация рентгеновских спектров с высоким спектральным разрешением позволит осуществить дистанционную диагностику физических условий в солнечной короне и изучить различные физические механизмы ее нагрева.

Исследования аврорального километрового излучения российскими и польскими учеными планируется продолжить в рамках проекта РЕЗОНАНС, который предназначен для продолжения международных многоспутниковых исследований околоземного космоса.

Основная цель этого проекта – изучение взаимодействия электромагнитного излучения с заряженными частицами во внутренней магнитосфере Земли, которую иногда называют «кухней космической погоды», проведение активных экспериментов с использованием наземных средств, а также контроль техногенных воздействий на земную магнитосферу и геофизические процессы.

Przyszły wspólny projekt IZMIRAN i CBK PAN przewiduje użycie przyrządu CHM-X (analyzer Bragga składu chemicznego koronalnej plazmy), który przygotowywany jest dla projektu „INTERHELIOZOND”. Celem tego projektu są badania z bliskiej odległości Słońca i rozwiązywanie problemów związanych z grzaniem korony słonecznej, badania przyspieszenia wiatru słonecznego, pochodzenia rozbłysków i koronalnych emisji plazmy.

Konstrukcja przyrządu CHEM-X będzie unikalna. Będzie możliwe zarówno dynamiczne, jak i operacyjne sterowanie rozdzielczością widmową w zakresie miękkiego promieniowania rentgenowskiego, które zawiera wiele spektralnych linii obserwowanych emisji w górnej części widma ciągłego. Rejestracja widma rentgenowskiego z wysoką spektralną rozdzielczością pozwoli na zdalną diagnostykę warunków fizycznych w koronie słonecznej i pozwoli na zbadanie różnych fizycznych mechanizmów jej grzania.

Planowana jest kontynuacja badań kilometrowego promieniowania zorzowego (AKR) przez rosyjskich i polskich naukowców w ramach projektu "REZONANS", który jest zaprojektowany jako kontynuacja międzynarodowych wielosputnikowych badań przestrzeni okołoziemskiej. Podstawowym celem tego projektu są badania oddziaływania promieniowania elektromagnetycznego z naładowanymi cząstkami wewnątrz magnetosfery Ziemi, która jest czasami nazywana «kuchnią pogody kosmicznej», prowadzenie aktywnych eksperymentów z wykorzystaniem aparatury naziemnej, jak również kontrolę wpływu rozwoju technologicznego na magnetosferę Ziemi i procesy geofizyczne.

Наблюдения солнечного ветра и солнечной короны помимо научного интереса имеют большое практическое значение, поскольку плазма солнечного ветра служит основным агентом, посредством которого активные процессы на Солнце оказывают влияние на состояние околоземного космического пространства и магнитосферы Земли. Лучшее понимание природы причинно-следственных связей процессов в ближнем и дальнем космосе помогает в разработке основ «космической погоды» – пространственных и временных вариаций параметров космической среды в зависимости от солнечной активности. Прогнозы «космической погоды» нужны, в частности, для обеспечения радиационной безопасности космических полетов, в том числе на орбитальных станциях (ОС). В свою очередь ОС благодаря длительности эксплуатации представляют собой очень удобное место для изучения «космической погоды».

Сотрудничество между Россией и Польшей в области космических исследований всегда было чрезвычайно плодотворным, несмотря на то, что официально российско-польская Исполнительная рабочая группа по фундаментальным космическим исследованиям постановлением РАН и ПАН была воссоздана только в 2005 году. Успех сотрудничества Польши и России в фундаментальных космических исследованиях отмечен несколькими премиями и правительственными наградами: в 2009 году премией правительства Российской Федерации за успешную научную реализацию проекта КОРОНАС-Ф; в 2011 – престижной совместной премией РАН и ПАН за лучшую научную работу, выпол-

Observacje wiatru słonecznego i korony słonecznej oprócz naukowego znaczenia mają znaczenie praktyczne, ponieważ plazma wiatru słonecznego jest podstawowym czynnikiem, za pomocą którego aktywne procesy na Słońcu wpływają na stan przestrzeni okołoziemskiej i magnetosfery Ziemi.

Lepsze zrozumienie charakteru procesów przyczynowo skutkowych w bliskiej przestrzeni kosmicznej pomaga w tworzeniu fundamentów «pogody kosmicznej» – przestrzennych i czasowych zmienności parametrów przestrzeni kosmicznej w zależności od aktywności słonecznej. Prognozy «pogody kosmicznej» konieczne są w szczególności w celu zapewnienia bezpieczeństwa radiacyjnego w misjach kosmicznych, w tym na stacjach orbitalnych (OS). Z kolei Stacje orbitalne ze względu na długi czas eksploatacji są bardzo dobrym miejscem do badania «kosmicznej pogody».

Współpraca między Polską a Rosją w dziedzinie badań kosmicznych zawsze była bardzo owocna, mimo że grupa robocza w ramach współpracy polsko-rosyjskiej w zakresie podstawowych badań kosmicznych została formalnie utworzona postanowieniem PAN i RAN dopiero w 2005 roku.

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 rosyjskopolskiej współpracy; rządowe nagrody dla dyrektorów

ненную в ходе российско-польского сотрудничества; правительственными наградами директоров ЦБК ПАН и ИКИ РАН, которые были вручены президентами России и Польши.

CBK PAN oraz IKI RAN wręczone odpowiednio przez prezydentów Polski i Rosji.



фото 4



фото 5



фото 6

На фотографиях (фото 4, 5 и 6) – волнующие моменты награждения российских и польских ученых в ИКИ РАН (фото 4 и 5) и Президиуме РАН (фото 6).

Как показывает практика, самые лучшие результаты сотрудничества в области космических исследований достигаются в результате неофициального общения специалистов научных органи-

Na fotografiach (fot. 4, 5 i 6) – wzruszające momenty wręczania polskim i rosyjskim uczonym nagród w IKI RAN (fot. 4 i 5) i w Prezydium RAN (fot. 6).

Praktyka pokazała, że najlepsze wyniki współpracy w dziedzinie badań przestrzeni kosmicznej zostały osiągnięte w wyniku nieformalnych kontaktów pomiędzy uczonymi z IKI RAN i CBK PAN, ponieważ oparte są one na zaufa-

заций, таких, например, как ИКИ РАН и ЦКИ ПАН, потому что эти отношения основываются на многолетнем сотрудничестве и доверии. Рабочие встречи всегда проходят в хорошей дружественной обстановке, а принимающие стороны всегда организуют мероприятия, помогающие познакомиться своих коллег с культурным богатством своей страны. Полученные научные результаты и сложившиеся международные коллективы исследователей – это наше общее богатство и серьезная основа успеха новых совместных проектов.

Важно, что плодотворное взаимодействие, путь к которому был не так прост, как дерево, растущее на открытом месте, только и крепнет со временем под натиском самых разных и часто не очень ласковых ветров.

**Л. Зеленый
В. Кузнецов
И. Станиславска
М. Банашкевич**

niu i wieloletniej kooperacji. Spotkania robocze odbywają się zawsze w miłej i przyjaznej atmosferze, organizowane są również imprezy towarzyszące, które pozwalają zapoznać kolegów z bogactwem kultury kraju. Otrzymane w wyniku tej współpracy wyniki naukowe i utworzone międzynarodowe zespoły badaczy są naszym wspólnym dorobkiem i ważną podstawą sukcesu dla dalszych wspólnych projektów.

Istotne jest to, że nasza owocna współpraca umacnia się i podobnie jak proste drzewo, rosnące na otwartej przestrzeni, staje się z czasem, pod wpływem nie zawsze przyjaznych wiatrów wiejących z różnych stron, silniejsza.

**L.M. Zielony
V.Kuznetsov
I. Stanisławska
M. Banaszkievicz**

ХЕМИКС – РЕНТГЕНОВСКИЙ СПЕКТРОМЕТР БРЭГГА ДЛЯ СОЛНЕЧНО-ГЕЛИОСФЕРНОЙ МИССИИ ИНТЕРГЕЛИОЗОНД

авторы проекта с российской стороны:

В. Кузнецов, С. Кузин

авторы проекта с польской стороны:

М. Сярковски, Я. Сильвестер, Я. Бонкала, Ж. Шафощ, З. Кордылевски

Миссия «ИНТЕРГЕЛИОЗОНД» (ИГЗ) Российского космического агентства направлена на изучение внутренней гелиосферы и Солнца с близких расстояний и из внеэклиптических положений [Kuznetsov et al., 2014]. Два космических аппарата (КА), запуск который планируется после 2025 года, будут располагаться на наклонных к плоскости эклиптики гелиоцентрических орбитах, формируемых за счет многократных гравитационных маневров у Венеры. В состав научной аппаратуры космического аппарата (КА) включается изготавливаемый совместно польскими и российскими учеными брегговский спектрометр ХЕМИКС (CHEMIX – CHEMICAL composition in X-Rays). Анализ рентгеновских спектров, которые будут получаться с использованием этого спектрометра, даст возможность определять химический состав горячих структур короны Солнца, вспышечной плазмы и активных областей (АО). Прибор находится в стадии разработки, которая возглавляется Вроцлавской лабораторией физики Солнца (ЛФС) Центра космических исследований Польской Академией Наук. В работах принимают участие представители институтов России (ИЗМИРАН, ИКИ РАН, ФИАН) и Украины (НАНУ). Ниже будут описа-

CHEMIX: RENTGENOWSKI SPEKTROMETR BRAGGA NA MIĘDZYPLANETARNĄ MISJĘ INTERHELIOPROBE

autorzy projektu ze strony Rosji:

V. Kuznetsov (IZMIRAN), S. Kuzin (FIAN)

autorzy projektu ze strony Polski:

M. Siarkowski, J. Sylwester, J. Bąkała, Ż. Szaforz, Z. Kordylewski

INTERHELIOPROBE (IHP) to rosyjska międzyplanetarna misja, której obiekty będą zbliżać się do Słońca na odległość ok. 60 promieni słonecznych [Kuznetsov et al., 2014]. Misja ta prowadzona jest przez Rosyjską Agencję Kosmiczną ROSKOSMOS. Będą brały w niej udział dwie sondy kosmiczne, których start przewidywany jest na lata po 2025. Dzięki zastosowaniu dwóch obiektów możliwe będzie prowadzenie stereoskopowych obserwacji indywidualnych struktur w atmosferze słonecznej, w szczególności w koronie. W skład aparatury naukowej obu sond wejdzie, przygotowany we współpracy polsko-rosyjskiej, Braggowski spektrometr CHEMIX. Analiza widm rentgenowskich otrzymanych za pomocą tego spektrometru umożliwi wyznaczenie składu chemicznego gorących struktur korony takich jak rozbłyski i obszary aktywne (AR). CHEMIX znajduje się w projektowaniu, w tzw. fazie B. Współpraca obejmuje wrocławski Zakład Fizyki Słońca, wchodzący w skład Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk oraz instytutu z Rosji (IZMIRAN, IKI, FIAN) i Ukrainy (Instytut Radioastronomii NANU). Niniejsza praca przedstawia zadania naukowe przyrządu CHEMIX, zawiera zwięzły opis instrumentu oraz opis stopnia zaawansowania prac projektowych.

ны основные научные задачи прибора ХЕМИКС и детали его конструкции.

Основные научные задачи проекта ИГЗ состоят в исследовании приполярных областей Солнца, тонкой структуры солнечной атмосферы, динамических процессов в атмосфере Солнца, в изучении процессов нагрева солнечной короны, ускорения солнечного ветра и, что очень важно, измерения „in situ” свойства плазмы гелиосферы. Космические аппараты приблизятся к Солнцу на расстояние в 65–70 солнечных радиусов, наклонение орбит к плоскости эклиптики достигнет 30°.

Солнечная спектроскопия мягкого рентгеновского диапазона бурно развивалась в 80-х годах XX века на основе наблюдений со спутников на околоземных орбитах. Большой вклад был внесен советскими экспериментами, выполненными под руководством проф. Мандельштама и Житника [Grineva et al., 1973] по программе ИНТЕРКОСМОС. Основную роль для развития знаний по физике процессов энерговыделения во вспышках сыграли исследования проведенные с помощью аппаратуры размещенной на борту спутников P78-1 (США, приборы SOLEX, SOLFLEX) [Doseck et al., 1979], HINOTORI (JAXA) [Tanaka et al., 1982], SMM (NASA, прибор XRP: BCS & FCS [Acton et al., 1980]) и Yohkoh, (JAXA, прибор BCS [Culhane et al., 1991]). Эти приборы характеризовались довольно большим спектральным разрешением, однако их общим недостатком было отсутствие системы абсолютной калибровки сдвигов спектральных линий из-за того, что невозможно было определять физическую причину часто наблюдаемых смещений линии, так как сдвиг из-за эффекта Доплера нельзя

Obie okołosłoneczne sondy *IHP*, podobnie jak ich europejski odpowiednik *Solar Orbiter*, zbliżą się do naszej dziennej gwiazdy na odległość około 0,3 j.a. Tak znaczne zbliżenie do Słońca będzie możliwe dzięki serii tzw. manewrów grawitacyjnych w pobliżu Ziemi i Wenus. Po ok. 1,5 roku od startu sondy znajdą się w peryhelium, gdzie będą one „unosily się” ponad indywidualnym obszarem fotosfery (tzw. korotacja). Pozwoli to na obserwacje wybranych fragmentów atmosfery Słońca przez wiele dni z rzędu. Kolejne manewry grawitacyjne (co ok. pół roku) będą wykorzystywane do stopniowego zwiększania nachylenia płaszczyzny orbity sond w stosunku do płaszczyzny ekliptyki. Pod koniec misji nachylenie to osiągnie wartość ok. 30°, co pozwoli na wygodne prowadzenie obserwacji obszarów okołobiegunowych Słońca (w znacznym stopniu zredukowany będzie efekt perspektywy zakłócający lub uniemożliwiający prowadzenie obserwacji tych obszarów z płaszczyzny ekliptyki).

Do głównych celów naukowych misji *IHP* należy kontynuacja badań procesów związanych z dynamiką zjawisk zachodzących w atmosferze Słońca, w tym prowadzenie obserwacji struktur koronalnych z dużą rozdzielczością przestrzenną, diagnostyka procesów wydzielania energii (przyspieszanie cząstek i grzanie) korony słonecznej, badanie przyspieszania wiatru słonecznego, a także prowadzenie pomiarów *in situ* własności fizycznych plazmy heliosferycznej.

Sondy *IHP*, konstruowane w Rosji przez kompanię „Lavochnik Research and Production Association”, będą posiadały 3-osiową stabilizację przestrzenną, umożliwiającą nakierowanie obiektów na centrum tarczy Słońca z precyzją 1 minuty łuku. Dryfy (tempo zmian) osi

было отличить от сдвига из-за перемещения источника в плоскости наблюдений. Несмотря на эти недостатки, выполненные до настоящего времени интерпретации рентгеновских спектров, полученных за последние 50 лет с помощью вышеупомянутых инструментов, дали целый ряд основных достижений в области физики горячей плазмы вспышек. Наблюдались эмиссионные спектры H-, He- и Ne-подобных ионов наиболее обильных элементов, так называемых «металлов»: Fe, Ca, Ar, S, Si, Mg, Ne, Na, и O. Полученных во время вспышек спектры излучения позволили установить:

- наличие значительного уширения линии в начальной импульсной фазе вспышек, которая сопровождалась жестким рентгеновским излучением ($E > 20$ кэВ) [Antonucci et al., 1989];
- наличие коротковолновой составляющей профилей линии, связанной с процессами испарения хромосферы в начальной стадии вспышек (в одном случае); для вспышки балла X5,3, самой мощной, которая наблюдалась спектрометрами мягкого рентгена, зарегистрировано доплеровское смещение всей эмиссионной линии [Plocieniak et al., 2002];
- зависимость относительной интенсивности линий $K\alpha$ и $K\beta$, возбуждаемых на уровне фотосферы вследствие флуоресценции, от расстояния вспышки от центра диска Солнца [Parmar et al., 1984];
- наличие многотемпературной структуры источника излучения (на основе измерения относительных интенсивностей линий, формирующихся при разных температурах) [Sylwester et al., 2015];

накиривания не przekroczą 1 sekundy łuku/sek w każdym z kierunków. Maksymalna prędkość przesyłania na Ziemię danych telemetrycznych wynosić będzie 1GB/24h. W początkowej fazie lotu sondy wykorzystywać będą (do korekty orbity) silniki plazmowe, co znacznie skróci czas potrzebny do osiągnięcia perihelium, w porównaniu do podobnego czasu dla misji *Solar Orbiter* (której start jest zaplanowany na październik 2018 r). Szacowany czas trwania misji *IHP* to minimum 5 lat. Obie sondy *IHP* będą zawierały identyczny zestaw ok. 20 instrumentów naukowych, o łącznej wadze około 150 kg. Schematyczny wygląd satelity przedstawiono na rysunku 1.

W założeniach misja *IHP* umożliwi:

- Rejestrację obrazów powierzchni Słońca i korony słonecznej z niewielkiej odległości ($\sim 60 R_{\text{Sl}}$) w różnych długościach fali (od światła widzialnego przez UV i zakres rentgenowski, aż do zakresu gamma);
- Obserwacje z poza płaszczyzny ekliptyki, tj. obserwacje słonecznych obszarów około-biegunowych i fragmentów tarczy Słońca niewidocznych z Ziemi;
- Pomiary *in situ* parametrów fizycznych plazmy wewnętrznej heliosfery w bezpośrednim otoczeniu satelity.

W skład aparatury naukowej obu sond wejdzie konstruowany wspólnie przyrząd CHEMIX. CHEMIX to spektrometr rentgenowski Bragga. Burzliwy rozwój spektroskopii słonecznej w zakresie miękkiego promieniowania rentgenowskiego przypadł na lata 80'ie XX wieku. Wysłano wtedy na orbity wokół Ziemi szereg satelitów i obserwatoriów słonecznych. Eksperymenty te podążały drogą wyznaczoną pionierskimi pomiarami przeprowadzonymi przez grupę prof. prof. Mandelsztama i Żytніка [Grineva et al., 1973]

- отличие распределения электронов в источнике от максвелловского [Dudík et al., 2014];
- отличие химического состава короны от фотосферного (природа физического механизма этого эффекта остается пока не вполне известной); присутствие эффекта FIR – Первого потенциала ионизации [Laming et al., 2015].

В 2005 году Лаборатория физики Солнца Центра космических исследований ПАН получила возможность участия в проекте ИГЗ, что связано с успешной работой Брэгговского спектрометра RESIK [Sylwester et al., 2015] на борту спутниковой обсерватории КОРОНАС-Ф. В связи с этим в последнее время совместными силами проводилась разработка спектрометра нового поколения ХЕМИКС.

Наблюдения структур короны с близкого расстояния дают возможность значительного увеличения углового разрешения, в ~4 раза лучше, чем с расстояния Земли, а также увеличения потоков излучения в квадрате, т.е. в ~16 раз, что позволит значительного уменьшить размеры и вес спектрометра с одновременным увеличением отношения сигнала к фону (по сравнению с условиями на расстоянии в 1 а.е.). Прибор ХЕМИКС должен работать на протяжении примерно 10 лет на межпланетарной околосолнечной орбите, на расстояниях от Солнца в $0,3 \div 0,7$ а.е.

Конструкция прибора ХЕМИКС представляет собой усовершенствованный вариант спектрометра, который включает достоинства всех предыдущих инструментов подобного типа. Использование изогнутых кристаллов в сочетании с ПЗС-матрицами в качестве детекторов обеспечивает

в рамках programu INTERKOSMOS. Podstawową rolę prowadzącą do rozwoju wiedzy o naturze fizycznej procesów wydzielania energii w rozbłyskach słonecznych odegrały badania przeprowadzone przy pomocy aparatury umieszczonej na pokładach satelitów: *P78-1* (USA, przyrządy SOLEX i SOLFLEX) [Doschek et al., 1979], *Hinotori* (JAXA) [Tanaka et al., 1982], *SMM* (NASA, przyrząd XRP: BCS & FCS [Acton et al., 1980]) i *Yoh-koch* (JAXA, przyrząd BCS) [Culhane et al., 1991]. Przyrządy te charakteryzowały się dość dużą rozdzielczością widmową, jednak ich wspólną wadą był brak absolutnej kalibracji położenia i przesunięć emisyjnych linii widmowych. Nie pozwalało to na określenie przyczyny fizycznej często obserwowanych zmian położenia linii w związku z tym, że nie można było odróżnić przesunięć dopplerowskich tych linii od przesunięć wywołanych ruchem źródła w płaszczyźnie obserwacji. Pomimo tej wady, interpretacja widm rentgenowskich rozbłysków, uzyskanych przy pomocy wyżej wymienionych instrumentów w okresie ubiegłych 50 lat, pozwoliła uzyskać sporo nowych i cennych informacji, szczególnie dotyczących warunków formowania się widm w jonach H-, He- i Ne-podobnych najbardziej obfitych pierwiastków słonecznych takich jak: Fe, Ca, Ar, S, Si, Mg, Ne, Na, i O. Do najczęściej wymienianych i najważniejszych osiągnięć zaliczamy:

- detekcję znacznego poszerzenia turbulentnego linii we wczesnej, impulsowej fazie rozbłysków, której towarzyszy emisja rentgenowska w twardym ($E > 20$ keV) zakresie widma [Antonucci et al., 1989];
- stwierdzenie obecności, w początkowej, impulsywnej fazie rozbłysków, składowych widmowych linii prze-

одновременную регистрацию спектров во всех каналах и на всех длинах волн внутри отдельных каналов. Это, в свою очередь, дает возможность следить за быстрыми изменениями спектров, с характерным временем порядка секунд. В спектральном диапазоне 1,5–9 Å будут наблюдаться непрерывный спектр и все линии, общее число которых несколько сотен. Они формируются при температурах от 1,5 МК и выше (до 100 МК). Таким образом, возможно определение не только температурной структуры ядер эмиссии, но и химического состава плазмы для таких элементов как: Ne, Mg, Al, Si, S, Cl, Ar, K, Ca, Fe и Ni. Дисперсионные элементы (вафли монокристаллов) подобраны таким образом, чтобы флуоресценция от материала кристалла не попадала в область регистрации спектра в данной секции. Это значительно понижает уровень инструментального шума и повышает отношение сигнала к шуму для непрерывного спектра. Все 10 секций спектрометра снабжены коллиматорами, которые ограничивают поле зрения в обоих направлениях до 3 мин дуги, что заметно устраняет эффект перекрывания спектров от разных источников, присутствующих одновременно в короне. Используемые ПЗС-матрицы охлаждаются до температур ниже -20°C , что заметно уменьшает уровень шума в системах первичного усилителя.

Космический аппарат «ИНТЕР-ГЕЛИЗОНД» разрабатывается НПО им. С.А.Лавочкина. КА будет ориентирован на Солнце (трехосная ориентация) с точностью ± 1 минуты дуги. Скорости вращения по всем осям не будут превышать значения 1 сек дуги/с. Максимальная скорость передачи инфор-

сунієтьх в стронę крѳтсьх длугоści фали в стосунку до лини глѳвнеј (тзв. blue-shifted components). Przynajmniej w jednym wypadku (silnego rozbłysku klasy rentgenowskiej X5.3) zarejestrowane zostało przesunięcie dopplerowskie całej linii [Plocieniak et al., 2002];

- odkrycie, że linie emisyjne $K\alpha$ i $K\beta$ powstają głównie w wyniku fluorescencji materii fotosferycznej poprzez stwierdzenie, że względne natężenia tych linii wykazują zmienność z odległością od środka tarczy słonecznej [Parmar et al., 1984];
- stwierdzenie, poprzez analizę względnych natężeń linii, że plazma w rozbłyskach i obszarach aktywnych znajduje się jednocześnie w wielu temperaturach [Sylwester et al., 2015];
- wykrycie występowania tzw. „niemaxwellovskich” rozkładów elektronów w plazmie rozbłyskowej [Dudik et al., 2014];
- precyzyjny pomiar składu chemicznego plazmy koronalnej w rozbłyskach słonecznych i obszarach aktywnych i potwierdzenie występowania różnic pomiędzy składem chemicznym struktur fotosfery i korony, związanego z obecnością tzw. efektu FIP (zależności od wartości pierwszego potencjału jonizacji) [Laming et al., 2015]. Określanie składu chemicznego korony jest niezbędne w badaniach procesu rozdzielania obfitości pierwiastków w plazmie, obliczeniach całkowitego strumienia promieniowania emitowanego przez gorącą plazmę i stanowi podstawę prawidłowych interpretacji danych helio-sejsmologicznych.

Około roku 2005, krѳtko po przeprowadzeniu zakończonego sukcesem eksperymentu RESIK [Sylwester et al., 2015],

миссии на Землю составит 1 ГБ/сутки в случае радиопрозрачности короны и отсутствия помех. В начальной стадии миссии, для корректировок орбиты, будут использоваться ионные плазменные двигатели. Благодаря этому время полёта к Солнцу значительно уменьшится по сравнению с временем долёта КА SOLAR ORBITER (запуск октябрь 2018). Время полной работоспособности КА ИГЗ составит не менее 5 лет. Оба КА будут снабжены научной аппаратурой весом в 150 кг (20 научных инструментов). Схематический вид КА Интергелиозонд и его основные системы представлена на рис. 1: 1 – защитный экран, 2 – платформа с комплексом научной аппаратуры, 3 – двигательная установка, 4 – антенна, 5 – солнечные панели. Размеры КА $3,7 \times 4,5 \times 3,7$ м.

Наблюдения, проводимые с использованием комплекта научной аппаратуры, дадут возможность:

- регистрации изображений поверхности и короны Солнца с расстояния 65–70 солнечных радиусов в широком диапазоне спектра (от видимой его части, до УФ- и гамма-диапазона);
- исследования из мало изученных внеэклиптических областей полярных районов Солнца;
- измерения „in situ” физических свойств плазмы в непосредственной близости от Солнца и во внеэллиптических областях гелиосферы.

Прибор ХЕМИКС будет в основном измерять спектры вспышек и активных областей короны с очень высоким спектральным, угловым и временным разрешением, что даст возможность исследовать динамику горячей плазмы и свойства турбулентной плазмы в разных фазах развития вспышек. Эти из-

за pomocą którego prowadzono obserwacje korony słonecznej z pokładu satelity *CORONAS-F*, przystąpiono do prac nad nowym spektrometrem Bragga – przyrządem CHEMIX. Prace podjęto w związku z tym, że Zakład Fizyki Słońca – wrocławski oddział Centrum Badań Kosmicznych PAN otrzymał propozycję uczestniczenia nieodpłatnie w obu rosyjskich misjach *IHP*. W przypadku instrumentu umieszczonego na niskiej orbicie okołoziemskiej, tak jak to miało miejsce w przypadku instrumentu RESIK, uzyskanie wystarczająco silnych strumieni widmowych w spektrometrze Bragga wymaga użycia dość dużych kryształów, o rozmiarach ok. $20 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$. Ich koszt jest ogromny, dużo powyżej możliwości sfinansowania w Polsce. Budowa tak drogiego instrumentu nie uzyskaby akceptacji. Jednak wykorzystanie przedstawionej przez stronę rosyjską możliwości uczestnictwa w projekcie *Interhelioprobe* stworzyło szansę, gdyż zmniejsza koszt przygotowania takiego instrumentu o rząd wielkości, w związku ze zmniejszeniem rozmiarów kryształów i detektorów. Mając to na uwadze, pracownicy ZFS przygotowali wniosek o dofinansowanie instrumentu CHEMIX, który otrzymał wsparcie z Narodowego Centrum Nauki Rzeczypospolitej Polskiej (NCN). Dedykowane fundusze NCN dały możliwość przeprowadzenia fazy „B” projektowania instrumentu.

Według naszej wiedzy CHEMIX będzie jedynym spektrometrem słonecznym przeznaczonym do obserwacji miękkiego promieniowania rentgenowskiego na przełomie 25/26 cyklu Aktywności Słonecznej.

Opracowana obecnie w ZFS CBK, konstrukcja przyrządu CHEMIX czerpie z najlepszych doświadczeń zebranych w trakcie obserwacji prowadzonych za pomocą wcześniejszych spektrometrów tego typu. Wykorzystanie cylindrycznie wypukłych kryształów wraz z detektorami (po raz pierwszy matrycami CCD) za-

мерения будут вносить вклад в решение основных научных задач проекта в области исследований высокоэнергетических проявлений активности Солнца, их связи с выбросами корональной массы, т.е. тех явлений, которые определяют состояние космической погоды в околоземном космическом пространстве. Одна из главных задач прибора ХЕМИКС – определение химического состава плазмы рентгеновской короны с точностью не хуже той, которая присуща измерениям с поверхности Земли в видимой области спектра.

После успешного выполнения миссии КОРОНАС-Ф, на борту которой находился прибор RESIK, во Вроцлавской лаборатории ЦКИ началась разработка аналогичного рентгеновского спектрометра нового поколения с использованием ПЗС-матрицы в качестве детектора. В случае наблюдения таким прибором на околоземной орбите, для получения нужных потоки освещения надо было бы использовать кристаллы и детекторы размерами $\sim 20 \times 5$ см, высокая стоимость которых не могла быть обеспечена финансированием в Польше. Однако, используя предложенную российской стороной возможность участия в проекте «ИНТЕРГЕЛИОЗОНД», в рамках которого наблюдения Солнца будут проводиться с близких расстояний, стоимость разработки такого инструмента падает на порядок в связи с уменьшением размеров кристаллов и детекторов. И специалистами ЛФС подготовили было подготовлено грантовое предложение по прибору ХЕМИКС, которое получило поддержку Народного центра по науке Республики Польши (NCN) и выделенные NCN средства дали возможность проведения фазы «Б» работ по этому проекту.

пewni jednoczesną rejestrację widm we wszystkich kanałach widmowych oraz wszystkich długościach fali wewnątrz oddzielnych kanałów. Obserwowane będą zarówno linie emisyjne jak i widmo ciągłe w zakresie długości fal $1,5 \text{ \AA} - 9 \text{ \AA}$. Widma w tym zakresie formują się w plazmie o temperaturach powyżej $1,5 \text{ MK}$ (aż do kilkudziesięciu milionów Kelwinów). Interpretacja obserwacji wykonanych za pomocą przyrządu CHEMIX umożliwi nie tylko określenie struktury temperaturowej emitującej plazmy, lecz także pozwoli na precyzyjne pomiary jej składu chemicznego obejmując takie pierwiastki jak: Ne, Mg, Al, Si, S, Cl, Ar, K, Ca, Fe i Ni. W przyrządzie zastosowano elementy dyspersyjne w postaci wygiętych cylindrycznie wafli mono-krystalicznych. Materiały z których wykonane są wafle dobrano w taki sposób, aby ich własna fluorescencja wywołana oświetleniem poprzez promieniowanie rentgenowskie Słońca nie przypadała w zakresie energii mierzonych widm. Dzięki temu poziom tzw. szumów tła uda się wyeliminować, co doprowadzi do poprawy stosunku sygnału do szumu, ważnego w szczególności przy wyznaczaniu poziomu widma ciągłego. Każdy z 10 torów pomiarowych spektrometru, czyli układów widmowych, wyposażony będzie w kolimator, którego zadaniem będzie ograniczenie pola widzenia spektrometru do 3 minut łuku w każdym z kierunków. Zastosowanie kolimatorów ma na celu eliminację (ograniczenie) efektu nakładania widm formujących się w niezależnych źródłach obecnych jednocześnie w koronie. Wykorzystywane do rejestracji widm detektory CCD chłodzone będą do temperatury ok. -20°C (i poniżej), co pozwoli dodatkowo zmniejszyć poziom szumów elektroniki.

Przyrząd CHEMIX będzie obserwował widma rozbłysków i obszarów aktywnych korony z niespotykaną rozdzielczością spektralną, kątową i czasową, co pozwoli na śledzenie dynamiki gorącej

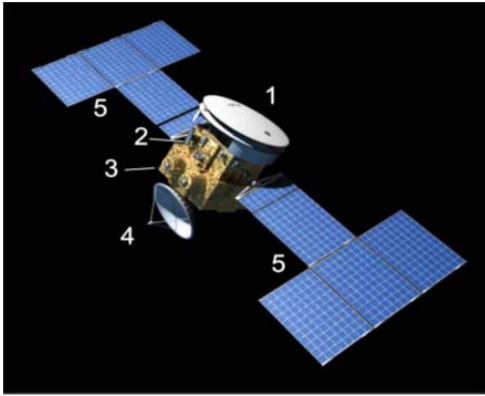


рис. 1. Схематический вид КА ИНТЕРГЕЛИОЗОНД и его основные системы. Размеры КА 3,7×4,5×3,7 м

rys. 1. Schematyczna wizja satelity Interhelioprobe z opisem głównych podzespołów. Rozmiar satelity wynosi 3,7×4,5×3,7 m

Общая схема прибора ХЕМИКС представлена на рис. 2 и 3. На рис. 2 указано положение измерительного блока (measurement block – MB) в системе космического аппарата (КА). Блок MB с (описанными далее) системами спектрального атласа (SA), доплерометра, пинхол-камеры (камера обскура) и соответствующими приводами размещается в тени системы тепловых и рентгеновских фильтров, встроенных в тепловую защиту КА.

plazmy i określanie właściwości gorącej plazmy turbulentnej w poszczególnych fazach rozwoju rozbłysków. Pomiarы te w istotny sposób uzupełniają wypełnianie głównych celów naukowych misji *IHZ* w części dotyczącej badania przejawów aktywności słonecznej w zakresie wysokich energii i analizy ich związku z wyrzutami materii koronalnej (CME), czyli zjawiskami które określają stan pogody kosmicznej w bezpośrednim otoczeniu Ziemi. Jednak zasadniczym celem przyrzędu CHEMIX jest wyznaczenie składu chemicznego rentgenowskich źródeł w koronie z dokładnością nie gorszą niż ta, mierzona z powierzchni Ziemi w widzialnej części widma.

Ogólny schemat przyrzędu CHEMIX pokazany został na rysunkach 2 i 3. Na rysunku 2 uwidoczniło położenie bloku pomiarowego (measurement block – MB) na pokładzie sondy. Blok ten wraz z opisanymi dalej systemami spektrometru, dopplerometru, kamery otworkowej i ich oprzyrządowania, znajduje się w cieniu zestawu filtrów ultrafioletowych i termicznych (thermal and ultraviolet filters – TUVF) wbudowanych w osłonę termiczną sondy.

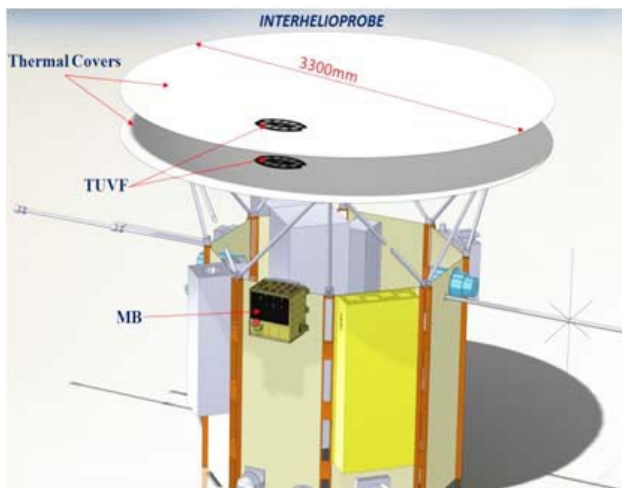


рис. 2. Размещение измерительного блока MB прибора ХЕМИКС в составе космического аппарата «ИНТЕРГЕЛИОЗОНД». Блок MB размещен в тени за фильтрами рентгеновского излучения (TUVF)

rys. 2. Położenie bloku pomiarowego (MB) przyrzędu ChemiX na pokładzie sondy międzyplanetarnej *IHP*. Blok MB umieszczony jest w cieniu filtrów termicznych (TUVF)

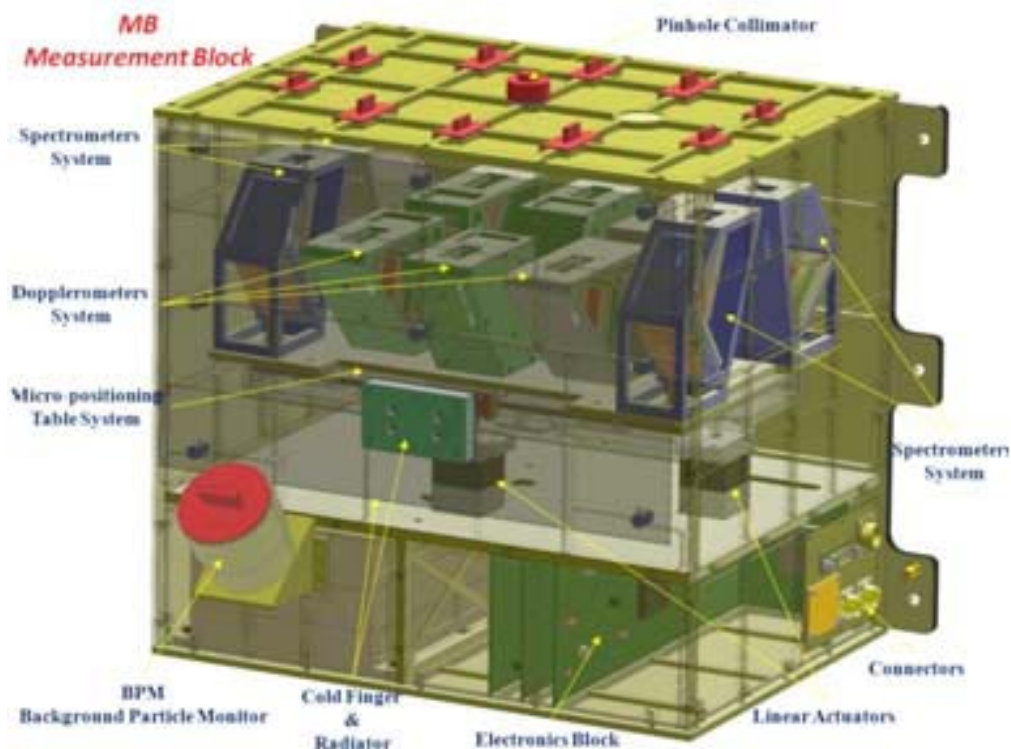


рис. 3. Детали конструкции измерительного блока (MB) прибора ХЕМИКС (см. описание в тексте)
 rys. 3. Szczegóły budowy bloku pomiarowego (MB) przyrządu ChemiX (patrz opisy w tekście)

На рисунке 3 представлены детали конструкции измерительного блока MB, особенно детально для десяти жестко связанных пар кристалл-ПЗС-матрица. Общая масса прибора (включая фильтры TUVF – Termo-Ultra-Violet Filters) 6 кг, энергопотребление 10 Вт, скорость телеметрии порядка 20 МБ/сутки. Размеры блока MB, который размещается в тени рентгеновских фильтров TUVF под тепловым экраном на расстоянии примерно 1 м от него, составляют 30×30×24 см.

В состав измерительного блока входят следующие системы:

- **монитор радиационных частиц фона BPM** (background particle monitor system); Это полуавтоматическая система, предназначенная для

Rysunek 3 przedstawia szczegóły bloku pomiarowego, a zwłaszcza ułożenie 10 układów kryształ-detektor czyli 10 torów pomiarowych spektrometru. Całkowita masa przyrządu (włączając blok filtrów TUVF) wynosi 6 kg, średni pobór energii to 10 W, a prędkość transmisji danych przekroczy ponad 20MB/dobę. Blok MB ma wymiary 30×30×24 cm i jest umieszczony ok 1 m za zestawem filtrów TUVF.

W skład bloku pomiarowego CHEMIXa wchodzi:

- **monitor naładowanych cząstek tła** (background particle monitor system – BPM). System BPM to pół-autonomiczny moduł, którego głównym zadaniem jest ochrona delikatnych części elektroniki detektorów przed wpływem obecności „w środowisku” wysokoenergetycznych,

защиты чувствительных электронных частей прибора (электроника, детекторы) от пагубного влияния потоков энергетических частиц, пронизывающих КА во время его прохождения через ударные волны, связанные с выбросами коронального вещества, или через потоки энергетических частиц, связанные со вспышками. Под воздействием энергетических частиц повышается уровень шума в детекторах, что значительно уменьшает точность определения рентгеновского непрерывного спектра и может привести к нарушению работоспособности систем управления прибором. В случае превышения допускаемых уровней по данным ВМР прибор ХЕМИКС будет частично или полностью отключаться на определенное время. Поскольку ВМР должен работать автономно, питание на него подается независимо от питания других частей прибора ХЕМИКС. ВМР будет не только измерять потоки энергетических частиц, но также определять энергетические спектры их отдельных составляющих (электроны, протоны, альфа-частицы и ионы легких ядер – до кислорода). Монитор ВМР разработан и изготовлен группой из Харьковского института радиоастрономии, возглавляемой д.ф.м.н. О.В. Дудником. Более детальное описание системы можно найти в работах [Dudnik et al., 2015, Dudnik et al., 2015].

- **пинхол-камера (Pinhole Collimator)** камера обскура с апертурой в 1 мм^2 – используется для получения в реальном времени изображений короны Солнца в мягком рентгеновском диапазоне. Изображения будут формироваться на ПЗС-матрицах (1024×256) после прохождения через тонкий гра-

наloaded чąstek. Strumień cząstek mierzony przez BPM może rosnać znacząco w trakcie przechodzenia sondy przez obłok naładowanych cząstek pochodzenia słonecznego (SEP), towarzyszących niektórym rozbłyskom lub koronalnym wyrzutom materii (CMEs). Dla szczególnie silnych zjawisk, strumienie naładowanych cząstek mogą spowodować uszkodzenie elektroniki instrumentu, zatem obserwacje BPM posłużą do określenia, czy należy w danej sytuacji wyłączyć instrument lub ograniczyć zakres prowadzonych pomiarów. Wzmoczony strumień cząstek przenikając osłony instrumentu i docierając do detektorów CCD w modułach spektrometru i dopplerometru będzie zakłócał pomiary powodując np. wzrost poziomu tła. BPM pomoże także zbadać wpływ naładowanych cząstek otoczenia promienistego na pomiary w określonych energiach. System BPM musi działać niezależnie od funkcjonowania pozostałych części przyrządu CHEMIX, w związku z czym BPM posiada niezależną linię zasilania. Oprócz pomiarów wartości strumieni energetycznych cząstek, BPM będzie mierzył również ich widma (niezależnie widma elektronów, protonów, cząstek alfa i jonów lekkich pierwiastków – do tlenu włącznie). System monitora cząstek został zaprojektowany i wykonany na Ukrainie, w Instytucie Radio-Astronomii, NANU w Charkowie przez grupę kierowaną przez dr. O.V. Dudnika. Bardziej szczegółowy opis BPM znajduje się w pracach [Dudnik et al., 2015, Dudnik et al., 2015].

- **kamera otwarkowa (pin-hole camera)** o aperturze ok. 1 мм^2 tworzyć będzie i obserwować w sposób ciągły rentgenowskie obrazy korony Słońca. Obrazy rejestrowane będą za pomocą detektora CCD (1024×256) po przejściu przez cienki filtr grafitowy, co pozwoli na detekcję

фитовый фильтр, что даст возможность наблюдения эффекта уярчения края диска и определения его положения, и, как следствие, привязки положения активных областей и вспышек к солнечным координатам. Угловое разрешение на получаемых изображениях будет составлять около 1 мин дуги. Этого достаточно для определения точного положения центров корональных активных областей. Бортовое программное обеспечение будет отслеживать положение и изменения яркости отдельных активных областей с целью обнаружения вспышек. В случае их обнаружения будут определены координаты явления, а система привода внутренней платформы с кристаллами наведет ось коллиматоров на вспыхивающую область. Предусмотрено также наведение оси прибора на заданную точку диска Солнца по команде с Земли;

- **подвижная следящая платформа (Micro-positioning Table System)**, на которой размещены все кристаллы с детекторами. Платформа будет наводить коллиматоры, кристаллы и детекторы спектрометра в направлении вспыхивающей области, мгновенно, в течение секунды от начала явления.

Все детекторы прибора ХЕМИКС (одиннадцать ПЗС-матриц 1024×256) изготовлены фирмой e2v; <http://www.e2v.com/>. Четыре детектора используются с кристаллами системы спектрального атласа, шесть детекторов в системе доплерометра и один предназначен для регистрации изображений, получаемых пинхол-камерой. Размеры пикселя на ПЗС-матрице: 26×26 мкм. Предусмотрено охлаждение детекторов пассивным методом с использованием охлаждающих труб,

эффекту tzw. pojaśnienia brzegowego. Obraz Słońca z wyraźnie obserwowanym pojaśnieniem brzegowym dysku pozwoli na wyznaczanie położenia obszarów o podwyższonej emisji we współrzędnych słonecznych. Rozdzielczość na obrazach wynosić będzie ok. 1 minuty łuku, co wystarczy, by oddzielić od siebie źródła emisji pochodzącej od indywidualnych obszarów aktywnych. Obrazy będą na bieżąco analizowane za pomocą algorytmów umieszczonych w komputerze pokładowym, co umożliwi śledzenie i wybór najbardziej interesujących do analizy widmowej źródeł, na które następnie zostaną nakierowane wszystkie sprzężone mechanicznie układy spektrometru. Standardowo wybierane będą najjaśniejsze obszary rentgenowskiej emisji korony słonecznej. Istnieć będzie również możliwość wyboru dowolnego innego obszaru obserwacji poprzez przesłanie odpowiedniej komendy z Ziemi.

- **ruchoma platforma śledząca**, na której umieszczono, wyjustowano i sprzęgnięto wszystkie 10 układów spektrometru. Ten układ tworzą zamocowane nieruchomo kryształy wraz z detektorami. Platforma naprowadzać będzie jednocześnie wszystkie układy na obszar rozbłysku w przeciągu sekundy od zaistnienia zjawiska.

- **układy dopplerometru**. Ważną część przyrządu stanowi nowatorski system kryształów i detektorów ustawionych w konfiguracji dopplerometru (DOP) [Sylwester et al., 1990; Sylwester et al., 2015]. System ten będzie umożliwiał rozróżnienie przesunięć linii spowodowanych ruchami wzdłuż kierunku widzenia od ruchów emitującej materii w polu widzenia kolimatora. Ruchy radialne rejestrowane będą w absolutnym układzie odniesienia, kalibrowanym z wykorzystania

подключенных к внешнему радиатору. Это обеспечит температуру работы ниже -20°C . При такой температуре тепловые шумы детекторов ниже значения, допускаемого для измерений. Система охлаждения разрабатывается в сотрудничестве с ФИАН (Москва).

Дополнительное оборудование прибора включает двойную систему фильтров TUVF, которая размещена впереди (как указывалось выше) на расстоянии 1 м от блока МВ. Эти фильтры устраняют всё нежелательное излучение (тепловое, жёсткое ультрафиолетовое), пропуская хорошо солнечную радиацию с длинами волн короче 10 \AA . Фильтры будут изготовлены из графитовых/графеновых фольг и будут размещены на двух поддерживающих рамках (из композитов), встроенных в конструкцию экрана тепловой защиты (Thermal Covers) КА (см. рис. 2).

Десять отдельных коллиматоров с угловым разрешением (FWHM) 3×3 угл. мин² размещаются непосредственно перед кристаллами. Коллиматоры в виде капилляров ограничивают поле зрения кристаллов до размеров выбранной активной области. Применение коллиматоров не допускает перекрытия спектров, формирующихся в разных активных областях, что значительно мешало интерпретации данных, полученных в предыдущих экспериментах.

Прибор ХЕМИКС будет управляться бортовым компьютером, изготовленным по технологии FPGA. Программное обеспечение будет выполнять следующие задачи:

- постоянный мониторинг активности в отдельных активных областях короны (измерения каждую секунду) с целью обнаружения вспышек;

нием wiedzy o rzucie prędkości satelity względem Słońca, a analiza zmian profili linii pozwoli na oszacowanie prędkości turbulentnych emitującej plazmy. Pomiarы przeprowadzane będą w trzech zakresach widma czułych na obecność plazmy w temperaturach charakterystycznych dla AR, słabych i silnych rozbłysków.

W przyrządzie CHEMIX wykorzystanych będzie 11 identycznych detektorów CCD firmy e2v (<http://www.e2v.com/>). Cztery z nich służyć będą do rejestracji widm tzw. Atlasu Widmowego (AW), sześć rejestrować będzie widma w sekcjach dopplerometru (DOP), a ostatni służyć będzie do rejestracji obrazów w kamerze otworkowej. Każdy z detektorów wyposażony jest w prostokątną matrycę o wymiarach 256×1024 pikseli. Piksele mają rozmiary $26 \mu\text{m} \times 26 \mu\text{m}$. Detektory będą chłodzone pasywnie poprzez system przewodów cieplnych (z ang. heat pipes) podłączony do zewnętrznego radiatora. Dzięki temu systemowi detektory będą pracować w temperaturze poniżej -20°C . System chłodzenia zostanie opracowany i przetestowany we współpracy z moskiewskim instytutem FIAN RAN.

W części przedniej przyrządu CHEMIX znajduje się system podwójnych filtrów termicznych i ultrafioletowych (TUVF). Składa się on z dwóch identycznych paneli, wykonanych z kompozytów węglowych, wbudowanych w przednią i tylną płytę osłony termicznej satelity w odległości ok. 1 m przed blokiem pomiarowym МВ (patrz rysunek 2). Głównym zadaniem filtrów jest zablokowanie promieniowania termicznego i EUV, a przepuszczenie promieniowania o długościach fal krótszych niż 10 \AA . Filtry wykonane będą z folii grafenowych lub grafitowych, umieszczonych na ramach wspierających, wykonanych również z kompozytów węglowych.

- активация нужных приводов, наведение на вспышку или другую интересную для измерений часть короны;
- бортовая обработка сигналов, сжатие информации, формирование телеметрических блоков;
- управление бортовой памятью;
- отслеживание состояния прибора, мониторинг температур в разных его частях, мониторинг напряжений и токов;
- управление отключением/включением питания и др.

Прибор должен работать после включения питания, с возможностью автоматического выключения в случае прохождения через сильные радиационные бури. Повторное включение происходит по команде с КА.

Предусматривается применение в приборе памяти большого объема (до 512 ГБ) с системой устранения ошибок. Вся информация, получаемая системами прибора, будет записываться в эту память, в том числе время регистрации фотонов (с точностью в 1 мс) и амплитуда сигнала. Из записанной информации в телеметрию будут передаваться только фрагменты, которые наиболее интересны с научной или технической точки зрения. Остальная информация будет сбрасываться в периоды хорошей телеметрической связи с КА. Данные, полученные прибором, будут общедоступными после их начальной обработки и предварительного анализа.

Прибор ХЕМИКС – это усовершенствованный брэгговский спектрометр с изогнутыми кристаллами, которые используются в качестве дисперсионных элементов. В состав прибора входят 10 кристаллов, отражен-

Дзiesięć oddzielnych kolimatorów w postaci systemu szklanych kapilar umieszczonych zostanie we wszystkich układach spektrometru, tuż przed kryształami. Kolimatory te o rozdzielczości kątowej (FWHM-pełna szerokość połówkowa transmisji) 3 minuty łuku \times 3 minuty łuku zawężają pole widzenia kryształów do wybranego, pojedynczego obszaru aktywnego. Obecność kolimatorów uniemożliwia nakładanie się widm formujących się w indywidualnych obszarach aktywnych obecnych jednocześnie na tarczy słonecznej. Takie nakładanie się widm znacznie utrudniało interpretację danych we wcześniejszych eksperymentach, np. w przyrządzie RESIK i BCS na *Yohkoh*.

Funkcjonowanie przyrządu CHEMIX sterowane będzie za pomocą odpowiednich algorytmów przechowywanych w pamięci komputera pokładowego. Układy komputera będą wykonane w technologii FPGA z zachowaniem pełnej redundancji. Ważną częścią komputera będzie procesor wyposażony w zestaw programów służących do:

- stałego (co sekundę) monitorowania aktywności rentgenowskiej indywidualnych obszarów aktywnych celem wykrycia rozbłysków,
- aktywacji silników w ruchomych częściach instrumentu oraz naprowadzania sekcji spektrometrów na obszar rozbłyskowy,
- przetwarzania, kompresowania i formatowania danych, w sposób wymagany przez system telemetryczny sond,
- zarządzania pamięcią pokładową,
- śledzenia statusu urządzenia (tzw. housekeeping), w tym monitorowania temperatur w różnych jego częściach, monitorowanie napięć i prądów,
- kontroli włączania/wyłączania zasilania podukładów i inne.

ное излучение от которых в диапазоне мягкого рентгеновского излучения попадает на 10 отдельных ПЗС-матриц. Четырьмя кристаллами непрерывно перекрывается спектральная область 1,5–9 Å таким образом, что спектры перекрываются на концах что будет способствовать хорошей взаимной относительной калибровке. Спектральное разрешение этой четырехкристалльной системы так называемого спектрального атласа (SA) в 5–7 раз превышает разрешение, достигнутое в приборе РЕСИК (RESIK). Ожидаемое в приборе ХЕМИКС отношение сигнала к шуму будет также выше в 3–5 раз, чем в приборе РЕСИК, что даст возможность уверенно определять уровень непрерывной эмиссии даже для бесвспышечных активных областей. Отдельную часть прибора составляет система так называемого Доплерометра (DOP) [Sylwester et al., 1990; Sylwester et al., 2015], позволяющего проводить измерения радиальной составляющей скорости плазмы по отношению к объекту. Используя известную величину проекции вектора орбитальной скорости движения КА по отношению к источнику рентгеновского излучения будет возможна абсолютная калибровка зависимости спектральных сдвигов от скорости. Измерения будут проводиться в трех участках спектра, характерных для температуры плазмы в АО, в слабых и сильных вспышках, соответственно. В диапазоне спектров мягкого рентгена, перекрываемых системами SA и DOP, находятся сотни эмиссионных линий, излучаемых тяжелыми элементами, примесями оптически тонкой горячей плазмы короны. Уширения и временные изменения профилей этих

Прzewiduje się stałą pracę przyrządu od momentu włączenia zasilania z możliwością automatycznego wyłączenia w przypadku pojawienia się silnych strumieni cząstek tła promienistego. Powtórne włączenie nastąpi na komendę z komputera sondy.

Przewiduje się zastosowanie w urządzeniu pamięci stałych RAM o dużych objętościach (do 512 GB) z systemem eliminacji błędów. Przechowywane w tej pamięci będą wszystkie informacje otrzymywane z zewnątrz urządzenia oraz informacje pojawiające się w instrumencie, głównie dane o czasie rejestracji każdego fotonu (z dokładnością do 1 milisekundy) i amplitudzie indukowanego sygnału. Do telemetrii przekazywane będą jedynie fragmenty zapisanych informacji, te najbardziej interesujące z naukowego lub technicznego punktu widzenia. Reszta danych będzie przesyłana „na Ziemię” w okresach dobrej radio-widoczności satelity ze stacji telemetrycznych dalekiego zasięgu. Przekazane dane zostaną udostępnione publicznie po przeprowadzeniu ich wstępnej redukcji i analizy.

Spektrometr prowadzić będzie obserwacje w zakresie 1,5 Å – 9 Å w czterech, nieco zazębiających się przedziałach widmowych. Rozdzielczość widmowa tego systemu (tzw. atlasu widmowego – AW) będzie 5–7 razy lepsza niż ta, jaką uzyskano w instrumencie RESIK. Dodatkowo, oczekiwany stosunek sygnału do szumu w przypadku widm AW będzie także 3–5 razy korzystniejszy, umożliwiając wiarygodne pomiary poziomu widma ciągłego nawet dla spokojnych obszarów aktywnych poza rozbłyskami. W zakresie widm miękkiego promieniowania rentgenowskiego objętych pomiarami AW i DOP znajdują się setki linii emitowanych w optycznie cienkiej, gorącej plazmie korony.

эмиссионных линии дадут возможность изучения турбулентного состояния плазмы в импульсной фазе вспышек. По информации на сегодняшний день, прибор ХЕМИКС – это единственный брэгговским спектрометр, который будет проводить наблюдения солнечной короны в 25-м и 26-м циклах солнечной активности.

На рис. 4 указаны детали конструкции одного из каналов системы SA и схема взаимного размещения кристаллов в блоке Спектрального атласа (SA).

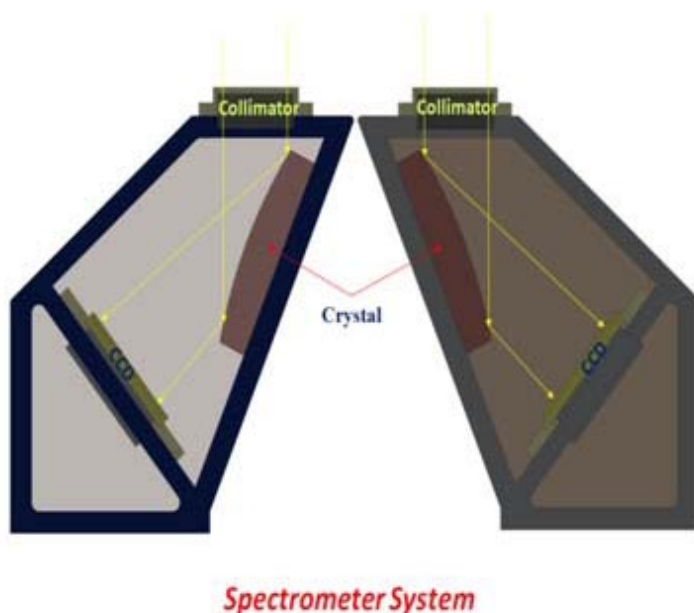


рис. 4. Детали конструкции одного из каналов системы SA и схема взаимного размещения кристаллов в блоке Спектрального атласа (SA)

rys. 4. Szczegóły konstrukcji par kanałów systemu AW

В каналах спектрального атласа прибора ХЕМИКС будет проводиться регистрация полных спектров в диапазоне $1,5\text{--}9,0 \text{ \AA}$ с использованием четырех (отдельных) кристаллов, «сопряжённых» с четырьмя ПЗС-матрицами. Для того, чтобы выполнить следующие принципиальные условия:

Poszerzenie i zmiany czasowe profili tych linii dają możliwość badania turbulencji plazmy w fazie impulsowej rozbłysków.

Na rysunku 4 przedstawiono szczegóły konstrukcji par kanałów systemu AW. Schemat wzajemnego rozmieszczenia kryształów i detektorów w jednej z dwóch sekcji tzw. atlasu widmowego (AW) wraz z pokazanym przebiegiem promieni (żółte linie) dla dwóch kanałów. W przypadku dopplerometru, pokazanym na następnym rysunku, kryształy w obu kanałach są identyczne.

Spektrometr będzie prowadzić obserwacje przy użyciu czterech kryształów (dwie pary jak na rysunku 4). Kryształy te zostały wygięte cylindrycznie tak, by uzyskać żądane promienie krzywizny i (związany z geometrią układu kryształ-detektor) zakres widmowy.

Promieniowanie odbite przez każdy z kryształów pada na oddzielny detektor

- спектральная область 1,5–9 Å должна полностью перекрываться наблюдениями,
- четыре спектральные субдиапазона должны перекрывать друг друга по краям при сильных эмиссионных линиях;
- отраженные лучи должны попадать на ПЗС-матрицы приблизительно под прямым углом;
- длина волн характерного рентгеновского излучения материала кристаллов не должна попадать в измеряемый участок спектра,
- была разработана специальная программа типа «слежения лучей». С использованием этой программы проведен анализ десятков вариантов размещения кристаллов относительно ПЗС-матриц и оптической оси прибора. Выбран вариант, в котором кристаллам кремния, кварца, КАР и КДР соответствуют спектральные промежутки: 1,500÷2,713 Å; 2,700÷4,304 Å; 4,290÷5,228 Å и 5,200÷8,800 Å, соответственно. Более детальные данные по отдельным спектральным каналам прибора приведены в таблице.

Секция рентгеновского доплерометра (DOP) прибора ХЕМИКС состоит из трех двойных пар жестко связанных изогнутых кристаллов и ПЗС-матрицы. Дисперсионные элементы изготовлены из идентичных кристаллов, изогнутых таким же образом; это значит, что они не отличаются друг от друга, кроме противоположного направления дисперсии. Кристаллы и радиусы кривизны подобраны таким образом, чтобы перекрывать области спектров вокруг линий сильно ионизованных элементов Fe (~1,85 Å), Ca (~3,2 Å) и Ar (~3,9 Å).

CCD. Geometrie poszczególnych układów oraz zakresy widmowe poszczególnych układów kryształ-detektor wyznaczano przy użyciu specjalnie opracowanego oprogramowania, stworzonego na potrzeby eksperymentu i uwzględniającego wypełnienie następujących podstawowych warunków:

- zakres widmowy 1,5–9 Å powinien być obserwowany w sposób nieprzerwany,
- cztery podzakresy widmowe systemu AW powinny się częściowo zazębiać. Zazębianie powinno zachodzić w okolicach silnych linii emisyjnych,
- promienie odbite od kryształów powinny padać na matryce CCD w przybliżeniu pod dużym kątem bliskim kąta prostego,
- długość fali promieniowania charakterystycznego materiału, z którego wykonany jest monokryształ (fluorescencja), nie powinna przypadać w zakresie pomiarowym widma danego układu.

Spośród setek wariantów, przeanalizowanych za pomocą tego programu, wybrano wariant optymalny, w którym wykorzystuje się jako elementy dyspersyjne kryształy krzemu, kwarcu, КАР oraz КДР (patrz Tabela 1). W wybranym wariacie mierzone będą widma z zakresu 1,500–2,713 Å, 2,700–4,304 Å, 4,290–5,228 Å i 5,200–8,800 Å. Pozostałe dane charakteryzujące poszczególne układy spektralne przyrządu przedstawiono w tabeli.

Секция доплерометру рентгеновского входящая в состав ХЕМИХа składa się z trzech par układów kryształ-detektor (jak na rysunku 3). W każdej parze oba kryształy są identyczne, układy różnią się jedynie przeciwnymi kierunkami dyspersji. Kryształy i ich promienie krzywizny dobrano tak, aby obserwować widma wokół linii wysoko zjonizowanych pierwiastków: Fe (~1,85 Å), Ca (~3,2 Å) i Ar (~3,9 Å). Szczegóły konstrukcji układów w parach podano w tabeli (oznaczenia 6÷10).

Спектральные каналы прибора ХЕМИКС.
Charakterystyki wszystkich układów spektralnych przyrządu CHEMIX

channel N° (crystals' number)	crystal	diffracting plane	2d [Å] (at -20°C)	wavelength Range [Å]	average spectral resolution [mÅ/pix]	curvature radius [mm]	crystal length [mm]	crystal width [mm]
спектральные каналы системы SA spectrometer channels AW								
1 (1)	Si	111	6,271	1,500–2,713	1,41	176,000	46,5	10,0
2 (1)	Quartz	10_10	8,514	2,700–4,304	1,82	166,729	44,8	10,0
3 (1)	KDP	011	10,185	4,290–5,228	0,98	410,425	53,5	10,0
4 (1)	KAP	001	26,64	5,200–8,800	4,20	364,731	61,7	10,0
спектральные каналы системы доплерометра dopplerometer channels DOP								
5, 6 (2)	LiF	022	2,848	1,835–1,949	0,12	650,00	46,1	10,0
7, 8 (2)	Si	111	6,271	3,150–3,324	0,11	2500,0	58,2	10,0
9, 10 (2)	Si	111	6,271	3,900–4,080	0,19	1000,0	47,0	10,0

На рис. 5 представлена схема системы доплерометра. Излучение, попадая на два цилиндрически изогнутых элемента идентичного монокристалла C1 и C2, вследствие Брэгговской дифракции отражается на два детектора D1 и D2 (ПЗС-матрицы). Фиолетовые стрелки (вверх) указывают направление возрастания длин волн на детекторах. В случае трансверсального перемещения источника (вспышки) в плоскости дисперсии (от точки А к точке В) попадающие на детекторы фотоны от источника будут перемещаться в противоположные стороны на обеих детекторах (показано зелеными стрелками). В случае, когда источник не меняет положения, но плазма движется в направлении к наблюдателю, спектральная линия смещается в коротковолновую сторону из-за эффекта Доплера, в направлении вниз на обоих детекторах. Таким способом становится возможным разделение обоих эффектов и определение как доплеровских сдвигов, так и перемещения источника.

Na rysunku 5 przedstawiono schemat funkcjonalny systemu Dopplerometru. Dwa cylindrycznie wygięte kryształy C₁ i C₂ powodują dyfrakcję padającego promieniowania rentgenowskiego, emitowanego początkowo w położeniu A na powierzchni Słońca. Pozycje D₁ i D₂, gdzie rejestrowana jest na detektorach emisja o danej długości fali, określona jest przez prawo Bragga $\lambda = 2d \sin \theta$. Purpurowe strzałki (w górę na rysunku) wskazują kierunek wzrostu długości fal rejestrowanych na obu detektorach. W przypadku przesuwania się źródła emisji z położenia A do położenia B (w kierunku dyspersji kryształu) pozycja, w której rejestrowana jest dana długość fali, na obu detektorach przesuwają się w przeciwnych kierunkach, jak to pokazano przy użyciu zielonych strzałek. W przypadku promieniowania emitowanego stale w położeniu A, ale przez plazmę poruszającą się radialnie w kierunku obserwatora, linia widmowa ulega przesunięciu Dopplerowskiemu w stronę mniejszych długości fali. Rejestrowana pozycja linii jest w tym przypadku przesunięta w tym samym kierunku (w dół) w obu detektorach. Dzięki temu możemy rozróżnić efekty wywołane przez ruch poprzeczny plazmy na dysku Słońca od przesunięć dopplerowskich linii.

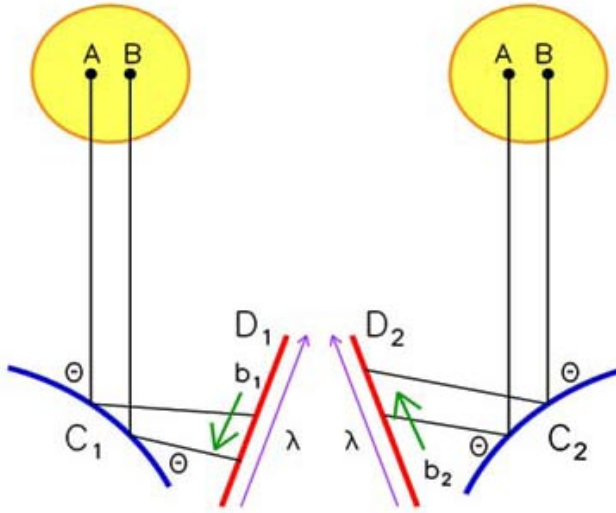


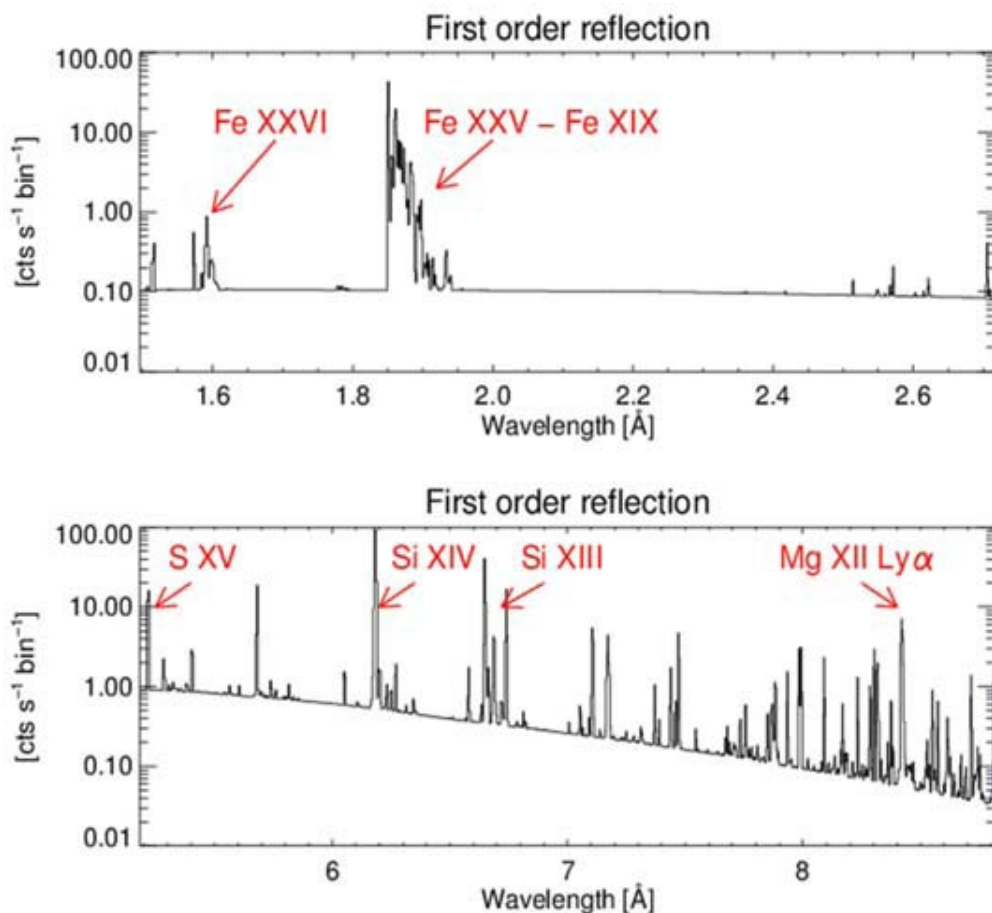
рис. 5. Наглядная схема системы доплерометра (DOP)
 rys. 5. Schemat funkcjonalny dopplerometru (DOP)

В системе DOP как эмиссионные линии, так и непрерывный спектр будут измеряться с высоким спектральным разрешением, особенно вблизи перигелия. Тогда все потоки излучения, приведенные на рис. 6, будут на порядок выше.

На рис. 6 указаны синтетические спектры, которые будут получаться в каналах 1 и 4 системы SA. Вычисления спектров проводились с использованием атомного кода CHIANTI-7 (<http://www.chiantidatabase.org>). Принимались следующие значения температуры и меры эмиссии: $T_e \approx 18,7$ МК, $EM \approx 5,6 \cdot 10^{49}$ см⁻³, соответствующие рентгеновской вспышке балла M5.0. На этом этапе моделирования пренебрегалось влиянием трансмиссии коллиматора и эффективностью регистрации фотонов ПЗС-матрицами. Эти величины не меняют существенным образом результаты моделирования.

W systemie dopplerometru, widma, zarówno w liniach jaki i kontinuum, będą rejestrowane z bezprecedensową rozdzielczością, szczególnie w momencie, gdy satelita znajdować się będzie w pobliżu peryhelium. Wówczas wszystkie rejestrowane strumienie będą co najmniej o rząd większe niż te pokazane na rysunku 6.

Rysunek 6 przedstawia syntetyczne, tzn. wyliczone, widma rentgenowskie, takie, jakie spodziewamy się zaobserwować w kanałach #1 i #4 systemu AW. Widma liczone przy wykorzystaniu kodu widmowego CHIANTI-7 (<http://www.chiantidatabase.org>). Do wyliczeń przyjęto typowe wartości charakteryzujące warunki fizyczne w plazmie rozbłysku klasy GOES M5, tj. temperatura $T_e = 18,7$ МК i miara emisji $EM = 5,6 \cdot 10^{49}$ cm⁻³. Na obecnym etapie symulacji pominięto efekty związane z wpływem funkcji transmisji kolimatora i efektywnością rejestracji fotonów przez detektor CCD. Wpływ pominiętych efektów nie zmienia znacząco wyników modelowania.



rys. 6. Modelne spektry w kanałach 1 (*верхняя панель*) i 4 (*нижняя панель*) системы спектрального атласа (SA), вычисленные для условий вспышки балла M5.0 на расстоянии КА в 1 а.е. Обозначены основные линии отдельных элементов, соответствующие разным степеням ионизации

rys. 6. Przykłady symulacji widm rejestrowanych spektrometrem CHEMIX w przypadku obserwacji Słońca z odległości 1 j.a. *U góry:* widma w kanale 1 z dielektronowymi liniami satelitarnymi jonów Fe XXV i Fe XXIV. Charakterystyczna temperatura formowania się to ok. 15–30 MK.

Na dole: widma w kanale 4 zawierającym linie wysoko-zjonizowanych jonów Si, S i Mg. Charakterystyczna temperatura formowania się to ok. 2–30 MK

Определение химического состава короны принципиально важно для исследований процессов сепарации разных ионов в плазме (первый потенциал ионизации FIP), для вычислений полного потока излучения от Солнца, а также для корректной интерпретации гелиосейсмологических наблюдений.

Przeprowadzone obliczenia czułości widmowej przyrządu CHEMIX wskazują na to, że na podstawie mierzonych strumieni w liniach i widmie ciągłym możliwe będzie wyznaczenie obfitości najważniejszych pierwiastków z dokładnościami przewyższającymi te, które charakteryzują dokładności pomiarów naziemnych

Выполненные нами вычисления спектральной эффективности прибора ХЕМИКС показывают, что его измерения позволят определять содержание в солнечной короне основных примесей с более высокой точностью, чем это достигается наземными измерениями. Это даст новый импульс исследованиям роли эффекта FIP в процессе сепарации ионных примесей между фотосферой и короной. Кроме определения содержания в солнечной короне отдельных элементов, измерения, проводимые прибором ХЕМИКС, дадут информацию об отношениях интенсивностей излучения диэлектронных спутников к интенсивности соответствующих прямо возбуждаемых переходов. Так как спутничные линии возбуждаются вследствие процессов диэлектронной рекомбинации (DE), их интенсивность зависит от присутствия электронов, энергия которых точно совпадает с энергией данного процесса DE. Спутничных линий в спектральной области 1,5–9 Å довольно много (сотни), они соответствуют переходам с $n=2, 3, \dots, 10$ для элементов Mg–Ni. Их резонансные энергии перекрывают область 1–10 кэВ довольно густо, в связи с чем можно будет на основе измерения их относительных интенсивностей определять функции распределения электронов по энергиям и их отличие от распределения Максвелла.

Для анализа спектров, регистрируемых прибором ХЕМИКС, будут использоваться различные пакеты атомного кода CHIANTI, с помощью которых возможно определение величин следующих физических параметров:

- тепловая/турбулентная ширина линий;
- радиальные и трансверсальные движения плазмы вспышек в разных температурных режимах в отдельных линиях ионов Si, S, Ar, Ca, Fe;

в предziale optycznym. Przewidywane wyniki stworzą podstawę do szczegółowego zbadania roli postulowanego efektu FIP, który przyczyniać się ma do powstawania różnic obfitości między strukturami fotosfery i korony Słońca.

Oprócz możliwości precyzyjnego określenia obfitości pierwiastków, pomiary prowadzone za pomocą przyrządu CHEMIX dostarczą bogatych informacji o stosunkach natężeń linii. Szczególnie ważne będą ilorazy natężeń tzw. satelitów (formujących się w procesach rekombinacji di-elektronowych) i linii wzbudzanych wprost (zderzeniowo). Wzbudzenie linii satelitarnych jest procesem rezonansowym i zachodzi dla elektronów, których energia pokrywa się ściśle z energią procesu rekombinacji di-elektronowej. Linii satelitarnych w widmie z zakresu 1,5 Å – 9 Å jest niezwykle dużo, odpowiadają one przejściom z poziomów wzbudzonych o głównej liczbie kwantowej $n = 2, 3, \dots, 10$ dla jonów pierwiastków od Mg do Ni. Ich energie rezonansowe obejmują na tyle gęsto zakres energii 1–10 keV wzbudzających elektronów, że na podstawie względnych intensywności tych linii możliwe będzie po raz pierwszy określenie kształtu profili funkcji rozkładu elektronów po energiach oraz badanie ewentualnych odchyłeń tych rozkładów od rozkładu Maxwella.

Do analizy otrzymanych widm zastosowane zostaną najnowsze pakiety odpowiednich obliczeń atomowych, w tym kodu CHIANTI. Z ich pomocą wyznaczone będą wielkości następujących parametrów charakteryzujących warunki fizyczne w obszarze formowania się widm:

- termiczna i turbulentna szerokość linii, oraz ich odpowiednie zmiany z czasem;
- ruchy plazmy rozblyskowej w różnych zakresach temperatur (radialne i po-

- распределение плазмы по температурам (так называемая дифференциальная мера эмиссии, DEM);
- распределение возбуждающих электронов по энергиям.

Так как наблюдения будут проводиться с двух объектов под разными углами зрения, станет возможным получение информации о полном векторе скорости направленных движений плазмы. Дополнительно для анализа будет использоваться информация, полученная с других космических аппаратов, например SOLAR ORBITER, и тех, которые будут находиться на околоземных орбитах, а также от наземных наблюдений (в оптическом и радиодиапазонах).

Конструкция прибора ХЕМИКС разработана во Вроцлавской лаборатории физики Солнца ЦКИ ПАН в международном сотрудничестве.

Разработчики прибора ХЕМИКС благодарны всем лицам и организациям в странах-участницах за возможность размещения прибора ХЕМИКС на борту солнечно-гелиосферной аппарата «ИНТЕРГЕЛИОЗОНД» и за финансовую поддержку работ над проектом. В особенности благодарим Польский Народный Центр по исследованиям (NCN) (грант No.UMO-2011/01/M/ST9/05878).

przeczne), w liniach jonów Si, S, Ar, Ca, Fe;

- rozkład plazmy po temperaturach (tzw. różniczkowa miara emisji, DEM);
- rozkład elektronów po energiach.

Ponieważ obserwacje prowadzone będą z dwóch sond pod różnymi kątami widzenia, można będzie wyznaczać pełny wektor prędkości ruchów plazmy w indywidualnych zjawiskach. Dodatkowo, przy interpretacji wyników uwzględniane będą informacje uzyskane z innych misji, na przykład *Solar Orbiter* i tych znajdujących się na niskich orbitach wokół Ziemi, a także obserwacji naziemnych (w zakresach optycznym i radiowym).

CHEMIX konstruowany jest w Zakładzie Fizyki Słońca CBK PAN we współpracy z międzynarodowym zespołem badawczym.

Konstruktorzy dziękują wszystkim osobom i organizacjom w krajach uczestniczących za możliwość umieszczenia przyrządu CHEMIX na pokładzie stacji międzyplanetarnej projektu *INTERHELIOPROBE* oraz za wsparcie finansowe prac nad projektem.

W szczególności dziękujemy polskiemu Narodowemu Centrum Nauki (NCN) za objęcie przeprowadzonych prac grantem 2011/01/M/ST9/05878.

ЛИТЕРАТУРА

- [Kuznetsov et al., 2014] *Kuznetsov V., Zelenyi L.* The Interhelioprobe Mission for Solar and Heliospheric Studies//In: 40th COSPAR Scientific Assembly, COSPAR Meeting 40. (2014). P. 1721.
- [Grineva et al., 1973] *Grineva Yu. I.; Karev V.I.; Korneev V.V.; Krutov V.V.; Mandelstam S.L.; Vainstein L.A.; Vasilyev B.N.; Zhitnik I.A.* Solar X-Ray Spectra Observed from the «INTERCOSMOS-4» Satellite and the «Vertical-2» Rocket // *Solar Physics.* (1973). V. 29. P. 441-446.
- [Doshchek et al., 1979] *Doshchek G.A., Kreplin R.W., Feldman U.* High-resolution solar are X-ray spectra // *Astrophys. J. Lett.* (1979). V. 233, L. 157.

BIBLIOGRAFIA

- [Tanaka et al., 1982] *Tanaka K., Watanabe T., Nishi K., Akita K.* High-resolution solar X-ray spectra obtained with rotating spectrometers on the HINOTORI satellite // *Astrophys. J. Lett.* (1982). V. 254. L. 59.
- [Acton et al., 1980] *Acton L.W., Finch M.L., Gilbreth C.W., Culhane J.L., Bentley R.D., Bowles J.A., Guttridge P., Gabriel A.H., Firth J.G., Hayes R.W.* The soft X-ray polychromator for the Solar Maximum Mission. // *Solar Phys.* (1980). V. 65. P. 53
- [Culhane et al., 1991] *Culhane J.L., Hiei E., Doschek G.A., Cruise A.M., Ogawara Y., Uchida Y., Bentley R.D., Brown C.M., Lang J., Watanabe T., Bowles J.A., Deslattes R.D., Feldman U., Fludra A., Guttridge P., Henins A., Lappington J., Magraw J., Mariska J.T., Payne J., Phillips K.J.H., Sheather P., Slater K., Tanaka K., Towndrow E., Trow M.W., Yamaguchi A.* The Bragg Crystal Spectrometer for SOLAR-A // *Solar Phys.* (1991). V. 136. P. 89.
- [Antonucci et al., 1989] *Antonucci E.* Solar flare spectral diagnosis – Present and future, IAU, Colloquium on Solar and Stellar Flares, 104th, Stanford, CA, Aug. 15–19, 1988 // *Solar Physics* (1989). (ISSN 0038-0938). V. 121, 31–60; Discussion. P. 459,
- [Plocieniak et al., 2002] *Plocieniak S.; Sylwester J.; Kordylewski Z.; Sylwester B.* Determination of wavelengths and line shifts based on X-ray spectra from Diogenes, “Solar variability: from core to outer frontiers” // *The 10th European Solar Physics Meeting, 9–14 September 2002, Prague, Czech Republic* // Ed. A. Wilson. ESA SP-506, Noordwijk: ESA Publications Division (ISBN 92-9092-816-6). (2002). V. 2. P. 963–966.
- [Parmar et al., 1984] *Parmar A.N., Culhane J.L., Rapley C.G., Wolfson C.J., Acton L.W., Phillips K.J. H., Dennis B.R.* SMM observations of K-alpha radiation from fluorescence of photospheric iron by solar flare X-rays // *Astrophysical Journal.* (1984). (ISSN 0004-637X). V. 279. P. 866–874.
- [Sylwester et al., 2015] *Sylwester B., Phillips K.J. H., Sylwester J., Kępa A.* RESIK Solar X-Ray Flare Element Abundances on a Non-isothermal Assumption. // *The Astrophysical Journal* (2015). V. 805. Article ID. 49. 8 p.
- [Dudík et al., 2014] *Dudík J., Del Zanna G., Mason H.E., Dzifčáková E.* Signatures of the non-Maxwellian κ -distributions in optically thin line spectra. I. Theory and synthetic Fe X–XIII spectra // *Astronomy & Astrophysics* (2014). V. 570. ID. A124. 23 p.
- [Laming et al., 2015] *Laming J.M.*: The FIP and Inverse FIP Effects in Solar and Stellar Coronae, <http://www.livingreviews.org/lrsp-2015-2>, doi: 10.1007/lrsp-2015-2.
- [Sylwester et al., 2015] *Sylwester J., Gaicki I., Kordylewski Z., Kowaliński M., Nowak S., Plocieniak S., Siarkowski M., Lang K.J.H., Brown J., Brown C.M., Doschek G.A., Kuznetsov V.D., Oraevsky V.N., Stepanov A.I., Lisin D.V.* RESIK: A Bent Crystal X-ray Spectrometer for Studies of Solar Coronal Plasma Composition // *Solar Phys.* (2005). V. 226. P. 45.
- [Dudnik et al., 2015] *Dudnik O.V., Kurbatov E.V., Tarasov V.O., Andryushenko L.A., Zajtsevsky I.L., Sylwester J., Bąkała J., Kowaliński M.* Background particle detector for the solar X-ray photometer CHEMIX of space mission Interhelioprobe : an adjustment of breadboard model modules // (ISSN 1561-8889) *Kosmichna Nauka I Tekhnologiya* (2015). V. 21. P. 3 (in Russian).
- [Dudnik et al., 2015] *Dudnik et al.* // *Радиофизика и радиоастрономия.* (2015). Т. 20. № 3. С. 247–260.

[Sylwester et al., 1990] *Sylwester J., Farnik F.* Diogeness – Soft X-ray spectrometer-photometer for studies of flare energy balance // *Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia.* (1990). V. 41. P. 149.

[Sylwester et al., 2015] *Sylwester J., Kordylewski Z., Płoceniak S., Siarkowski M., Kowaliński M., Nowak S., Trzebiński W., Stęślicki M., Sylwester B., Stańczyk E., Zawerbny R., Szaforz Ż., Phillips K.J.H., Farnik F., Stepanov A.* X-ray Flare Spectra from the DIOGENESS Spectrometer and Its Concept Applied to CHEMIX on the Interhelioprobe Spacecraft // *Solar Phys.* (2015) in press.

INTERHELIOPROBE (*IHP*), an analogue to the ESA *SOLAR ORBITER*, is the prospective Russian space solar observatory intended for in-situ and remote sensing investigations of the Sun and the inner heliosphere from a heliocentric orbit with a perihelion of about 65–70 solar radii. One of several instruments on board will be the Bragg crystal spectrometer CHEMIX which will measure X-ray spectra from solar coronal structures. Analysis of the spectra will allow the determination of the elemental composition in hot coronal sources like flares and active regions (AR). CHEMIX is under development at the Wrocław Solar Physics Division of the Polish Academy of Sciences Space Research Centre in collaboration with an international team. This paper gives an overview of the CHEMIX scientific goals and design preparatory to phase B of the instrument development.

РЕНТГЕНОВСКИЙ ТЕЛЕСКОП «СОРЕНТО»

руководитель проекта
с российской стороны:

С. Богачев

руководитель проекта
с польской стороны:

Т. Мрозек

Жесткий рентгеновский телескоп СОРЕНТО входит в комплекс научной аппаратуры, разрабатываемой в ФИАН им П.Н. Лебедева для солнечной обсерватории ИНТЕРГЕЛИОЗОНД. По своему устройству и принципу работы наиболее близким аналогом можно считать телескоп НХТ/Yohkoh [Kosugi et al., 1991]. В основе работы обоих инструментов лежит метод кодированной апертуры [Caroli E. et al., 1987; Fenimore, Cannon, 1978]. Данный метод заключается в использовании набора прозрачных и непрозрачных в рабочем спектральном диапазоне элементов, каждый из которых определенным образом модулирует первичный сигнал, разбивая его на Фурье-компоненты. Затем, с помощью преобразований Фурье, по компонентам восстанавливается первичное изображение [Narayan, Nityananda, 1986; Puetter, 1995; Metcalf et al., 1996]. Параметры элементов подбираются таким образом, чтобы итоговая система была чувствительна к угловому распределению падающего излучения.

При разработке таких приборов важнейшую роль играет моделирование прохождения излучения через оптическую систему. Во-первых, моделирование позволяет оптимизировать параметры элементов кодирующей апертуры. Вторая зада-

TELESKOP RENTGENOWSKI «SORENTO»

kierownik projektu
ze strony Rosji:

S. Bogaczew

kierownik projektu
ze strony Polski:

T. Mrozek

Teleskop twardego promieniowania rentgenowskiego SORENTO wchodzi w skład aparatury naukowej opracowywanej w Instytucie Fizyki AN Rosji im. P. N. Lebediewa (FIAN) na potrzeby międzyplanetarnego obserwatorium słonecznego INTERHELIOZOND. Ze względu na swoją konstrukcję i zasadę działania najbardziej zbliżonym do niego instrumentem był teleskop НХТ/Yohkoh [Kosugi et al., 1991]. Oba przyrządy działają wykorzystując zasadę апертуры кодowanej [Caroli E. et al., 1987, Fenimore, Cannon, 1978] Polega ona na użyciu naprzemiennych przezroczystych i nieprzezroczystych rentgenowsko elementów, z których każdy moduluje pierwotny sygnał mierząc jego składowe fourierowskie. Za pomocą odwrotnej transformacji Fouriera, z otrzymanych składowych można zrekonstruować oryginalny obraz [Narayan, Nityananda, 1986; Puetter, 1995; Metcalf et al., 1996]. Parametry elementów przesłaniających dobrane są w taki sposób, aby cały układ umożliwił dokładne odtworzenie przestrzennego rozkładu падаjącego promieniowania.

Przy opracowaniu konstrukcji teleskopów z апертурą кодowaną istotną rolę odgrywa modelowanie numeryczne przejścia promieniowania przez cały układ optyczny. Po pierwsze, modelowanie umożliwia optymalizację parametrów elementów апертуры кодowanej. Po drugie, dostarcza

ча заключается в создании модели, в рамках которой будет происходить само восстановление изображений. Причем такая модель должна учитывать все дефекты элементов кодирующей апертуры, которые неизбежно будут возникать при их изготовлении. Поскольку изображения строятся не прямым способом, а посредством математической обработки, точность их восстановления во многом зависит от точности модели.

Моделирование изображающей системы жесткого рентгеновского телескопа СОРЕНТО проводилось совместными усилиями сотрудников Физического института академии наук (ФИАН) им П.Н. Лебедева и Центра космических исследований Польской Академии наук (ЦКИ ПАН). Оба научных центра имеют богатый опыт проведения многочисленных космических экспериментов, а также обработки и интерпретации научных данных. Специалисты из ЦКИ ПАН разрабатывали аппаратуру и проводили анализ результатов в эксперименте РЕСИК [Sylwester J. et al., 2005] на борту орбитальной станции **КОРОНАС-Ф** [Ораевский, Собельман, 2002] и в эксперименте SphinX [Gburek et al., 2013] на спутнике **КОРОНАС-Фотон** [Kuzin et al., 2011]. ЦКИ ПАН накопил значительный опыт по обработке данных приборов HXT и RHESSI [Lin et al., 2002] в жестком рентгеновском диапазоне. Кроме того, польские специалисты принимают участие в разработке близкого по конструкции прибора STIX/Solar Orbiter [Vilmeret et al., 2014]. Участник проекта с российской стороны, ФИАН им П.Н. Лебедева, имеет почти 50-летний опыт проведения космических экспериментов. Всего за соответствующий период было вы-

нарządzia, które będzie wykorzystywane przy rekonstrukcji obrazów. Model numeryczny teleskopu powinien uwzględniać rozmieszczenie okien transmisji aпертуры oraz wszystkie jej дефекты, które w sposób nieunikniony pojawiają się podczas ich wytwarzania. W związku z tym, że obrazów nie otrzymujemy „wprost”, a rekonstruowane są one za pomocą metod matematycznych, dokładność procesu rekonstrukcji w istotny sposób zależy od precyzji modelu transmisji przyrządu.

Modelowanie transmisji układu obrazującego телескопу твардего промieniowania рентгеновского SORENTO prowadzone jest wspólnie przez pracowników FIAN i Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk (CBK PAN, oddział we Wrocławiu). Oba te ośrodki mają bogate doświadczenie w realizacji licznych eksperymentów kosmicznych, a także opracowywaniu nowych metod analizy i interpretacji danych naukowych. Specjaliści z CBK PAN opracowali instrumenty i analizowali dane w eksperymencie RESIK [Sylwester J. et al., 2005] na pokładzie satelity **KORNAS-F** [Ораевский, Собельман, 2002] i w eksperymencie SphinX [Gburek et al., 2013] na satelicie **KORNAS-Foton** [Kuzin et al., 2011]. CBK PAN posiada duże doświadczenie w analizie obserwacji твардего промieniowania рентгеновского z instrumentów HXT i RHESSI [Lin et al., 2002]. Ponadto, polscy specjaliści biorą udział w opracowaniu podobnego do SORENTO instrumentu STIX na misję misje międzyplanetarna Solar Orbiter [Vilmeret et al., 2014]. Rosyjski partner w projekcie, Instytut Fizyki im. P. N. Lebediewa, posiada ponad pięćdziesięcioletnie doświadczenie w prowadzeniu eksperymentów kosmicznych. Łącznie, w tym okresie, przeprowadzono tam ponad

полнено более 30 экспериментов на ракетах, спутниках, межпланетных и орбитальных станциях. В последние годы сотрудниками ФИАН подготовлены и успешно проведены эксперименты на трех спутниках серии **КОРОНАС**. В ФИАН имеется значительный опыт исследований в области спектральной диагностики корональной плазмы, созданы оригинальные методики обработки экспериментальных данных и их физической интерпретации.

1. ОПИСАНИЕ ПРИБОРА

Жесткий рентгеновский телескоп СОРЕНТО состоит из трех основных частей: рентгеновские фильтры, блок коллиматоров и блок детектора. На рис. 1 приведена 3d-модель прибора. Более подробно узлы описаны в соответствующих подразделах. Основные характеристики телескопа приведены в таблице.

trzydzieści eksperymentów na rakietach, satelitach, sondach międzyplanetarnych i stacjach orbitalnych. W ostatnich latach pracownicy FIAN opracowali i przeprowadzili eksperymenty na trzech satelitach z serii **KORONAS**. FIAN posiada również duże doświadczenie w prowadzeniu badań naukowych z obszaru diagnostyki widmowej plazmy koronalnej, stworzył oryginalne metody analizy danych eksperymentalnych i metody ich interpretacji fizycznej.

1. OPIS PRZYRZĄDU

Teleskop twardego promieniowania rentgenowskiego SORENTO zbudowany jest z trzech bloków konstrukcyjnych: tzn. filtrów rentgenowskich, układu kolimatorów i modułu detektorów. Na Rys. 1 przedstawiony jest przestrzenny model przyrządu. Dokładniejsze opisy poszczególnych układów są omówione w kolejnych podrozdziałach. Podstawowe parametry teleskopu uwidoczniiono w Tabeli .

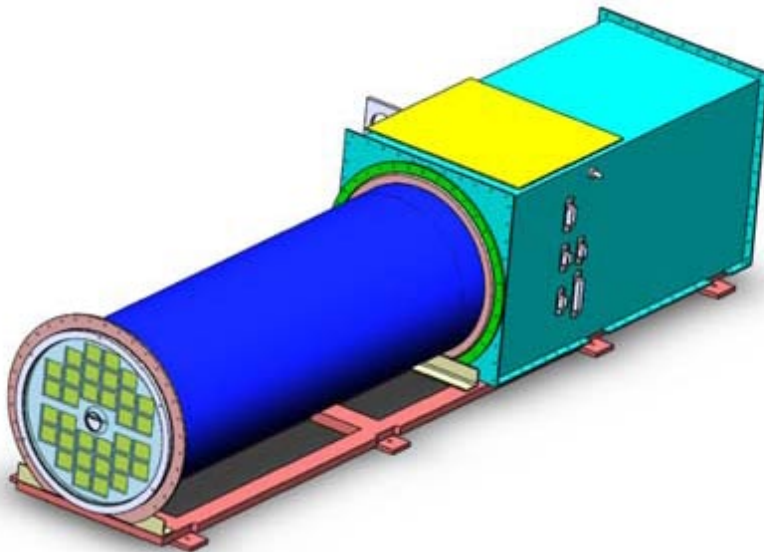


рис. 1. 3d-модель жесткого рентгеновского телескопа СОРЕНТО

rys. 1. Model teleskopu twardego promieniowania rentgenowskiego SORENTO

Основные характеристики жесткого рентгеновского телескопа COPEXTO
 Główne parametry teleskopu twardego promieniowania rentgenowskiego SORENTO

энергетический диапазон zakres energii	5–100 keV
поле зрения pole widzenia	1,5°
пространственное разрешение rozdzielczość kątowna	7''
временное разрешение rozdzielczość czasowa	0,1 сек
габариты rozmiary	Φ 200×1000 mm
масса masa	8 kg
телеметрия objętość transmitowanych danych	~50 MB/dobę

1.1. Рентгеновские фильтры

Рентгеновские фильтры предназначены для решения двух основных задач. Во-первых, они позволяют существенно уменьшить тепловую нагрузку на прибор за счет отражения и переизлучения падающего излучения видимого и инфракрасного диапазонов. Второе назначение фильтров заключается в подавлении потока мягкого рентгеновского излучения с энергией до ~5 кэВ. Фактически они играют роль первичных аттенуаторов. Необходимость их использования в таком качестве обусловлена тем, что большие потоки излучения в указанном диапазоне (в первую очередь во время солнечных вспышек) приводят к уменьшению времени жизни детектора.

Фильтры представляют собой два бериллиевых диска толщиной 2 и 1 мм, установленных во внешнем и внутреннем термоэкране космического аппарата. Термоэкраны выполнены из карбонопластика, размещены на освещенной части аппарата и предназначены для защиты приборов от перегрева

1.1. Układ filtrów rentgenowskich

Filtry rentgenowskie spełniają dwa podstawowe zadania. Po pierwsze, znacznie zmniejszają obciążenie cieplne przyrządu poprzez odbijanie i wypromieniowanie padającego promieniowania w zakresie widzialnym i podczerwonym. Po drugie, powstrzymują strumień fotonów miękkiego promieniowania rentgenowskiego o energii poniżej ~5 keV. W rzeczywistości spełniają one rolę pierwszych przesłon. Konieczność ich stosowania wynika z tego, że duże strumienie promieniowania w zakresie miękkim rentgenowskim (szczególnie podczas rozbłysków słonecznych) prowadzą do istotnego zwiększenia tzw. czasu martwego detektorów, co doprowadza do ich saturacji.

W przyrządzie SORENTO Filtry mają postać dwóch krążków wykonanych z folii berylowych o grubości 2 i 1 mm, umieszczonych w zewnętrznej i wewnętrznej części ekranu termicznego międzyplanetarnej sondy. Ekran termiczny wykonane z kompozytów węglowych umieszczone są na części sondy skierowanej na Słońce. Ich zadaniem jest uchronienie zespołu

в перигелии, на расстоянии ~ 60 солнечных радиусов от Солнца. Расстояние между внутренним экраном и блоком научной аппаратуры составляет 1000 мм. Внешний экран расположен на 305 мм выше внутреннего. В центре каждого из бериллиевых фильтров проделаны круглые отверстия для попадания видимого излучения в систему наведения, находящуюся в блоке коллиматоров.

1.2. Блок коллиматоров

Блок коллиматоров состоит из двух наборов вольфрамовых решеток толщиной 0,4 мм, размещенных на концах трубы из карбопластика на расстоянии 550 см, и из системы наведения. Передняя и задняя панель коллиматоров включает по 32 элемента, 30 из которых представляют собой двумерные решетки и состоят из эквидистантных непрозрачных в рентгеновском диапазоне перемычек и щелей. Решетки из переднего и заднего набора соосны и попарно формируют субколлиматор, выделяющий из излучения одну компоненту Фурье. Период и/или углы наклона верхней и нижней решеток немного отличаются друг от друга, что позволяет формировать на детекторе картину Муара. Два других субколлиматора предназначены для грубой оценки положения источника на Солнце и непрерывной регистрации фонового излучения, соответственно.

В блоке коллиматоров также размещена система наведения, позволяющая с высокой точностью определять координаты центра восстанавливаемого изображения. Система представляет собой камеру-

призрядов перед прогреванием в пeryhelium, czyli в odległości rzędu 60 promieni słonecznych od Słońca. Odległość między ekranem wewnętrznym a blokiem aparatury naukowej wynosi ok. 1 m. Zewnętrzny ekran znajduje się w odległości 305 mm od ekranu wewnętrznego. W środku każdego filtra berylowego znajduje się okrągły otwór, przez który przechodzi promieniowanie widzialne wpadające do klasycznego optycznego systemu naprowadzającego znajdujące się w bloku kolimatorów.

1.2. Blok kolimatorów

Blok kolimatorów składa się z dwóch zestawów siatek wolframowych o grubości 0,4 mm rozmieszczonych na dwóch końcach tuby, wykonanej z kompozytów węglowych. Siatki znajdują się w odległości 550 mm. Dodatkowym elementem jest układ orientacji „na Słońce”. Zarówno przednia jak i tylna z siatek składa się z 32 elementów, z których 30 jest złożonych z układu szczelin i słupków nieprzezroczystych w zakresie promieniowania rentgenowskiego. Siatki przednia i tylna są zgrane ze sobą i parami tworzą subkolimatory, które wyodrębniają z padającego promieniowania składowe fourierowskie. Niewielkie kąty skręcenia wokół osi prostopadłej siatek przednich i tylnych powodują powstanie na przedniej części detektorów prążków tzw. mory. Dwa pozostałe subkolimatory przeznaczone są do zgrubnego określenia położenia rozbłysku na tarczy słonecznej i ciągłej rejestracji promieniowania tła.

Elementem bloku kolimatorów jest również układ orientacji „na Słońce” umożliwiający, z dużą precyzją, określenie współrzędnych środka odtworzonego obrazu emisji rentgenowskiej na widomej tarczy Słońca. Układ orientacji zbudowany jest z tzw. kamery otworkowej z czte-

обскуру с четырьмя фотодиодами в качестве регистрирующих элементов. Путем сравнения сигнала на каждом из диодов можно вычислить положение центра Солнца.

1.3. Блок детектора

В состав блока детектора входит бортовой компьютер и 32 полупроводниковых детектора CdTe [Limousin O. et al., 2011; Michalowska A. et al., 2010]. Размер рабочей области каждого детектирующего элемента составляет $10 \times 10 \times 1$ мм³. Каждый детектор разделен на четыре одинаковых основных пикселя, которые, в свою очередь, состоят из трех субпикселей – двух больших и одного малого. Субпиксельная структура используется для увеличения динамического диапазона прибора. В отсутствие мощных вспышек, когда интенсивность излучения невысока, используются большие пиксели для увеличения количества отсчетов. Во время мощных вспышек с большим числом фотонов для предотвращения повышения мертвого времени детекторов используются малые пиксели.

В блоке детектора также установлены аттенюаторы для уменьшения потоков низкоэнергетического излучения. Они представляют собой набор алюминиевых полос, сдвигаемых механически и имеющих два крайних положения – точно над детекторами и между ними.

2. ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Как уже говорилось выше, SORENTO работает по принципу непрямого построения изображений путём Фурье-

рема диодами в роли элементов регистрирующих. Через порównywanie poziomu sygnału mierzonego przez każdą diodę można wyznaczyć dokładne położenie środka i rozmiary tarczy słonecznej w zakresie widzialnym.

1.3. Блок детекторów

W skład bloku detektorów wchodzi komputer pokładowy i 32 detektory półprzewodnikowe wykonane z kryształów CdTe [Limousin O. et al., 2011; Michalowska A. et al., 2010]. Wymiary tego aktywnego elementu detektora to $10 \times 10 \times 1$ mm³. Każdy detektor podzielony został na cztery piksele, z których każdy składa się z trzech subpikseli – dwóch dużych i jednego małego. Pikelizowanie detektora pozwala na zwiększenie zakresu dynamicznego instrumentu. W przypadku braku silnych rozbłysków, gdy tempo zliczeń jest niewielkie, wykorzystywane są duże piksele dla zwiększenia statystyki zliczeń. W przypadku silnych rozbłysków i dużej liczby padających fotonów aktywne pozostają jedynie małe piksele, co znacząco zmniejsza czas martwy detektorów.

W bloku detektorów zamontowane są także specjalne przesłony, które w razie potrzeby wysuwają się zmniejszając silnie strumień promieniowania w zakresie niższych energii z obserwowanego przedziału widma. Przesłony stanowią zestawy aluminiowych listew, poruszanych mechanicznie między dwoma położeniami – tuż nad detektorami (pozycja aktywna) i pomiędzy nimi.

2. ZASADA OBRAZOWANIA

Jak wspomniano, SORENTO działa według zasady obrazowania „nie-wprost” poprzez pomiar natężeń składowych

преобразований. Принцип заключается в измерении отдельных Фурье-компонент функции источника с помощью пар непрозрачных в рентгеновском диапазоне решеток (субколлиматоров), находящихся на большом расстоянии друг от друга. Каждый субколлиматор подавляет или пропускает излучение в зависимости от угла его падения. При получении большого количества таких компонент можно восстановить изображение [Michalowska A. et al., 2010; Hurford G. et al., 2012; Hurford G. et al., 2002].

В СОРЕНТО задняя и передняя решетки субколлиматоров отличаются периодами и/или углами наклона перемычек, что позволяет получать картины Муара, в которых закодирована информация о направлении падающего излучения. Крупные пиксели детектора позади каждой пары решеток регистрируют распределение интенсивности в картине Муара. После вычисления разницы количества отсчетов в каждом из пикселей можно определить одну Фурье-компоненту изображения. При этом аналогичная информация, поступающая с малых субпикселей детектора и содержащая данные о тонкой структуре картины Муара, не требуется. Пространственное разрешение восстанавливаемых изображений определяется только периодом решеток и расстоянием между ними. Чем меньше период и больше расстояние, тем выше пространственное разрешение прибора. Относительное значение периода и угла передней и задней решеток в пределах одного субколлиматора определяет период и ориентацию картины Муара – они подобраны таким образом, чтобы соответствовать размеру детектора и ориентации его пикселей.

Вследствие ограниченного количества пар решеток и, соответственно,

Fouriera. Складовые выдвигаются при использовании попеременно прозрачных и непрозрачных (в диапазоне рентгеновском) пар решеток (субколлиматоров) установленных в большей отдаленности. Индивидуальная пара субколлиматоров пропускает или пропускает излучение под различными, точно подобранными углами. Получая много таких складовых для выбранных углов можно сделать реконструкцию численной картины источника рентгеновского [Michalowska A. et al., 2010; Hurford G. et al., 2012; Hurford G. et al., 2002].

В СОРЕНТО ориентация передней и тыльных решеток субколлиматора различается немного углами скрутки, что позволяет получить образ, в котором закодирована информация о направлении падающего излучения. Большие пиксели детектора установлены за каждой парой решеток регистрируют распределение интенсивности в картине Муара. После вычисления разницы количества отсчетов в каждом пикселе даного детектора можно определить индивидуальную для данной пары одну складовую фурьеовскую картину. Различительность пространственная реконструируемой картины для данной пары решеток определяется через тов. шаг решетки и отдаленность между ними. Чем меньше шаг решетки и большая отдаленность между ними тем большая различительность пространственная прибора. Относительные значения шага и угла скрутки передней и тыльной решетки даного субколлиматора определяют период и ориентацию образа Муара – они подобраны относительно размера и ориентации пространственной пиксели в такой способ чтобы как лучше можно было реконструировать образ источника.

Из-за ограниченного количества комбинаций пар решеток и соответствующих зарегистрированных складовых фурье-

регистрируемых Фурье-компонент, существуют некоторые ограничения по сложности формы восстанавливаемых источников излучения. Однако, с учетом данных, полученных в ходе экспериментов на Yohkoh (HXT) и RHESSI, можно утверждать, что имеющаяся точность достаточна для решения научных задач эксперимента SORENTO.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТКЛИКА РЕШЕТОК

Для решения проблемы оптимизации параметров элементов кодирующей апертуры, в первую очередь, необходимо провести моделирование прохождения излучения через идеальные решётки (под идеальными понимаются решетки, у которых перемычки полностью непрозрачны). Было создано программное обеспечение, позволяющее для выбранных параметров решёток и источника получать картины Муара и пофотонной трассировки. На рис. 2 показан пример работы программы. Верхняя и нижняя решетки рассматриваемого субколлиматора имеют периоды 440 и 400 мкм, соответственно. Угол наклона нижней решетки 45° , верхней -39° . В модели рассматривался сферический изотропный источник с радиусом $27''$. Для пофотонной трассировки использовался поток излучения 10^5 фотонов см^{-2} . Было проведено моделирование прохождения излучения сигнала через субколлиматор для двух различных положений источника излучения на Солнце, расстояние между которыми составляло $\sim 1,5'$ (рисунок 2А и 2В, соответственно). На рисунке приведены результаты трассировки для обоих случаев. Как видно, в системе с указанными

rowskich pojawiają się ograniczenia dotyczące zdolności rekonstrukcji skomplikowanych źródeł. Jednak, biorąc pod uwagę obserwacje wykonane przez instrumenty Yohkoh (HXT) i RHESSI, można stwierdzić, że zakładane parametry SORENTO są wystarczające, co umożliwi uzyskanie zakładanych celów naukowych.

3. MODELOWANIE TRANSMISJI SIATEK

Celem optymalizacji wartości parametrów elementów aпертуры kodowanej, w pierwszej kolejności przeprowadzono modelowanie transmisji promieniowania przez układ idealnych siatek. Jako idealne rozumieć należy siatki, w których słupki wolframowe są całkowicie nieprzezroczyste i wykonane zostały dokładnie wg. założeń. Przeprowadzono symulacje, w których dla wybranych wartości parametrów siatek i źródła promieniowania wyznaczano kształt wzoru mory i transmisję poszczególnych fotonów. Na Rys. 2 przedstawiono przykłady działania programu. Przednia i tylna siatka rozpatrywanego kolimatora miały odpowiednio stałe równe 440 i 400 μm . Kąt skręcenia tylnej siatki to 45° , a przedniej: -39° . W modelu założono sferycznie symetryczne źródło o promieniu $27''$. W celu wyznaczenia obrazu transmisji promieniowania przez siatki założono że strumień padający wynosi 10^5 fotonów cm^{-2} . Modelowanie było przeprowadzone dla dwóch położeń źródła na tarczy słonecznej różniących się niewiele (Rysunek 2А i 2В, odpowiednio). Na rysunku przedstawiono dwa przypadki. Jak widać, w układzie z

ми параметрами картина на детекторе существенно отличается для двух рассматриваемых конфигураций источника. Это объясняется тем, что дистанция между источниками ($1,5'$) превышает расчетное пространственное разрешение решеток, которое определяется как отношение ширины щели к расстоянию между верхней и нижней панелью субколлиматоров и равно $\sim 1,25'$.

В результате моделирования прохождения излучения через идеальные элементы кодирующей апертуры, на данный момент, были определены следующие наиболее оптимальные ширины щелей решеток: 19, 27, 40, 56, 80, 115, 163, 232, 333, 477 мкм.

opisanymi parametrami, obraz tworzący się na detektorze różni się wyraźnie dla dwóch rozpatrywanych przypadków położenia źródła. Wynika to z tego, że różnica w położeniach ($1,5'$) jest większa niż rozdzielczość przestrzenna układu siatek, równa w tym przypadku $\sim 1,25'$, co jest określone przez stosunek szerokości pojedynczej szczeliny do odległości między przednią i tylną siatką.

W wyniku modelowania przejścia promieniowania przez idealne elementy apertury kodowanej otrzymano następujące, optymalne szerokości szczelin siatek: 19, 27, 40, 56, 80, 115, 163, 232, 333 oraz 477 μm .

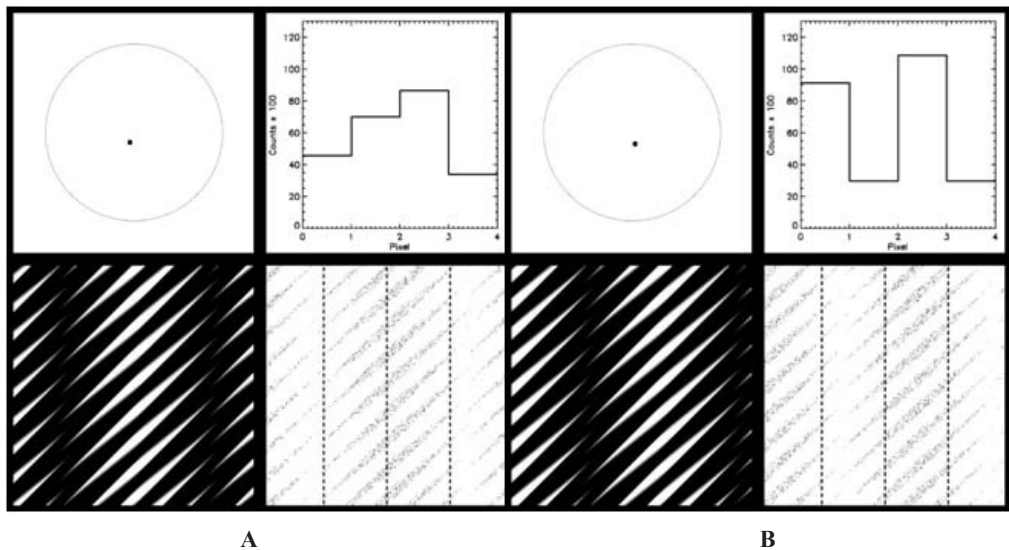


рис. 2. Результаты трассировки идеальных решеток для двух положений источника излучения на солнечном диске (А и В). Расстояние между положениями источника составляет $\sim 1,5'$. Левая верхняя панель: положение источника на диске Солнца. Правая верхняя панель: количество отсчетов на каждом из четырех пикселей детектора. Левая нижняя панель – картина Муара. Правая нижняя панель – распределение попаданий фотонов на поверхность детектора при пофотонной трассировке

rys. 2. Wyniki symulacji transmisji idealnego (bez wad) układu siatek dla dwóch położen źródła emisji na tarczy słonecznej (A i B). Nieznaczna różnica położen wynosi ok. $1,5'$. Lewy górny panel: położenie źródła emisji na tarczy słonecznej. Prawy górny panel – zliczenia zarejestrowane w każdym z czterech pikseli detektora. Lewy dolny panel: prążki moiry. Prawy dolny panel – wygenerowany losowo rozkład fotonów padających na przednią część detektora

4. ПРОДОЛЖЕНИЕ СОВМЕСТНОГО ПРОЕКТА

В дальнейшем, в рамках данного проекта, предполагается продолжить совместные работы по моделированию отклика модулирующих решеток. Первая задача, которую необходимо будет решить – создание программного обеспечения для восстановления изображений по заданному искусственному сигналу. С помощью такой программы можно продолжить оптимизацию параметров модулирующих решеток с целью получения максимально высокого качества изображений.

На более поздних этапах разработки, когда будут изготовлены первые лётные образцы решёток, необходимо начать создание моделей, учитывающих все дефекты реальных субколлиматоров. На рис. 3 показан фрагмент прототипа модулирующей решётки с шириной щели 477 мкм, изготовленного с помощью лазерной обработки. Как видно, ширины перемычек неоднородны по длине и отличаются от теоретического значения.

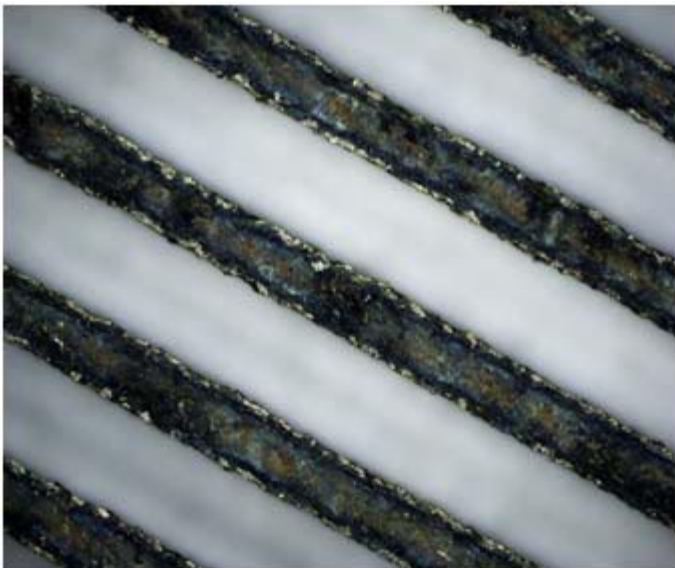


рис. 3. Изображение фрагмента прототипа модулирующей решетки, полученное на оптическом микроскопе. Ширина перемычек – 477 мкм.

rys. 3. Zdjęcie fragmentu prototypu siatki modulatora otrzymane za pomocą mikroskopu optycznego. Stała siatki – 477 μm .

4. KONTYNUACJA WSPÓLNEGO PROJEKTU

W przyszłości zamierzamy kontynuować wspólne prace nad modelowaniem odpowiedzi modulujących siatek. Pierwsze zadanie, które niewątpliwie należy podjąć, to stworzenie oprogramowania do rekonstrukcji obrazów dla zdefiniowanych syntetycznych rozkładów źródeł. Dzięki temu oprogramowaniu możliwe będzie optymalizowanie siatek pod kątem uzyskania jak najlepszej jakości obrazów.

Na dalszych etapach prac, kiedy będą przygotowane pierwsze lotne egzemplarze siatek, przeprowadzimy modelowanie biorąc pod uwagę wszystkie defekty wyprodukowanych subkolimatorów. Na Rysunku 3 przedstawiono zdjęcie fragmentu prototypu siatki o rozmiarze szczeliny 477 μm , wyprodukowanej z użyciem metod laserowych. Jak widać, szerokości szczelin nie są jednorodne wzdłuż słupków wolframowych i różnią się nieco od założonych wartości.

При трассировке, в рамках проведенной работы, перемычки решёток рассматривались как абсолютно непрозрачные. В действительности это не так – их пропускающая способность существенно зависит от энергии падающего излучения. Таким образом, необходимо будет проводить моделирование с учётом частичной прозрачности самих перемычек в различных энергетических диапазонах, в том числе с помощью инструментов GEANT4 [Agostinelli S. et al., 2003]. После решения перечисленных задач возможно создание конечного программного обеспечения, позволяющего восстанавливать изображения уже по данным, получаемым в ходе летного эксперимента.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе совместной работы ФИАН им П.Н. Лебедева и ЦКИ ПАН было проведено исследование отклика системы модуляционных коллиматоров жесткого рентгеновского телескопа СОРЕНТО при различных значениях периодов и угловой ориентации щелей решёток. Моделирование проводилось методом рейтрейсинга для решёток с абсолютно непрозрачными перемычками. Было показано соответствие расчётных значений углового разрешения, достигаемого при использовании решёток с определенным периодом, и чувствительности моделируемой системы при определении координаты источника излучения на Солнце. Также получены предварительные оптимальные значения ширины щелей в модуляционных решетках: 19, 27, 40, 56, 80, 115, 163, 232, 333, 477 мкм.

W ramach dotychczasowych prac modelując obraz transmisji zakładano, że słupki siatek są całkowicie nieprzezroczyste. W rzeczywistości tak nie jest. Zdolność przesłaniania słupków zależy od energii padającego promieniowania. W związku z tym potrzebne będzie przeprowadzenie modelowania z uwzględnieniem częściowej przezroczystości słupków w poszczególnych przedziałach energii. Modelowanie będzie prowadzone przy użyciu narzędzia GEANT4 [Agostinelli S. et al., 2003]. W efekcie możliwe stanie się stworzenie końcowej wersji oprogramowania służącego do rekonstrukcji obrazów na podstawie danych naukowych uzyskanych z orbity wokółsłonecznej.

PODSUMOWANIE

W wyniku wspólnych prac podjętych przez Instytut Fizyki AN Rosji im. P. N. Lebediewa i CBK PAN przebadano odpowiedź układu kolimatorów modulujących teleskopu twardego promieniowania rentgenowskiego SORENTO dla różnych wartości stałych i kątów skręcenia siatek. Modelowanie przeprowadzono metodą śledzenia promieni (ang. *ray-tracing*) przy założeniu obecności siatek z nieprzezroczystymi słupkami. Pokazano poprawność obliczonych wartości rozdzielczościątowej, osiągananej dla siatek o danej stałej, i czułości układu obrazującego na kierunku promieniowania dochodzącego ze Słońca. Dodatkowo wyznaczono zoptymalizowane wartości szerokości szczelin w modulujących siatkach. Szerokości te wynoszą: 19, 27, 40, 56, 80, 115, 163, 232, 333 oraz 477 μm.

ЛИТЕРАТУРА

BIBLIOGRAFIA

- [Kosugi et al., 1991] *Kosugi et al.* The Hard X-ray Telescope (HXT) for the SOLAR-A Mission // *Solar Physics* 1991. V. 136. P. 17-36.
- [Caroli E. et al., 1987] *Caroli E. et al.* Coded aperture imaging in X- and gamma-ray astronomy // *Space Science Reviews*. 1987. V. 45. No 3-4. P. 349-403.
- [Fenimore, Cannon, 1978] *Fenimore E.E., Cannon T.M.* Coded aperture imaging with uniformly redundant arrays // *Applied Optics*. 1978. V. 17. P. 337-347.
- [Narayan, Nityananda, 1986] *Narayan R., Nityananda R.* Maximum entropy image restoration in astronomy // *Annual review of astronomy and astrophysics* . 1986.V. 24.P. 127-170.
- [Puetter, 1995] *Puetter R.C.* Pixon-based multiresolution image reconstruction and the quantification of picture information content// *The International Journal of Image Systems and Technology*. 1995. V. 6. № 4. P. 314-331.
- [Metcalf et al., 1996] *Metcalf T.R. et al.* Pixon-based Multiresolution Image Reconstruction for Yohkoh's Hard X-ray Telescope // *The International Journal of Image Systems and Technology*. 1996. V. 466. P. 585,
- [Sylwester J. et al., 2005] *Sylwester J. et al.* RESIK: A Bent Crystal X-ray Spectrometer for Studies of Solar Coronal Plasma Composition // *Solar Physics*. 2005. V. 226. № 1. P. 45-72.
- [Ораевский, Собельман, 2002] *Ораевский В.Н., Собельман И.И.* Комплексные исследования активности Солнца на спутнике КОРОНАС-Ф // *Письма в АЖ*. 2002. Том 28. № 6. С. 457-467.
- [Gburek et al., 2013] *Gburek S. et al.* SphinX: The Solar Photometer in X-rays // *Solar Physics*. 2013. V. 283. Issue 2. P. 631-649,
- [Kuzin et al., 2011] *Kuzin S.V. et al.* The Tesis experiment on the CORONAS-PHOTON spacecraft // *Solar System Research*. 2011. V. 45. Issue 2. P. 162-173.
- [Lin et al., 2002] *Lin et al.* The Reuven Ramaty High-Energy Solar Spectroscopic Imager (RHESSI) // *Solar Physics*. 2002. V. 210. Issue 1. P. 3-32.
- [Vilmeret et al., 2014] *Vilmer N. et al.* The spectrometer telescope for imaging X-rays (STIX) on board Solar Orbiter // 40th COSPAR Scientific Assembly. 2014. Abstract D2.3-36-14. Moscow.
- [Limousin O. et al., 2011] *Limousin O. et al.* Caliste 256: A CdTe imaging spectrometer for space science with a 580 μm pixel pitch//*Nuclear Instruments and Methods*. 2011. V. 647. P. 46-54.
- [Michalowska A. et al., 2010] *Michalowska A. et al.* IDeF-X HD: A low power multi-gain CMOS ASIC for the readout of Cd(Zn)Te detectors // *Nucl. Sci. Conf. Rec*. 2010. P.1556-1559.
- [Hurford G. et al., 2012] *Hurford G. et al.* The imaging concept for the spectrometer/telescope for imaging X-rays (STIX) on Solar Orbiter // *Proc. SPIE* 2012. P. 8443.
- [Hurford G. et al., 2002] *Hurford G. et al.* The RHESSI Imaging Concept // *Solar Physics*. 2002. V. 136. Issue 1.
- [Agostinelli S. et al., 2003] *Agostinelli S. et al.* GEANT4 – a simulation toolkit // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*. 2003. V. 506. P. 250-303.

SORENTO is the X-ray spectrometer, which allows taking images in the energy range of 5–100 keV with high spatial and spectral resolution. SORENTO is a part of the scientific instrument assembly, which is under construction in the Lebedev Physical Institute RAS for solar observatory- interplanetary mission Interhelioprobe. This Mission is intended to perform multiwavelength observations of solar activity in EUV, soft X-ray and hard X-ray.

The principle of the imaging is based on the method of coded aperture. Theoretical modelling of emission after passing through the optical system is one of the most difficult problems in a design of such instruments. For optimization of grids parameters and for making of the final version of software it will be important to calibrate the optical system by restoring the real signal. In this paper, we demonstrate the results of the modelling, obtained in the frame of the collaboration between Lebedev Physical Institute (Moscow, Russia) and Space Research Center (Wroclaw, Poland).

РЕНТГЕНОВСКАЯ СПЕКТРОФОТОМЕТРИЯ СОЛНЦА (РЕСИК)

руководитель проекта
с российской стороны:
В. Кузнецов

руководители проекта
с польской стороны:
В. Сильвестер, Я. Сильвестер

РЕСИК – разработанный ЦКИ ПАН брэгговский спектрометр, который работал на спутнике КОРОНАС-Ф (2001–2005 гг.) и использовал изогнутые кристаллы для регистрации спектров высокого спектрального разрешения в рентгеновском диапазоне длин волн 3,4–6,1 Å в четырех спектральных каналах. Рентгеновские спектры этого диапазона в значительной степени определяются возникновением вспышек на солнечном диске. Прибор не имел коллиматора и в его поле зрения попадал весь солнечный диск. Если на диске одновременно возникали две вспышки, то полученный прибором РЕСИК спектр содержал вклад от излучения обеих вспышек. Вклад каждой вспышки определялся на основе знания характеристик прибора [Sylwester et al., 2005] и дополнительной информации, полученной в других наблюдениях (спутники *RHESSI* и *GOES*).

В течение 2011–2015 гг. продолжались работы по обработке спектров, полученных с помощью этого спектрометра. На данный момент в каталоге явлений, отнесённых к так называемому второму уровню (Level_2) http://www.cbk.pan.wroc.pl/experiments/resik/RESIK_Level2/index.html, находится 100 солнечных вспышек, которые произошли на Солнце между апрелем

СПЕКТРОСКОПИЯ RENTGENOWSKA SŁOŃCA (RESIK)

kierownik projektu
ze strony Rosji:
V. Kuznetsov

kierownik projektu
ze strony Polski:
B. Sylwester, J. Sylwester

RESIK [Sylwester et al., 2005] był polskim spektrometrem krystalicznym Bragg'a, który odbył lot na pokładzie rosyjskiego satelity-observatorium Słońca KORONAS-F. W przyrządzie zastosowano jako elementy dyspersyjne 4 wygięte cylindrycznie wypukłe kryształy. Promieniowanie gorących obszarów korony słonecznej, po odbiciu od wypukłego kryształu było rejestrowane za pomocą pozycyjnych gazowych detektorów proporcjonalnych, co umożliwiała równoczesną obserwację widm w czterech kanałach widmowych w nominalnym zakresie obejmującym przedział długości fal 3,4 Å – 6,1 Å (granice obserwowanego przedziału w niewielkim stopniu zależały od położenia rozbłysku na tarczy słonecznej). Przed spektrometrem nie umieszczono kolimatorów, w związku z czym w polu znajdowała się cała tarcza Słońca. W wypadku, gdy w dwóch różnych miejscach na tarczy jednocześnie obecne byłyby silne źródła promieniowania rentgenowskiego, ich widma nakładałyby się, powodując problemy z interpretacją. W takiej sytuacji pomocne są dodatkowe informacje otrzymane za pomocą innych instrumentów orbitalnych obserwujących Słońce w podobnym przedziale energii. Najbardziej użyteczne w tym kontekście okazały się obrazy rentgenowskie zrekonstruowane z danych uzyskanych

2002 г. и мартом 2003 г. Большинство их них (более 80%) – это вспышки балла С и М. Помимо спектров от вспышек получено более 300 спектров от активных областей.

На сайте http://www.cbk.pan.wroc.pl/experiments/resik/resik_catalogue.html находится каталог всех явлений, которые наблюдались прибором РЕСИК. Отметим, что наиболее оптимальные условия работы прибора (в смысле постановки уровней дискриминатора амплитуд, ADS) имели место в период с 24 декабря 2002 года. по 29 марта 2003 года.

На рис. 1 а, б представлены два спектра, характеризующие фазу роста (см. рис. 1а) и затухания (см. рис.1б) вспышки балла C1.9, которая произошла 26 декабря 2002 г. (SOL2002-12-26T08:35). Цвета на рисунках соответствуют отдельным энергетическим каналам. В каждом канале показаны наиболее сильные характеристические линии ионов солнечной плазмы. Спектры содержат спектральные линии таких элементов как Cl, Si, S, Ar, а также K. В наблюдаемом спектральном диапазоне зарегистрированы сильные эмиссионные линии, соответствующие переходам: $1s - np$ и $1s^2 - 1s(np)$, соответственно, в водородо- и гелиоподобных ионах. Переходы, соответствующие $n=2$ и $n=3$, часто наблюдались для различных ионов, но для некоторых вспышек прибор РЕСИК регистрировал повышенную эмиссию на длинах волн, соответствующих переходам с n вплоть до 9 или 10.

На рис. 1 пунктиром соединены две пары линий ионов S XVI и S XV, а также Si XIV и Si XIII, показывающие, что наклоны этих пунктирных линий диаметрально противоположны на

за pomocą teleskopu *RHESSI* (NASA) oraz obserwacje z XRM z satelity *GOES* (NOAA).

W latach 2011–2015 kontynuowano prace nad redukcją widm uzyskanych za pomocą spektrometru RESIK. Analizowano głównie dane zebrane w okresie, kiedy ustawienia instrumentu były optymalne, tzn. z okresu grudzień 2002-marzec 2003. W pierwszym kroku dokonywano redukcji do tzw. poziomu Level_2, gdzie natężenia emisji w funkcji długości fal było wyrażone w jednostkach absolutnych [fotony $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{Å}^{-1}$]. Zredukowane widma umieszczano w katalogu dostępnym publicznie pod adresem http://www.cbk.pan.wroc.pl/experiments/resik/RESIK_Level2/index.html.

Aktualnie w katalogu zjawisk zredukowanych znajduje się ok. 10 000 widm zaobserwowanych podczas 101 rozbłysków słonecznych (okres od kwietnia 2002 do marca 2003). Większość z tych rozbłysków (ponad 80 %) stanowiły słabsze zjawiska klasy rentgenowskiej C oraz kilka silniejszych klas M i X. RESIK był na tyle czułym spektrometrem, że umożliwiał też obserwacje bezrozbłyskowych obszarów aktywnych. W takim wypadku dynamicznie regulowany czas zbierania widm był najdłuższy i wynosił ok. 5 minut. Takich widm jest w katalogu ponad 300. Ze stron, przedstawionych pod innym adresem http://www.cbk.pan.wroc.pl/experiments/resik/resik_catalogue.htm można uzyskać informacje o częściowo zredukowanych widmach (ponad milion widm), obejmujących wszystkie zjawiska zaobserwowane za pomocą przyrządu RESIK.

W dalszej części przedstawimy najważniejsze wyniki otrzymane w rezultacie analizy widm dla wybranych zjawisk. Wyniki te były regularnie publikowane,

фазе роста и фазе затухания вспышки (времена интеграции спектров указаны на рисунке над спектрами). Такое изменение в отношениях интенсивностей указанных линий свидетельствует о заметном различии физических условий во вспышечной плазме на разных фазах развития вспышки.

Линии и континуум в рассматриваемом спектральном диапазоне формируются в горячей плазме в интервале температур $T = 3\div 30$ МК, с интенсивностями в разных пропорциях в зависимости от длины волны. Это позволяет использовать полученные прибором РЕСИК спектры для исследования температурной структуры источника (так называемая дифференциальная мера эмиссии/ DEM), а также для определения содержания в солнечной короне тех элементов, у которых наблюдаются линии излучения.

гłównie w czasopiśmie *The Astrophysical Journal*.

Na Rysunku 1 przedstawiono przykład widm zaobserwowanych w trakcie fazy wzrostu (lewy) oraz zaniku (prawy) rozbłysku klasy C1,9 z dnia 26 grudnia 2002 (czyli w obecnie obowiązującej notacji zjawisko: SOL2002-12-26T08:35). Kolory na zapisie widm odpowiadają indywidualnym przedziałom widmowym. Na rysunku podano identyfikację przejść odpowiadających silniejszym liniom emisyjnym. Za pomocą kropkowanych linii połączono maksima par linii jonów S XVI i S XV oraz Si XIV i Si XIII. Widać, że nachylenia tych linii są diametralnie różne na fazie wzrostu i zaniku (przedziały czasu integracji widm podano na górze rysunków). Obserwowany efekt jest odbiciem zasadniczych zmian warunków fizycznych w plazmie rozbłysku pomiędzy fazą wzrostu i zaniku.

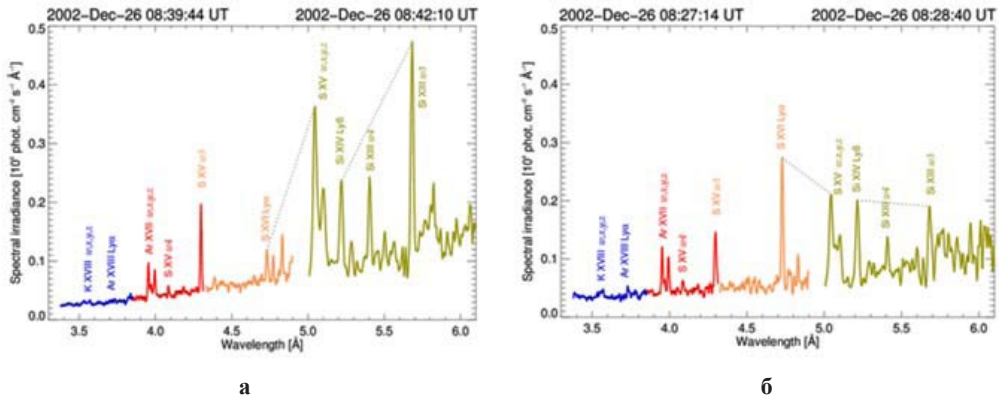


рис. 1. (а) Пример спектра, полученного с помощью спектрометра РЕСИК для фазы роста вспышки балла C1.9, которая произошла на Солнце 26 декабря 2002 года (SOL2002-12-26T08:35). Разным цветам соответствуют разные спектральные каналы. Приведена идентификация основных спектральных линий ионизованных ионов. Пунктирные линии соединяют две пары линий ионов SXVI и S XV, а также Si XIV и Si XIII

(б) Пример спектра, полученного с помощью спектрометра РЕСИК для фазы затухания вспышки балла C1.9, которая произошла на Солнце 26 декабря 2002 года (SOL2002-12-26T08:35).

rys. 1. Przykład widma uzyskanego za pomocą spektrometru RESIK dla fazy wzrostu (lewy panel) oraz zaniku (prawy panel) rozbłysku klasy C1,9 zaobserwowanego 26 grudnia 2002 (SOL2002-12-26T08:35). Kolorami zaznaczono indywidualne przedziały (kanały) widmowe oraz podano identyfikacje silniejszych linii. Kropkowanymi prostymi połączono pary linii jonów S XVI i S XV oraz Si XIV i Si XIII

В первых работах по анализу спектров [Sylwester et al., 2011; Sylwester et al., 2012; Sylwester et al., 2013; Huenemoerder et al., 2013], а также в работе [Phillips et al., 2015] принималось сильно упрощающее предположение о том, что вся излучающая плазма находится при одной температуре, которая мы определялась нами на основе рентгеновских потоков излучения, измеряемых в двух спектральных диапазонах спутником *GOES* (0,5–4–8 Å), т. е. предполагалось, что плазма является изотермической.

В последующих работах по более подробному анализу спектров [Sylwester et al., 2014; 2015] от предположения об изотермичности плазмы источника отказались и стали считать излучающую плазму многотемпературной, т. е. состоящей из смеси плазм с разными температурами (на временах её релаксации). Однако для линий некоторых ионов (К XVIII, а также Аг XVII) предположение об изотермичности плазмы оказалось вполне удовлетворительным, поскольку полученные из наблюдений *GOES* температуры хорошо соответствуют однотемпературным спектрам прибора РЕСИК для этих ионов.

Во втором канале спектра, наблюдаемого с помощью спектрометра РЕСИК, в диапазоне 4,44–4,5 Å отмечались слабые линии гелиоподобного иона хлора Cl XVI (на рис. 1 не показаны). Используя потоки в этих линиях, спектроскопическим методом в изотермическом приближении было определено содержание хлора Cl в корональной плазме [Sylwester et al., 2011]. Было исследовано около 3000 спектров солнечных вспышек (20 явлений, произошедших в 2002 и 2003 годах). В результате проведенного анализа была получена усред-

Widma obserwowane za pomocą spektrometru RESIK zawierają wiele linii widmowych formujących się w takich pierwiastkach jak: Si, S, Cl, Ar oraz K. Linie te związane są z przejściami typu $1s - np$ oraz $1s^2 - 1s(np)$, odpowiednio w jonach wodoropodobnych. Przejścia z poziomów wzbudzonych o głównej liczbie kwantowej $n = 2$ oraz 3 były wcześniej dość często obserwowane i analizowane. To, co nowego wniosły obserwacje wykonane za pomocą przyrządu RESIK, to odkrycie, że w pewnych zjawiskach widzimy znacznie wzmocnioną emisję w długościach fal odpowiadających przejściom z $n = 5, 6$ czasem nawet 8 lub 9!

Obserwowane linie oraz widmo ciągłe w badanym przedziale widmowym formują się w gorącej składowej plazmie, w przedziale temperaturowym z zakresu 3 MK – 30 MK. Proporcja wkładu gorętszych części plazmy silnie wzrasta (na ogół) w miarę przechodzenia do krótszych fal. W związku z tym efektem, widma uzyskane za pomocą spektrometru RESIK są szczególnie przydatne do badania struktury temperaturowej źródła opisywanej za pomocą formy rozkładu tzw. różniczkowej miary emisji (DEM). Natężenia linii zależą proporcjonalnie od obfitości pierwiastków odpowiedzialnych za ich formowanie się. Takie zależności stwarzają szanse użycia obserwowanych widm do wyznaczenia składu chemicznego plazmy.

Do pierwiastków dla których istnieją nieliczne tylko wyznaczenia obfitości zalicza się chlor. Linie jonu chloru Cl XVI obserwowane są jako bardzo słabe struktury na widmach z przedziału 4,44 Å – 4,5 Å (kanał widmowy Nr. 3). Bazując na mierzonych natężeniach tych linii określono obfitość chloru w koronie w przybliżeniu izotermicznym. W tym celu przeanalizowano około 3000 widm

нённая по всем спектрам величина содержания хлора $\log A(\text{Cl}) = 5,75 \pm 0,26$ в общепринятой шкале, где $\log A(\text{H}) = 12$. Ошибка определения содержания вытекает из разброса величины потоков излучения, измеряемых в линии Cl. Полученный результат является вероятно самым лучшим определением содержания хлора для солнечной плазмы. Величина содержания хлора, полученная по данным прибора РЕСИК, в 1,8 раза выше содержания, полученного на основании спектров солнечных пятен, наблюдаемых в инфракрасном диапазоне. Полученные в работе [Sylwester et al., 2011] содержания хлора оказались почти постоянными для разных уровней солнечной активности (были исследованы рентгеновские вспышки класса ниже C1 и вплоть до X1 по классификации *GOES*), что свидетельствует о достоверности результата и корректности использованной методики.

В работе [Sylwester et al., 2013] проводилось сопоставление содержания в солнечной короне серы (S), многие линии водорода и гелиоподобных ионов (S XVI и S XV) которой наблюдаются в спектрах плазмы солнечных вспышек, с содержанием серы, полученным по другим данным. Содержание серы определялось спектроскопическим методом в предположении изотермической плазмы с использованием линии S XV w4 из интервала 4,075–4,095 Å, линии S XV w3 из интервала 4,285–4,320 Å, триплета (w, x, y, z) иона S XV из интервала 5,006–5,14 Å а также линии Ly- α иона S XVI из интервала 4,717–4,745 Å.

Были проанализированы 1448 спектров для 13 вспышек, произошедших в 2003 г. В результате проведенного анализа на основе измеренных потоков излучения в линии S XV 1s² – 1s4p была

розысканных. Выбрано 20 явлений з r. 2002 и 2003 таких, в которых линии Cl были наиболее видны. В результате проведенной аналйзы получено среднее значение обфтощл $\log A(\text{Cl}) = 5,75 \pm 0,26$ (в ообщле прлжмowanej склл, гдле зклдлл сл $\log A(\text{H}) \equiv 12$). Олбл вызнлщел обфтощл odpowлдлл 1 σ . Wertool блбду зостл вызнлщелл з doposowллл крлзвей Gaussа до histogramу rozklлду обфтощл Cl [Sylwester et al., 2011]. Uzyskллл wertool обфтощл A(Cl) jest 1,8 rлзы wлькшл od tej, oszлcowanej nа podstlwе аnlлзы wldm plлm slonecznych obserwowanych w podczerwlenl. Uzyskллл wynlk jest prawdopodobnie nлjlpszym wyznлщелнем обфтощл chloru dlл plлzmy slonecznej. Otrzymane w pracy [Sylwester et al., 2011] обфтощл chloru byly w przyblлzlenlu stлe w szerokim zakresle аktywnoщл slonecznej (od klas *GOES* C1 do X1).

Przechodлcл do jonów formujлcych slе w nlлzszych temperaturach, w pracy [Sylwester et al., 2013] poszukiwллно odpowledzl nл pytlлne czy обфтощл slarkl, której lлczne llnle wodoro – oraz helopodobnych jonów (S XVI oraz S XV) obserwowane sл w аnlлzowanych wldmach plлzmy rozblыsków slonecznych, róznl slе od podawanych w literaturze обфтощл wyznлщonych z innych danych. Wykorzystujлc лlnle S XV w4 z przedzllлу 4,075 Å – 4,095 Å, S XV w3 z przedzllлу 4,285–4,320 Å, tryplet (w, x, y, z) jonu S XV z przedzllлу 5,006 Å – 5,14 Å oraz llnle Ly α jonu S XVI z przedzllлу 4,717 Å – 4,745, przy zлloлenlu жe emltujлcл plлzma jest izotermicznл wyznлщono обфтощл slarkl. W tym wypadku przeаnlлzowano 1448 wldm z 13 zjлwlsk obserwowanych w r. 2003. W wylнku przeprowadzonej аnlлзы natęлeń llnll S XV 1s² – 1s4p otrzymano wertool

получена величина $\log A(S) = 7,16 \pm 0,17$ (в общепринятой шкале, когда $\log A(H) = 12$). Ошибка в определении содержания серы связана с разбросом величины потоков излучения, измеряемых в линиях S. Полученный результат наиболее достоверен среди всех оценок по остальным линиям, дающих содержание в пределах 7,13–7,24. Эта величина весьма близка к фотосферному содержанию серы, полученному в последнее время, а также к её содержанию в спокойном солнечном ветре и в метеоритах.

В 2013 году были проведены работы по анализу спектров, полученных спектрометром РЕСИК, которые позволяли определять содержание в солнечной короне кремния (Si) [Sylwester et al., 2013]. Также принималось, что излучающая плазма является изотермической и характеризуется величиной температуры и мерой эмиссии, которые оценивались на основе анализа отношений потоков излучения в мягком рентгеновском диапазоне по данным спутника *GOES*.

На основе анализа 1822 спектров, полученных прибором РЕСИК, по измерениям потоков излучения в линиях кремния в канале 4 в диапазоне длин волн 5,00–6,05 Å для 21 солнечной вспышки было определено содержание кремния. В этот диапазон попадают линии водородо- и гелиоподобных ионов (Si XIV Ly β $\lambda=5,217$ Å, а также линия w3 иона Si XIII, соответствующая переходу $1s^2 - 1s3p$ $\lambda=5,688$ Å). По потокам в линии Ly- β (5,217 Å) была получена величина содержания $\log A(Si)=7,93\pm 0,21$, для потоков в линии w3 (5,688 Å) $\log A(Si)=7,89\pm 0,13$.

Полученные величины лишь незначительно изменяются от вспышки к вспышке. Они в 2,6 и 2,4 раза выше, чем соответствующие фотосферные величины, а также в 3 раза выше, чем ве-

$\log A(S) = 7,16 \pm 0,17$. Ten wynik uznajemy za najbardziej wiarygodny spośród istniejących oszacowań, również tych uzyskanych na podstawie analizy natężeń innych w/w linii, dla których wartości $\log A(S)$ zawarte są w przedziale 7,13–7,24 Å. Wyznaczone koronalne wartości obfitości siarki są bliskie otrzymanej ostatnio wartości obfitości fotosferycznej oraz wartości uzyskanej dla spokojnego wiatru słonecznego oraz meteorytów.

Kolejno badano w przybliżeniu izotermicznym obfitość krzemu w koronie. Na podstawie analizy wybranych 1822 widm z 21 rozbłysków słonecznych wyznaczono obfitość krzemu wykorzystując widma obserwowane w kanale 4 obejmującym przedział długości fal 5,00 Å – 6,05 Å. W tym celu wykorzystano natężenia linii jonów wodoru- oraz helopodobnych (Si XIV Ly β , $\lambda=5,217$ Å oraz Si XIII w3 odpowiadającej przejściu $1s^2-1s3p$, $\lambda=5,688$ Å). Na podstawie analizy natężeń linii Ly β (5,217 Å) uzyskano wartość obfitości $\log A(Si) = 7,93 \pm 0,21$, natomiast na podstawie natężeń linii w3 ($\lambda=5,688$ Å) otrzymano wartość $\log A(Si) = 7,89 \pm 0,13$. Otrzymane wartości tylko nieznacznie zmieniają się od rozbłysku do rozbłysku, będąc od 2,4 do 2,6 razy wyższe od wartości fotosferycznych, oraz 3 razy wyższe od wartości uzyskanych z widm RESIK dla bardzo niskiej aktywności słonecznej (okresy bez rozbłysków).

Założenie stałości temperatury w obszarze emisji mogło wprowadzić błędy w określaniu obfitości pierwiastków. Tak więc w kolejnej, bardziej zaawansowanej interpretacji, zastosowano po raz pierwszy podejście wielotemperaturowe. Rozważano sytuacje kiedy plazma źródła stanowi mieszkankę składowych posiadających znacznie różniące się temperatury.

Opracowano oryginalną metodę optymalizacji obfitości pierwiastków che-

личины полученные для кремния в случае очень низкой солнечной активности (периоды наблюдений без вспышек).

Следующим этапом исследований была разработка метода оптимизации по определению химического состава солнечной плазмы (AbuOpt), который вместо предположения об изотермичности излучающей плазмы использует предположение об её многотемпературности. Для описания многотемпературности плазмы использовалась дифференциальная мера эмиссии (DEM). На основе потоков излучения, наблюдаемых в более, чем в десяти спектральных диапазонах, включающих эмиссионные линии и континуум, восстанавливались как химический состав излучающей плазмы, так и её распределение по температурам (DEM). Метод AbuOpt позволяет, таким образом, одновременно определить как оптимальный состав излучающей плазмы, так и распределение этой плазмы по температурам.

Разработанный метод был применен в качестве примера для анализа вспышки балла M1.0, которая произошла на Солнце 14 ноября 2002 (SOL2002-11-14T22:26). Результаты опубликованы в работе [Sylwester et al., 2014].

Редуцированные спектры были использованы для определения содержания элементов (Si, S, Cl, Ar и K), у которых линии излучения ионов регистрировались прибором RESIK. Ранее оценки содержания этих элементов были нами получены на основе упрощенного предположения, что излучающая плазма является изотермической. На рис. 2 показаны временные изменения полученных содержаний указанных выше элементов для этой вспышки, а также усредненные по времени величины содержаний из работы [Sylwester et al., 2014].

micznych (o nazwie AbuOpt), w której przyjęto realistyczne założenie, że źródło emisji jest wielotemperaturowe tzn. istnieje pewien rozkład plazmy z temperaturą opisywany za pomocą tzw. różniczkowej miary emisji – DEM. Na podstawie analizy natężeń obserwowanych w kilkunastu przedziałach widmowych zawierających zarówno linie emisyjne jak i wyłącznie promieniowanie ciągłe, próbowaliśmy odtworzyć zarówno skład chemiczny emitującej plazmy jak i jej rozkład z temperaturą. Metoda AbuOpt pozwala na jednoczesne wyznaczenie tego rozkładu oraz optymalnego składu chemicznego emitującej plazmy.

Opracowaną metodę zastosowano do analizy przykładowego rozbłysku klasy M1.0 z 14 listopada 2002 (SOL2002–11–14T22:26). Wyniki opublikowano w pracy [Sylwester et al., 2013]. Zredukowane widma analizowano w celu wyznaczenia rozblyskowych obfitości pierwiastków (Si, S, Cl, Ar oraz K), które emitują obserwowane linie.

Otrzymane wyniki jednoznacznie wykazały, że założenie izotermiczności jest bardzo dobrym przybliżeniem przy interpretacji obserwowanych natężeń linii niektórych, tzw., gorętszych jonów (np. K XVIII lub Ar XVII). Wynika to z faktu, że wykorzystywane podczas analizy wartości temperatury uzyskane z interpretacji obserwacji XRM GOES dobrze odpowiadają odpowiednim temperaturom formowania się linii w gorętszych jonach. Jednakże w wypadku chłodniejszych jonów, przybliżenie izotermiczne jawnie zawodzi, co przedyskutowano poniżej. Wyniki zastosowania metody AbuOpt do interpretacji widm zaobserwowanych w trakcie rozbłysku ilustruje Rysunek 2 zaczerpnięty z pracy [Sylwester et al., 2014]

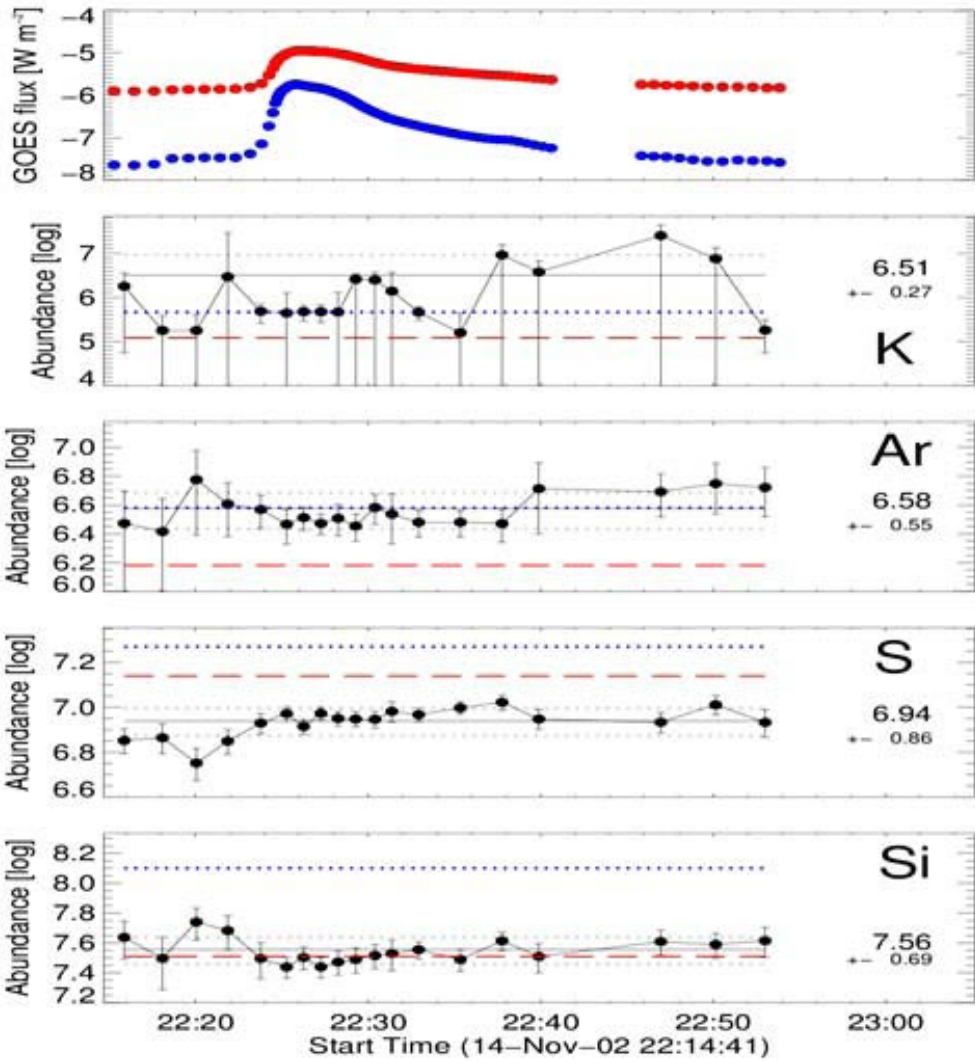


рис. 2. Временные изменения абсолютных содержаний элементов K, Ar, S и Si для вспышки балла M1.0, которая произошла на Солнце 26 декабря 2002 года (SOL2002-11-14T22:26), полученные с помощью метода AbuOpt. Тонкие черные горизонтальные линии показывают усредненные по времени величины содержания, а черные пунктирные линии соответствуют ошибкам, полученным с помощью метода наименьших квадратов. На верхнем рисунке представлены рентгеновские потоки излучения, зарегистрированные в двух каналах спутника GOES. Пунктирная голубая линия соответствует значениям содержания элементов в короне из работы [Feldman, 1992], а красный пунктир – фотосферным значениям [Asplund et al., 2009]

rys. 2. Zmiany z czasem absolutnych obfitości pierwiastków: K, Ar, S, oraz Si podczas rozbłysku klasy M1.0 z 14 listopada 2002 (SOL2002-11-14T22:26) wyznaczone z wykorzystaniem metody AbuOpt. Cienkie czarne linie poziome przedstawiają uśrednione po czasie wartości obfitości zaś czarne linie kropkowane odpowiadają błędom wyznaczonym za pomocą metody najmniejszych kwadratów (rms). Górny panel przedstawia strumienie rentgenowskie w 2 kanałach GOES. Kropkowane linie niebieskie odpowiadają obfitościom „koronalnym” [Feldman, 1992], zaś przerywane czerwone obfitościom „fotoferycznym” [Asplund et al., 2009]

В работе [Sylwester et al., 2015] с использованием метода AbuOpt исследованы более 2400 спектров, полученных в диапазоне длин волн 3,4–6,1 Å для 33 солнечных вспышек, отобранных с учетом периода оптимальной работы прибора РЕСИК (декабрь 2002 – март 2003) и длительности наблюдений вспышек. Были определены содержания в короне элементов K, Ar, S и Si, сильные линии излучения которых наблюдались в изученных спектрах. Был использован новый метод анализа спектров, который основывался на реальных и поддержанных другими наблюдениями предположениях о том, что излучающая плазма является смесью плазм с разными температурами (т.е. не является изотермической). На рис. 3 показаны результаты, полученные в этой работе: усредненные по времени величины содержаний в короне отдельных элементов по данным отдельных вспышек, а также средние величины содержания по данным всех 33 проанализированных вспышек.

Проведенные вычисления и анализ результатов позволяют сделать вывод о том, что величины содержаний элементов K и Ar в короне, полученные в рамках предположения о много-температурности излучающей плазмы, сравнимы с величинами, которые для этих элементов были получены ранее в рамках предположения об изотермичности излучающей плазмы. Это является следствием того, что температуры плазмы, использованные в анализе и полученные по наблюдениям спутника GOES, достаточно хорошо совпадали с температурами, соответствующими ионизационному состоянию ионов K XVIII и Ar XVII. Для элементов S и Si величины содержаний элементов, по-

В badanym zjawisku nie stwierdzono istnienia znaczących zmian obfitości analizowanych pierwiastków w trakcie zjawiska. Postanowiono więc zbadać, czy występują różnice składu chemicznego pomiędzy rozbłyskami, na co wskazywały wyniki analizy danych SMM BCS. W tym celu wyselekcjonowano spośród wszystkich zredukowanych zjawisk te, dla których warunki rejestracji widm były najkorzystniejsze. Takich zjawisk było 33. Obserwowane one były w okresie (grudzień 2002 – marzec 2003). Przeprowadzono analizę ich 2400 widm, wykorzystując metodę AbuOpt. Wyznaczono obfitości pierwiastków K, Ar, S oraz Si dla wszystkich widm. Okazało się, że w większości rozbłysków nie obserwuje się zmian z czasem obfitości analizowanych pierwiastków w trakcie zjawiska. W większości zjawisk niewielkie zmiany obfitości nie były znaczące statystycznie. Tak więc postanowiono przypisać każdemu z badanych zjawisk zespół reprezentatywnych obfitości, wyliczony jako średnie z tych obserwacji, kiedy strumienie w zespole analizowanych linii były dostatecznie silne. Na Rysunku 3 [Sylwester et al., 2015] przedstawiono sumaryczne wyniki.

Nie stwierdzono występowania zasadniczych zmian obfitości pomiędzy poszczególnymi rozbłyskami – jedynie w wypadku potasu, można starać się dopatrzeć występowania różnic w obfitości pomiędzy poszczególnymi rozbłyskami – jedynie w wypadku potasu, można starać się dopatrzeć występowania różnic w obfitościach pomiędzy indywidualnymi rozbłyskami. Trzeba jednakże brać pod uwagę fakt, że wartości obfitości są w wypadku potasu obciążone dużą niepewnością. Jest to związane ze stosunkowo niskim natężeniem linii K w obserwowana-

лученные в рамках многотемпературного приближения, оказались в 1,8 и 2,1 раза меньше, чем соответствующие величины, полученные в рамках изотермического приближения. Для серы (S) величины содержаний, полученные в рамках многотемпературного приближения оказались также ниже корональных и фотосферных величин содержаний, полученных другими авторами. Для кремния (Si) величины содержаний, полученные в рамках многотемпературного приближения, значительно ниже соответствующих корональных содержаний и находятся на уровне величины фотосферного содержания Si. Не были обнаружены какие-либо заметные изменения содержания элементов в короне от вспышки к вспышке. Единственные изменения, которые могли бы быть замечены, связаны с калием, однако полученные для калия величины содержаний имеют большую погрешность, которая обусловлена сравнительно малой интенсивностью излучения в линии калия в наблюдаемых спектрах.

В работе 2015 г. [Phillips et al., 2015] по анализу полученных прибором РЕСИК рентгеновских спектров представлены результаты, которые могут пролить свет на природу наблюдаемого избытка излучения в диапазоне энергии 3,5 кэВ в спектрах некоторых скоплений галактик и в Галактике Андромеды [Bulbul et al., 2014; Boyarsky et al., 2014], а также способствовать разрешению возникшего разногласия в интерпретации этого избытка. В указанных работах наблюдаемый избыток излучения в рентгеновском спектре связывают с присутствием тёмной материи в виде так называемых стерильных нейтрино <http://www.skyandtelescope.com/astronomy-news/mysterious-x-rays-might-hint-at-dark-matter-07082014/>.

nych widmach – obfitość tego pierwiastka jest niewielka.

Wyniki przeprowadzonych analiz wykazały, że obfitości uzyskane dla pierwiastków K oraz Ar w podejściu wielotemperaturowym (AbuOpt) są zbliżone do tych, uzyskanych wcześniej z wykorzystaniem założenia o jednakowej temperaturze plazmy w całym obszarze emisji. Wynika to z faktu, że wykorzystywane podczas analizy temperatury uzyskane z obserwacji *GOES* dobrze opisują odpowiednie temperatury dla jonów K XVIII oraz Ar XVII. W wypadku pierwiastków S oraz Si, wartości obfitości uzyskane w przybliżeniu wielotemperaturowym są o czynnik przybliżeniu wielotemperaturowym są o czynnik 1,8 oraz 2,1 **niższe** od odpowiednich wartości otrzymanych w przybliżeniu izotermicznym. Dla siarki są one również niższe zarówno od obfitości koronalnych jak też fotosferycznych. Dla krzemu są one znacznie niższe od wartości koronalnych i mają wartość zbliżoną do fotosferycznej obfitości Si.

Wartość energii w której obserwowane są linie potasu to ok. 3,5 keV. W analogicznym zakresie energii obserwuje się występowanie nadwyżki w widmach niektórych gromad galaktyk oraz w Galaktyce Andromedy [Bulbul et al., 2014; Boyarsky et al., 2014]. Autorzy prac [Bulbul et al., 2014; Boyarsky et al., 2014] przypisują obserwowaną nadwyżkę w widmie rentgenowskim obecności ciemniej materii w postaci tzw. sterylnych neutrino. <http://www.skyandtelescope.com/astronomy-news/mysterious-x-rays-might-hint-at-dark-matter-07082014/>. promieniowania w okolicach widma odpowiadającej energii 3,5 keV.

Между тем, представленные в работе [Phillips et al., 2015] результаты указывают на то, что избыток излучения в спектральной области энергии 3,5 кэВ наблюдается также в спектрах солнечных вспышек по данным спектрометра RESIK. Для солнечных вспышек наблюдаемый избыток излучения связан с наличием многократно ионизованного калия, содержание которого в горячей вспышечной плазме значительно выше фотосферного содержания калия. Это связано с известным в астрофизике так называемым эффектом FIP (FIP – First Ionization Potential, эффект первого ионизационного потенциала).

В упомянутой работе [Phillips et al., 2015] проанализировано около 9000 спектров в области энергии 3,5 кэВ для 101 вспышки и было подтверждено, что содержание калия во вспышечной плазме значительно повышено по сравнению с фотосферным значением (на фактор ~ 10). На рис. 4 из этой работы представлены результаты по содержанию калия в солнечной короне, полученные в рамках предположения об изотермичности излучающей плазмы. В левой части рисунка 4 черными точками показаны величины потоков излучения, измеренные в спектральных линиях в диапазоне энергий 3,465–3,520 кэВ (был вычтен средний уровень континуума, определённый как уровень в двух соседних диапазонах энергии свободных от линий), разделённые на соответствующие меры эмиссии, определённые по наблюдениям спутника *GOES*. Красная сплошная линия соответствует теоретической зависимости (теоретические потоки в линиях w, x, y а также в линии z для иона $K\ XVIII$), полученной на основе модели CHIANTI (в фотонах/см²/с) для еди-

Тымczasem wyniki przedstawione w pracy [Phillips et al., 2015] wskazują, że nadwyżka widmowa w okolicy energii 3,5 keV obserwowana jest również w widmach rozbłysków słonecznych uzyskanych za pomocą polskiego spektrometru RESIK. Obserwowana nadwyżka, w wypadku widm słonecznych,

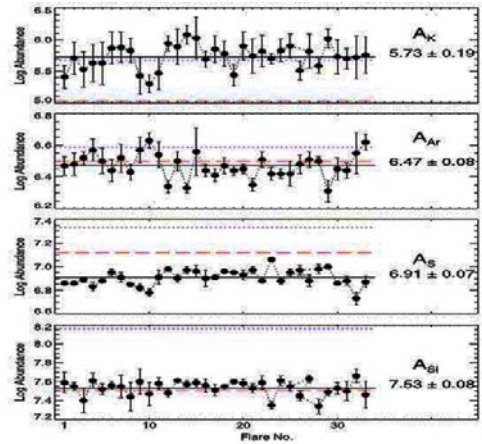


рис. 3. Усредненные по времени содержания элементов в короне по данным отдельных вспышек, а также усредненные величины содержаний элементов (черная сплошная линия) по данным всех 33 исследованных вспышек. Красные прерывистые линии соответствуют величинам «фотосферных» содержаний элементов из работы [Asplund et al., 2009] для Si, S, K, а для Ar из работы [Lodders et al., 2008]. Голубые пунктирные линии соответствуют величинам «корональных» содержаний из работы [Feldman, 1992] для Si, S, Ar, а для K из базы CHIANTI.

rys. 3. Uśrednione po czasie wartości obfitości dla indywidualnych rozbłysków oraz wartości średnie (czarna linia ciągła) dla całego zespołu 33 analizowanych rozbłysków. Czerwone linie przerywane odpowiadają obfitościom „fotosferycznym” z pracy [Asplund et al., 2009] dla Si, S, K oraz z pracy [Lodders et al., 2008] dla Ar. Niebieskie linie kropkowane odpowiadają wartościom obfitości „koronalnych” z pracy [Feldman, 1992] dla Si, S, Ar oraz z bazy CHIANTI dla K. Czarne linie poziome odpowiadają wartościom średnim dla zespołu 33 analizowanych rozbłysków.

ничной меры эмиссии, равной 10^{48} см^{-3} и для фотосферного содержания калия из работы [Asplund et al., 2009].

На рис. 4 видно, что большинство точек, соответствующих наблюдениям находится значительно выше теоретической кривой (фактор ~ 10); это связано с тем, что содержание калия в солнечной короне, определяющее величины наблюдаемых потоков излучения, значительно выше фотосферного содержания, принятого в теоретических расчетах.

В правой части рис. 4 представлена гистограмма, соответствующая наблюдаемым потокам излучения с наилучшим теоретическим соответствием функции Гаусса, что позволяет определить среднюю величину содержания калия в плазме солнечной короны на основе выполненных наблюдений – $\log A(K) = 6,06 \pm 0,34$.

На повышение содержания калия на другой активной звезде (двойной σ Gem) мы указывали ранее в работе [Huenemoerder et al., 2013], в которой было проведено сравнение спектров, полученных с помощью РЕСИК для одной отдельной солнечной вспышки (SOL2002-12-26T08:30), со спектрами с близким спектральным разрешением, полученными спектрометром HETG на обсерватории *Chandra* для двух звезд: σ Gem и HR 1099. В этой работе на основе наблюдаемых спектров были также исследованы и сравнены распределения плазмы с разными температурами.

Авторы работ [Bulbul et al., 2014; Boyarsky et al., 2014] в которых сообщалось о несоответствии наблюдений и теории, исходили из фотосферных значений содержания калия для Солнца и пришли к заключению что наблюдаемое в спектрах XMM-Newton излучение в линиях невозможно объяснить атом-

звязана jest z obecnością wielokrotnie zjonizowanego potasu, którego obfitość w gorącej plazmie rozbłykowej jest znacznie wyższa od obfitości fotosferycznej potasu. Jest to najprawdopodobniej związane ze znanym dla heliofizyków tzw. efektem “FIP” (ang. first ionisation potential)

Na Rys. 4 z pracy [Phillips et al., 2015] widać, że większość punktów obserwacyjnych leży znacznie powyżej krzywej teoretycznej (nawet 10 razy wyżej), co oznacza iż obserwacje rozbłyków wskazują na **znacznie wyższą niż fotosferyczna** obfitość potasu w koronie. Odpowiednia wartość obfitości w rozbłykach wynosi $\log A(K) = 6,06 \pm 0,34$.

Wcześniej, w pracy [Huenemoerder et al., 2013] anonsowaliśmy również podwyższoną obfitość potasu w innej niż Słońce gwiazdzie aktywnej (σ Gem). W pracy tej porównywano widma uzyskane za pomocą spektrometru RESIK dla wybranego rozbłysku (SOL2002-12-26T08:30) z widmami o podobnej rozdzielczości widmowej zyskanymi za pomocą spektrometru HETG z obсервatorium *Chandra*. Porównanie prowadzono dla gwiazd: σ Gem oraz HR 1099. Oprócz problemu wyznaczania obfitości w pracy [Huenemoerder et al., 2013] zbadano również i porównano rozkłady plazmy z temperaturą (czyli DEM) uzyskane na podstawie analizy widm tych gwiazd i rozbłyków).

Autorzy kontrowersyjnej interpretacji nadwyżki widmowej [Bulbul et al., 2014; Boyarsky et al., 2014] zakładali w swoich pracach fotosferyczną obfitość słoneczną potasu. Doszli do wniosku, że obserwowanej w widmach XMM-Newton linii nie można objaśnić przejściem odpowiadającym energii 3,5 keV w jonach potasu. Niestety, w swoich rozwa-

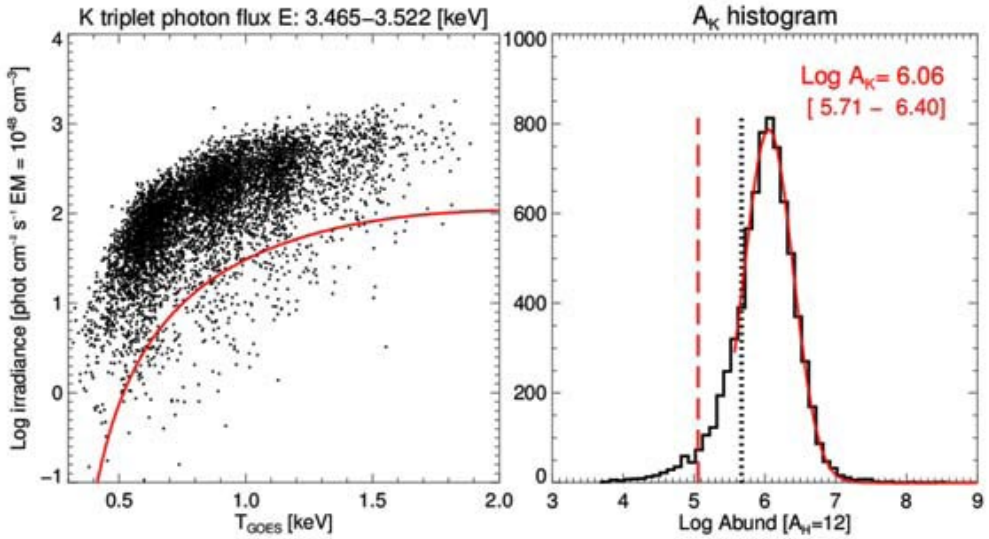


рис. 4. *Левая панель:* Потоки излучения (фот/см²/сек), наблюдаемые в диапазоне энергий 3,465–3,520 кэВ (с учтенным вкладом среднего уровня континуума и разделенные на меру эмиссии, определенную из наблюдений *GOES*). На рисунке черными точками показаны величины потоков излучения для наиболее сильных 7439 спектров (из всех ~9000 проанализированных). Красная сплошная линия соответствует зависимости теоретического потока излучения (линии w , x , y , а также линия z иона K XVIII в том же самом энергетическом диапазоне), вычисленного с помощью пакета *CHIANTI* для единичной меры эмиссии 10^{48} cm⁻³ и общепринятого фотосферного содержания калия.

Правая панель: Гистограмма, полученная на основе наблюдаемых потоков излучения, которая позволяет определить величину содержания калия в солнечной короне. Наилучшему совпадению наблюдений (черная кривая) с функцией Гаусса (красная сплошная линия) соответствует содержание калия в солнечной короне $\log A(K) = 6,06 \pm 0,34$. Вертикальные линии соответствуют фотосферному содержанию калия из работы [Asplund et al., 2009] (красная прерывистая линия) и корональному содержанию, взятому из модели *CHIANTI* [Feldman, 1992] (черный пунктир)

rys. 4. *Po lewej:* Znormalizowane strumienie [fotony/cm²/s; EM = 10⁴⁸ cm⁻³] obserwowane w przedziale energii 3,465–3,520 keV (z odjętym wkładem od średniego poziomu kontynuuum i podzielone przez miarę emisji wyznaczoną z obserwacji *GOES*). Na rysunku czarnymi kropkami przedstawiono wyniki dla najsilniejszych 7439 widm (spośród ~9000 analizowanych). Czerwona linia ciągła reprezentuje przebieg strumienia teoretycznego (wkład dają linie w , x , y , oraz z jonu K XVIII) policzony z wykorzystaniem kodu *CHIANTI*, również przyjmując miarę emisji 10^{48} cm⁻³. W wyliczeniach założono fotsferyczną obfitość potasu [10].

Po prawej: Histogram rozkładu mierzonych obfitości (odległości punktów od krzywej teoretycznej) wraz z naniesionym (czerwona linia ciągła) najlepiej dopasowanym profilem Gaussa. Wyniki dopasowania wskazują, że koronalna obfitość potasu $\log A(K) = 6,06 \pm 0,34$. Pionowe linie zaznaczają referencyjne wartości obfitości fotsferycznej potasu z pracy [Asplund et al., 2009], (linia czerwona, przerywana) oraz koronalnej z pliku *CHIANTI* "coronal_extended", [Feldman, 1992], (linia czarna kropkowana)

ными переходами, соответствующими энергии 3,5 кэВ в ионах калия. К сожалению, они в своих рассуждениях не приняли во внимание возможности и последствия повышенного содержа-

жаниях не уoзгледнили они возможности oraz konsekwencji podwyższonej obfitości potasu w plazmie kosmicznej, jak to ma miejsce w przypadku rozbłysków słonecznych oraz gwiazdy σ Gem.

ния калия, как это следует из наблюдений солнечных вспышек и звезды σ Gem. Результаты работы [Huenemoerder et al., 2013] показывают, что эффект FIP представляет собой значительно более универсальное явление, чем это принималось до сих пор, а также что вывод об объяснении наблюдаемого избытка излучения в спектре в окрестности энергии 3,5 кэВ за счет стерильных нейтрино является, по крайней мере, преждевременным. Резюмируя результаты опубликованных нами в течение 2011–2015 гг. работ в области интерпретации рентгеновских спектров, полученных спектрометром РЕСИК, необходимо отметить, что они главным образом относились к определению содержания в солнечной короне различных элементов (K, Ar, Cl, S, Si), излучающих спектральные линии в наблюдаемом интервале длин волн 3,4–6,1 Å.

Полученные результаты могут быть использованы также для анализа распределения дифференциальной меры эмиссии излучающей корональной плазмы по температурам, и изменения ее во времени для отдельных вспышек. Пример такого анализа для двух событий представлен в работе [Sylwester et al., 2015]. Использование дополнительной информации, например, рентгеновских снимков вспышек, полученных телескопом спутника *RHESSI*, позволит оценить размеры источника излучения. Это в свою очередь дает оценку плотности плазмы и её тепловой энергии [Sylwester et al., 2014]. Пока такой анализ был сделан только для нескольких отдельных вспышек. Такая работа планируется для всех 33 вспышек, для которых в работе [Sylwester et al., 2015] было изучено содержание элементов в солнечной короне.

Wyniki naszej pracy [Phillips et al., 2015] wykazują, że efekt FIP jest zjawiskiem znacznie bardziej uniwersalnym niż dotychczas uważano oraz że przypisywanie sterylnym neutrinom obecności nadwyżki widmowej w okolicy energii 3,5 keV jest co najmniej przedwczesne.

Podsumowując, w latach 2011–2015 wspólne prace dotyczące interpretacji widm otrzymanych za pomocą przyrządu RESIK poświęcone były wyznaczaniu obfitości pierwiastków (K, Ar, Cl, S oraz Si) z obserwacji widm rentgenowskich zakresu 3,4 Å – 6,1 Å. W ich wyniku ustalono wartości rozblyskowe obfitości pierwiastków dających podstawowy wkład do formowania się widm z obserwowanego zakresu. Przykład tego typu analizy przedstawiono dla dwóch zjawisk w pracy [Sylwester et al., 2015].

Posiłkując się dodatkowymi obserwacjami np. obrazami rentgenowskimi jaśder rozblyskowych rekonstruowanych na podstawie obserwacji z satelity *RHESSI*, oszacowano rozmiary gorących jąder rozblyskowych, w których formują się widma. Porównanie wielkości miary emisji jąder z ich objętością, umożliwiło oszacowanie jej gęstości i zawartości energii termicznej [Sylwester et al., 2014].

Dotychczas tego typu analiza przeprowadzono jedynie dla kilku wybranych rozblysków. Planujemy tego typu analizę kontynuować.

ЛИТЕРАТУРА

BIBLIOGRAFIA

- [Sylwester et al., 2005] *Sylwester J., Gaicki I., Kordylewski et al.* RESIK: A Bent Crystal X-ray Spectrometer for Studies of Solar Coronal Plasma Composition // *Solar Physics*, 2005. V. 226, P. 45.
- [Sylwester et al., 2011] *Sylwester B., Phillips K.J.H., Sylwester J., Kuznetsov V.D.* The solar flare chlorine abundance from RESIK X-ray spectra // *Astrophys. J.* 2011. V. 738. P. 49
- [Sylwester et al., 2012] *Sylwester J., Sylwester B., Phillips K.J.H., Kuznetsov V.D.* The solar flare sulphur abundance from RESIK observations//*Astrophys. J.* 2012. V. 751. P. 103
- [Sylwester et al., 2013] *Sylwester B., Phillips K.J.H., Sylwester J., Kepa A.* Silicon Abundance from RESIK Solar Flare Observations // *Solar Physics*. 2013. V. 283. P. 453.
- [Huenemoerder et al., 2013] *Huenemoerder D.P., Phillips K.J.H., Sylwester J., Sylwester B* Stellar Coronae, Solar Flares: a Detailed Comparison of σ Gem, HR 1099, and the Sun in High-resolution X-rays // *Astrophys. J.* 2013. V. 768. № 135. P. 15.
- [Phillips et al., 2015] *Phillips K.J.H., Sylwester B., Sylwester J.* The X-ray Line Feature at 3,5 keV in Galaxy Cluster Spectra // *Astrophys. J.* 2015.V. 809. № 50.
- [Sylwester et al., 2014] *Sylwester B., Sylwester J., Phillips K.J.H., Kepa A., Mrozek T.* Solar Flare Composition and Thermodynamics from RESIK X-ray Spectra. *Astrophys. J.* // 2014. V. 787. P. 122.
- [Sylwester et al., 2015] *Sylwester B., Phillips K.J.H., Sylwester J., Kepa A.* RESIK solar X-ray flare element abundances on non-isothermal assumption // *Astrophys. J.* 2015. V. 805. P. 49.
- [Feldman, 1992] *Feldman U.* Elemental abundances in the upper solar atmosphere // *Physica Scripta*. 1992.V. 46. P. 202.
- [Asplund et al., 2009] *Asplund M., Grevesse N., Sauval A.J. & Scott P.* The Chemical Composition of the Sun // *Annual review of Astronomy and Astrophysics*. 2009. V. 47. P. 481.
- [Lodders et al., 2008] *Lodders K.* The Solar Argon Abundance // *Astrophys. J.* 2008. V.674. P. 607.
- [Bulbul et al., 2014] *Bulbul E., Markevitch M., Foster A. et al.* Detection of an Unidentified Emission Line in the Stacked X-ray Spectrum of Galaxy Clusters // *Astrophys. J.* 2014. V. 789. P. 13.
- [Boyarsky et al., 2014] *Boyarsky A., Ruchayskiy O., Iakubovskiy D. & Franse J.* An Unidentified Line in X-ray Spectra of the Andromeda Galaxy and Perseus Galaxy Cluster // *Physical Review Letters*. 2014. V. 113. P. 251301.

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 reach 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.

«СОЛЬПЕКС»: СПЕКТРОМЕТРОПОЛЯРИМЕТР МЯГКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА

руководитель проекта
с российской стороны:

С. Кузин

руководитель проекта
с польской стороны:

Я. Сильвестер

участники проекта
с российской стороны:

С. Шестов

участники проекта с польской стороны:
**С. Пłoциеняк, М. Стенслицки, Я. Бонкала,
Ж. Шафож, Д. Сциловски, М. Ковалински,
З. Кордылевски**

Глубокое понимание природы источников рентгеновского излучения Солнца остается одной из основных проблем физики Солнца и астрофизики. Известно, что импульсный нагрев плазмы в начальной стадии вспышек происходит путем преобразования непотенциальной части энергии магнитного поля активной области (АО) в другие её формы: энергию ускоренных частиц, повышение турбулентности плазмы, нагрев и направленные движения плазмы в магнитных петлях.

Вследствие торможения ускоренных частиц в нижележащих слоях солнечной атмосферы возбуждается рентгеновское излучение в широком диапазоне энергий. Подробные исследования такого излучения проводились в последнее время с использованием телескопа-спектрометра RHESSI [Lin, 2011]. Пучки ускоренных частиц сильно анизотропны, вследствие чего при взаимодействии ускоренных частиц со средой формируемое жесткое излуче-

«SOLPEX»: СПЕКТРОПОЛЯРИМЕТР МЯГКОГО ПРОМИЕНИОВАНИЯ РЕНТГЕНОВСКОГО СЛОНЦА

кierownik projektu
ze strony Rosji:

S. Kuzin

кierownik projektu
ze strony Polski:

J. Sylwester

uczestnicy projektu
ze strony Rosji:

S. Szestow

uczestnicy projektu ze strony Polski:
**S. Płocieniak, M. Stęślicki, J. Bąkała,
Ż. Szaforz, D. Ścisłowski, M. Kowaliński,
Z. Kordylewski**

Jednym z głównych zadań współczesnej astrofizyki jest dobre zrozumienie właściwości źródeł promieniowania rentgenowskiego Słońca. Widomo, że w początkowej (impulsowej) fazie rozbłysku plazma jest podgrzewana poprzez zamianę części energii potencjalnej zawartej w polu magnetycznym obszaru aktywnego (АО) w jej inne formy: energię przyśpieszonych cząstek, energię turbulencji plazmy i wzrost jej temperatury.

Przyspieszone cząsteczki podczas hamowania w gęstszych częściach atmosfery słonecznej są źródłem promieniowania rentgenowskiego (promieniowanie hamowania) o szerokim zakresie energii. W ostatnich latach największy postęp w rozumieniu fizyki rozbłysków przyniosły obserwacje wykonana za pomocą rotującego teleskopu-spektrometru RHESSI [Lin, 2011]. Wiadomo, że wiązki przyśpieszonych w rozbłyskach cząsteczek są wysoce anizotropowe, co powoduje, że podczas interakcji z otoczeniem powinno być emitowane silnie spolaryzowane

ние оказывается в значительной степени поляризованным (до 40% для фотонов с энергией около 20 кэВ).

Мягкое рентгеновское излучение (с энергиями фотонов ниже 10 кэВ) формируется в областях пересоединения (реконфигурации) магнитного поля и вспышечных магнитных петель. Мягкое рентгеновское излучение тоже поляризовано, но в меньшей степени. В этом случае причиной поляризации излучения является анизотропное распределение энергий электронов [Emslie, Brown, 1980]. Третий механизм, который может приводить к появлению поляризованной компоненты излучения, это флуоресценция рентгеновского излучения фотосферой [Jeffrey, Kontar, 2011].

Уже в 70-х годах прошлого века было проведено несколько попыток измерить степень поляризации как мягкой, так и жесткой компоненты рентгеновского излучения солнечных вспышек. Эти измерения проводились на спутниках:

- ИНТЕРКОСМОС [Tindo et al., 1970; 1972a; 1972b; 1976]
- OSO-7 [Nakada et al., 1974]
- STS-3 [Tramiel et al., 1984]
- КОРОНАС-Ф [Zhitnik et al., 2006]
- RHESSI [McConnell et al., 2003; Boggs et al., 2006; Suarez-Garcia et al., 2006].

К сожалению, ни одно измерение не было достаточно точным, чтобы его интерпретация позволила добавить новую информацию о горячей вспышечной плазме.

Конструкция прибора СОЛЬПЕКС даст такую возможность, причем степень поляризации мягкого рентгеновского излучения вспышек будет измеряться с точностью в несколько процентов

тверде промieniowanie rentgenowskie (do 40% w wypadku fotonów o energiach około 20 keV).

Мя́кка складова промieniowania (o energiach poniżej 10 keV) jest emitowana początkowo z okolicy tzw. miejsc przełączania (rekonfiguracji) pola magnetycznego i wzdłuż pętli magnetycznych rozbłysku. Ten miękki składnik jest również spolaryzowany, ale w mniejszym stopniu niż w przypadku twardego promieniowania rentgenowskiego. Źródłem polaryzacji tego składnika jest anizotropowy charakter rozkładu elektronów wywołujących to promieniowanie [Emslie, Brown, 1980]. Trzecim mechanizmem, który może prowadzić do pojawienia się spolaryzowanej składowej promieniowania rentgenowskiego jest fluorescencja fotosfery oświetlanej źródłem koronalnym [Jeffrey, Kontar, 2011].

Od początku lat siedemdziesiątych ubiegłego wieku podejmowano wiele prób pomiarów polaryzacji zarówno miękkiego jak i twardego promieniowania rentgenowskiego rozbłysków. Obserwacje prowadzono w trakcie kilku misji kosmicznych:

- INTERCOSMOS. [Tindo et al., 1970; 1972a; 1972b; 1976]
- OSO-7 [Nakada et al., 1974]
- STS-3 [Tramiel et al., 1984]
- CORONAS-F [Zhitnik et al., 2006]
- RHESSI [McConnell et al., 2003; Boggs et al., 2006; Suarez-Garcia et al., 2006].

Niestety żaden z tych pomiarów nie był wystarczająco dokładny, aby precyzyjnie wyznaczyć stopień polaryzacji i wyjaśnić strukturę fizyczną obszaru emisji i uwięzionej w nim gorącej plazmy rozbłyskowej.

Planowany w ramach instrumentu SOLPEX zestaw bloków pomiarowych stwarza niepowtarzalną okazję do uzy-

и даст возможность определить направления плоскости поляризации.

СОЛЬПЕКС – это часть прибора КОРТЕС, предназначенного для размещения на борту Международной космической станции (МКС). Инструмент СОЛЬПЕКС разрабатывается в рамках проекта СИЛЕКС (Spectroscopic Investigation of Low-Energy soft X-rays). Основные научные задачи инструмента СОЛЬПЕКС:

- измерение степени линейной поляризации мягкого рентгеновского излучения в солнечных вспышках и других астрофизических объектах, попадающих в поле зрения прибора;
- определение временных изменений физических характеристик плазмы вспышечной области, включая определение функции распределения плазмы по температуре, временную зависимость турбулентного состояния плазмы, величину доплеровских смещений линий, определения химического состава плазмы излучающей области, все эти наблюдения будут проводиться с временным разрешением, которое до настоящего времени не было достигнуто;
- измерение абсолютного потока рентгеновского излучения в области энергий 1–15 кэВ с точностью 10^{-10} Вт/м² и временным разрешением порядка ~1 мс;
- измерение спектров рентгеновского излучения АО и вспышек со сверхвысоким спектральным и временным разрешением.

Прибор СОЛЬПЕКС, размещенный внутри измерительного комплекса КОРТЕС, состоит из трёх частично независимых модулей (рис. 1):

skania dokładnych pomiarów stopnia oraz kierunku polaryzacji miękkiego promieniowania rentgenowskiego formującego się w rozbłyskach słonecznych.

Instrument SOLPEX będzie częścią zespołu instrumentów KORTES, który będzie umieszczony na zewnątrz Międzynarodowej Stacji Kosmicznej, na specjalnym wysięgniku naprowadzanym na Słońce. Instrument ten będzie główną częścią projektu SILEX (Spectroscopic Investigation of Low-Energy soft X-rays). Głównymi celami naukowymi instrumentu SOLPEX są:

- pomiary, w zakresie promieniowania rentgenowskiego, liniowej polaryzacji pochodzącego z rozbłysków słonecznych, jak też i innych źródeł astrofizycznych będących w zasięgu obserwacji.
- zbadanie zmian parametrów fizycznych plazmy rozblyskowej takich jak np. funkcja rozkładu plazmy po temperaturach, zmian prędkości turbulentnej, wyznaczenie przesunięć dopplerowskich linii widmowych i określenie składu chemicznego emitującej plazmy. Wszystkie te pomiary będą wykonywane z niespotykaną dotąd rozdzielczością czasową.
- pomiary słonecznego widma promieniowania rentgenowskiego w zakresie 1–15 keV, ze średnią rozdzielczością widmową, z czułością około 10^{-10} W/m² i rozdzielczością czasową bliską 1 ms.
- pomiary widm promieniowania rentgenowskiego pochodzącego od obszarów aktywnych i rozbłysków z bardzo dużą rozdzielczością czasową i niespotykaną rozdzielczością spektralną.

Instrument SOLPEX składa się z trzech częściowo niezależnych modułów (Rys. 1) rozmieszczonych wewnątrz platformy KORTES:

- быстро вращающегося барабанного спектрометра **RDS** (rotating drum spektrometer) с плоскими кристаллами;
 - брэгговского поляриметра **B-POL** (Bragg polarimeter);
 - **Пинхол-камеры** (Pin-hole Imager), камеры обскура.
- szybko rotującego spektrometru o dużych kryształach **RDS** (rotating drum spektrometer);
 - **polarymetr B-POL** (Bragg POLarimeter)
 - **kamera otworkowa** (Pin-hole Imager)

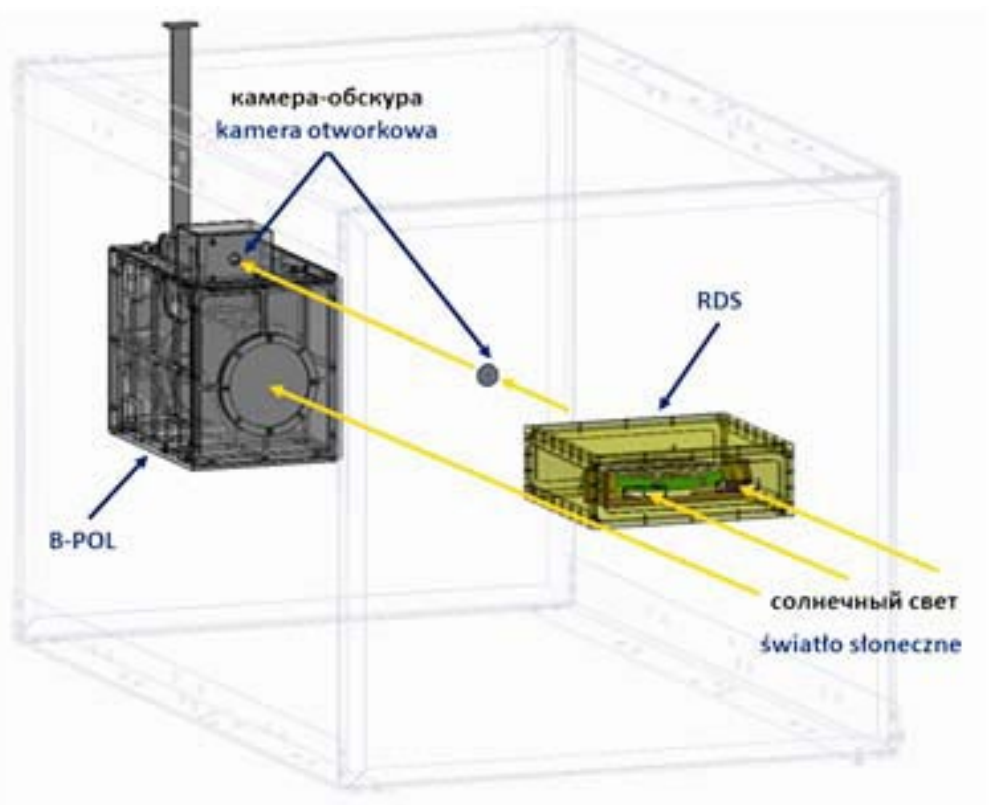


рис. 1. Распределение модулей прибора СОЛЬПЕКС внутри аппаратуры КОРТЕС
rys. 1. Rozmieszczenie bloków pomiarowych instrumentu SOLPEX wewnątrz platformy KORTES

СПЕКТРОМЕТР RDS

Входящий в состав прибора СОЛЬПЕКС быстро вращающийся барабанный спектрометр RDS (rotating drum spektrometer) с плоскими кристаллами позволяет следить за быстрыми изменениями спектров и даёт возможность определять величину доплеров-

SPEKTROMETRU RDS

Szybko rotującego spektrometru o dużych kryształach. Ten rotujący bębnowy spektrometr (**RDS** – rotating drum spectrometer) pozwoli na badania szybkich zmian natężenia linii widmowych i umożliwi pomiary ich przesunięć dopplerowskich. Konstrukcja bębnowego

ских сдвигов линий. Конструкция барабанного спектрометра (рис. 2 – слева) не имеет предшественников. Его основной частью является восьмисторонний барабан с восемью плоскими кристаллами, прикрепленными по сторонам. Барабан постоянно вращается со скоростью 10 об/с. Кристаллы освещаются рентгеновским излучением источников в короне Солнца, которое отражается по закону Брэгга и попадает на четыре детектора типа SSD. В эксперименте будут применяться детекторы Vitus R100 фирмы Ketek, которые имеют довольно большую активную поверхность и быстро (в течение миллисекунды) реагируют на попадание отдельных фотонов. Детекторы обладают также большим динамическим диапазоном $>10^5$.

В спектрометре RDS использован новый принцип получения информации о брэгговском угле, который соответствует данному зарегистрированному фотону. В момент регистрации, который можно определить с точностью до 1 мс, можно определить тип кристалла, освещавшего детектор, и угол падения на кристалл с точностью ~ 10 с дуги, что меньше ширины кривой отражения. В ходе работы для каждого кристалла будет строиться гистограмма: количество счетов/угол/длина волны. В зависимости от интенсивности источника, существенное количество счетов на спектрах будет получаться в течение минут (безвспышечная активная область) или уже за секунду (вспышка балла M5 и выше). Восемь кристаллов разбиваются на четыре попарно идентичных, которые встраиваются в барабан таким образом, чтобы они составляли систему доплерометра [Sylwester et al., 2015]. Определение наличия и величины сдвигов доплера составляет одну из основных задач

спектрометра (patrz Rys. 2) jest nowatorska. Moduł ten składa się ośmiokątowego bębna z zamocowanymi do niego płaskimi kryształami. Bęben rotuje z częstotliwością 10 obrotów na sekundę. Światło emitowane przez koronę słoneczną jest odbijane od rotujących kryształów zgodnie z prawem Bragga i dalej oświetla cztery detektory typu SDD (silicon drift detectors). W tym bloku zostaną użyte detektory Vitus R100 firmy Ketek. Detektory te charakteryzują się dużą powierzchnią efektywną i szybkim czasem reakcji (1 μ s). Zakres dynamiczny detektorów jest większy niż 10^5 . W RDS zastosowano nowatorską metodę przypisania kąta Bragga każdemu fotonowi rejestrowanemu za pomocą indywidualnego detektora. W momencie rejestracji, znanym z dokładnością 1 μ s, można łatwo określić który detektor i kryształ dokonał rejestracji i ile wynosił kąt Bragga, z dokładnością ok. 10 sekund łuku, czyli mniejszą niż szerokość instrumentalna tzw. krzywej odbicia. W ten sposób dla każdego kryształu można skonstruować histogram liczby zliczeń przypadającej na jednostkę kąta obrotu lub długości fali. Zależnie od intensywności źródła odpowiednia, wymagana do interpretacji widma, liczba zliczeń zostanie osiągnięta w ciągu minut (w przypadku obszarów aktywnych) lub sekund (w przypadku maksimum rozbłysku klasy rentgenowskiej powyżej M5). Dwa spośród ośmiu kryształów umieszczonych na bębnie są identyczne i zamocowane tak, aby moduł ten mógł być wykorzystany jako doplerometr [Sylwester et al., 2015]. Określenie istnienia i wielkości przesunięć dopplerowskich w widmie jest jednym z głównych celów naukowych tego instrumentu. Przesunięcia te niosą

проекта. Присутствие сдвигов несёт информацию о скорости испарения плазмы в импульсной фазе вспышки, которая до настоящего времени не измерялась с временным разрешением в несколько секунд.

ze sobą informacje o szybkości parowania plazmy podczas impulsowej fazy rozbłysku. Po raz pierwszy będą one mierzone w odstępach co najwyżej kilku sekundowych.

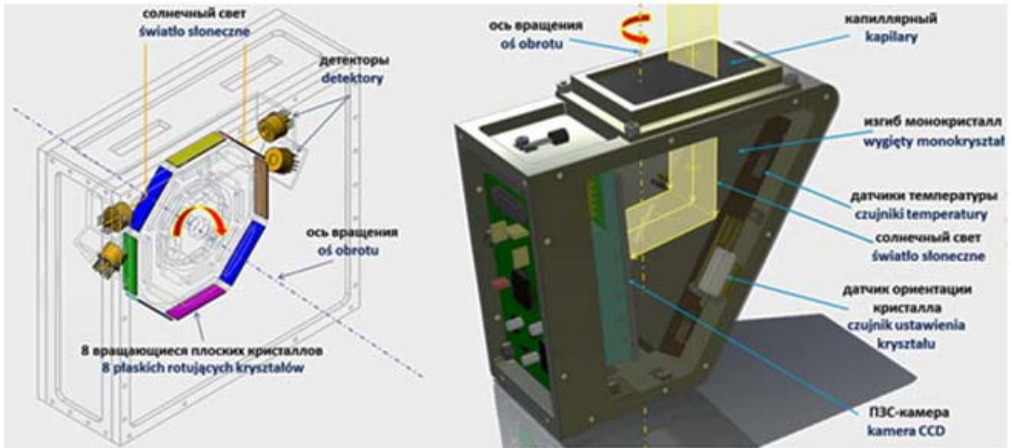


рис. 2. Слева: схема быстро вращающегося спектрометра RDS. Справа: схема поляриметра B-POL
rys. 2. Po lewej: schemat funkcjonalny szybko rotującego spektrometru RDS. Po prawej: schemat polarymetru B-POL

ПОЛЯРИМЕТР B-POL (BRAGG POLARIMETER)

Поляриметр B-POL (схема которого представлена на рис. 2 – справа) предназначен для регистрации и измерения величины линейной поляризации излучения в импульсной стадии вспышек. Измерения будут проводиться в узком интервале мягкого рентгеновского диапазона спектра, выделяемого с использованием большего монокристалла Si 111, изогнутого цилиндрически по радиусу (~610 мм). Отражённый спектр будет регистрироваться с помощью детектора на основе ПЗС-матрицы. Пара кристалл – ПЗС-матрица будет вращаться вокруг оси, направленной на исследуемую активную область. Скорость вращения 1 оборот/с. Спек-

POLARYMETR B-POL (BRAGG POLARIMETER)

Schemat funkcjonalny tego bloku przedstawiony jest na Rys. 2 – po prawej. B-POL będzie wykorzystany do mierzenia stopnia liniowej polaryzacji miękkiego promieniowania rentgenowskiego w fazie impulsowej rozbłysków słonecznych. Pomiarы będą prowadzone w wąskim zakresie widma za pomocą wypukłego, cylindrycznie wyprofilowanego monokryształu Si 111 o promieniu krzywizny wynoszącym 610,0 mm. Odbite widmo będzie rejestrowane przez duży detektor CCD. Para kryształ–CCD będzie rotować wokół osi skierowanej na rozbłysk słoneczny, z częstotliwością 1 obrót/s. Widmo rejestrowane za pomocą detektora będzie odczytywane co każ-

тры будут регистрироваться каждые 30° оборота, т.е. не реже 12 раз в секунду. Кристалл подобран таким образом, чтобы отражение спектров происходило в окрестности угла Брюстера (45°, см. рис. 3 – слева), где чувствительность отражения сильно зависит от степени поляризации излучения.

В предельном случае, если уровень линейной поляризации составляет 100%, модуляция регистрируемого сигнала достигает также 100%. Присутствие модуляции будет сви-

de 30° obrotu, czyli co najmniej 12 razy na sekundę. Kryształ dobrany jest tak, że widmo mierzone jest w pobliżu tzw. kąta Brewstera (45°, patrz Rysunek 3 – po prawej) gdzie stopień efektywności odbicia silnie zależy od stopnia liniowej polaryzacji promieniowania.

W skrajnym przypadku, gdyby stopień polaryzacji liniowej padającego promieniowania wynosił 100% poziom modulacji również dochodziłby do 100% (w długości fali odpowiadającej kątowi Brewstera). Istnienie modulacji widma w liniach jak

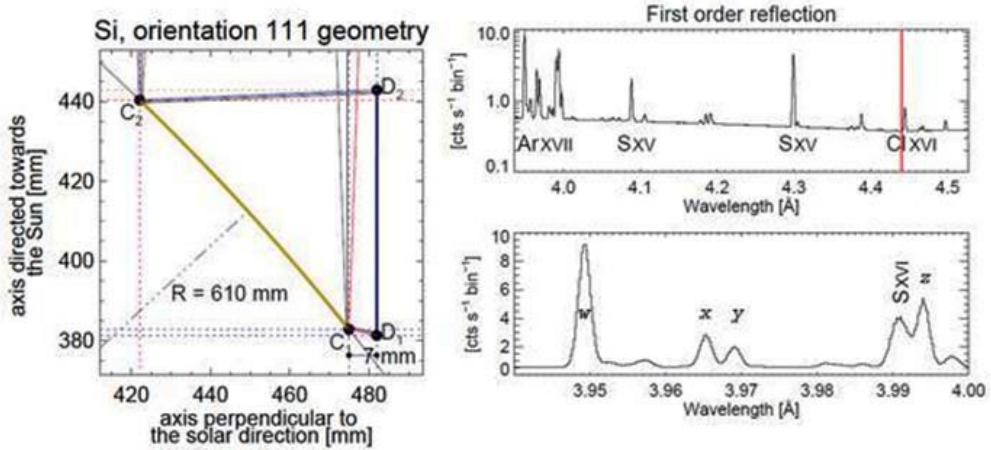


рис. 3. Слева: Разрез системы кристалл-детектор. Кристалл цилиндрически изогнутый (зеленая линия). C1 и C2 обозначают границы монокристалла Si 111 и соответствующие им положения границы детектора ПЗС-матрицы. Красные тонкие линии обозначают положения источника внутри поля зрения коллиматора (увеличено для наглядности). Справа: вычисленный спектр вспышки балла M5.0, который будет измеряться детектором за один оборот. Внизу увеличение формы спектра в области линии He-подобного иона Ar XVIII (w, x, y, и z обозначают резонансную, интеркомбинационную и запрещенную линии этого иона). Присутствие линейной поляризации будет существенным образом менять интенсивности этих линий, также как и модуляцию уровня континуума вследствие вращения [Beiersdorfer et al., 1996].

rys. 3. Z lewej: Przekrój kryształu i detektora polarymetru B-POL. Powierzchnia cylindrycznie zakrzywionego kryształu została zaznaczona za pomocą zielonej linii. C1 i C2 oznaczają końce monokryształu Si 111 i odpowiadające im położenia końców detektora CCD (D1 i D2). Cienkie czerwone linie oznaczają możliwy zakres położenia źródła w polu widzenia kolimatora (zakres ten zdecydowanie powiększono dla większej przejrzystości schematu). Z prawej: wyliczone widmo rozbłysku klasy M5.0, będące rejestrowane podczas jednego obrotu detektora wokół osi nakierowanej na rozblysk. U dołu przedstawiono powiększenie okolicy linii widmowych formujących się w helopodobnym jonie Ar XVIII (linie oznaczone w, x, y i z odpowiadają odpowiednio przejściom: rezonansowemu, interkombinacyjnemu i wzbronionemu). Obecność polaryzacji liniowej zmienia znacząco względne natężenia tych linii, co wywołuje modulację emisji w funkcji fazy obrotu [Beiersdorfer et al., 1996].

детельствовать о наличии поляризации, а фаза определять положение плоскости поляризации относительно солнечных координат. Для того чтобы сузить поле зрения поляриметра до размера одной активной области (2×2 мин дуги), перед кристаллом будет установлен 2D коллиматор, изготовленный из множества капилляров. Ось вращения системы будет наводиться на активную область на основе данных о положении всыпечной области. Эти данные будут рассчитываться бортовым компьютером на основе анализа изображений, регистрируемых пинхол-камерой.

ПИНХОЛ-КАМЕРА (PIN-HOLE IMAGER)

Пинхол-камера состоит из круглого отверстия ($\sim 1 \text{ мм}^2$) и ПЗС-матрицы (E2V CCD30-11, 256×1024), регистрирующей изображение на расстоянии ~ 60 см. Перед отверстием размещен графитовый фильтр, который обеспечит пропускание излучения только с энергиями выше 0,5 кэВ. В таком диапазоне энергий хорошо видны активные области, вспышки, а также лимбовое уярчение. На основе наблюдений пинхол-камеры станет возможной привязка положения вспыпечной области к солнечным координатам. Измерения будут проводиться непрерывно, несколько раз в секунду, что также позволит следить за появлением вспышек с самого начала и наводить на вспыпечные АО ось вращения поляриметра еще до начала импульсной фазы.

Описанный прибор СОЛЬПЕКС разрабатывается группами из ФИАН

и в widmie ciągłym wskazywałyby na obecność polaryzacji, głębokość modulacji na stopień polaryzacji, natomiast faza modulacji określałaby położenie płaszczyzny polaryzacji względem współrzędnych słonecznych. Aby ograniczyć pole widzenia do jednego obszaru aktywnego (o rozmiarach 2×2 minuty kątowe) polarymetr B-POL będzie wyposażony w kolimator składający się z układu wielu cienkich kapilar. Oś obrotu układu będzie naprowadzana na rozbiegający obszar aktywny. Informacja o rozwoju jasności i położeniu rozbiegu będzie przekazywana przez komputer pokładowy na podstawie analizy obrazów całej tarczy słonecznej dostarczanych nieustannie przez kamerę otworkową.

KAMERA OTWORKOWA (PIN-HOLE IMAGER)

W skład kamery otworkowej wchodzi sam okrągły otworek ($\sim 1 \text{ mm}^2$) i detektor CCD (E2V CCD30-11, 256×1024 pikseli), który rejestruje obraz formujący się w odległości około 60 cm. Przed otworkiem znajduje się filtr grafitowy, który przepuszcza tylko promieniowanie o energiach powyżej ok. 0,5 keV. Promieniowanie o takich energiach jest emitowane przez obszary aktywne i rozbieg, a także, w tym zakresie energii, obserwowane jest pojaśnienie brzegowe. Analiza położenia tego pojaśnienia umożliwi wyznaczanie położenia obszarów aktywnych na tarczy Słońca. Obrazy będą wykonywane i analizowane w sposób ciągły, kilka razy na sekundę, co pozwoli na określenie momentu początku rozbiegu i naprowadzenie osi obrotu polarymetru w zadany punkt obszaru jeszcze przed pojawieniem się fazy impulsowej.

Opisany instrument SOLPEX jest obecnie konstruowany przez zespoły FIAN (w Moskwie, RAN) i ZFS CBK

(РАН) и ЛФС ЦКИ (ПАН). Предполагаемый срок начала эксперимента на МКС – 2018 год. Концепция измерений, используемая в приборе СОЛЬПЕКС, до сих пор не применялась. Рассчитано, что с помощью прибора, в условиях освещенности на борту МКС, станут возможными наблюдения 50, 5 и одной вспышек балла С, М и Х, соответственно.

Работы по конструкции прибора идут по плану. В Польше они поддерживаются грантом НЦН УМО-2013-11/B/ST9/00234.

(PAN). Spodziewane wyniesienie przyrzadu na pokład Międzynarodowej Stacji Kosmicznej (MSK) to rok 2018.

Zawarte w konstrukcji przyrzadu koncepcje pomiarów nie były dotychczas stosowane. Szacuje się, biorąc pod uwagę warunki panujące na pokładzie MSK, że instrument zaobserwuje około pięćdziesiąt rozbłysków klasy C, pięć klasy M i jeden rozbłysk klasy X.

Prace nad konstrukcją urządzenia przebiegają zgodnie z planem. W Polsce są one finansowane przez grant NCN UMO-2013-11 / B / ST9 / 00234.

ЛИТЕРАТУРА

BIBLIOGRAFIA

- [Lin, 2011] *Lin R.P.* Energy Release and Particle Acceleration in Flares: Summary and Future Prospects // *Space Science Reviews*. 2011.V. 159. Issue 1-4. P. 421-445.
- Zharkova V.V., Kuznetsov A.A., Siversky T.V.* Diagnostics of energetic electrons with anisotropic distributions in solar flares I. Hard X-rays bremsstrahlung emission // *A&A*. 2010. P. 512.
- [Emslie, Brown, 1980] *Emslie A.G., Brown J.C.* The polarization and directivity of solar-flare hard X-ray bremsstrahlung from a thermal source // *ApJ*. 1980. V. 237. P. 1015
- [Jeffrey, Kontar, 2011] *Jeffrey N.L.S., Kontar E.P.* Spatially resolved hard X-ray polarization in solar flares: effects of Compton scattering and bremsstrahlung // *A&A*. 2011. V. 536. P. 93.
- [Tindo et al., 1970] *Tindo I.P., Ivanov V.D., Mandel'Stam S.L., Shuryghin A.I.* On the polarization of the emission of X-ray solar flares // *Solar Physics*. 1970. V. 14. P. 204.
- [Tindo et al., 1972a] *Tindo I.P., Ivanov V.D., Mandel'Stam S.L., Shuryghin A.I.* New measurements of the polarization of X-ray solar flares // *Solar Physics*. 1972. V. 24. P. 429.
- [Tindo et al., 1972b] *Tindo I.P., Ivanov V.D., Valniček B., Livshits M.A.* Preliminary interpretation of the polarization measurements performed on "INTERCOSMOS-4" during three X-ray solar flares // *Solar Physics*. 1972b. V. 7. P. 426.
- [Tindo et al., 1976] *Tindo I.P., Shurygin A.I., Steffen W.* The polarization of X-ray emission of some solar flares in July 1974 // *Solar Physics* 1976. V. 46. P. 219.
- [Nakada et al., 1974] *Nakada M.P., Neupert W.M., Thomas R.J.* Polarization results of solar X-rays from OSO-7 // *Solar Physics*. 1974. V. 37. P. 429.
- [Tramiel et al., 1984] *Tramiel L.J., Novick R., Chanan G.A.* Polarization evidence for the isotropy of electrons responsible for the production of 5-20 keV X-rays in solar flares // *ApJ*. 1984. V. 280. P. 440.
- [Zhitnik et al., 2006] *Zhitnik I.A., Logachev Yu.I., Bogomolov A.V., Denisov Yu.I. et al.* Polarization, temporal, and spectral parameters of solar flare hard X-rays as measured by the SPR-N instrument onboard the *CORONAS-F* satellite // *Solar System Research* 2006.V. 40. P. 93.
- [McConnell et al., 2003] *McConnell M.L., Smith D.M., Emslie A.G. et al.* A Hard X-Ray Polarimeter for Gamma-Ray Bursts and Solar Flares // *Proc. SPIE* 2003.V. 4843. P. 1382

- [Boggs et al., 2006] *Boggs S.E., Coburn W., Kalemci E.* Gamma-Ray Polarimetry of Two X-Class Solar Flares // *ApJ.* 2006. V. 638. P. 1129.
- [Suarez-Garcia et al., 2006] *Suarez-Garcia E., Hajdas. W., Wigger C. et al.* X-Ray Polarization of Solar Flares Measured with Rhesi // *Solar Physics* 2006. V. 239. P. 149.
- [Sylwester et al., 2015] *Sylwester J., Kordylewski, Z., Płoceniak S. et al.* X-ray Flare Spectra from the DIOGENESS Spectrometer and Its Concept Applied to ChemiX on the Interhelioprobe Spacecraft // *Solar Physics* 2015. V. 290. Issue 2. P. 3683.
- [Beiersdorfer et al.,1996] *Beiersdorfer P., Vogel D.A., Reed K.J. et al.* Measurement and interpretation of the polarization of the x-ray line emission of heliumlike Fe // *Physical Review A.* 1996. V. 53. P. 3974.

SolpeX is an innovative soft X-ray spectro-polarimeter designed for registering solar X-ray spectra, images and polarization in the energy range 0,5–40 keV. SolpeX will be included in Russian instrument KORTES, to be mounted aboard International Space Station. SolpeX consists of three independent units: a pin-hole X-ray spectral imager, a polarimeter and a fast-rotating flat-crystal Bragg spectrometer. We discuss main scientific tasks of the instrument, describe operation principles and design of the instrument.

ТРАНЗИЕНТ

руководитель с российской стороны:

А. Позаненко

руководитель с польской стороны:

Л. Манкевич

Проект Pi-of-the-Sky-II является развитием проекта Pi-of-the-Sky, предназначенного, как следует из названия, для одновременного обзора примерно четверти всего небосвода, или половины неба, видимого из одной точки на Земле. Идея проекта была предложена известным польским астрофизиком Богданом Пачинским для поиска оптических компонентов космических гамма-всплесков [Paczynski, 2001] и вообще быстропеременных транзитных астрономических источников.

Космические гамма-всплески (GRB) – одни из самых мощных катастроф во Вселенной (рис. 1), источники которых расположены на космологических расстояниях. Гамма-всплески, длительность гамма-излучения которых превышает десятки секунд, в 60% случаев сопровождаются оптическим послесвечением, регистрируемым уже после окончания активной фазы всплеска, то есть после окончания излучения в гамма-диапазоне. Регистрация оптического компонента во время активной фазы, синхронно с гамма-излучением, является сложной технологической задачей, так как предсказать момент и место возникновения гамма-всплеска невозможно, а малая длительность активной фазы всплеска не позволяет эффективно использовать оптические телескопы, даже полностью роботизированные, поскольку они могут начать наблюдения лишь после наведения на объект, а время наведения часто оказывается больше, чем длительность активной фазы. Действительно, из более чем 600 удачных наблюдений послесвечений только для

ТРАНЗЫТ

кierownik projektu ze strony Rosji:

А. Позаненко

кierownik projektu ze strony Polski:

Л. Манкевич

Pi of the Sky II jest kontynuacją projektu Pi of the Sky, którego celem jest, jak wynika z samej nazwy, jednoczesna obserwacja mniej więcej połowy nieba, widzianego z punktu obserwacji na Ziemi. Sam pomysł wykorzystania małych teleskopów do ciągłych obserwacji nieba w celu poszukiwania zmienności obiektów astronomicznych, w tym także poświat optycznych związanych z rzadkimi zjawiskami kosmicznymi kosmologicznego pochodzenia, takimi jak rozbłyski gamma, pochodzi od wybitnego polskiego astrofizyka profesora Bogdana Paczyńskiego [Paczynski, 2001].

Rozbłyski gamma (GRB) są jednymi z najsilniejszych eksplozji we Wszechświecie (Rys. 1), znajdujących się w kosmologicznych odległościach od Ziemi. Czas trwania rozbłysków gamma wynosi, w większości wypadków, co najmniej kilkadziesiąt sekund. Zazwyczaj rozbłyski gamma związane są z poświatami optycznymi, które daje się zaobserwować dopiero po zakończeniu emisji gamma. Obserwacje aktywności optycznej w tak zwanej fazie natychmiastowej emisji, równoległe z emisją promieniowania gamma, stanowi poważne wyzwanie techniczne i technologiczne. Położenia na niebie i czasu rozbłysku gamma przewidzieć nie można, a krótki okres trwania emisji gamma powoduje że trudno w tym czasie naprowadzić na rozbłysk teleskopy optyczne, nawet te w pełni automatyczne. W rzeczywistości, na ponad 600 przypadków zaobserwowania poświat optycznych stowarzyszonych

десятка случаев имеется регистрация оптического излучения в активной фазе гамма-всплеска, синхронно с гамма-излучением. Наблюдение и изучение оптического излучения активной фазы является важной задачей, решение которой может пролить свет на понимание механизмов образования и эволюции космических гамма-всплесков.

Для увеличения поля зрения телескопы проекта построены по многоапертурной схеме (состоят из небольших объективов, поле зрения которых не пересекается, смонтированных на общей роботизированной монтировке). Практически закончена реализация проекта версии I, оснащенного питающей оптикой EF CANON $f = 85$ мм ($f/d=1,2$) [<http://grb.fuw.edu.pl>]. В насто-

z rozbłyskami gamma, tylko w około 10 przypadkach udało się zaobserwować poświaty optyczne bezpośrednio w czasie fazy aktywnej emisji promieniowania gamma, pomimo że w zasadzie tylko takie obserwacje, i to w różnych zakresach widma, mogą wyjaśnić mechanizm powstawania rozbłysków gamma.

Aby powiększyć pole widzenia, Pi of the Sky w wersji I składa się z 4 montażu paralaktycznych, na których zamontowano po 4 układy złożone z obiektywów EF CANON $f=85$ mm ($f/d=1,2$) [<http://grb.fuw.edu.pl>]. W pełni automatyczne urządzenie zainstalowano w obserwatorium INTA w Hiszpanii. Budowana obecnie wersja II bazuje na obiektywach VT-78a (Rys. 2) $f=296$ mm ($f/d = 1,57$).

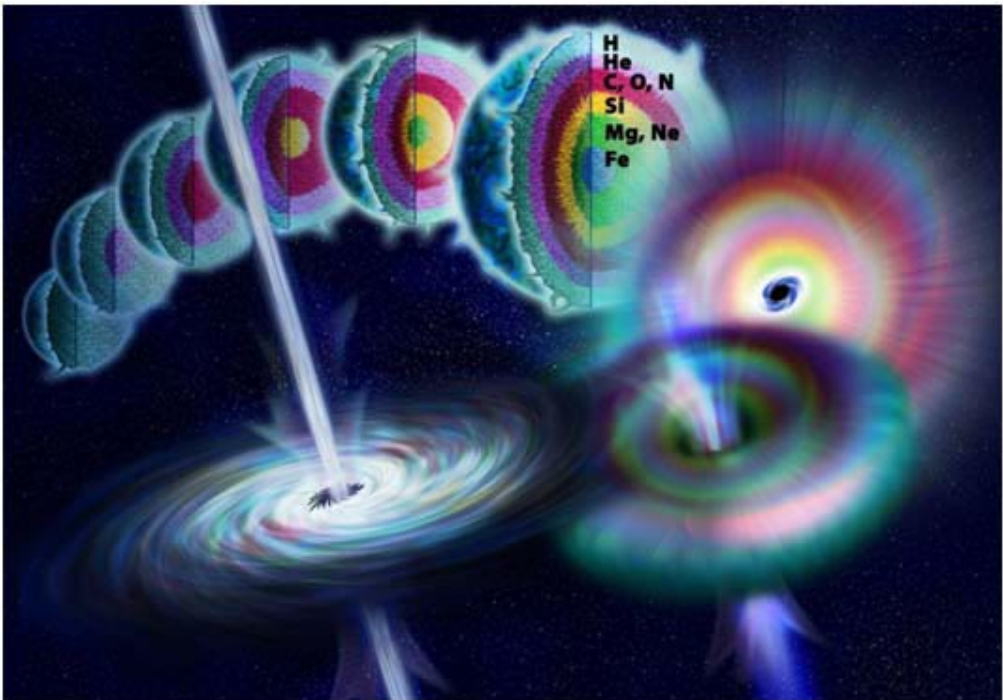


рис. 1. Художественное изображение длинного гамма-всплеска как конечной стадии эволюции сверхмассивной звезды. [Wikipedia].

rys. 1. Artystyczne wyobrażenie długiego rozbłysku gamma jako ostatniej fazy ewolucji supermasywnej gwiazdy. [Wikipedia].

ящее время начата реализация проекта Pi-of-the-Sky-II, оснащаемого новыми объективами VT-78 (рис. 2) с фокусным расстоянием $f=296\text{ mm}$ ($f/d=1,57$).

Также было принято решение уменьшить длительность экспозиции до 0,3 с. Были сконструированы, изготовлены и протестированы все механические части новой монтировки (рис. 3). Центром космических исследований в Варшаве сконструирован и испытан специализированный контроллер для управления монтировками и ПЗС-камерами. Реализация проекта Pi-of-the-Sky-II позволит регистрировать оптическое излучение космических гамма-всплесков как в их активной фазе, так и в фазе послесвечения, проводить поиск возможных оптических компонентов быстрых радиовсплесков

Nowa optyka pozwoli zredukować minimalny czas ekspozycji do 0,3 s, pozwalając na znaczne zwiększenie rozdzielczości czasowej przeprowadzanych obserwacji. Zaprojektowano nowy montaż paralaktyczny, charakteryzujący się dużą szybkością, rzędu 30 stopni/sekundę. Wszystkie elementy nowego montażu oraz specjalnie zaprojektowany i wykonany kontroler zostały wyprodukowane i przechodzą obecnie fazę testów. Po zakończeniu budowy, teleskop Pi of the Sky II będzie w stanie obserwować poświatę optyczną równoległą i po zakończeniu emisji promieniowania gamma, poszukiwać źródeł optycznych stowarzyszonych z krótkimi błyskami radiowymi (FRB) [Lorimer et al., 2007], poszu-



рис. 2. Объектив VT-78 в сборе с блендой.

rys. 2. Obiektyw VT-78 z osłoną.

(FRB) [Lorimer et al., 2007] и источников гравитационного излучения, детектируемых в экспериментах LIGO/Virgo [<http://www.ligo.org>], а также любых быстропеременных и нестационарных астрономических источников с блеском до 15 m (при времени экспозиции 1 с).

Стоимость проекта уже сейчас достигла 100 000 Евро. С польской стороны проект Pi-of-the-Sky-II поддерживается идеями и грантом Министерства науки и высшего образования, предоставленным Национальному центру ядерных исследований. Руководителем проекта является профессор Лех Манкевич (Центр теоретической физики). С российской стороны в проекте Pi-of-the-Sky-II участвуют Институт космических исследований РАН и Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН.

kiwać promieniowania optycznego ze źródeł fal grawitacyjnych zidentyfikowanych przez eksperymenty LIGO/Virgo [<http://www.ligo.org/>] a także badać inne szybkozmienne zjawiska astronomiczne o jasności nie przekraczającej 15m, przy długości ekspozycji 1s.

Koszt nowego teleskopu Pi of the Sky II wynosi około 100 000 Euro. Ze strony polskiej projekt finansowany jest z grantu Ideas Plus przyznanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Kierownikiem projektu jest prof. Lech Mankiewicz z Centrum Fizyki Teoretycznej PAN. Ze strony rosyjskiej w projekcie uczestniczą IKE RAS i Instytut Zastosowań Matematyki im M.B. Keldysza RAS.

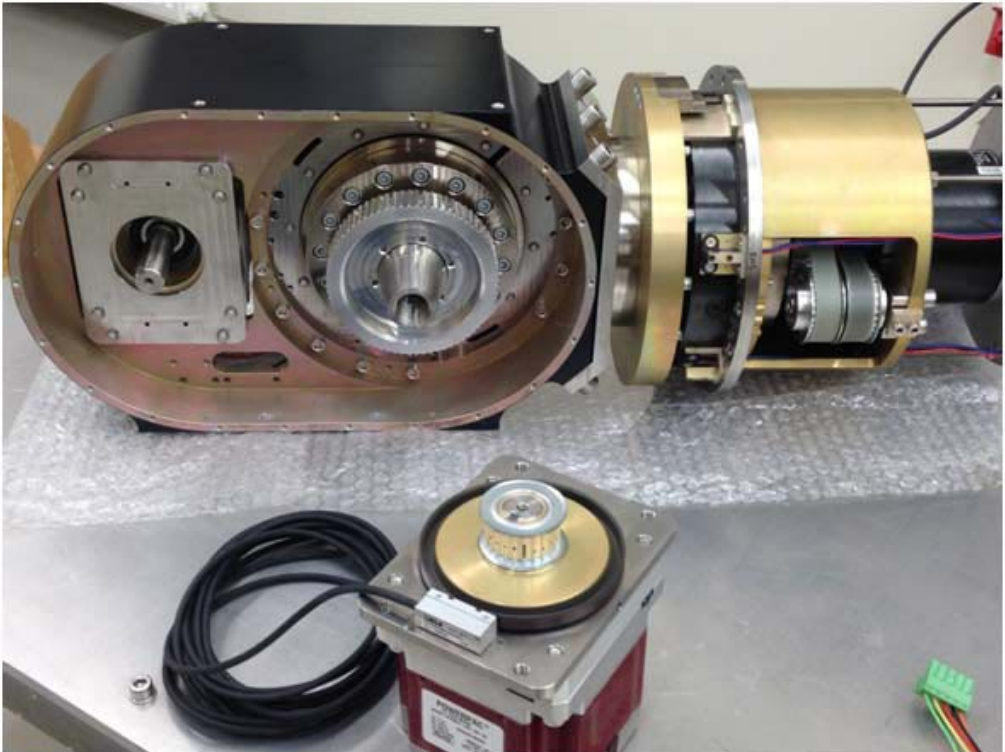


рис. 3. Элементы привода новой монтировки.
rys. 3. Elementy napędu nowego montażu

ЛИТЕРАТУРА

BIBLIOGRAFIA

- [Paczynski, 2001] *B. Paczynski*. Optical Flashes Preceding GRBs // eprint arXiv: astro-ph/0108522, 2001.
[<http://grb.fuw.edu.pl>]
- [Lorimer et al., 2007] *D. Lorimer, et al.* A Bright Millisecond Radio Burst of Extragalactic Origin // *Science*, 2007. V. 318. Issue 5851.P. 777
[<http://www.ligo.org>]

ИЗЛУЧЕНИЕ

руководители проекта
с российской стороны:

М. Могилевский, Т. Романцова

руководители проекта
с польской стороны:

Р. Шрайбер, Х. Роткель

Основной целью проекта ИЗЛУЧЕНИЕ является изучение физических механизмов генерации и распространения Аврорального Километрового Излучения (АКР) и его взаимосвязь с параметрами плазмы, геомагнитными возмущениями и излучениями в диапазоне ОНЧ/КНЧ/УНЧ. В качестве исходных данных были использованы результаты измерений электромагнитного излучения на борту спутника ИНТЕРБОЛ-2 экспериментом ПОЛЬРАД.

Оригинальность эксперимента ПОЛЬРАД, подготовленного польскими учеными и специалистами с участием российских исследователей, заключается в том, что впервые в практике космических исследований волновых процессов в магнитосфере, на борту спутника вычислялись компоненты корреляционной матрицы, позволяющие определить параметры Стокса. Такой подход позволил исследовать не только динамику спектров мощности излучения, но также его поляризационные характеристики и направление потока энергии.

По результатам измерений на спутнике Авроральный зонд получен большой объем экспериментальных данных о свойствах АКР в различных условиях и связи этих характеристик с параметрами плазмы и геомагнитного поля. Эти данные легли в основу совместных исследований польских и российских ученых в проекте ИЗЛУЧЕНИЕ.

PROMIENIOWANIE

kierownik projektu
ze strony Rosji:

M. Mogilewsky, T. Romantsova

kierownik projektu
ze strony Polski:

R. Schreiber, H. Rothkaehl

Podstawowym celem polsko-rosyjskiego projektu PROMIENIOWANIE jest badanie jednego z najsilniejszych zjawisk wewnętrznej magnetosfery Ziemi – zorzowego promieniowania kilometrowego (AKR – Auroral Kilometric Radiation) i jego związku z parametrami plazmy, zaburzeniami geomagnetycznymi i emisjami w zakresie fal VLF/ELF/ULF. Jako dane wyjściowe wykorzystane zostały rezultaty pomiarów promieniowania elektromagnetycznego eksperymentu POLRAD na pokładzie satelity INTERBALL-2.

Oryginalność eksperymentu POLRAD przygotowanego przez polskich naukowców i ekspertów z udziałem badaczy rosyjskich, wynika z tego, że praktycznie po raz pierwszy w badaniach kosmicznych przy badaniu procesów falowych w magnetosferze, była tworzona na pokładzie sztucznego satelity macierz kowariancyjna pola elektrycznego, pozwalająca określić parametry Stokesa. Takie podejście pozwoliło nie tylko badać dynamikę widm natężenia promieniowania, ale także jego polaryzację i kierunek przepływu energii.

W rezultacie pomiarów na satelicie INTERBALL-2 (Sonda Zorzowa), dostaliśmy dużą ilość danych eksperymentalnych dokumentujących zarówno własności AKR w różnych warunkach jak i jego związku z parametrami plazmy i pola geomagnetycznego. Dane te stworzyły podstawę dla wspólnych (polsko-rosyjskich) badań naukowych w ramach projektu PROMIENIOWANIE.

ПОДАВЛЕНИЕ
АВРОРАЛЬНОГО
КИЛОМЕТРОВОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ ВЧ
НАГРЕВНЫМ СТЕНДОМ

Экспериментальные и теоретические исследования нелинейных явлений, возникающих при воздействии мощных КВ волн на ионосферную плазму, позволили получить, может быть не полную, но достаточно целостную картину процессов в искусственно нагретой области ионосферы.

Основные результаты этих исследований изложены в обзорах [Гуревич, 2007; Фролов и др., 2007]. Доминирующая часть исследований базируется на измерениях, сделанных при помощи наземных средств. Это связано с объективными трудностями проведения измерений над нагретой областью на борту космических аппаратов. Область нагрева ионосферы имеет характерный размер 30–50 км и спутнику пересечь эту силовую трубку, сопряженную с возмущенной областью, удается крайне редко. Это привело к тому, что взаимодействие искусственно нагретой ионосферы с магнитосферой изучено весьма ограниченно. Измерения на спутнике ДЕМЕТЕР, проведенные в последние годы, позволили, в значительной степени заполнить этот пробел [Фролов и др., 2008; Milikh et al., 2008; Milikh et al., 2010; Piddyachiy et al., 2010]. В частности, измерения над возмущенной ионосферой показали, что из нагретой области плазма «выдавливается» в магнитосферу, и образуются вытянутые вдоль магнитного поля неоднородности, так называемые дакты плотности, которые могут служить волноводами для распространения

TŁUMIENIE KILOMETROWEGO
PROMIENIOWANIA
ZORZOWEGO JAKO WYNIK
WYSOKOCZĘSTOTLIWOŚCIOWEGO
NAGRZEWANIA JONOSFERY

Badania, zarówno eksperymentalne jak i teoretyczne, zjawisk nieliniowych powstających w wyniku oddziaływania silnych fal elektromagnetycznych na plazmę jonosferyczną, pozwoliły otrzymać, może nie kompletny, ale dostatecznie pełny obraz procesów zachodzących w sztucznie nagrzanej części jonosfery.

Podstawowe wyniki tych badań zostały przedstawione w pracach przeglądowych [Гуревич, 2007; Фролов и др., 2007]. Dominująca część badań oparta była na pomiarach wykonanych przy pomocy urządzeń naziemnych. Wynika to z obiektywnych trudności przeprowadzenia pomiaru na pokładzie statku kosmicznego powyżej ogrzewanego obszaru. Nagrzany obszar jonosfery ma charakterystyczne rozmiary rzędu 30–50 km, satelicie udaje się jedynie sporadycznie przeciąć rurkę linii sił pola magnetycznego, sprzężoną z zaburzonym obszarem jonosfery. Wszystko to spowodowało, że nasza wiedza o oddziaływaniu sztucznie nagrzanej jonosfery z magnetosferą jest bardzo ograniczona. Pomiarы przeprowadzone w ostatnich latach przez satelitę DEMETER pozwoliły w znacznym stopniu tę lukę uzupełnić [Фролов и др., 2008; Milikh et al., 2008; Milikh et al., 2010; Piddyachiy et al., 2010]. W szczególności, pomiary zakłóceń jonosfery wykazały, że z nagrzanego obszaru „wyciskana” jest do magnetosfery plazma, tworząc, wyciągnięte wzdłuż pola magnetycznego, niejednorodności, tak zwane dukty gęstości, mogą one służyć jako falowody dla propagacji fal VLF. Ponieważ jednak

ОНЧ волн. Однако орбита спутника ДЕМЕТЕР была относительно низкой (660–720 км) и вопрос о том, каково влияние искусственно нагретой ионосферы на процессы в магнитосфере на больших высотах оставался открытым. В октябре–ноябре 1996 года на спутнике ИНТЕРБОЛ-2 в рамках финской кампании были проведены эксперименты с нагревным стендом EISCAT в Тромсе. Измерения проводились как на борту спутника ИНТЕРБОЛ-2, так и на разветвленной сети наземных станций IMAGE.

Совместный эксперимент проводился по следующей схеме – расчетным путем выбирались временные интервалы орбиты спутника, которая проходила вблизи силовой трубки магнитного поля, сопряженной с ионосферой над нагревным стендом EISCAT в Тромсе. Было проведено несколько серий эксперимента. Из 37 сеансов наиболее благоприятные условия для наблюдения были только 27 октября 1996 года, когда орбита спутника ИНТЕРБОЛ-2 проходила на несколько градусов южнее области нагрева и пересекала возмущенную силовую трубку на высоте ~11 тыс. км. Воздействие осуществлялось в вечерние часы мощной радиоволной Х-поляризации на частоте 4,04 МГц с эффективной мощностью излучения 183 МВт.

На рис.1 приведена схема проведения эксперимента (слева) и проекция орбиты спутника ИНТЕРБОЛ-2 (справа).

Во время проведения эксперимента спутник двигался с юга на север и пересекал силовую трубку магнитного поля, сопряженную с нагревным стендом EISCAT. В результате проведения этого

орбита спутника ДЕМЕТЕР была относительно низкой (660–720 км) и вопрос о том, каково влияние искусственно нагретой ионосферы на процессы в магнитосфере на больших высотах оставался открытым. В октябре–ноябре 1996 года на спутнике ИНТЕРБОЛ-2 в рамках финской кампании наблюдательной программы было проведено эксперимент с использованием установки нагревающей ионосферу (EISCAT) в Тромсе. Измерения были выполнены как на борту спутника ИНТЕРБОЛ-2 так и в сети наземных станций IMAGE.

Совместный эксперимент проводился по следующей схеме – расчетным путем выбирались временные интервалы орбиты спутника, которая проходила вблизи силовой трубки магнитного поля, сопряженной с ионосферой над нагревным стендом EISCAT в Тромсе. Было проведено несколько серий эксперимента. Из 37 сеансов наиболее благоприятные условия для наблюдения были только 27 октября 1996 года, когда орбита спутника ИНТЕРБОЛ-2 проходила на несколько градусов южнее области нагрева и пересекала возмущенную силовую трубку на высоте ~11 тыс. км. Воздействие осуществлялось в вечерние часы мощной радиоволной Х-поляризации на частоте 4,04 МГц с эффективной мощностью излучения 183 МВт.

На рис.1 представлен план эксперимента (слева) и проекция орбиты спутника ИНТЕРБОЛ-2 на поверхность Земли (справа).

Во время проведения эксперимента спутник двигался с юга на север и пересекал силовую трубку магнитного поля, сопряженную с нагревным стендом EISCAT. В результате проведения этого

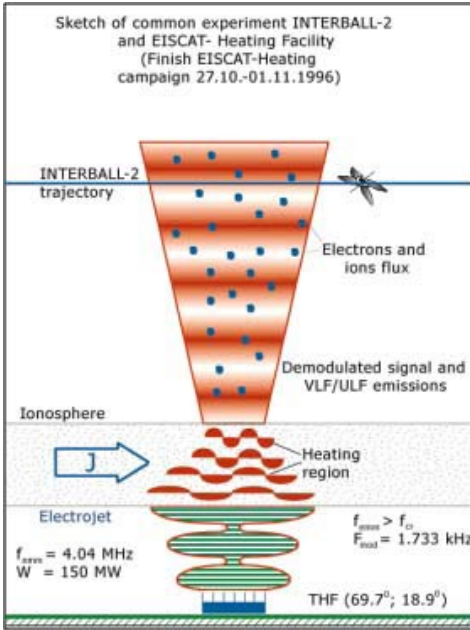


рис.1. Схема проведения эксперимента.
rys.1. Schemat eksperymentu.

Проекция орбиты спутника ИНТЕРБОЛ-2.
Rzut orbity satelity INTERBALL-2

эксперимента на сети наземных станций IMAGE было зарегистрировано сильное изменение магнитосферной токовой системы, сходное с суббурей. Геомагнитные условия во время проведения нагревного эксперимента представлены на рис. 2. Начало работы нагревного стенда обозначено как T1, T2 – начало «классической» суббури. В интервале 21:30–24:00 наблюдается геомагнитное возмущение, локализованное вблизи нагревного стенда, что подтверждается динамикой распределения эквивалентных токов в ионосфере (см. рис. 2).

На рис. 3 приведен график изменения L -оболочки вдоль орбиты спутника. Нагревный стенд EISCAT расположен на $L=6,45$ ($L = 1/\cos^2 \phi_m$ – параметр Мак-Илвайна, ϕ_m – геомагнитная широта), а центр области нагрева ионосферы, из-за наклона магнитного поля

станции наземных силне zmiany prądów w magnetosferze podobne do wywołanych subburzą. Warunki geomagnetyczne w czasie przeprowadzania eksperymentu przedstawione są na rysunku 2. Początek pracy instalacji EISCAT oznaczono jako T1, T2 odpowiada początkowi „klasycznej” subburzy. W przedziale 21:30–24:00 obserwuje się zaburzenie geomagnetyczne zlokalizowane w pobliżu EISCATa o czym świadczy dynamika rozkładu ekwiwalentnych prądów jonosfery (patrz rys. 2).

Na rys. 3 przedstawiony został wykres zmian parametru L McIlwaina ($L = 1/\cos^2 \phi_m$, ϕ_m – szerokość geomagnetyczna) wzdłuż orbity satelity. Instalacja EISCAT znajduje się na $L=6,45$, natomiast środek obszaru grzania jonosfery ze względu na nachylenie pola magne-

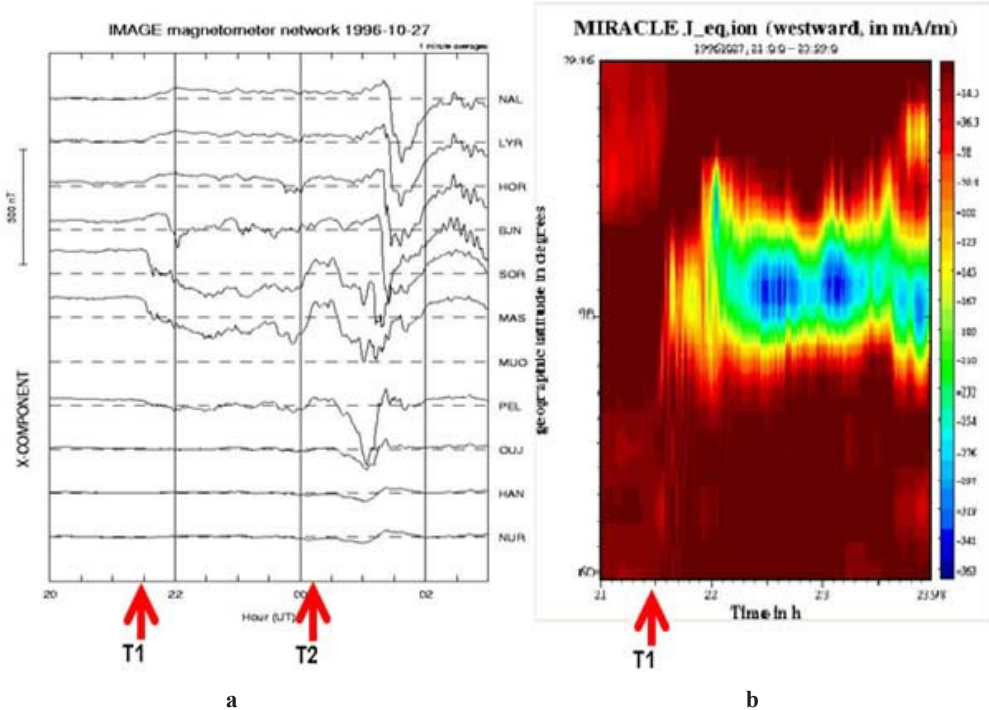


рис. 2. (а) Вариации геомагнитного поля на сети наземных станций IMAGE 27 октября 1996 года, расположенных вблизи нагревного стенда. T1 – начало работы стенда, T2 – начало классической суббури. (б) Изменение распределения эквивалентных токов в ионосфере при работе нагревного стенда Тромсе.

rys.2. (а) Zmiany pola geomagnetycznego widziane w dniu 27 października 1996 r. w sieci stacji naziemnych IMAGE położonych w pobliżu instalacji grzejącej jonosferę. T1 – początek pracy EISCATa, T2 – początek klasycznej subburzy. (б) Zmiana rozkładu ekwiwalentnych prądów w jonosferze w trakcie pracy instalacji w Tromsø.

в этом районе, имеет $L=6,7$ (сплошная линия). Нагревный стенд EISCAT в Тромсе начал работу в 21:29:00 UT на частоте 4,4 МГц – не заштрихованная область на рис. 2. Размер области нагрева на уровне F -слоя ионосферы составлял ~ 50 км (границы области нагрева отмечены пунктирными линиями). Согласно расчетам, спутник пересек границу сопряженной силовой трубки в 21:31:20 UT – через ~ 140 с после включения стенда. В течение 70 с он двигался внутри трубки и в $\sim 21:32:30$ UT вышел из нее.

тычного в этом районе на $L=6,7$ (линия ciągła). Instalacja EISCAT w Tromsø rozpoczęła pracę o 21:29:00 UT na częstotliwości 4,4 MHz — nie zacieniony obszar na rysunku 2. Rozmiar ograniczonego obszaru jonosfery na wysokości warstwy F to około 50 km, (granice obszaru oznaczone są linią przerywaną). Zgodnie z wyliczeniami satelita przekroczył granicę sprzężonej rurki pola magnetycznego o godzinie 21:31:20 UT, po upływie około 140 s od włączenia instalacji. W ciągu 70 sekund poruszał się wewnątrz rurki i opuścił ją około 21:32:30 UT.

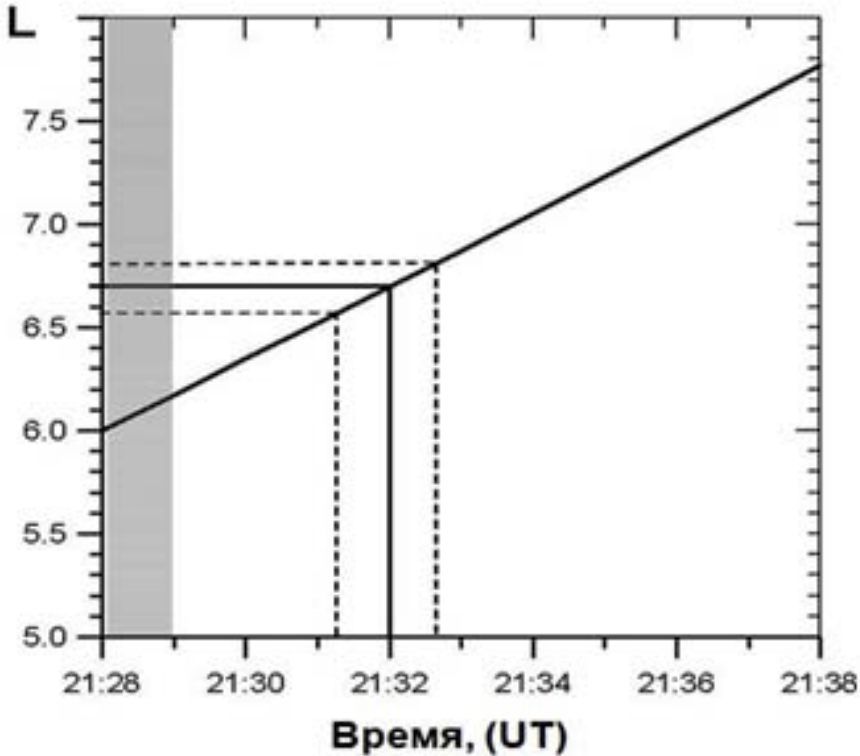


рис. 3. Изменение L -оболочки вдоль орбиты спутника ИНТЕРБОЛ-2 при пролете над нагревным стендом EISCAT в Тромсе.

rys. 3. Zmiany parametru L wzdłuż orbity satelity INTERBALL-2 podczas przelotu nad instalacją EISCAT w Tromsø.

Результаты измерений аврорального километрового излучения (АКР), зарегистрированного прибором ПОЛЬРАД на спутнике ИНТЕРБОЛ-2 27 октября 1996 года приведены на рис. 4. В интервале 21:28–21:31 UT в диапазоне частот 350–500 кГц наблюдается стационарное АКР средней мощности, что является типичным для этой области магнитосферы. В 21:31:20 UT, при пересечении сопряженной силовой трубки, интегральная интенсивность излучения уменьшается с $2\text{--}3 \cdot 10^{-14}$ до $2\text{--}4 \cdot 10^{-15}$ Вт/м². В 21:36 UT интенсивность АКР увеличивается и его уровень достигает прежнего значения —

Na rysunku 4 pokazane zostały wyniki pomiarów zorzowego promieniowania kilometrycznego (AKR), które zostały zarejestrowane na satelicie INTERBALL-2 przez przyrząd POLRAD w dniu 27.10.1996 r. W okresie 21:28–21:31 UT w przedziale częstotliwości 350–500 kHz obserwowano stacjonarne AKR średniej mocy, co jest zjawiskiem typowym dla tego obszaru magnetosfery. O 21:31:20 UT podczas przecięcia sprzężonej rurki pola magnetycznego zintegrowane natężenie promieniowania spadło z $2\text{--}3 \cdot 10^{-14}$ do $2\text{--}4 \cdot 10^{-15}$ W/m². O 21:36 UT natężenie AKR wzrosło i jego poziom osiągnął poprzednią war-

$2-4 \cdot 10^{-14}$ Вт/м². В этом временном интервале, кроме изменения интегральной интенсивности, происходит существенное изменение граничных частот спектра АКР (рис. 5). Нижняя частота обрезания изменяется от ~ 300 до ~ 400 кГц, а верхняя – от ~ 550 до ~ 450 кГц. Изменение нижней грани-

тось $2-4 \cdot 10^{-14}$ W/m². W tym przedziale czasowym oprócz zmiany zintegrowanego natężenia, w sposób istotny zmienia się widmo częstotliwości АКР (rys. 5). Dolna częstotliwość odcięcia zmienia się od ~ 300 do ~ 400 kHz, a górna – od ~ 550 do ~ 450 kHz. Zmiana dolnej granicy widma najwyraźniej związana jest

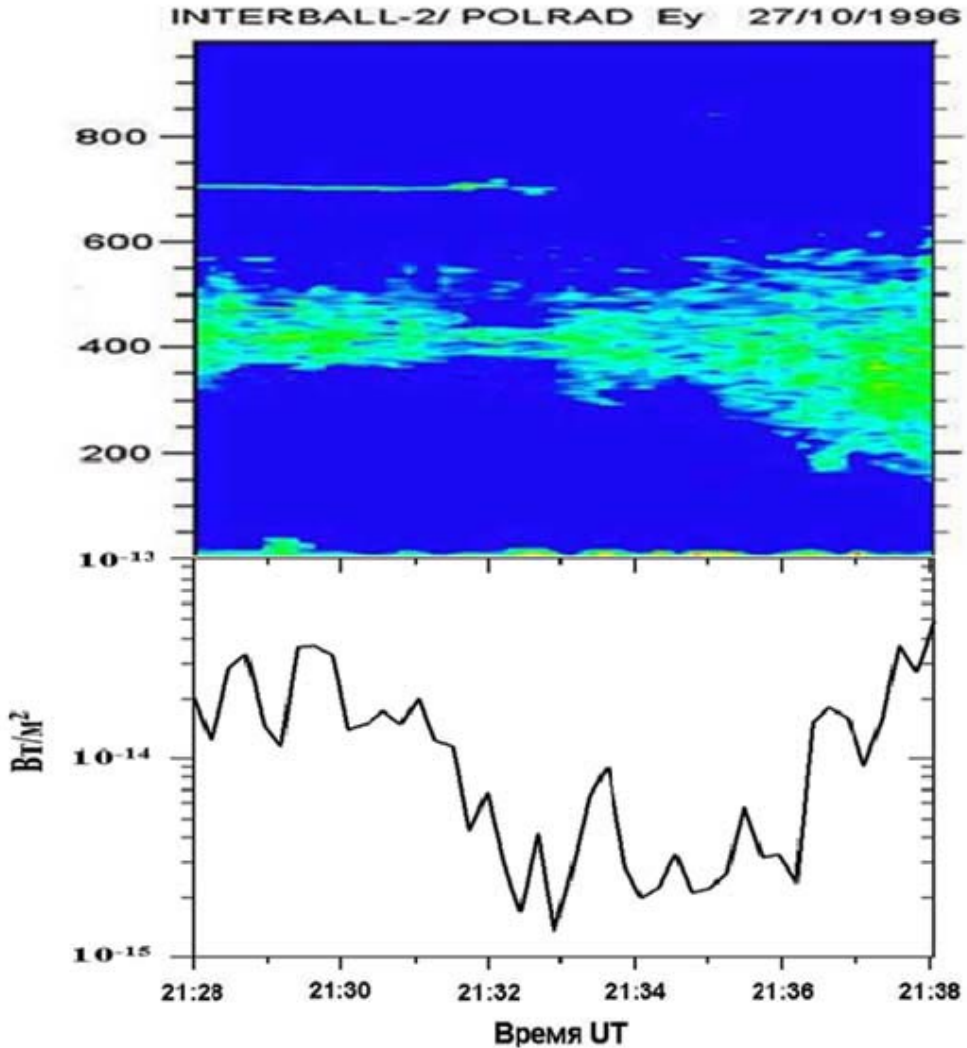


рис. 4. Динамическая спектрограмма АКР по измерениям со спутника ИНТЕРБОЛ-2 (верхняя панель). Интегральная мощность излучения АКР (нижняя панель).

rys. 4. Widmo dynamiczne АКР – pomiary z satelity INTERBALL-2 (panel górny). Zintegrowana moc promieniowania АКР (panel dolny).

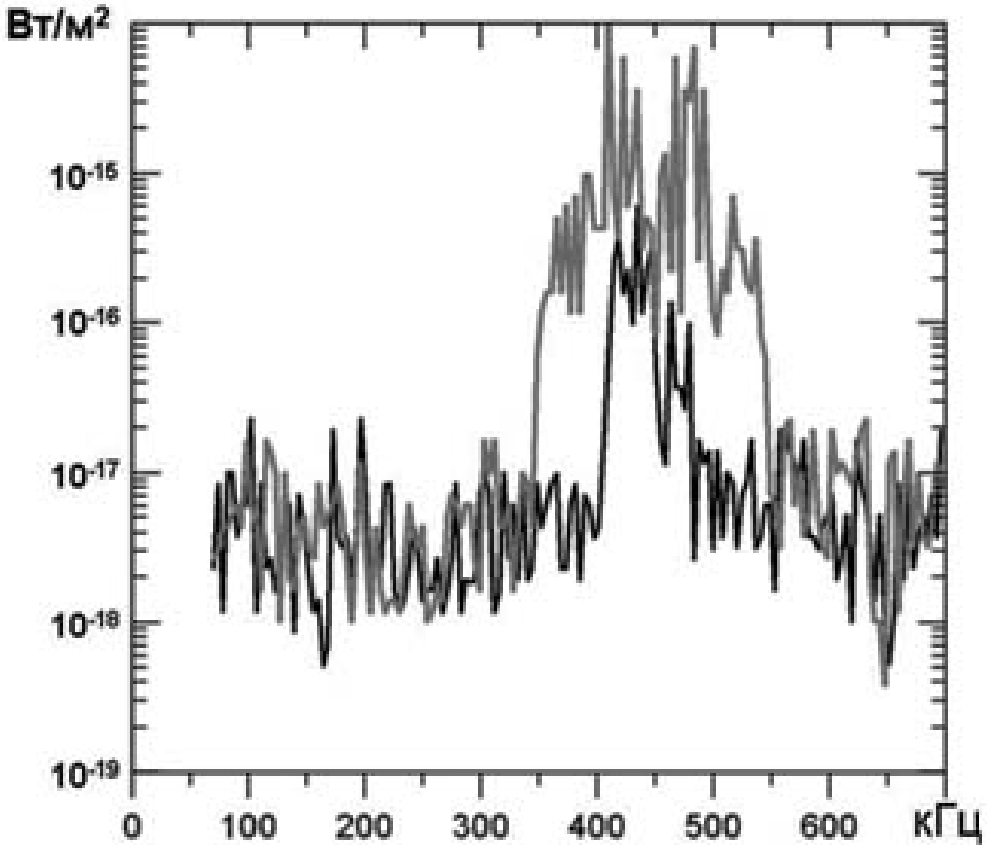


рис. 5. Спектры АКР, измеренные в 21:28:41 UT – до входа спутника в сопряженную силовую трубку (серая кривая) и в 21:31:55 UT – внутри силовой трубки (черная кривая).

rys. 5. Widma AKR, zmierzone o 21:28:41 UT przed wejściem satelity w sprzężoną rurkę magnetyczną (szara krzywa) i o 21:31:55 UT – wewnątrz rurki (czarna krzywa).

цы спектра, по-видимому, связано с изменением расстояния от источника до приемника [Могилевский и др., 2011]. Уменьшение частоты верхней границы спектра означает изменение условий генерации АКР на соответствующих высотах. Поскольку АКР генерируется на локальной гирочастоте электронов, то можно оценить изменение высоты нижней границы области генерации. Из соотношения $B(h) = f_{\text{AKP}} / (2,8 \cdot 10^{-6})$ получаем, что граница источника поднимается на 700 км – с 2200 км до 2900 км.

ze zmiana odległości między źródłem a odbiornikiem [Могилевский и др., 2011]. Zmniejszenie częstotliwości górnej granicy widma oznacza zmianę warunków generacji АКР na odpowiednich wysokościach. Ponieważ АКР generuje się w okolicach lokalnej częstotliwości cyklotronowej elektronów, to można ocenić zmianę wysokości dolnej granicy generacji. Korzystając z formuły $B(h) = f_{\text{AKP}} / (2,8 \cdot 10^{-6})$ można pokazać że granica źródła podnosi się o 700 км – z 2200 km do 2900 km.

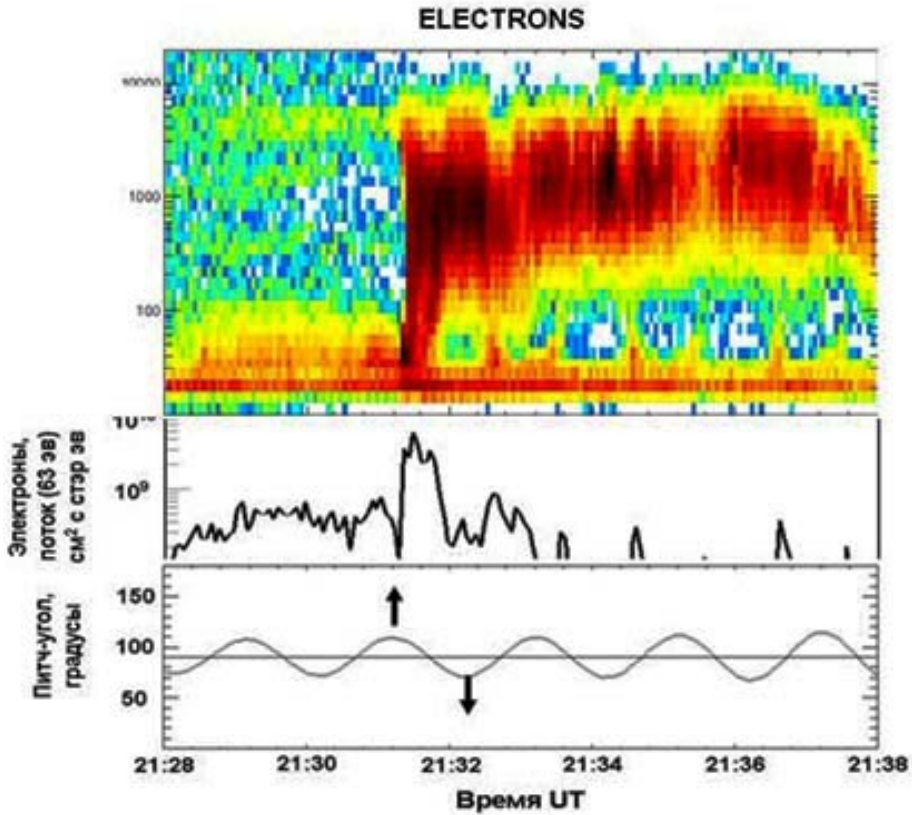


рис. 6. Верхняя панель – динамическая спектрограмма электронов; средняя панель – поток электронов с энергией 63 эВ; нижняя панель – питч-угол измеряемых электронов. Стрелками отмечено направление движение частиц.

rys. 6. Panel górny – widmo dynamiczne elektronów, panel środkowy – strumień elektronów o energii 63 eV, panel dolny – kąt skłonu mierzonych elektronów – kierunek ruchu cząstek oznaczony został strzałkami.

Вход спутника в сопряженную силовую трубку подтверждается прямыми измерениями сверхтепловых электронов, полученными прибором ИОН на борту спутника ИНТЕРБОЛ-2 (см. рис. 6). В 21:32:18 UT наблюдается резкое увеличение потоков восходящих электронов в широком диапазоне энергий – от 20 эВ до 7 кэВ (питч-угл $\alpha_{pa} > 90^\circ$). Столь резкое возрастание и величина потоков электронов малых энергий являются не типичными для

Wejście satelity w sprzężoną rurkę pola magnetycznego zostało potwierdzone pomiarami strumieni elektronów nadtermicznych dokonanych na pokładzie satelity INTERBALL-2 przez przyrząd ION 2 (rys. 6). O godzinie 21:32:18 UT widoczny jest gwałtowny wzrost strumieni biegnących w górę wiązek elektronów w szerokim przedziale energii od 20 eV do 7 keV (kąt skłonu $\alpha_{pa} > 90^\circ$). Tak gwałtowny wzrost i wielkość strumieni elektronów o małych energiach nie są typowe

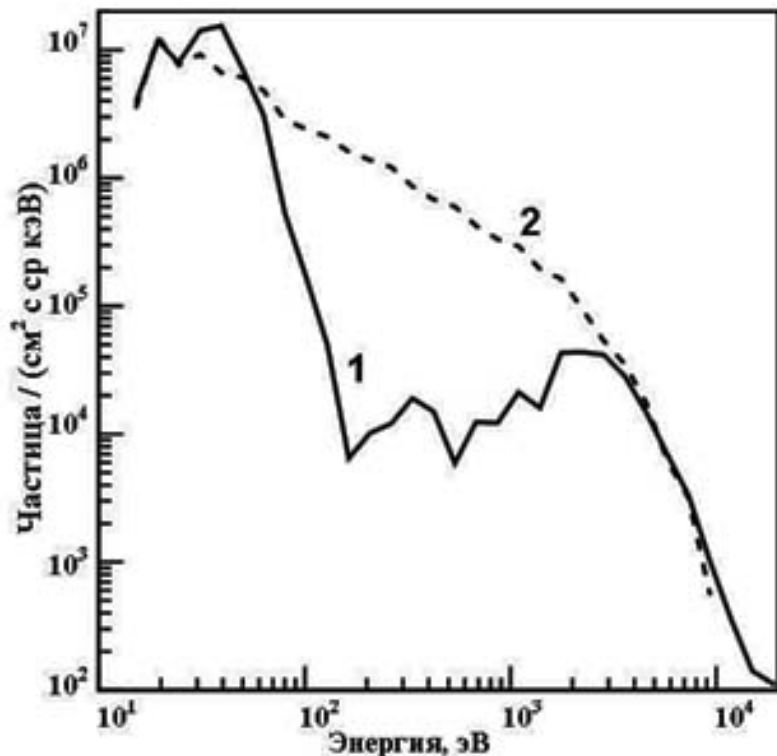


рис.7. Спектры электронов, измеренные при входе в сопряженную силовую трубку в 21:31:21 UT (непрерывная кривая) и внутри трубки в 21:31:29 UT (пунктирная кривая).

rys.7. Widma elektronów zmierzone przy wejściu do sprzężonej rurki pola magnetycznego o godzinie 21:31:21 UT (krzywa ciągła) i wewnątrz rurki o 21:31:29 UT (linia przerywana).

естественных явлений в этой области. Через 22 секунды интенсивность потока электронов в нижней части спектра (30–80 эВ) уменьшилась до фонового уровня. Это связано с поворотом направления зоны видимости прибора и невозможностью измерять восходящие частицы ($\alpha_{pa} > 90^\circ$). Поэтому по измерениям электронов момент выхода из сопряженной трубки не виден.

На рис. 7 приведены спектры электронов для двух моментов времени – на границе и внутри сопряженной трубки. На первом спектре (1), построенном по измерениям в 21:31:21 UT при питчугле $\alpha_{pa}=107^\circ$, хорошо выделяются две

для явлений натуральных в этом регионе. По 22 секундах, величина потока электронов в нижней части спектра (30–80 эВ) zmniejszyła się do poziomu tła. Związane to jest obrotem przyrządu ION i niemożnością rejestracji cząstek biegnących do góry ($\alpha_{pa} > 90^\circ$). Dlatego w oparciu o pomiar strumienia elektronów nie możemy określić momentu wyjścia satelity ze sprzężonej rurki magnetycznej.

Rys. 7 przedstawia widma elektronów dla dwóch różnych momentów – na granicy i wewnątrz sprzężonej rurki magnetycznej. Pierwsze (1) ilustruje pomiary przeprowadzone o 21:31:21 UT przy kącie skłonu $\alpha_{pa}=107^\circ$, można wydzielić

фракции частиц: первая фракция с энергиями 30–80 эВ и вторая – 1,5–7 кэВ.

Небольшой подъем спектра на энергии 20 эВ связан с фотоэлектронами, образующимися при освещении Солнцем поверхности спутника. На втором спектре (2), в 21:31:29 UT при $\alpha_{pa}=100^\circ$, такого разделения по отдельным энергетическим фракциям не наблюдается, спектр носит почти монотонный характер. Из анализа спектров можно сделать вывод, что поскольку пучок электронов с энергиями 30–80 эВ наблюдается при $\alpha_{pa} > 90^\circ$, эти частицы имеют ионосферное происхождение. Из приведенных результатов измерений можно оценить время, за которое электроны достигают высоты спутника: оно составляет не более 140 с. Согласно результатам проведенных нагревных экспериментов [Гуревич, 2007; Фролов и др., 2007], разогрев электронов в ионосфере может достигать десятков электрон-вольт, что является дополнительным аргументом в пользу ионосферного происхождения наблюдаемых на спутнике частиц. Электроны с энергиями 1,5–7 кэВ имеют магнитосферное происхождение и могут быть связаны с изменением функции распределения частиц в результате их резонансного взаимодействия с демодулированным сигналом накачки. Поскольку область резонансного взаимодействия находится много выше спутника, то часть частиц, по мере движения в усиливающемся магнитном поле, отражается и двигается в обратном направлении. Поэтому на рис. 6 видны как восходящие, так и нисходящие потоки электронов с энергиями 1,5–7 кэВ. Но в монотонном спектре, сформированном при установившихся условиях в трубке, уровень потока низкоэнергичных электронов остается доминирующим.

две популяции частиц: в zakresach 30–80 keV oraz 1,5–7 keV.

Niewielki wzrost widma w okolicach 20 eV jest związany z fotoelektronami, które powstają w wyniku oświetlenia powierzchni satelity przez Słońce. Na drugim widmie (2) zarejestrowanym o godzinie 21:31:29 UT dla $\alpha_{pa}=100^\circ$ takiego rozdzielenia na populacje o różnych energiach nie zaobserwowano, widmo ma praktycznie charakter monotoniczny. Analiza widm prowadzi do wniosku, że wiązka elektronów o energiach 30–80 eV jest obserwowana dla $\alpha_{pa} > 90^\circ$ i jest pochodzenia jonosferycznego. Na podstawie przedstawionych wyników można ocenić po jakim czasie elektrony osiągną wysokość satelity: jest to nie więcej niż 140 s. Zgodnie z rezultatami przeprowadzonych wcześniej eksperymentów z nagrzewaniem jonosfery [Гуревич, 2007; Фролов и др., 2007], elektrony w jonosferze mogą osiągać energie rzędu dziesiątek elektronowoltów – stanowi to dodatkowy argument na rzecz jonosferycznego pochodzenia cząstek obserwowanych przez satelitę. Elektrony o energiach 1,5–7 keV są pochodzenia magnetosferycznego i ich obecność może być związana ze zmianą funkcji rozkładu cząstek w wyniku ich oddziaływania rezonansowego ze zdemodulowanym sygnałem pompującym. Ponieważ obszar oddziaływania rezonansowego znajduje się dużo wyżej od satelity, to część cząstek w miarę poruszania się w narastającym polu magnetycznym odbija się i następnie porusza w przeciwnym kierunku. Dlatego na rysunku 6 widać zarówno wiązki elektronów poruszających się dół jak i w górę. Jednak w monotonicznym widmie, sformowanym przy warunkach ustalonych w rurce, dominują niskoenergetyczne elektrony.

Суммируя результаты измерений на спутнике ИНТЕРБОЛ-2 в области, сопряженной искусственно нагретой ионосфере, можно выделить следующие:

- интенсивность АКР внутри силовой трубки, сопряженной нагретой ионосфере, уменьшается на порядок;
- ионосферные частицы, ускоренные под действием волны накачки от нагревного стенда, доходят до высоты 11 тыс. км за время не более 140 с.

Можно предложить два механизма подавления АКР. Первый из них связан с генерацией излучения. Источником АКР является циклотронная мазерная неустойчивость, развивающаяся в областях с пониженной концентрацией [Wu and Lee, 1979; Calvert, 1981]. Условием развития неустойчивости является выполнение соотношения:

$$(\omega_{pe}/\omega_{ce}) \ll 1 \quad (1)$$

где ω_{pe} и ω_{ce} – плазменная частота и гирочастота электронов.

Отсюда следует, что увеличение концентрации электронов приведет к нарушению условия развития неустойчивости и прекращению генерации АКР. Используя результаты измерений (рис. 7) можно оценить минимальное значение дополнительной концентрации электронов ионосферного происхождения, которая составляет $\Delta N = 1-2$ частицы/см³. Увеличение концентрации в области генерации ($\Delta N/N_0 \sim 0,1$) приведет к нарушению соотношения (1) и срыву генерации АКР. Поскольку электроны поднимаются из ионосферы, то подавление излучения будет наиболее заметно на малых высотах (высоких частотах). Однако этот

Podsumowując wyniki pomiarów na satelicie INTERBALL-2 w obszarze sprzężonym ze sztucznie nagrzaną jonosferą należy podkreślić następujące rezultaty:

- natężenie AKR wewnątrz rurki pola magnetycznego, sprzężonej z grzana jonosferą ulega zmniejszeniu o rząd wielkości.
- cząstki jonosferyczne, przyśpieszone w wyniku oddziaływania z falami e-m emitowanymi przez EISCATa dochodzą do wysokości 11 tys. km w czasie nie większym niż 140 s.

Można zaproponować dwa mechanizmy tłumienia AKR. Pierwszy jest związany z mechanizmem generacji promieniowania. Źródłem AKR jest niestabilność masera cyklotronowego, która ma miejsce w obszarach obniżonej koncentracji elektronów [Wu and Lee, 1979; Calvert, 1981]. Warunkiem rozwoju niestabilności jest spełnienie warunku:

$$(\omega_{pe}/\omega_{ce}) \ll 1 \quad (1)$$

gdzie ω_{pe} i ω_{ce} są odpowiednio częstotliwością plazmową i cyklotronową elektronów.

Z tego warunku wynika, że zwiększenie koncentracji elektronów prowadzi do zmiany warunków rozwoju niestabilności i ostatecznie do wygaśnięcia generacji AKR. Wykorzystując rezultaty pomiarów (rys. 7) można ocenić minimalną wartość dodatkowej koncentracji elektronów pochodzących z jonosfery, to jest $\Delta N = 1-2$ cząstek/cm³. Zwiększenie koncentracji cząstek w obszarze generacji ($\Delta N/N_0 \sim 0,1$) prowadzi do osłabienia warunku (1) a tym samym do przerwania generacji AKR. Ponieważ elektrony unoszone są z jonosfery, to tłumienie będzie szczególnie widoczne na małych wysokościach (dla wysokich częstotliwości). Mechanizm ten może być jednak reali-

механизм реализуется только в том случае, если область генерации находится внутри силовой трубки, сопряженной с искусственно нагретой ионосферой.

Второй механизм связан с распространением АКР. В работах [Louarn and Le Que'au, 1996; Буринская, Рош, 2007] было показано, что неоднородности плотности плазмы, вытянутые вдоль магнитного поля, формируют волновод, в котором распространяется АКР. Границами волновода могут быть как скачки плотности холодной плазмы, так и границы области высыпания энергичных частиц. При этом изменение плотности холодной плазмы поперек направления магнитного поля могут быть меньше 10%. В случае, когда над возмущенной ионосферой формируется область с повышенной плотностью, она будет препятствием для проникновения АКР и излучение от источников, расположенных вне силовой трубки с повышенной плотностью, не проникают в них. В этом случае интенсивность излучения в областях с повышенной концентрацией будет ниже, чем вне этой области.

Отметим, что если размеры области генерации АКР поперек магнитного поля достаточно велики и превышают размеры возмущенной силовой трубки, то могут реализоваться оба механизма.

Как для первого, так и для второго механизма необходимо, чтобы ионосферные электроны успели подняться из области нагретой ионосферы до высот генерации АКР (2–3 тыс. км). Более того, измерения на спутнике ИНТЕРБОЛ-2 ионосферных электронов показывают, что они достигают высоты 11 200 км за ~140 с. Однако, для соблюдения условия квазинейтральности необходимо, чтобы вместе с электронами двигались

только wtedy gdy obszar generacji znajduje się wewnątrz rurki magnetycznej sprzężonej ze sztucznie nagrzaną jonosferą.

Drugi mechanizm związany jest z rozchodzeniem się АКР. W pracach [Louarn and Le Que'au, 1996; Буринская, Рош, 2007] zostało pokazane, że wyciągnięte wzdłuż pola magnetycznego niejednorodności plazmy tworzą falowód, w którym rozchodzi się АКР. Granicami tego falowodu mogą być zarówno skoki gęstości zimnej plazmy jak i granice wysypywania się wysokoenergetycznych cząstek. Zmiany gęstości zimnej plazmy w kierunku prostopadłym do kierunku pola magnetycznego mogą być mniejsze niż 10%. Gdy nad pobudzoną jonosferą tworzy się obszar o podwyższonej gęstości, to będzie on barierą dla wnikania АКР i promieniowanie ze źródeł położonych na zewnątrz rurki do niej nie wnika. W tym przypadku natężenie promieniowania w obszarach o podwyższonej koncentracji będzie niższe niż na zewnątrz.

Zauważmy, że jeśli obszary generacji АКР, mierzone w poprzek pola magnetycznego, są dostatecznie duże i przewyższają rozmiary zaburzonej rurki magnetycznej, to wtedy mogą być realizowane obydwa scenariusze.

W obu przypadkach konieczne jest aby elektrony jonosferyczne zdążyły się unieść z obszaru nagrzanego jonosfery do wysokości generacji АКР (2–3 tys. км). Pomiarы elektronów jonosferycznych na satelicie INTERBALL-2 pokazują, że docierają one na wysokość ~11200 km w czasie ~140 s. Jednak aby spełnione były warunki kwazineutralności, razem z elektronami muszą wznosić się też jony.

и ионы. Для этого необходимо, чтобы ионы были ускорены (разогреты) до величины 65–75 эВ. В настоящее время вопрос о механизме нагрева и выносе из ионосферы в магнитосферу ионов остается открытым.

W tym celu jony muszą być przyśpieszone (rozgrzane) do energii 65–75 eV. W tej chwili zagadnienie grzania i unoszenia się jonów z jonosfery do magnetosfery pozostaje otwarte.

ЛИТЕРАТУРА

BIBLIOGRAFIA

- [Гуревич, 2007] *Гуревич А.В.* Нелинейные явления в ионосфере // УФН, 2007. Т. 177. № 11. С. 1145.
- [Фролов и др., 2007] *Фролов В.Л., Бахметьева Н.В., Беликович В.В. и др.* Модификация ионосферы Земли мощным коротковолновым радиоизлучением // УФН, 2007. Т. 177. С. 330.
- [Фролов и др., 2008] *Фролов В.Л., Рапопорт В.О., Комраков А.С. и др.* Создание дактов плотности при нагреве ионосферы Земли мощным коротковолновым радиоизлучением. // Письма в ЖЭТФ, 2008. Т. 88. № 12. С. 908.
- [Milikh et al., 2008] *Milikh G.M., Papadopoulos K., Shroff H. et al.* Formation of artificial ionospheric ducts // *Geophys. Res. Lett.*, 2008. V. 35. № 17. P. 104.
- [Milikh et al., 2010] *Milikh G.M., Demekhov A.G., Papadopoulos K. et al.* Model for artificial ionospheric duct formation due to HF heating // *Geophys. Res. Lett.*, 2010. V. 37. № 7. P. 803.
- [Piddyachiy et al., 2010] *Piddyachiy D., Bell T.F., Berthelier J. et al.* DEMETER observations of the ionospheric trough over HAARP in relation to HF heating experiments // *J. Geophys. Res.*, 2011. V. 116. A06304. DOI:10.1029/2010JA016128.
- Галеев А.А., Гальперин Ю.И., Зеленый Л.М.* Проект ИНТЕРБОЛ по исследованиям в области солнечно-земной физики // *Космич. Исслед.* 1996. Т. 34. № 4. С. 339.
- Назирова Р.Р., Прохоренко В.И.* Ситуационный анализ в задачах космической физики // *Космич. Исслед.*, 1998. Т. 36. № 3. С. 311.
- Sauvaud J.A., Barthe H., Aoustin C. et al.* The ion experiment onboard the Interball-Aurora satellite; initial results on velocity-dispersed structures in the cleft and inside the auroral oval // *Ann. Geophys.*, 1998. V. 16. № 9. P. 1056.
- Ханаи Я., Кравчик З., Могилевский М.М. и др.* Наблюдение аврорального километрового излучения на спутнике ИНТЕРБОЛ-2: эксперимент ПОЛЬРАД // *Космич. исслед.*, 1998. Т. 36. № 6. С. 617.
- [Могилевский и др., 2011] *Могилевский М.М., Моисеенко И.Л., Романцова Т.В., и др.* Прямые измерения аврорального километрового радиоизлучения в ограниченном источнике // Письма в ЖЭТФ, 2011. Т. 93. Вып. 6. С. 359.
- [Wu and Lee, 1979] *Wu C.S. and Lee L.C.* A theory of the terrestrial kilometric radiation // *Astrophys. J.*, 1979. V. 230. P. 621.
- [Calvert, 1981] *Calvert W.* The auroral plasma cavity // *Geophys. Res. Letters*, 1981. V. 8. № 8. P. 919.
- [Louarn and Le Que'au, 1996] *Louarn P. and Le Que'au D.* Generation of the auroral kilometric radiation in plasma cavities-II. The cyclotron maser instability in small size sources // *Planet. Space Sci.*, 1996. V. 44. № 3. P. 211.

[Буринская, Рош, 2007] *Буринская Т.М., Рош Ж.Л.* Волноводный режим циклотронной мазерной неустойчивости в областях плазмы с пониженной плотностью // *Физика плазмы*, 2007. Т. 33. С. 28.

Могилевский М.М., Чугунин Д.В., Моисеенко И.Л., Романцова Т.В. Подавление Аврорального Километрового Излучения ВЧ нагревным стендом // *Космические исследования*, 2014. Т. 52. Вып.1. P.68

<http://www.ava.fmi.fi/image/>

Suppression of auroral kilometric radiation by an HF heating facility

The results of a joint experiment using the Tromsø heating facility and the *INTERBALL-2* satellite are presented. It is shown that fluxes of accelerated ionospheric electrons reach an altitude of 11200 km, suppressing the auroral kilometric radiation. The timescales of the observed phenomena are estimated and possible physical mechanisms are discussed.

ИОНОСФЕРА: МОДЕЛИРОВАНИЕ ИОНОСФЕРНОЙ ПОГОДЫ ДЛЯ РАДИОСВЯЗИ

руководитель проекта
с российской стороны:

Т. Гуляева, И. Крашенников

руководитель проекта
с польской стороны:

И. Станиславска

основные исполнители:

***В. Дзиак-Янковска, Л. Томасик,
Л. Пустовалова***

Целью совместного проекта ИЗМИРАН и ЦКИ Ионосферная погода является информационное обеспечение в сети Интернет параметров, характеризующих ионосферную погоду. В этом проекте с 1997 года разработаны новые методы анализа ионосферных данных, предложена оригинальная система индексов ионосферной изменчивости и их применение для прогноза состояния ионосферы и ионосферного распространения радиоволн. На страницах ИЗМИРАН и ЦКИ в сети Интернет представлены данные измерений ионозондов и результаты их прогноза в ряде обсерваторий, региональные и глобальные карты полного электронного содержания ТЕС по наблюдениям за сигналами спутников навигационных систем (GNSS), карты параметров максимума слоя F2 (foF2, hmF2) и W-индекса ионосферной изменчивости. Системы обработки включают анализ и прогноз геомагнитных индексов ap, kp и нового индекса x, используемых для прогноза ионосферных характеристик. Впервые произведены и предоставлены пользователям продукты анализа карт W-индекса в виде каталогов ионосфер-

JONOSFERA: MODELOWANIE POGODY JONOSFERYCZNEJ DLA ŁĄCZNOŚCI RADIOWEJ

prowadzący projekt
ze strony Rosyjskiej:

T. Gulyaeva, I. Krasheninnikov

prowadzący projekt
ze strony Polskiej:

I. Stanisławska

wykonawcy projektu:

***B. Dziak-Jankowska, Ł. Tomasiak,
L. Poustowalowa***

Celem wspólnego projektu Pogoda Jonosferyczna realizowanego przez IZMIRAN i CBK PAN jest informacyjne przedstawienie i zamieszczenie w Internecie parametrów charakteryzujących pogodę jonosferyczną. W projekcie od 1997 roku opracowano nowe metody analizy danych jonosferycznych, przedstawiono oryginalny system indeksów zaburzeń jonosferycznych i ich zastosowania w prognozie stanu jonosfery i jonosferycznego rozprzestrzenienia fal radiowych. Na stronach internetowych IZMIRAN i CBK PAN przedstawiono dane pomiarów jonosond i wyniki ich prognozy w szeregu obсерваторiów, regionalne i globalne mapy całkowitej koncentracji elektronowej TEC opracowane dzięki wykorzystaniu sygnałów satelitów obserwacyjnych (GNSS), mapy parametrów warstwy F2 (foF2, hmF2) i indeksu W zaburzeń jonosferycznych. Systemy opracowania włączają analizę i prognozę geomagnetycznych indeksów ap, kp i nowego indeksu x, wykorzystywanych do prognozy jonosferycznych charakterystyk. Po raz pierwszy utworzono i przedstawiono użytkownikom produkty analizy map indeksu W w postaci katalogów

ных бурь и суббурь и исследовано их соответствие глобальным геомагнитным бурям экваториального Dst индекса. Представленные в проекте результаты находят широкое применение в различных исследованиях и прикладных задачах, о чем свидетельствует постоянно растущее число пользователей.

История развития проекта Ионосферная погода включает следующие этапы:

- 1997 – создание веб-сайта IDCE (Ionospheric Dispatch Centre in Europe) в Центре космических исследований ПАН [Stanisławska et al., 1999]: <http://www.cbk.waw.pl/rwc>;
- 2006 – создание веб-сайта «Ионосферная погода» ИЗМИРАН [Гуляева, Станиславска, 2011a]: <http://www.izmiran.ru/services/iweather> ;
- 2008 – создание метода классификации W-индекса ионосферной погоды и критериев определения Wp индекса планетарных бурь по картам W индекса на основе карт GIM-TEC [Gulyaeva et al., 2008; Gulyaeva, Stanisławska, 2008];
- 2008 – создание каталога планетарных ионосферных бурь за период с 1998 по настоящее время на веб-сайте ИЗМИРАН [Гуляева, Станиславска, 2011];
- 2010 – региональные карты W-индекса над Европой в реальном времени на сайте ЦКИ ПАН [Stanisławska, Gulyaeva, 2015];
- 2013 – глобальные карты TEC, foF2, hmF2, W-индекса в автоматическом режиме с использованием Международной модели ионосферы и плазмосферы ИРИ-Плаз на сайте ИЗМИРАН [Gulyaeva et al., 2013];

jonosferycznych burz i sub-burz oraz badano ich zgodność z globalnymi geomagnetycznymi burzami równikowego Dst indeksu. Przedstawione w projekcie wyniki znajdują szerokie zastosowanie w różnych badaniach i zastosowaniach, o czym świadczy ciągle rosnąca liczba użytkowników.

W historii rozwoju projektu Pogoda Jonosferyczna można wyróżnić następujące etapy:

- 1997 – utworzenie strony internetowej IDCE (Ionospheric Dispatch Centre in Europe) w Centrum Badań Kosmicznych PAN [Stanisławska et al., 1999]: <http://www.cbk.waw.pl/rwc>;
- 2006 – utworzenie strony internetowej „Ionosphericweather”/„Ионосферная погода” IZMIR AN [Gulyaeva, Stanisławska, 2011a]: <http://www.izmiran.ru/services/iweather>;
- 2008 – opracowanie metody klasyfikacji indeksu W pogody jonosferycznej i kryteriów określenia indeksu Wp burz planetarnych według map indeksu W na podstawie map GIM-TEC [Gulyaeva et al., 2008; Gulyaeva, Stanisławska, 2008];
- 2008 – utworzenie katalogu planetarnych burz jonosferycznych w okresie od 1988 roku do roku bieżącego na stronie internetowej IZMIR AN [Gulyaeva, Stanisławska, 2011];
- 2010 – regionalne mapy indeksu W nad Europą w czasie rzeczywistym na stronie internetowej CBK PAN [Stanisławska, Gulyaeva, 2015];
- 2013 – globalne mapy TEC, foF2, hmF2, indeksu W w automatycznym systemie z wykorzystaniem Międzynarodowego Modelu Jonosfery i Plazmosfery ИРИ-Плаз na stronie internetowej IZMIR AN [Gulyaeva et al., 2013];

- 2014 – создание каталогов ионосферных бурь и суббурь и геомагнитных Dst бурь на сайте ИЗМИРАН [Gulyaeva, Stanislawska 2008; Gulyaeva et al., 2014];
- 2015 – предоставление актуальных ионосферных карт и индексов (Delay, TEC, Rate of TEC, W-index, ETA-index) на сайте ЦКИ [Dziak-Jankowska et al., 2011].

Мониторинг ионосферы мировой сетью ионозондов и глобальной сетью приёмников сигналов навигационных спутников GPS и ГЛОНАСС включает наблюдения ионосферных характеристик, их последующий анализ и прогноз космической погоды для радиосвязи и навигации на страницах Интернет в ряде центров данных [Stanislawska et al., 2010], в том числе в ЦКИ ПАН и ИЗМИРАН [Гуляева, Станиславска, 2011а]. Соответствующие ионосферные модели, методы и программное обеспечение для оценки текущего состояния ионосферы и краткосрочного прогноза ее параметров создаются и развиваются в рамках данного проекта [Gulyaeva et al., 2008; Dziak-Jankowska et al., 2011; Stanislawska, Zbyszyński, 2001; De Franceschi, 2001; Gulyaeva, Stanislawska, 2010; Gulyaeva et al., 2011b; Gulyaeva, Stanislawska, 2013; Gulyaeva et al., 2013, Stanislawska, Gulyaeva, 2015].

Разработанная система планетарного Wp-индекса позволила впервые создать Каталог около 300 ионосферных бурь за период с 1998 года по настоящее время, который включает умеренные и интенсивные бури и пополняется регулярно по мере появления новых бурь [Gulyaeva, Stanislawska, 2008; Гуляева, Станис-

- 2014 – utworzenie katalogów jonosferycznych burz i sub-burz oraz geomagnetycznych Dst burz na stronie internetowej IZMIR AN [Gulyaeva, Stanislawska 2008; Gulyaeva et al., 2014];
- 2015 – przedstawienie aktualnych map jonosferycznych i indeksów (Delay, TEC, Rate of TEC, index W, index ETA) na stronie internetowej CBK PAN [Dziak-Jankowska et al., 2011].

Monitoring jonosfery poprzez światową sieć jonosond oraz globalną sieć odbiorników sygnałów satelitów obserwacyjnych GPS i GLONASS zawiera także obserwację jonosferycznych charakterystyk, następnie ich analizę i prognozę kosmicznej pogody dla łączności radiowej i nawigacji, zamieszczonych w Internecie na stronach danych instytutów [Stanislawska et al., 2010], w tym CBK PAN i IZMIR AN [Gulyaeva, Stanislawska, 2011a]. W ramach niniejszego projektu powstają i opracowywane są odpowiednie modele jonosferyczne, metody i oprogramowanie do oceny bieżącego stanu jonosfery i krótkoterminowej prognozy jej parametrów [Gulyaeva et al., 2008; Dziak-Jankowska et al., 2011; Stanislawska, Zbyszyński, 2001; De Franceschi, 2001; Gulyaeva, Stanislawska, 2010; Gulyaeva et al., 2011b; Gulyaeva, Stanislawska, 2013; Gulyaeva et al., 2013; Stanislawska, Gulyaeva, 2015].

Opracowany system planetarnego indeksu Wp pozwolił po raz pierwszy utworzyć Katalog około 300 jonosferycznych burz w okresie od 1998 roku do roku bieżącego, który zawiera informacje o umiarkowanych i intensywnych burzach oraz aktualizowany jest regularnie zgodnie z wystąpieniem kolejnych burz [Gulyaeva, Stanislawska, 2008; Гуляева,

лавска, 2011б; Gulyaeva et al., 2014; Gulyaeva, Stanisławska, 2010].

В таблице приведена выборка интенсивных ионосферно-плазмосферных бурь из Каталога, представленного на сайте «Ионосферная погода» ИЗМИРАН. В таблице также указаны порядковый номер в полном Каталоге бурь, дата и время начала бури, время и значение максимума планетарного Wp-индекса, момент окончания бури, длительность бури в часах, среднее значение $\langle Wp \rangle$ за время бури и мощность бури. Последняя строка в таблице относится к супер буре, произошедшей в «День Св. Патрика» 17 марта 2015 года в 4 ч мирового времени после мощного выброса корональной массы на Солнце и возмущений в солнечном ветре и межпланетном магнитном поле. Вследствие этого наблюдалась самая мощная в 24-м цикле солнечной активности магнитосферная и ионосферная супер буря, при максимальной интенсивности кольцевого тока $Dst = -228$ нТл 17 марта в 23 ч мирового времени (рис. 1а).

Станиславска, 2011б; Gulyaeva et al., 2014; Gulyaeva, Stanisławska, 2010].

W tabeli przedstawiono parametry wybranych intensywnych jonosferyczno-plazmosferycznych burz z Katalogu znajdującego się na stronie internetowej „Ionospheric weather” / „Ионосферная погода” IZMIR AN. W tabeli wskazano także numery porządkowe z pełnego Katalogu burz, datę i okres rozpoczęcia burzy, czas trwania burzy w godzinach i maksymalny planetarny indeks Wp, moment zakończenia burzy w godzinach, średnia wartość $\langle Wp \rangle$ w okresie burzy i jej intensywność. Ostatni wiersz w tabeli odnosi się do super-burzy, która wystąpiła w Dniu Św. Patryka 17 marca 2015 roku o 4.00 (4UT) po wystąpieniu potężnego wyrzutu masy koronalnej na Słońcu i związanych z nim zaburzeń wiatru słonecznego i międzyplanetarnego pola magnetycznego. W następstwie powstała najmocniejsza, w 24-m cyklu słonecznej aktywności, magnetosferyczna i jonosferyczna superburza, przy maksymalnej intensywności prądu pierścieniowego $Dst = -228$ nT 17 marca o 23.00 (rys. 1a).

nn	start	UT	peak	UT	Wp	end	UT	hrs	$\langle Wp \rangle$	power
37	2000/04/06	19	2000/04/06	23	9,0	2000/04/08	11	41	6,3	369,0
44	2000/07/15	15	2000/07/16	01	10,0	2000/07/17	11	45	6,7	450,0
75	2001/05/19	21	2001/05/20	21	9,0	2001/05/21	01	29	6,9	261,0
87	2001/11/05	21	2001/11/06	07	9,4	2001/11/08	01	53	5,9	498,2
143	2003/10/28	18	2003/10/29	22	9,4	2003/11/02	00	103	6,4	968,2
146	2003/11/19	12	2003/11/20	22	9,3	2003/11/23	14	99	5,5	920,7
166	2004/11/07	17	2004/11/08	06	9,9	2004/11/13	16	144	6,4	1425,6
290	2015/03/17	08	2015/03/18	07	9,5	2015/03/21	00	89	6,1	845,5

Интенсивные планетарные ионосферно-плазмосферные бури Wp-индекса, вычисленные по картам W-индекса из исходных карт JPL GIM-TEC в формате IONEX за 1998–2015 годы: географические координаты сетки на карте по широте от 87,5°S до 87,5°N с шагом 2,5°, по долготе от -180° до 180°E с шагом 5°.

Silne jonosferyczno-plazmosferyczne burze indeksu W obliczone z globalnych map indeksu W z JPL GIM-TEC w formacie IONEX za lata 1998–2015: współrzędne geograficzne siatki mapy po szerokości od 87,5°S do 87,5°N z krokiem co 2,5°, po długości od -180° do 180°E z krokiem co 5°.

На рис.1а показана страница «Бури» с каталогами геомагнитных и ионосферных бурь и суббурь на сайте «Ионосферная погода» ИЗМИРАН. Здесь же встроен график изменения планетарного ионосферного Wp-индекса и магнитосферного Dst-индекса во время супер бури 17–21 марта 2015 года (см. таблицу). Интерес пользователей к сайту «Ионосферная погода» демонстрируется на рис. 1б, где приводится гистограмма числа пользователей за последние 2 года. Здесь показано общее количество пользователей сайта «Ионосферная погода» за каждый месяц (серый цвет), и отдельно число пользователей страницы «Бури» (голубой цвет). Хотя видны некоторые колебания от месяца к месяцу, в целом наблюдается тенденция увеличения запросов пользователей, число которых превышает к настоящему времени 1000 человек в месяц.

Na rys. 1a pokazana jest zakładka „Storms” / „Burzy” z katalogami geomagnetycznych i jonosferycznych burz i subburz zamieszczona na stronie internetowej „Ionospheric weather” / „Ионосферная погода” IZMIR AN. Pokazana jest grafika zmian planetarnego jonosferycznego indeksu Wp i magnetosferycznego Dst-indeksu w czasie super-burzy 17–21 marca 2015 roku (patrz: tabela). Zainteresowanie użytkowników stroną „Ionospheric weather” / „Ионосферная погода” pokazane jest na rys. 1b, gdzie zaprezentowany jest histogram liczby użytkowników w ostatnich 2 latach. Pokazano tutaj ogólną liczbę użytkowników strony „Ionospheric weather” / „Ионосферная погода” w każdym miesiącu (szary kolor), i oddzielnie liczbę użytkowników zakładki „Storms” / „Burzy” (niebieski kolor). Mimo że widoczne są wahania z miesiąca na miesiąc, zauważalna jest tendencja wzrostu zapytań użytkowników, liczba których przekracza obecnie 1000 w miesiącu.

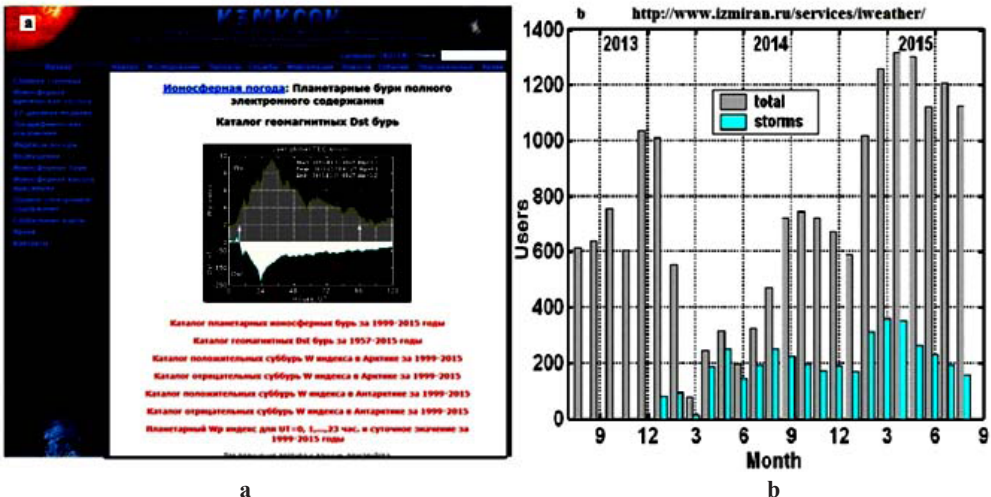


рис. 1. (а) Страница «Бури» на сайте «Ионосферная погода» ИЗМИРАН, включая график геомагнитно-ионосферной супер бури 17-21 марта 2015 года; (б) Число пользователей сайта «Ионосферная погода» ИЗМИРАН и «Бури» за каждый месяц с августа 2013 по август 2015 года.

rys. 1. (а) Zakładka «Storms» na stronie «Ionospheric weather» IZMIR AN, włącznie z super burzą z 17–21 marca 2015 r.; (б) Ilość odwiedzin strony «Ionospheric weather» IZMIR AN i ilość wejść na stronę « Storms» w miesiącach od sierpnia 2013 do sierpnia 2015 r.

Для операторов космической связи и навигации важно знать, показывают ли ионосферные параметры её 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; 2014].

Региональная карта W-индекса над Европой, построенная на сайте IDCE по наблюдениям TEC системой EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) 16 марта 2015 года в 18 ч мирового времени (18UT) накануне бури в «День Св. Патрика», представлена на рис. 2. В процессе развития главной фазы супербури 17–18 марта исходные данные TEC системы EGNOS отсутствовали из-за возможных технических проблем прерывания наблюдений в связи с помехами из-за бури, поэтому соответствующие карты W-индекса над Европой не были построены на сайте IDCE. На карте рис. 2 ясно видны области положительных (оранжевый цвет) и отрицательных (синий цвет) ионосферных возмущений за несколько часов до начала ионосферной супербури.

На рис. 3 показаны примеры изменения локального W-индекса по наблюдениям ионозонда в Варшаве (e) и Москве (f) и геомагнитных индексов аврорального электроджета AE (a), экваториального Dst (b), и среднеширотных ap (c) и kp (d) индексов во время

Операторы космической коммуникации и навигации должны знать, что параметры ионосферные показывают обычный спокойный стабильный стан, характеристичный для даного poziomu słonecznej aktywności, czy też wskazują na krótkoterminowe perturbacje w jonosferze w związku ze wzburzeniami na Słońcu i w magnetosferze Ziemi. Podobnie jeśli chodzi o geomagnetyczne indeksy, zmiany pogody jonosferycznej powinno się kalibrować poprzez indeks W na czterech poziomach dla dodatnich i ujemnych logarytmicznych odchyłeń foF2 lub TEC od spokojnego typowego [Gulyaeva et al., 2008; 2014].

Regionalna mapa indeksu W nad Europą, utworzona na stronie internetowej IDCE na podstawie obserwacji TEC systemu EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) 16 marca 2015 roku o 18.00 (18UT) w przeddzień burzy w Dniu Św. Patryka przedstawiono na rys. 2. W procesie rozwoju głównej fazy superburzy 17–18 marca wyjściowe dane TEC systemu EGNOS nie były prawidłowe z powodu możliwych technicznych problemów przerywania obserwacji w związku z błędami powodowanymi przez burzę, dlatego odpowiadające mapy indeksu W nad Europą nie były zamieszczone na stronie IDCE. Na mapie na rys. 2 jasno widać miejsca dodatnich (pomarańczowy kolor) i ujemnych (niebieski kolor) zaburzeń jonosferycznych na kilka godzin przed rozpoczęciem jonosferycznej superburzy.

Na rys. 3 przedstawiono przykłady lokalnego indeksu W na podstawie obserwacji jonosondy w Warszawie (e) i w Moskwie (f) i geomagnetycznych indeksów elektrojetu zorzowego (AE), prądu pierścieniowego Dst (b), i średnioszerokościowych ap (c) i kp (d) indeksów w czasie umiarkowanej geomagnetyczno-jonosferycznej

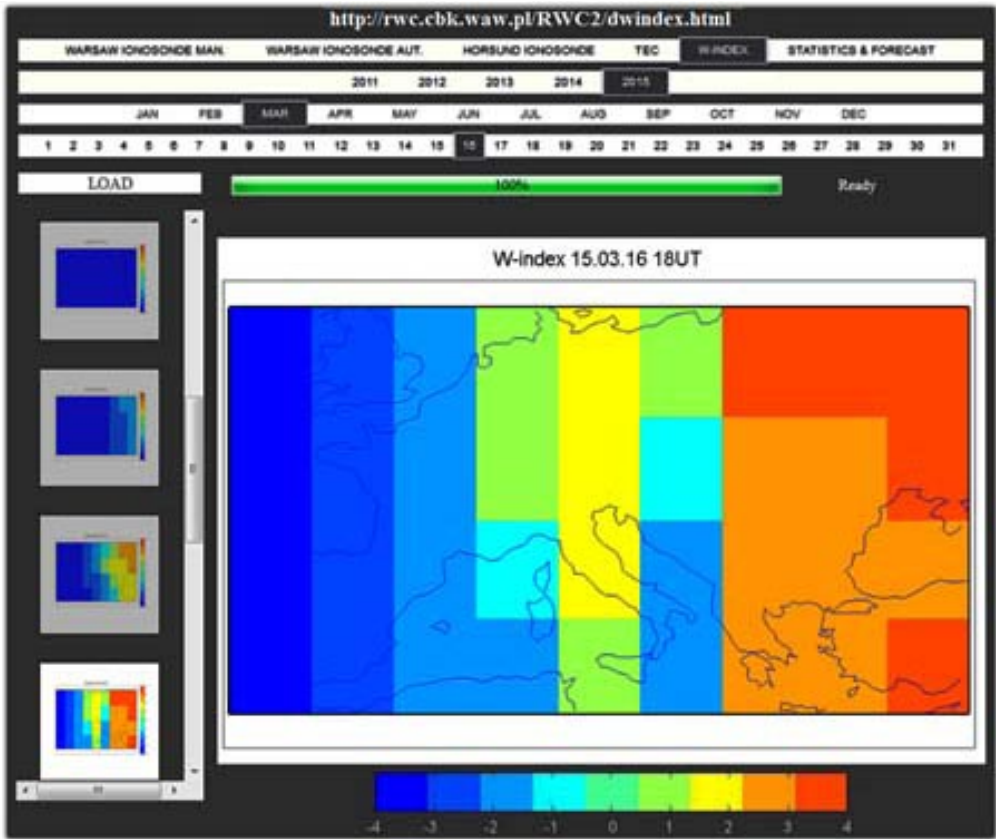


рис. 2. Карта W-индекса ионосферной погоды над Европой, представленная на сайте IDCE 16 марта 2015 в 18 ч мирового времени (18UT).

rys. 2. Mapa indeksu W pogody jonosferycznej nad Europą, na stronie IDCE z 16 marca 2015 o 18 UT.

умеренной геомагнитно-ионосферной бури 7 и 8 сентября 2015 года. Геомагнитные индексы A_p и K_p представлены на сайте http://www-app3.gfz-potsdam.de/kp_index/qlyymm.wdc и используются для прогноза этих индексов по методике [De Franceschi, 2001] на текущий день на сайте «Ионосферная погода» ИЗМИРАН. Геомагнитные индексы A_E и Dst предоставлены на сайте <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html> и используются для построения и обновления Каталога Dst бурь [Gulyaeva et al., 2014] на сайте «Ионосферная погода» ИЗМИРАН.

burzy 7 i 8 września 2015 roku. Geomagnetyczne indeksy A_p i K_p przedstawiono na stronie internetowej: http://www-app3.gfz-potsdam.de/kp_index/qlyymm.wdc i używane są dla prognozy tych indeksów według metodyki [De Franceschi, 2001] na bieżący dzień na stronie „Ionospheric weather”, „Ионосферная погода” IZMIR AN. Geomagnetyczne indeksy A_E i Dst przedstawiono na stronie <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html> i wykorzystywane są dla tworzenia i aktualizacji Katalogu Dst burz [Gulyaeva et al., 2014] na stronie „Ionospheric weather” / „Ионосферная погода” IZMIR AN.

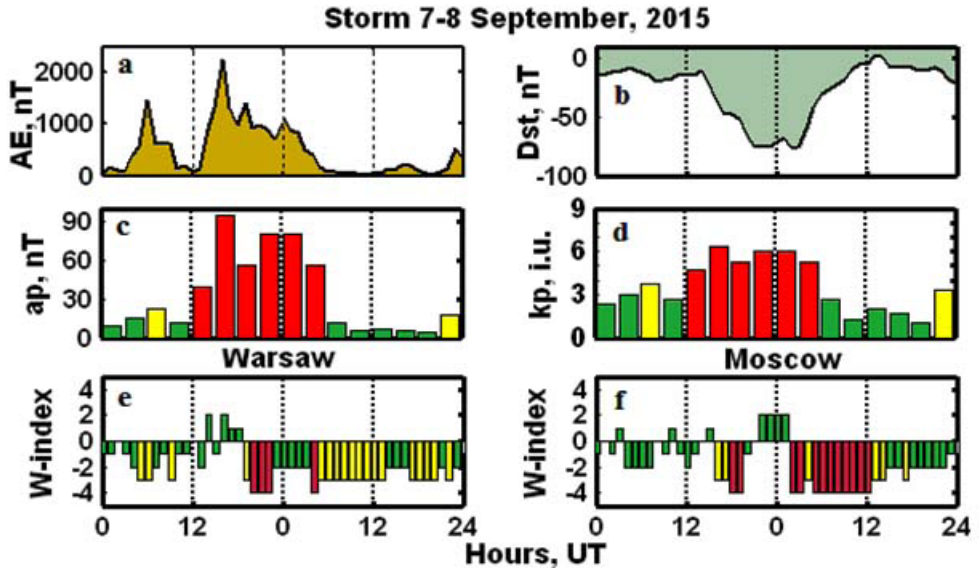


рис. 3. Отклик ионосферы на геомагнитную бурю 7–8 сентября 2015 года по наблюдениям ионозондов в Варшаве [52,2°N, 21,1°E] и Москве [55,5°N, 37,3°E].

rys. 3. Odpowiedź jonosfery na burzę magnetyczną 7-8 września 2015 z obserwacji jonosond w Warszawie [52,2°N, 21,1°E] i Moskwie [55,5°N, 37,3°E].

На рис. 3 отметим наблюдавшуюся отрицательную фазу ионосферной бури (красные и желтые полосы) 7 и 8 сентября во время главной фазы геомагнитной бури. Ионосферная буря наблюдается и в процессе восстановительной фазы геомагнитной бури, что позволяет с учетом запаздывания ионосферных процессов использовать геомагнитные индексы для прогноза ионосферных возмущений [De Franceschi et al., 2014].

Примеры глобальных карт TEC, критической частоты foF2, высоты максимума hmF2 и W-индекса, ежедневно обновляемых на сайте «Ионосферная погода» ИЗМИРАН, представлены на рис. 4. Здесь отображен момент состояния ионосферы в 23 ч мирового времени 7 сентября 2015г в максимуме геомагнитно-ионосферной бури, динамическая картина которой изображена на рис. 3.

Na rys. 3 odnotujemy zaobserwowaną ujemną fazę burzy jonosferycznej (czerwone i żółte paski) 7 i 8 września w czasie głównej fazy geomagnetycznej burzy. Burzę jonosferyczną dało się zauważyć w procesie regeneracyjnej fazy geomagnetycznej burzy, co pozwala z uwzględnieniem zapadania jonosferycznych procesów posługiwać się geomagnetycznymi indeksami do prognozy wzburzeń jonosferycznych [De Franceschi et al., 2014].

Przykłady globalnych map TEC, częstotliwości krytycznej foF2, wysokości maksimum hmF2 i indeksu W, codziennie aktualizowanych na stronie „Ionospheric weather” / „Ионосферная погода” IZMIR AN, przedstawiono na rys. 4. Zobrazowano tu moment stanu jonosfery o 23.00 (23UT) 7 września 2015 roku w maksimum geomagnetyczno-jonosferycznej burzy, której dynamikę przedstawiono na rys. 3.

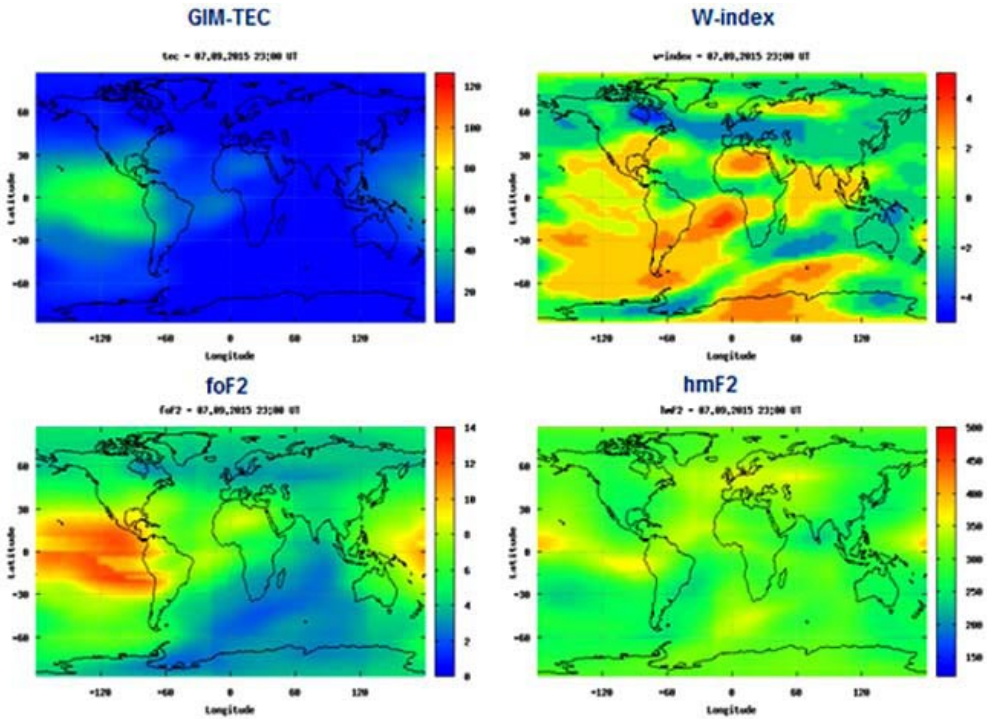


рис. 4. Глобальные карты TEC, W-индекса, foF2 и hmF2 в пике бури 7.09.2015, 23:00 UT на сайте «Ионосферная погода».

rys.4. Globalne mapy TEC, indeksu W oraz foF2 i hmF2 w czasie burzy 7.09.2015 23 UT na stronie «Ионосферная погода».

На карте W-индекса хорошо видны регионы повышенной электронной плотности (положительные ионосферные возмущения, красный цвет) и пониженной электронной плотности (отрицательные ионосферные возмущения, синий цвет) по сравнению со спокойным фоновым уровнем. Видны облака повышенной плотности ионосферной плазмы в ночной ионосфере (красный цвет) на севере Африки, в Южной Америке и примыкающей к ней части Атлантического океана, и в Антарктике. Область провалов в плотности ионосферной плазмы (синий цвет) простирается в ночной ионосфере от Северной Америки через Атлантический океан в Центральную Европу, включая евро-

Na mapie indeksu W dobrze widoczne są regiony przewyższonej koncentracji elektronowej (dodatnie jonosferyczne zaburzenia, czerwony kolor) i obniżonej koncentracji elektronowej (ujemne jonosferyczne zaburzenia, niebieski kolor) w porównaniu ze stabilnym poziomem. Widoczne są obłoki podwyższonej koncentracji jonosferycznej plazmy w nocnej jonosferze (czerwony kolor) na północy Afryki, w Południowej Ameryce i przylegającego do niej części Oceanu Atlantyckiego, i na Antarktyce. Rejon zapaści w gęstości jonosferycznej plazmy (niebieski kolor) przeciera się w nocnej jonosferze od Ameryki Północnej przez Ocean Atlantycki do Centralnej Europy, włączając europejską część

пейскую часть России, в южной части Индийского океана, на севере Австралии и в Антарктике. Эта мгновенная картина ионосферной возмущённости меняется с течением времени и представляет интерес для дальнейших исследований [Gulyaeva et al., 2016].

При прогнозе состояния ионосферы появление спорадического слоя Es критично для коротковолновой СВ радиосвязи, которая изначально выявила само существование ионосферы в начале 20-го века. В результате исследований в ЦКИ ПАН была обнаружена корреляция между вновь введенным локальным геомагнитным индексом ETA и появлением спорадического слоя Es [Dziak-Jankowska et al., 2011]. Эта зависимость, использованная в новой службе на сайте ЦКИ, позволяет в реальном времени отслеживать взаимосвязанные возмущения магнитного поля и нижней ионосферы, которые могут быть незаметны в трехчасовых геомагнитных Ap и Kp индексах. График на рис. 5a показывает изменение индекса ETA 11–13 мая 2015 года в обсерватории Бельск [51,8°N, 21,8°E]. Звездочкой отмечены всплески возмущений индекса ETA, с которыми согласуется появление спорадического слоя Es на ионограммах в Варшаве (рис. 5b, c).

В задаче прогнозирования ионосферных радиокommunikаций можно выделить два принципиальных аспекта: долгосрочный и текущий (оперативный) прогнозы. Оба вида прогнозов строятся на основе глобальной модели ионосферы, где в качестве управляющего параметра используется индекс солнечной активности. Можно рассматривать три возможных подхода к его определению: классическое значение числа солнечных пятен (R_i), оптимальное значение,

Rosji, w południowej części Oceanu Indyjskiego, na północy Australii i na Antarktyce. Ten moment jonosferycznego zaburzenia zmienia się biegiem czasu i ma znaczenie dla dalszych badań [Gulyaeva et al., 2016].

W prognozie stanu jonosfery pojawia się sporadyczna warstwa Es krytyczna dla krótkofalowej łączności radiowej KB, która pierwotnie potwierdziła samo istnienie jonosfery w początku XX wieku. W wyniku badań przeprowadzonych w CBK PAN ukazano korelację między wprowadzonym lokalnym geomagnetycznym indeksem ETA i pojawieniem się sporadycznej warstwy Es [Dziak-Jankowska et al., 2011]. Ta zależność, używana w nowym serwisie na stronie internetowej CBK PAN, pozwala w realnym czasie śledzić wzajemnie związane zaburzenia pola magnetycznego i dolnej jonosfery, które mogą być niewidoczne w trzygodzinnych geomagnetycznych indeksach Ap i Kp. Grafika na rys. 5a pokazuje zmiany w indeksie ETA w dniach 11–13 maja 2015 roku w obserwatorium w Belsku [51,8°N, 21,8°E]. Gwiazdką oznaczone są rozbłyski zaburzeń w indeksie ETA, z którym zgodne jest pojawienie się sporadycznej warstwy Es na jonogramach w Warszawie (rys. 5b, c).

W zadaniu prognozowania jonosferycznej radiokommunikacji można wyróżnić dwa główne aspekty: długoterminowe i bieżące (operacyjne) prognozy. Obydwa rodzaje prognoz powstają na podstawie globalnego modelu jonosfery, gdzie wiodącym parametrem jest indeks aktywności słonecznej. Można mówić o trzech możliwościach jego określenia: klasyczna wartość liczby plam słonecznych (R_i), optymalna wartość, ustalana na podstawie liczby plam słonecznych i strumienia

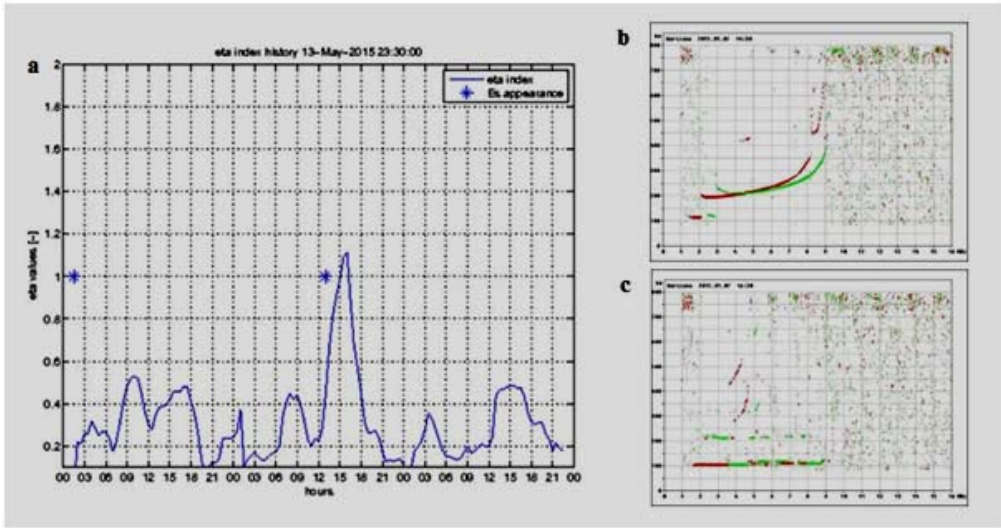


рис. 5. Вариации геомагнитного индекса ETA (а) 11–13 мая 2015 г. в обсерватории Бельск и соответствующие ионограммы (b, c), с появлением спорадического слоя Es, зарегистрированные ионозондом в Варшаве.

rys. 5. Wariacje indeksu geomagnetycznego ETA: (a) 11–13 maja 2015 r. rejestrowane w obserwatorium Belsk wraz z odpowiadającymi jonogramami z jonosondy z Warszawie (b, c). c – pojawienie się warstwy sporadycznej Es.

определяемое из числа солнечных пятен и потока солнечного радиоизлучения, и эквивалентный ионосферный индекс солнечной активности (IG12). В 2015 году на сайте космической погоды (<ftp://ftp.sec.noaa.gov/pub/weekly/Predict.txt>, Боулдер) было представлено независимое прогнозирование среднемесячных значений солнечной активности в виде числа солнечных пятен и потока солнечного радиоизлучения. В ИЗМИРАН была апробирована методика их совместного учета в долгосрочном прогнозировании ионосферных радиокommunikаций, предложенная в [Krasheinnikov, Egorov, 2010], которая показала меньшую среднеквадратичную погрешность, чем в случае использования только числа солнечных пятен.

Примеры представления долгосрочного и текущего прогнозов иллюстриру-

promieniowania słonecznego, i ekwiwalentny jonosferyczny indeks aktywności słonecznej (IGI12). W 2015 roku na stronie internetowej pogody kosmicznej (<ftp://ftp.sec.noaa.gov/pub/weekly/Predict.txt>, Boulder), przedstawiono niezależne prognozowanie średniomiesięcznych wartości aktywności słonecznej w zestawieniu liczby plam słonecznych i strumienia promieniowania słonecznego. W instytucie IZMIR AN zaaprobowano metodykę tych wspólnych wyliczeń w długoterminowym prognozowaniu jonosferycznym, przedstawionych w [Krasheinnikov, Egorov, 2010], które pokazały mniejszy średni błąd kwadratowy niż w przypadku wykorzystania tylko liczby plam słonecznych.

Przykłady przedstawienia długo-terminowych i bieżących prognoz ilustruje rys. 6 dla eksperymentalnej ra-

ются рис. 6 для экспериментальной радиотрассы наклонного радиозондирования Кипр-ИЗМИРАН с дальностью 2300 км в системе «Прогноз-ИЗМИРАН». Долгосрочный прогноз (рис. 6а) представляет собой зависимость усредненного среднемесячного значения максимальной применимой частоты (МПЧ) и её верхней и нижней границ допустимых значений, оптимальной рабочей частоты – ОРЧ, с учетом технических свойств системы радиосвязи – ОРЧ РКС, наименьшей применимой частоты (НПЧ) и напряжённости поля (отношения сигнал/шум в децибелах) на заданных частотах (рис. 6б).

Отмечается пороговое значение отношения сигнал/шум для функционирования радиокommunikационной системы (рис. 6б, горизонтальная линия). В расчёте долгосрочного и оперативного прогнозов используется не только информация о солнечной активности, но и представление рабочих антенн, данные системы радиосвязи, в частности, ширина полосы применяемого

диотрасы уклонного зондирования Cypr IZMIR AN z odległością 2300 km w systemie „Прогноз-ИЗМИРАН”. Długoterminowa prognoza (rys. 6a) przedstawia zależność uśrednionej średniej miesięcznej wartości maksymalnej użytecznej częstotliwości (MUF) i jej górnej i dolnej granicy dopuszczalnych wartości, optymalnej użytecznej częstotliwości – (OTF), z uwzględnieniem warunków technicznych systemu radio łączności – (OTF OWF), najmniejszej określonej częstotliwości (LUF) i natężenia pola (koligacje sygnał/szum w decybelach) na zadanych częstotliwościach (rys. 6b).

Odnotowuje się progową wartość współzależności sygnał/szum w funkcjonowaniu radio-kommunikacyjnego systemu (rys. 6b, linia horyzontalna). W rachunku długoterminowej i operatywnej prognozy wykorzystywane są nie tylko informacje o aktywności słonecznej, ale i parametry roboczych anten, dane systemów radio łączności, częstotliwości, szerokość pasa określonego

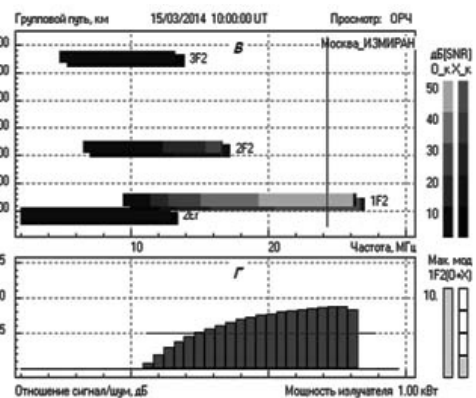
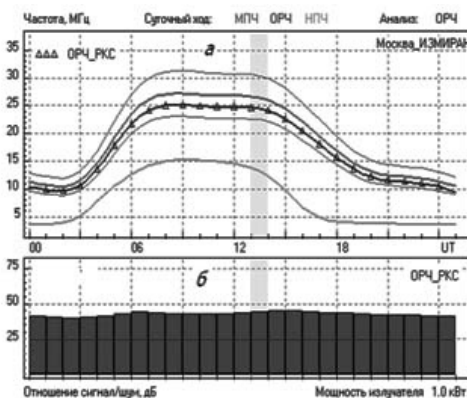


рис. 6. Долгосрочный (а, б) и текущий (в, г) прогнозы ионосферного прохождения радиоволн (радиокommunikации) на март 2014 года для экспериментальной трассы наклонного радиозондирования ионосферы Кипр-ИЗМИРАН.

rys.6. Długo (а, б) i krótkoterminowa prognoza (в, г) warunków propagacji na eksperymentalnej trasie Cypr IZMIR AN na 10 marca 2014 r.

сигнала и модель фоновых электромагнитных шумов. Долгосрочный прогноз является обобщением расчётов модовой структуры волнового поля (ионограмм наклонного зондирования – НЗ, в адаптированном виде, рис. 6 в, г) для каждого часа в глобальной медианной модели ионосферы. В долгосрочном прогнозе выделяются оптимальный часовой интервал наличия радиосвязи и оптимальные антенны для работы (если есть выбор антенн).

В задаче построения оперативного прогноза использовались дневные данные солнечной активности (F10.7) и результаты автоматической обработки ионограмм вертикального радиозондирования ионозонда «Парус-А» в ИЗМИРАН программой Autoscala в реальном времени [Krasheninnikov et al., 2010] для адаптации ионосферной модели к текущим условиям. Для текущего прогноза используются данные наблюдений foF2 и hmF2 ионозондом

sygnału i model elektromagne-tycznych szumów tła. Długoterminowa prognoza stanowi podsumowanie pola falowego (jono-gram ukośnego sondowania, w zaadoptowanym środowisku, rys. 6 в, г) dla każdej godziny w globalnym modelu jonosfery. W długoterminowej prognozie wydziela się optymalny godzinny interwał obecności radio łączności i optymalne anteny do pracy (jeśli jest wybór anten).

W zadaniu stworzenia operatywnej prognozy wykorzystano dzienne dane aktywności słonecznej (F10.7) i wyniki automatycznego opracowania jonogramów pionowego sondowania jonosondy „Парус-А” w instytucie IZMIR AN programem Autoscala w czasie realnym [Krasheninnikov et al., 2010] w adaptacji jonosferycznego modelu do bieżących warunków. Dla bieżącej prognozy wykorzystano dane obserwacji foF2 i hmF2 jonosondą „Парус-А” w czasie realnym regularnego sondowania (15min) z ostat-

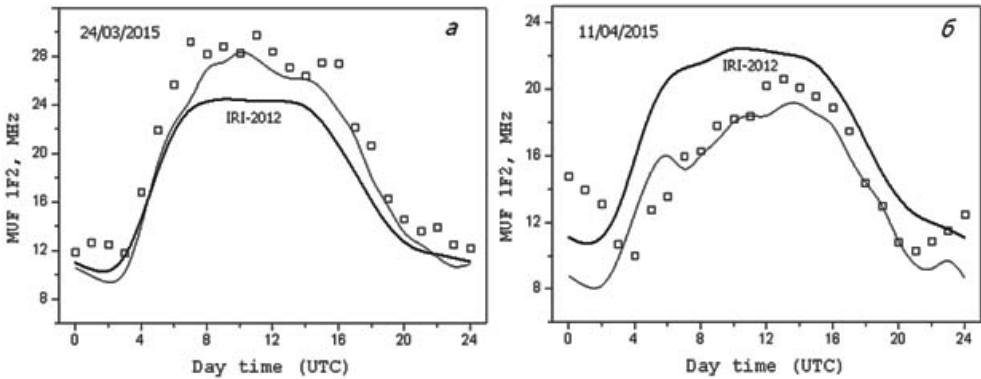


рис. 7. Суточный ход МПЧ 1F2 для экспериментальной трассы наклонного радиозондирования ионосферы Кипр-ИЗМИРАН: квадратики – экспериментальные значения, толстая линия – базовая модель IRI-2012 и тонкая линия – оперативный прогноз с учетом текущего уровня F10.7 и данных ВЗ (ИЗМИРАН).

rys. 7. Dobowy przebieg MUF1F2 podczas ukośnego sondowania na eksperymentalnej trasie Cypr-IZMIR AN. Kwadraty – wartości pomiarów, linia gruba – model IRI-2012, linia cienka – operacyjna prognoza z uwzględnieniem zmian strumienia 10.7 oraz danych z sondowania (IZMIR AN).

«Парус-А» в реальном времени с тактом регулярного зондирования (15 мин) за последние 3 ч. На рис. 7 приведены примеры анализа данных наклонного радиозондирования (дневной ход МПЧ 1F2) в спокойных (левая панель) и возмущенных (правая панель) условиях. В целом, прогнозные значения значительно более достоверно описывают динамику МПЧ 1F1 по сравнению с медианной ионосферной моделью.

Динамика крупномасштабных структур в ионосфере хорошо прослеживается в последовательности глобальных карт W-индекса в течение суток 18 марта 2015 года (рис. 8) во время главной фазы геомагнитной супербури в «День Св. Патрика» (таблица и рис. 1a). На рис. 8 видно образование облака повышенной плотности ионосферной плазмы (красное пятно) в Южной Америке и субавроральных широтах Атлантического океана, которое медленно перемещается к экваториальным широтам и постепенно диссипирует в течение 12–13 ч после пика геомагнитной бури. Отрицательная фаза ионосферной бури (синий цвет), характеризующая провал плотности плазмы по сравнению с нормальным спокойным уровнем, распространена вокруг облака повышенной плотности по всему глобусу, достигая почти 50% пространства в ионосфере и плазмосфере через 6–7 ч после пика геомагнитной бури. Динамика крупномасштабных возмущений в ионосфере меняется от бури к буре, в зависимости от начальных условий на Солнце, в межпланетной среде и в магнитосфере, уровня солнечной активности, сезона, местного времени начала ионосферной бури и времени её развития и затухания.

них 3 godzin. Na rys. 7 przedstawiono przykłady analizy danych ukośnego sondowania (dobowy MUF 1F2) w spokojnych (lewy panel) i zaburzonych (prawy panel) warunkach. Całościowo, wartości prognozowe o wiele bardziej wiarygodnie opisują dynamikę MUF 1F1 w porównaniu z wartościami mediany jonosferycznego modelu.

Dynamikę ogromnych struktur w jonosferze można zauważyć na kolejnych globalnych mapach indeksu W na podstawie obserwacji doby w dniu 18 marca 2015 roku (rys. 8) w czasie głównej fazy geomagnetycznej superburzy w Dniu Św. Patryka (tabela i rys. 1a). Na rys. 8 widoczne są obłoki podwyższonej gęstości jonosferycznej plazmy (czerwona plama) w Południowej Ameryce i subzorzowych Oceanu Atlantyckiego, które powoli przemieszczały się do równikowych szerokości geograficznych i stopniowo rozprasa się przez 12–13 godzin po osiągnięciu szczytu geomagnetycznej burzy. Ujemna faza burzy jonosferycznej (niebieski kolor), charakteryzująca się zmniejszeniem koncentracji plazmy w porównaniu z normalnym stabilnym poziomem, rozprzestrzeniona jest wokół obłoku podwyższonej gęstości na całym globie, osiągając prawie 50% rozprzestrzenienia w jonosferze przez 6–7 godzin po osiągnięciu szczytu geomagnetycznej burzy. Dynamika ogromnych zaburzeń w jonosferze zmienia się od burzy do burzy, w zależności od uwarunkowań na Słońcu, w międzyplanetarnym środowisku i w magnetosferze, poziomu aktywności słonecznej, sezonu, miejscowego czasu rozpoczęcia jonosferycznej burzy i czasu jej rozwoju i osłabienia.

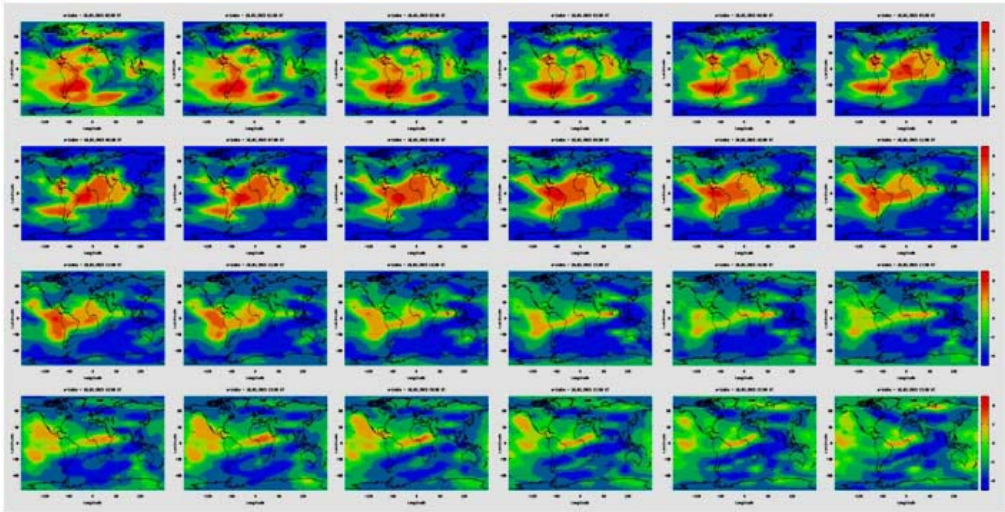


рис. 8. Динамика изменений глобальных карт W-индекса, построенных с разрешением в 1 час, в течение мощной бури 18 марта 2015 года

rys. 8. Dynamika zmian indeksu W pokazane na mapach globalnych o rozdzielczości 1 godz. podczas burzy z 18 marca 2015 r.

Статистические свойства зон наибольшего риска для ионосферной погоды, связанные с положительными и отрицательными ионосферными возмущениями, исследованы во время бурь и спокойных условий за период с 1999 по 2014 годы [Gulyaeva et al., 2016]. Типичные зоны повышенной плотности ионосферной плазмы во время ионосферных бурь обнаружены в Южной Америке, северном побережье Европы и России и на долготах от 30°W до 30°E в Антарктике, а зоны пониженной плотности плазмы доминируют в Антарктике. В то время как положительные и отрицательные зоны ионосферных неоднородностей во время бурь могут занимать до 20–25% ячеек на карте глобальной ионосферы, остаточная возмущенность до 6% наблюдается в ионосфере и в периоды «спокойной» ионосферной погоды, возможно, обуслов-

Statystyczne cechy stref największego ryzyka dla jonosferycznej pogody związane są dodatnimi i ujemnymi jonosferycznymi zaburzeniami, które analizowano podczas burz i stabilnych warunków w okresie od 1999 do 2014 roku [Gulyaeva et al., 2016]. Typowe strefy przewyższonej koncentracji jonosferycznej plazmy w czasie jonosferycznych burz wystąpiły w Południowej Ameryce, na północnym wybrzeżu Europy i Rosji oraz na długościach geograficznych od 30°W do 30°E na Antarktyce, a strefy obniżonej gęstości plazmy dominują na samej Antarktyce. W tym czasie jeśli dodatnie i ujemne strefy jonosferycznych niejednorodności podczas burz będą zajmować do 20–25% powierzchni globalnej jonosfery, można zauważyć szczytkowe zaburzenie do 6% w jonosferze i podczas „spokojnej” jonosferycznej pogody, możliwe, że warunkujące zaburze-

ленная возмущениями в нижних слоях атмосферы [Gulyaeva et al., 2016].

Представленные результаты демонстрируют возможность использования информации на сайтах «Ионосферная погода» ИЗМИРАН и ЦКИ ПАН как для научных исследований, так и в оперативном режиме для задач радиосвязи и навигации. Отметим, что многие из полученных результатов были представлены и одобрены в ряде Европейских проектов КОСТ (Комиссия по науке и технологии) и в проекте УРСИ и КОСПАР по Международной модели 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, а также представлять их в других национальных, европейских и международных проектах.

nia w niskich warstwach atmosfery [Gulyaeva et al., 2016].

Представленные результаты показывают возможность использования информации на страницах «Ionospheric weather» / „Ионосферная погода” IZMIR AN и CBK PAN так для научных исследований, как и в работе оперативной до задач радиосвязи и навигации. Важно заметить, что многие из полученных результатов были представлены и апробированы в ряде европейских проектов COST (European Cooperation for Scientific and Technical Research) oraz w projekcie URSI i COSPAR w Międzynarodowym modelu jonosfery IRI, co świadczy o zgodności przedstawionych opracowań z wysokimi międzynarodowymi standardami. Projekt rozwija się pomyślnie, rozszerzając możliwości wykorzystania jego produktów w radio-, nawigacyjnych i satelitarnych technologiach, tak w Europie i Rosji, jak i na świecie, posługując się ogólnodostępnymi w Internecie danymi jonosferycznych obserwacji, a ze swojej strony przedstawiając oryginalne metody ich analizy i zamieszczenia wyników w Internecie.

Wspólny projekt RAN i PAN pozwala:

- lepiej koordynować funkcjonujące programy badawcze IZMIR AN i CBK PAN;
- wymianę danymi, ideami, algorytmami i programami analizy i opracowań eksperymentalnych danych;
- prezentować ogólne wyniki we wspólnych publikacjach i wykładach na konferencjach, a także ich przedstawienie w innych narodowych, europejskich i międzynarodowych projektach.

ЛИТЕРАТУРА

BIBLIOGRAFIA

- [Stanisławska et al., 1999] *Stanisławska I., Gulyaeva T.L., Hanbaba R.* Ionospheric Despatch Centre in Europe // *Phys. Chem. Earth (C)*, 1999, V. 24. № 4. P. 355-357.
- [Гуляева, Станиславска, 2011a] *Гуляева Т.Л., Станиславска И.* Ионосфера: Моделирование ионосферной погоды для радиосвязи. Научное сотрудничество между Российской академией наук и Польской академией наук в области фундаментальных космических исследований. Результаты совместных исследований. М.: ИКИ РАН, 2011. P. 73-81. <http://www.iki.rssi.ru/book/2011poland.pdf>.
- [Gulyaeva et al., 2008] *Gulyaeva T.L., Stanisławska I., Tomasik M.* Ionospheric weather: Cloning missed foF2 observations for derivation of variability index // *Ann. Geophys.* 2008. V. 26. № 2. P. 315-321.
- [Gulyaeva, Stanisławska, 2008] *Gulyaeva T.L., Stanisławska I.* Derivation of a planetary ionospheric storm index // *Ann. Geophys.* 2008. V. 26. № 9. P. 2645-2648.
- [Гуляева, Станиславска, 2011] *Гуляева Т.Л., Станиславска И.* Классификация ионосферной активности: от локальных индексов к списку ионосферно-плазмосферных бурь // *Физика окружающей среды, Томск, Россия*, 2011. С. 81-84.
- [Stanisławska, Gulyaeva, 2015] *Stanisławska I., Gulyaeva T.* Ionospheric W index based on GNSS TEC in the operational use for navigation systems // *Book Chapter in Satellite Positioning*, 2015. P. 18.
- [Gulyaeva et al., 2013] *Gulyaeva T.L., Arian F., Hernandez-Pajares M., Stanisławska I.* GIM-TEC adaptive ionospheric weather assessment and forecast system // *J. Atmosph. Solar-Terr. Phys.* 2013. V. 102 P. 329-340. DOI: 10.1016/j.jastp.2013.06.011.
- [Gulyaeva et al., 2014] *Gulyaeva T.L., Arian F., Stanisławska I.* Probability of occurrence of planetary ionosphere storms associated with the magnetosphere disturbance storm time events // *Adv. Radio Sci.* 2014. V. 12. P. 261-266. DOI: 10.5194/ars-12-261-2014, <http://www.adv-radio-sci.net/12/261/2014/ars-12-261-2014.pdf>,
- [Dziak-Jankowska et al., 2011] *Dziak-Jankowska B., Stanisławska I., Ernst T., Tomasik Ł.* Ionospheric reflection of the magnetic activity described by the index eta, *Adv. Space Res.* // 2011. V. 48. P. 850-856.
- [Stanisławska et al., 2010] *Stanisławska I., Lastovicka J., Bourdillon A., Zolesi B., Cander Lj.R.* Monitoring and modeling of ionospheric characteristics in the framework of European COST 296 Action MIERS//*Space Weather*, 2010. V. 8. P. S02001, doi: 1029/2009SW000493.
- [Stanisławska, Zbyszyński, 2001] *Stanisławska I., Zbyszyński Z.* Forecasting of the ionospheric quiet and disturbed foF2 values at a single location // *Radio Sci.* 2001. V. 36. № 5. P. 1065-1071.
- [De Franceschi et al., 2001] *De Franceschi G., Gulyaeva T.L., Perrone L.* Forecasting geomagnetic activity 3 hours in advance for ionospheric applications//*Annali di Geofisica*, 2001. V. 44. № 5/6. P. 1067-1074.
- [Gulyaeva, Stanisławska, 2010] *Gulyaeva T.L., Stanisławska I.* Magnetosphere associated storms and autonomous storms in the ionosphere-plasmasphere environment//*J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2010. V. 72. P. 90-96. DOI: 10.1016/j.jastp.2009.10.012.
- [Gulyaeva et al., 2011] *Gulyaeva T.L., Arian F., Stanisławska I.* Inter-hemispheric Imaging of the Ionosphere with the upgraded IRI-Plas model during the space weather storms // *Earth, Planets and Space*, 2011. V. 63. № 8. P. 929-939. DOI: 10.5047/eps.2011.04.007.
- [Gulyaeva, Stanisławska, 2013] *Gulyaeva T.L., Stanisławska I.* Deformation of the ionosphere structure during the space weather events on October-November 2003// *Adv. Space Res.* 2013. V.51. ; 4. P. 683-690. DOI:10.1016/j.asr.2011.09.022.

- [Stanisławska, Gulyaeva, 2016] *Stanisławska I., Gulyaeva T.L.* Ionospheric W index based on GNSS TEC in the operational use for navigation systems//Satellite Positioning methods, models and applications, 2016. P. 131-148, ISBN 978-953-51-1738-4.
- [Gulyaeva et al., 2013] *Gulyaeva T.L., Arikani F., Stanisławska I., Poustovalova L.V.* Symmetry and asymmetry of ionospheric weather at magnetic conjugate points for two midlatitude observatories // *Adv. Space Res.*, 2013. V. 52. № 10. P. 1837-1844. DOI: 10.1016/j.asr.2012.09.038.
- [Gulyaeva et al., 2016] *Gulyaeva T.L., Arikani F., Stanisławska I., Poustovalova L.V.* Global distribution of zones of enhanced risk for the ionospheric weather // *J. Geography, Earth, Environ. Int.* 2016. DOI: 10.9734/JGEEI/2016/20488,
- [Krasheninnikov, Egorov, 2010] *Krasheninnikov I., Egorov I.B.* IRI-2001 model efficiency in ionospheric radiowave propagation forecasting // *J. Adv. Space Res.* 2010. V. 45. № 2. P. 268-275.
- [Krasheninnikov et al., 2010] *Krasheninnikov I., Pezzopane M., Scotto C.* Application of Autoscala to ionograms recorded by the AIS-Parus ionosonde // *Computers & Geosciences*, 2010. V. 36. P. 628-635.

The joint research Project on the 'Ionospheric Weather' of IZMIRAN and CBK is aimed to provide on-line the ionospheric parameters characterizing the space weather in the ionosphere. In the framework of the joint Project the novel techniques for data analysis, the original system of the ionospheric disturbance indices and their implementation for the ionosphere and the ionospheric radio wave propagation are developed since 1997. Data of ionosonde measurements and results of their forecasting for the ionospheric observatories network, the regional maps and global ionospheric maps of total electron content from the navigational satellite system (GNSS) observations, the global maps of the F2 layer peak parameters (foF2, hmF2) and W-index of the ionospheric variability are provided at the web pages of IZMIRAN and CBK. The data processing systems include analysis and forecast of geomagnetic indices ap and kp and new eta index applied for the ionosphere forecasting. For the first time in the world the new products of the W-index maps analysis are provided in Catalogues of the ionospheric storms and sub-storms and their association with the global geomagnetic Dst storms is investigated. The products of the Project web sites at <http://www.cbk.waw.pl/rwc> and <http://www.izmiran.ru/services/iweather> are widely used in scientific investigations and numerous applications by the telecommunication and navigation operators and users whose number at the web sites is growing substantially from month to month.

ГЛОНАСС/GPS МОНИТОРИНГ ИОНОСФЕРЫ

руководитель проекта
с российской стороны:

И. Шагимуратов

руководитель проекта
с польской стороны:

А. Кранковский

В работе обсуждаются результаты использования GPS/GLONASS- наблюдений для мониторинга ионосферы. В качестве примера представлены исследования флуктуаций TEC (Total Electron Content) в субавроральной, авроральной ионосфере во время геомагнитной бури 2 октября 2013 года и реакции ионосферы над Европой на солнечное затмение 20 марта 2015 года.

1. ФЛУКТУАЦИИ GPS СИГНАЛОВ, АССОЦИИРОВАННЫЕ С АВРОРАЛЬНЫМИ ВОЗМУЩЕНИЯМИ

Одним из эффективных средств диагностики ионосферы является измерение задержек сигналов навигационных спутников систем GPS/ГЛОНАСС на двух когерентных частотах $f_1/f_2=1,6/1,2$ ГГц. Дифференциальная задержка является мерой полного электронного содержания ионосферы (TEC). Наиболее существенные отклонения от регулярного поведения ионосферы связаны с геомагнитными возмущениями. Во время геомагнитных возмущений в ионосфере развиваются неоднородности различных масштабов, которые вызывают флуктуации амплитуды и фазы трансionoсферных сигналов. Интенсивность

MONITORING JONOSFERY PRZY UŻYCIU OBSERWACJI GPS/GLONASS

kierownik projektu
ze strony Rosji:

I. Shagimuratov

kierownik projektu
ze strony Polski:

A. Krankowski

W pracy przedstawiono rezultaty wykorzystania obserwacji GPS/GLONASS do monitorowania jonosfery. Dla przykładu przedstawiono fluktuacje TEC (Total Electron Content) w polarnej i okołobiegunowej jonosferze w czasie trwania burzy geomagnetycznej w dniu 2 października 2013 roku oraz odpowiedź w jonosferze, w postaci zmian TEC nad Europą, na zaćmienie słoneczne w dniu 20 marca 2015 roku.

1. FLUKTUACJE SYGNAŁÓW GPS ZWIĄZANE Z ZABURZENIAMI PODCZAS ZORZY POLARNEJ

Jednym ze skutecznych sposobów diagnozowania jonosfery jest pomiar opóźnienia sygnałów satelitów systemów GPS/GLONASS, na dwóch spójnych częstotliwościach $f_1/f_2=1,6/1,2$ GHz. Różnica opóźnień jest miarą całkowitej zawartości elektronów w jonosferze (TEC). Najbardziej znaczące odchylenia od normalnego stanu jonosfery związane są z zaburzeniami geomagnetycznymi. Podczas zaburzeń geomagnetycznych w jonosferze rozwijają się niejednorodności o różnych skalach, które powodują wahania amplitudy i fazy sygnałów transjonosferycznych (przechodzących przez jonosferę). Wahania intensywno-

и частота флуктуаций существенно увеличиваются во время магнитных бурь [Shagimuratov et al., 2009; Krankowski et al., 2005]. Флуктуации сигналов приводят к срывам приёма GPS/ГЛОНАСС, затрудняют разрешение фазовой неоднозначности, что в конечном итоге приводит к ухудшению точности местопредопределения [Afraimovich et al., 2009; Forte, Radicella, 2004].

1.1. Материалы и методы

Исследования особенностей приёма сигнала в условиях возмущенной ионосферы проводились по материалам комплексных наблюдений во время магнитной бури 2 октября 2013 г. В анализе использовалась разработанная совместно ЗО ИЗМИРАН и кафедрой геодиними Варминско-Мазурского университета в Ольштыне методика обработки GPS/GLONASS-наблюдений, которая позволяет по исходным измерениям, представленным в RINEX-формате, выявить флуктуации спутниковых сигналов и оценить их интенсивность в пространстве и времени. Информация о TEC-флуктуациях была получена по данным регулярных наблюдений международной сети IGS. Широко разветвлённая сеть GPS/GLONASS приёмных станций обеспечивает регулярный мониторинг пространственного распределения ионосферных неоднородностей в планетарном масштабе с высоким временным разрешением. Буря оценивалась по данным магнитных наблюдений на сети станций IMAGE (<ftp://space.fmi.fi/image>), планетарных и региональных геомагнитных индексов и вариаций короткопериодических колебаний геомагнитного поля на измерительных пунктах на Кольском полуострове и в Скандинавии.

ści i częstotliwości znacznie zwiększają się podczas burz magnetycznych [Shagimuratov et al., 2009; Krankowski et al., 2005]. Fluktuacje sygnałów GPS/GLONAS utrudniają określenie nieznaczności co w ostateczności prowadzi do pogorszenia dokładności pozycjonowania [Afraimovich et al., 2009; Forte, Radicella, 2004].

1.1. Materiały i metody

Badania właściwości odbioru sygnału w zaburzonej jonosferze przeprowadzono na podstawie kompleksowych obserwacji przeprowadzonych podczas burzy magnetycznej 2 października 2013. W analizie wykorzystano metodologię opracowaną wspólnie przez Zachodni Oddział IZMIRAN oraz Wydział Geodezji, Inżynierii Przestrzennej i Budownictwa Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie dotyczącą przetwarzania obserwacji GPS/GLONASS, od surowych obserwacji w formacie RINEX do identyfikacji fluktuacji sygnałów wraz z oceną ich intensywność w czasie i przestrzeni. Informacje o fluktuacjach TEC uzyskano z permanentnych obserwacji satelitarnych międzynarodowej sieci IGS. Gęsta sieć odbiorników GPS/GLONASS tej sieci zapewnia regularne monitorowanie rozkładu przestrzennego występowania niejednorodności w jonosferze w skali globalnej o wysokiej rozdzielczości czasowej. Ocenianą burze dobrze opisują obserwacje magnetyczne wykonane na stacjach sieci IMAGE (<ftp://space.fmi.fi/image>), regionalne i planetarne indeksy geomagnetyczne oraz zmiany krótkookresowych oscylacji pola magnetycznego Ziemi w punktach pomiarowych na Półwyspie Kolskim oraz w Skandynawii.

1.2. Данные и геомагнитные условия

Стандартные, с 30 с интервалом, двухчастотные GPS/GLONASS-измерения были обработаны для получения информации о проявлении TEC флуктуаций во время бури. Исходными данными служили измерения TEC вдоль индивидуальных пролетов спутников над станцией наблюдения. Флуктуационная активность оценивалась по скорости изменения TEC — Rate of TEC (ROT) на одноминутном интервале. Единица измерения ROT-TECU/min, $1 \text{ TECU} = 10^{16}$ электрон/м² [Aarons, 1997]. В качестве меры интенсивности флуктуаций был использован индекс ROTI [Pi et al., 1997].

$$ROTI = \sqrt{\langle ROT^2 \rangle - \langle ROT \rangle^2}$$

На рис. 1 представлены глобальные характеристики Kp-, Dst- и AE-индексов во время магнитной бури за период 30 сентября – 4 октября 2013 года. Очевидно, что её главная фаза имела место с 00 до 06 UT 2 октября с минимальным значением Dst ~ -70 нТ; максимальное значение Kp-индекса достигало 8, Ae-индекс превышал значение 1300 нТ. Учитывая, что планетарные индексы являются усредненными по пространству величинами и не отображают реальную геофизическую ситуацию в деталях, на рис. 2 приводятся реальные магнитограммы меридиональной цепочки магнитометров (X-компонента) в Евро-Арктическом регионе по данным сети IMAGE.

Рис. 2 демонстрирует магнитные вариации (бухты), полученные на скандинавской сети магнитометров. Международная сеть включает станции, расположенные в среднеширотной субавроральной и авроральной областях. Две серии геомагнитной активности

1.2. Dane i warunki geomagnetyczne

Standardowe, 30 s. dwuczęstotliwościowe obserwacje GPS/GLONASS zostały przetworzone w celu uzyskania informacji o TEC fluktuacjach w czasie burzy. Za wstępne dane służyły pomiary TEC wzdłuż przejść satelitów GNSS. Fluktuacje TEC dobrze opisuje Rate of TEC (ROT) parametr wyznaczany w odstępach minutowych. Jednostką ROT jest TECU/min, gdzie $1 \text{ TECU} = 10^{16}$ elektronów/m² [Aarons, 1997]. Jako miarę natężenia fluktuacji użyto indeksu ROTI [Pi et al., 1997].

Na rys. 1 przedstawiono globalną charakterystykę indeksów Kp-, Dst- oraz AE-podczas trwania burzy magnetycznej w okresie 30 września – 4 października 2013 r. Główna faza burzy trwała od 00 do 06 UT w dniu 2 października z minimalną wartością Dst ~ -70 nT; maksymalną wartość Kp wynosiła 8, indeks Ae przekroczył wartość 1300 nT. Biorąc pod uwagę, że indeksy planetarne są uśrednionymi wartościami na rys. 2 przedstawiono prawdziwe magnetogramy (X-składowych) w regionie Euro-Arktycznym w oparciu o dane z sieci IMAGE.

Rys. 2 pokazuje zmiany magnetyczne uzyskane ze skandynawskiej sieci magnetometrów. Międzynarodowa sieć obejmuje stacje usytuowane w okolicach okołobiegunowych i biegunowych. Dwie serie aktywności geomagnetycznej obserwowane są 2 października w godzinach porannych i wieczornych.

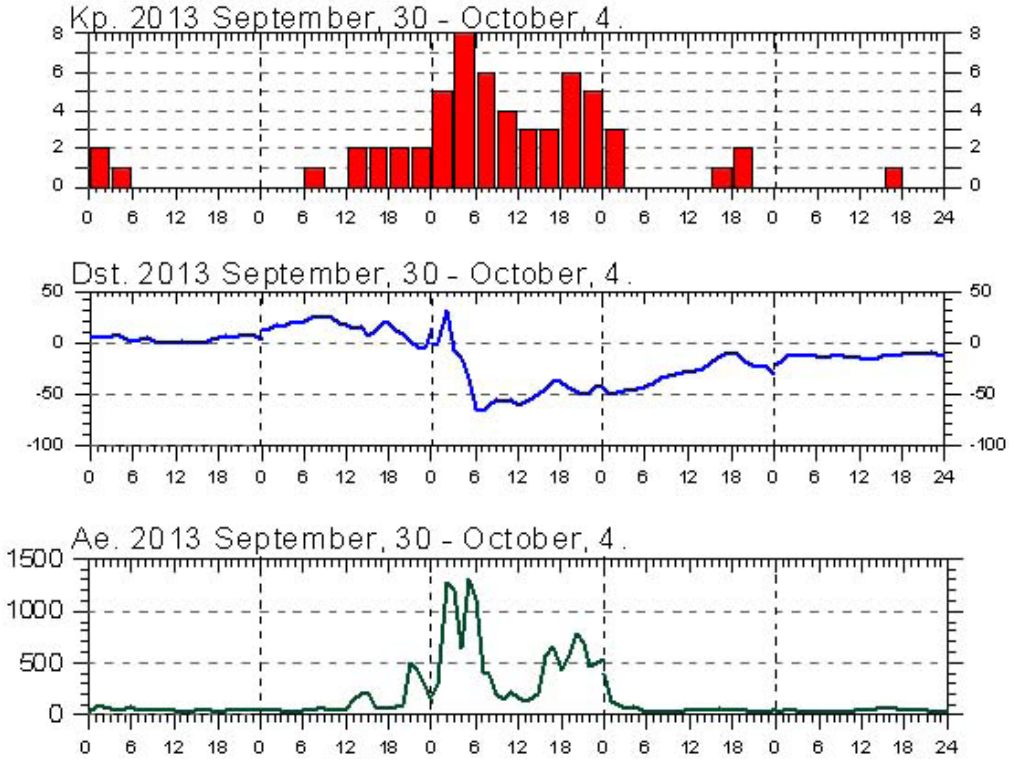


рис. 1. Kp, Dst и Ae вариации за период 30 Сентября – 4 Октября, 2013 г.
 rys. 1. Zmiany Kp, Dst dla okresu 30 września – 4 października 2013 roku

наблюдалась 2 октября в утреннем и вечернем секторах. Интенсивность магнитных бухт уменьшается с севера на юг. Наиболее интенсивные магнитные вариации приходились на утренние часы, слабые всплески наблюдались даже на широте 55°N . Это свидетельствует о том, что авроральный овал сместился во время бури к экватору.

1.3. Результаты

Временное проявление TEC-флуктуаций хорошо видно в вариациях параметра ROT вдоль пролётов спутников. На рис. 3 представлена картина проявления флуктуаций на различных станциях вдоль пролётов всех спутников на

Наиболее интенсивные изменения магнитные наблюдаются в поранных. Слабые изменения также наблюдаются на широтах около 55°N . Это свидетельствует о том, что авроральный овал сместился во время бури в направлении экватора.

1.3 Wyniki

Часowe zmiany fluktuacji TEC dobrze widoczne są w zmianach parametru ROT. Na rysunku 3 przedstawiono fluktuacje TEC dla różnych stacji dla wszystkich satelitów GPS w 24 godzinnych interwałach dla spokojnych i zaburzonych

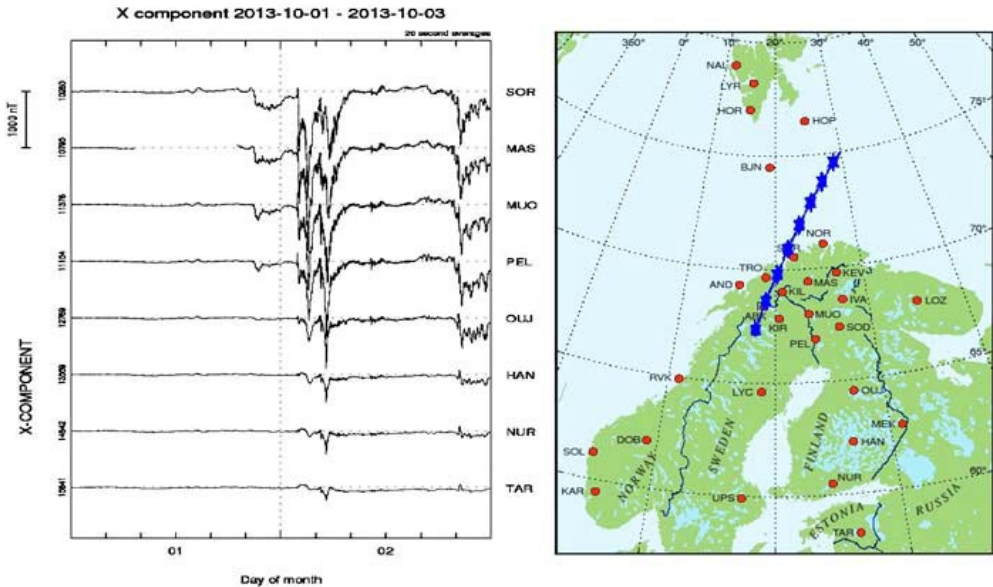


рис. 2. Вариации геомагнитного поля (X-компонента) (слева) на станциях, разнесённых по широте скандинавской сети и карта расположения магнитометров (справа)

rys. 2. Zmiany pola geomagnetycznego (składowa X) dla stacji skandynawskiej sieci oraz mapa położenia magnetometrów

24-часовом интервале для спокойного и возмущенного дней. Для спокойного дня флуктуации TEC на среднеширотных станциях фактически не наблюдались, на высоких широтах (ст. Кируна) флуктуации умеренной интенсивности регистрировались в вечернее время на отдельных пролётах. Это свидетельствует о том, что траектории некоторых спутников в данный период проходили вдоль южной границы аврорального овала. Во время возмущения на станции Кируна интенсивные флуктуации наблюдались в утреннее и вечернее время. На средних широтах на фоне общей низкой флуктуационной активности хорошо проявляется вспышка усиления флуктуаций для спутника № 14 в интервале 05–06 UT как на станции Калининград, так и на станции Ламковко.

warunków. Dla dnia spokojnego nie zarejestrowano znaczących fluktuacji TEC na stacjach położonych na średnich szerokościach. Na wysokich szerokościach (stacja Kiruna) zarejestrowano umiarkowane fluktuacje TEC w godzinach wieczornych. W czasie burzy na stacji Kiruna zarejestrowano silne fluktuacje TEC w godzinach porannych i wieczornych. Na średnich szerokościach ogólnie rejestrowano niską fluktuacyjną aktywność, tylko dla satelity nr 14 w godzinach 05–06 UT zarejestrowano skok wartości parametru ROT na stacjach Kaliningrad i Lamkówko.

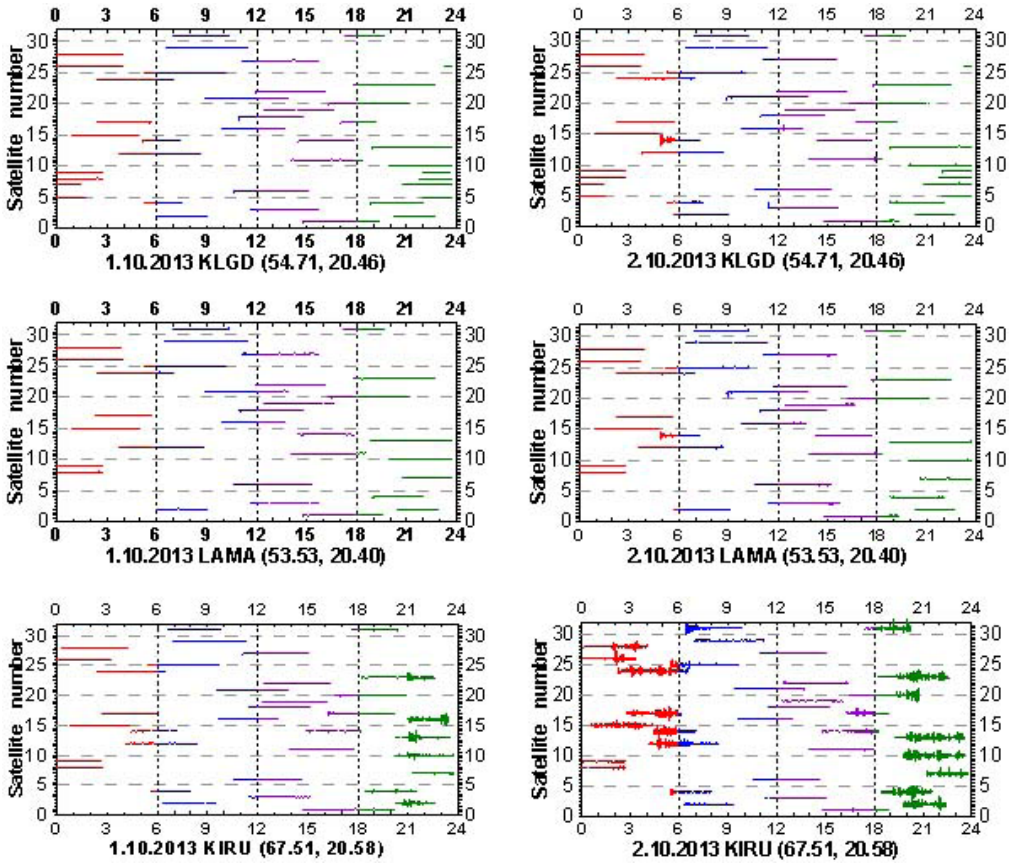


рис. 3. Развитие TEC флуктуаций (ROT) на среднеширотных станциях Калининград и Ламковко и высокоширотной станции Кируна для спокойного (1 Октября) и возмущённого (2 Октября) дней на 24 часовом интервале

rys. 3. Rozwój fluktuacji TEC (ROT) na średnieszerościowych stacjach Kaliningrad i Lamkówko oraz wysokoszerokościowej stacji Kiruna w czasie spokojnego (1 października) oraz zaburzonego dnia (2 października)

Пространственную локализацию вспышки интенсивности флуктуаций можно видеть на рис.4. Здесь показана вариация параметра ROT вдоль пролёта спутника № 14 для 1 и 2 октября 2013 г. и нанесена траектория движения спутника на ионосферных высотах (подионосферные точки). На рисунке видно, что во время возмущения интенсивность флуктуаций резко возросла и была локализована на широтах 58–59°N.

Przestrzenną lokalizację skoku intensywności fluktuacji przedstawia rys. 4. Na rysunku pokazano zmiany parametru ROT wzdłuż przelotu satelity nr 14 dla 1 i 2 października 2013 roku. Naniesiono również tor przebiegu satelity oraz punkty podjonosferyczne. Na rysunku widać, że w czasie burzy intensywność fluktuacji znacznie wzrosła i była obserwowana na szerokościach 58–59°N.

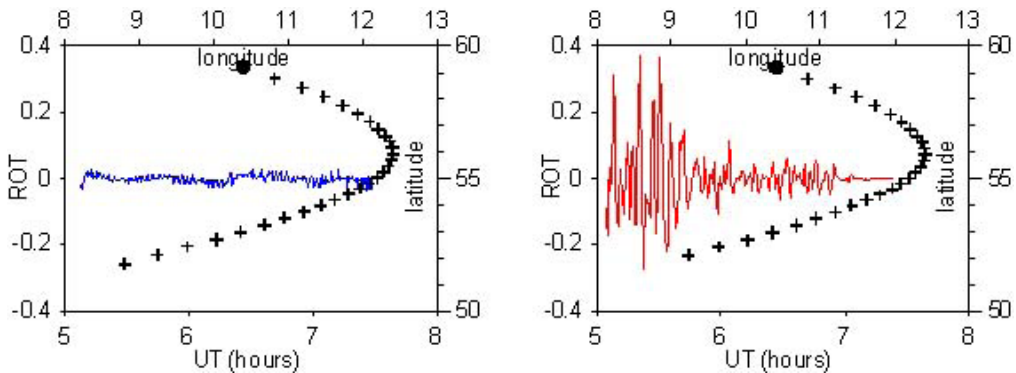


рис. 4. ТЕС флуктуации на станции Ламковко для спутника № 14 для спокойного (слева) и возмущённого (справа) дней
rys. 4. Fluktuacje TEC nad stacją Lamkówko dla satelity nr 14 dla spokojnego (lewa strona) i zaburzonego (prawa strona) dnia

На рис. 5 представлено поведение ТЕС флуктуаций на станциях, различных по широте для спокойного и возмущённого дней. Флуктуационная активность, как и интенсивность магнитных бурх, спадает с севера на юг.

На авроральных станциях интенсивные флуктуации во время бури наблюдались в утренние и вечерние часы. На субавроральных широтах всплески флуктуаций наблюдались в районе 5–6 UT, когда магнитная возмущённость была наибольшей. Временное развитие ТЕС и магнитных вариаций очень похоже.

Временной ход параметра ROT на различных станциях совпадает со спектральными и временными вариациями магнитного поля на станциях Ловозеро и Соданкула. Это указывает на то, что в период авроральных возмущений в ионосфере возникают различных масштабов неоднородности, которые могут вызвать сильные фазовые флуктуации GLONASS/GPS сигналов. Это, в свою очередь, может приводить к нарушению приёма сигналов навигационных спутников и, как следствие, вызвать большие ошибки позиционирования в Арктическом регионе.

Na rys. 5 przedstawiono fluktuacje TEC nad stacjami położonymi na różnych szerokościach dla spokojnych i zaburzonych dni. Aktywność fluktuacji zmniejsza się z północy na południe.

Na polarnych stacjach intensywne fluktuacje, w czasie burzy, występują w godzinach porannych i wieczornych. Na stacjach sub-polarnych intensywne fluktuacje występują w godz. 5–6 UT, kiedy magnetyczna intensywność była największa. Czasowe zmiany magnetyczne i TEC są bardzo podobne.

Czasowe zmiany parametru ROT na różnych stacjach są podobne do czasowo-spektralnych zmian pola magnetycznego rejestrowanego na stacjach Lovozero oraz Sodankyla. Oznacza to, że w czasie zorzy polarnej w zaburzonej jonosferze istnieją różnoskalowe niejednorodności, które mogą powodować silne fazowe fluktuacje sygnałów GLONASS/GPS. To z kolei może prowadzić do kłopotów w odbiorze sygnałów satelitów a w konsekwencji powodować duże błędy w pozycjonowaniu w regionie arktycznym.

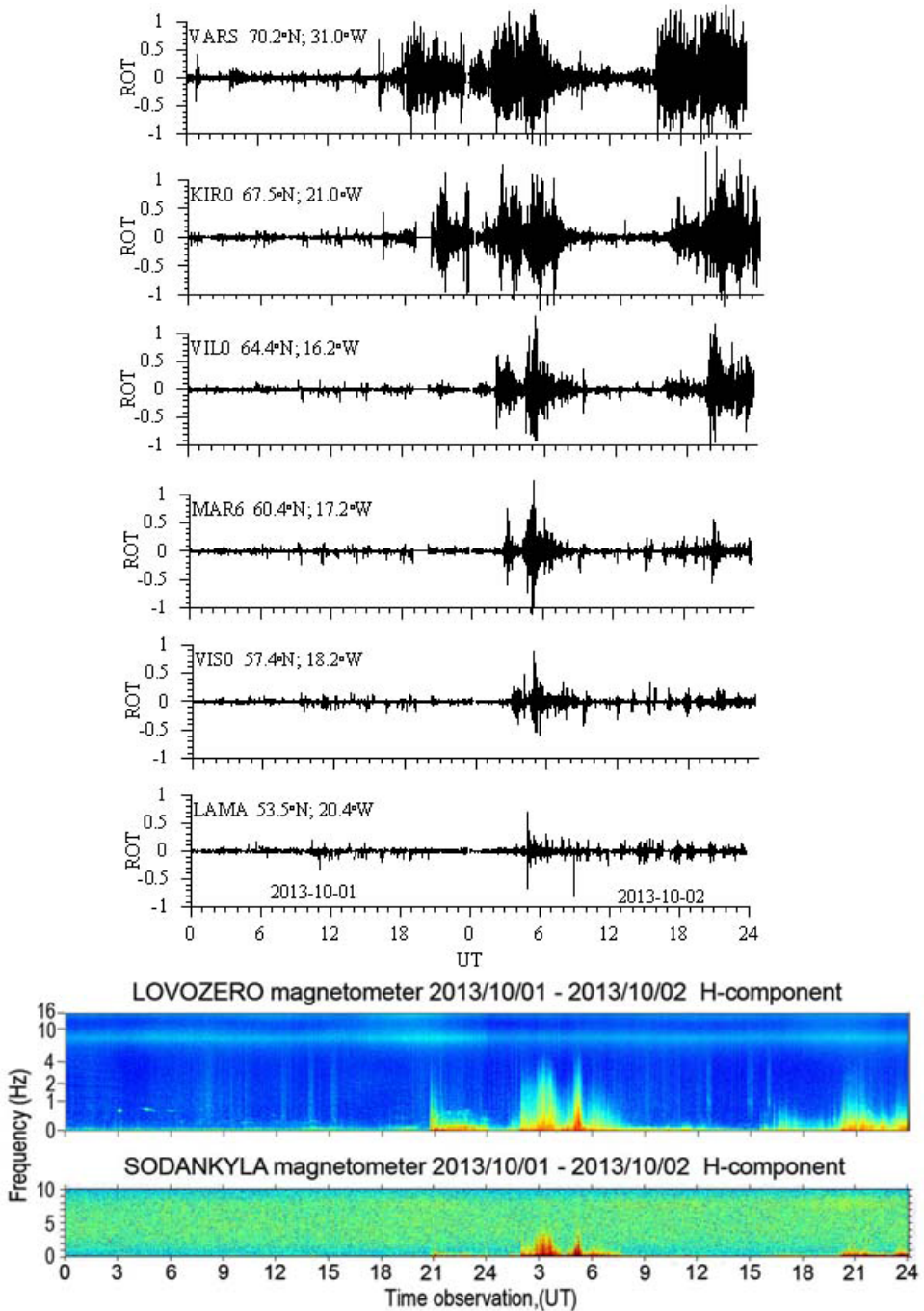


рис. 5. Широконое проявление TEC флуктуаций для 1 и 2 октября 2013 года и кеограммы для станций Ловозеро и Соданкула

rys. 5. Szerokościowe fluktuacje TEC dla 1 i 2 października 2013 roku oraz magnetogramy dla stacji Lovozero i Sodankyla

Учитывая временное совпадение TEC-флуктуаций и пульсаций геомагнитного поля, представляется возможным определить в ионосфере источник, который может приводить к нарушению приема навигационного сигнала при авроральных возмущениях. Особенно это касается периода суббулевой активности. Например, слабые магнитные возмущения в районе 21 UT 1 октября 2013 года, которые локализованы в полярной области, не вызвали TEC-флуктуации на станции Калининград. В то же время сильное возмущение в районе 05 UT 2 октября (во время бури) проявилось как в магнитном возмущении на средних широтах, так и в TEC-флуктуациях на станции Калининград. Это свидетельствует о возможности диагностики и прогноза состояния приема навигационных сигналов в Арктике по измерениям вариаций геомагнитного поля.

1.4. Овал неоднородностей

Используя одновременные GLONASS/GPS наблюдения 130–150 высокоширотных станций северного полушария, можно сформировать картину пространственного распределения интенсивности TEC флуктуаций (индекс ROTI) в полярной ионосфере. В координатах CGL (Corrected Geomagnetic Latitude) и MLT (Magnetic Local Time) такая картина демонстрирует, подобно авроральному овалу, овал неоднородностей [Shagimuratov et al., 2012]. Проявление овала связано с авроральным овалом, каспом и полярной шапкой. В качестве примера на рис. 6 представлена динамика овала неоднородностей в зависимости от геомагнитной активности во время рассматриваемой бури.

Ze względu na zbieżność czasową fluktuacji TEC i pulsacji pola magnetycznego, możliwe jest ustalenie warunków, które mogą prowadzić do pogorszenia odbioru satelitarnych sygnałów nawigacyjnych w czasie zaburzeń. Szczególnie dotyczy to okresu subburzowej aktywności. Na przykład, słabe zaburzenia magnetyczne około 21 UT w dniu 1 października 2013 roku, które rejestrowano w regionie polarnym, nie powodowało intensywnej fluktuacji TEC rejestrowanych na stacji Kaliningrad. W tym samym czasie, silne zakłócenia około 05 UT w dniu 2 października (podczas burzy) zaobserwowano zarówno we fluktuacjach TEC na stacji Kaliningrad jak i w obserwacjach magnetycznych. Wskazuje to na możliwość diagnozowania i prognozowania stanu odbioru sygnałów nawigacyjnych w Arktyce poprzez pomiar różnic w zakresie geomagnetycznym.

1.4. Овал нејенородноці

Korzystanie jednoczesnych z obserwacji z około 130–150 permanentnych stacji monitorujących GLONASS/GPS położonych wokół bieguna północnego daje możliwość stworzenia mapy rozkładu natężenia fluktuacji TEC (indeks ROTI) w układzie CGL (Corrected Geomagnetic Latitude) i MLT (Magnetic Local Time). Poniższy rysunek 6 przedstawia dynamikę zmian owalu nieregularności w zależności od geomagnetycznej aktywności.

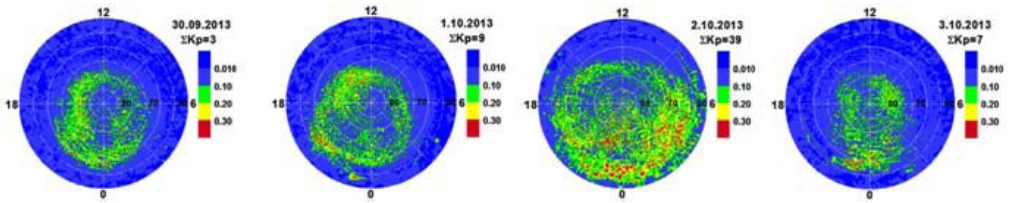


рис. 6. Динамика овала неоднородностей за период с 30 сентября по 3 октября 2013 года
rys. 6. Dynamika zmian owala nieregularności w okresie od 30 września do 3 października 2013 roku

Как видно на рис. 6 картина овала существенно меняется в зависимости от геомагнитной возмущенности. Минимально низкое положение экваториальной границы овала приходится на местную магнитную полночь. Граница овала при слабой магнитной возмущенности находилась на широте $65\text{--}68^\circ$ CGL. Дневное положение овала неоднородностей приходилось на широты около 75° CGL. Во время бури овал заметно расширился, и его экваториальная граница опустилась до широты 60° CGL, интенсивность флуктуаций в овале также заметно выросла. Пространственные характеристики овала даже при почти одинаковой величине ΣKp могут заметно различаться, например, для 1 октября ($\Sigma Kp = 9$) и 3 октября ($\Sigma Kp = 7$) 2013 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во время геомагнитной бури 2 октября интенсивные TEC-флуктуации регистрировались в авроральной и субавроральной ионосфере. Совместный анализ фазовых флуктуаций GLONASS/GPS-сигналов (TEC-флуктуаций) и флуктуаций геомагнитного поля показал хорошее согласие в их поведении во время максимальной авроральной активности. В этот период интенсивные флуктуации были зафиксированы на среднеширотной станции Калини-

Как видно на рисунке 6, овал нерегулярности значако изменяется с активностью геомагнитной. Граница овала при слабой активности геомагнитной находится на широте $65\text{--}68^\circ$ CGL. В случае бури овал расширяется до широты 60° CGL а интенсивность флуктуации TEC в овале значако также растет.

WNIOSKI

Podczas burzy magnetycznej 2 października 2013 roku rejestrowano intensywne fluktuacje TEC w polarnej i okołobiegunowej jonosferze. Wspólna analiza fazowych fluktuacji GLONASS/GPS-TEC fluktuacji i zmian pola geomagnetycznego wykazała dobrą zgodność w ich zachowaniu w czasie maksymalnej aktywności геомагнитной. W tym okresie intensywne fluktuacje TEC rejestrowane były również na średnich szerokościach (stacja Kaliningrad).

град. В комбинации с оптическими и геомагнитными измерениями этот факт подтверждает, что в этот период авроральный овал расширился к экватору.

2. РЕАКЦИЯ ТЕС ИОНОСФЕРЫ НА СОЛНЕЧНОЕ ЗАТМЕНИЕ 20 МАРТА 2015Г.

Солнечные затмения являются своего рода естественным экспериментом, который позволяет исследовать физико-химические процессы в ионосфере Земли в период кратковременного выключения главного источника ионизирующей солнечной радиации в условиях сформировавшейся дневной ионосферы. Это также даёт возможность тестирования различных моделей верхней атмосферы. Реакция ионосферы на солнечное затмение зависит от многих факторов, в частности, от времени года, сезона, уровня солнечной активности.

Затмение Солнца 20 марта 2015 г. было частичным на всей территории Европы. Максимальный коэффициент покрытия диска Солнца составлял $\sim 0,9$ над Скандинавией и $\sim 0,5$ на юге Европы. Для станции Калининград и Ламковко коэффициент покрытия диска Солнца составлял $\sim 0,71$. Начало затмения приходилось на 08:50 UT, окончание – на 11:09 UT, максимальное покрытие диска Солнца имело место в 09:58 UT. Освещённость поверхности Земли при максимальном покрытии диска Солнца уменьшилась более чем в 5 раз. Затмение проходило на стадии перехода от утренней ионосферы к дневной. Таким образом, наблюдаемые нами ионосферные эффекты вызваны изменением потока ионизирующего излучения Солнца и сопутствующими процессами. Общая продолжительность частичного затмения над точкой наблюдения составила 2 ч 48 мин.

W połączeniu z optycznymi i geomagnetycznymi pomiarami można stwierdzić, że owal nieregularności rozszerzył się w kierunku równika.

2. ZMIANY TEC W JONOSFERZE W CZASIE TRWANIA ZAĆMIENIA SŁOŃCA W DNIU 20 MARCA 2015 ROKU

Zaćmienia Słońca pozwalają na zbadanie różnego rodzaju procesów fizycznych i chemicznych zachodzących w jonosferze. Umożliwiają również testowanie różnych modeli dla górnych warstw atmosfery ziemskiej. Reakcja jonosfery na zaćmienie zależy od wielu czynników, w tym od pory roku, sezonu oraz poziomu aktywności słonecznej.

W całej Europie zaćmienie Słońca w dniu 20 marca 2015 roku było częściowe. Maksymalny wskaźnik pokrycia dysku słonecznego wynosił $\sim 0,9$ nad Skandynawią i $0,5$ na południu Europy. Dla stacji Kaliningrad i Lamkówko wskaźnik pokrycia dysku wynosił około $0,71$. Zaćmienie zaczęło się około 08:50 UT a skończyło 11:09 UT, maksymalne zakrycie tarczy słonecznej było około 09:58 UT. Zaćmienie Słońca miało miejsce w czasie przejścia jonosfery od jej stanów porannych do południowych. Całkowity czas trwania częściowego zaćmienia wynosił 2 godziny i 48 minut.

2.1. Геомагнитная обстановка

Затмению 20 марта предшествовала мощная магнитная буря 20 марта (рис. 7).

2.1. Warunki geomagnetyczne

Zaćmienie Słońca 20 marca zostało poprzedzone silną burzą magnetyczną (rys. 7).

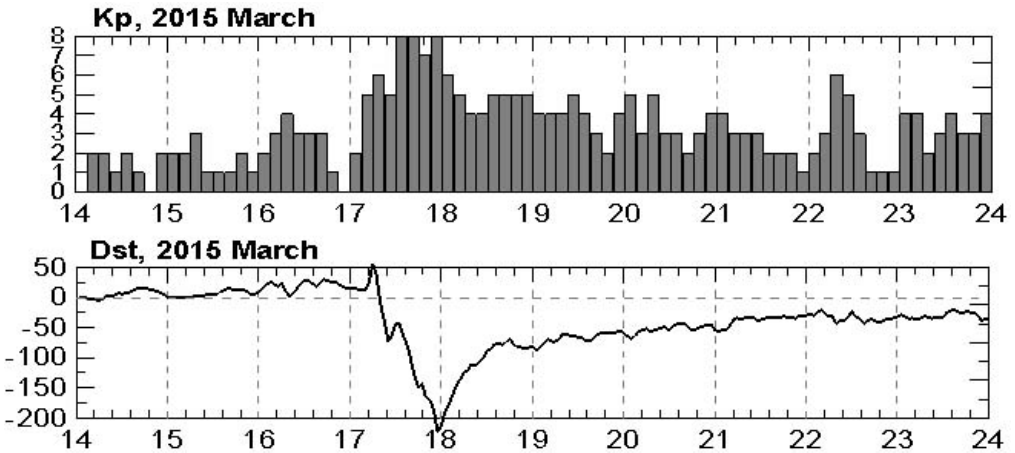


рис. 7. Kp- и Dst-индексы за период 13–23 марта 2015 г.

rys. 7. Ineksy Kp i Dst w okresie 13–23 marca 2015 roku

Максимальная величина Dst достигала -223 нТ в 23UT, а величина Kp – 8 (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>). Затяжная восстановительная фаза бури стартовала в 00 ч 18 марта и продолжалась вплоть до 25 марта. Затмение наблюдалось на третий день бури при уровне Dst ~ -55 нТ.

2.2. Суточные вариации TEC

В качестве исходных данных для анализа TEC использовались ГЛОНАСС наблюдения европейской сети станций EUREF. Суточные вариации формировались на основе алгоритмов и программ, которые обеспечивали расчёт абсолютной величины TEC над станцией наблюдения. Для примера на рис. 8 представлено поведение TEC на станции Ламковко для спокойных

Maksymalna wartość Dst osiągnęła -223 nT około 23UT a indeks Kp- wartość 8 (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>). Przedłużająca się faza regeneracji rozpoczęła się około 00 UT w dniu 18 marca i trwała aż do 25 marca. Zaćmienie obserwowano na trzeci dzień trwania burzy, gdzie Dst był na poziomie 55 nT.

2.2. Dobowe zmiany TEC

Do analiz TEC wykorzystano obserwacje GLONASS zarejestrowane w stacjach europejskich sieci EUREF. Dobowe zmiany TEC wyznaczono w oparciu o algorytmy i programy, które zapewniają obliczenie wartości bezwzględnej TEC na stacji monitorującej. Na przykład, na rys. 8 przedstawiono zmiany TEC na stacji Lamkowko. W czasie trwania burzy obserwowane są pozytywne i na-

суток, предшествующих магнитной буре, эффект бури 17 марта и в последующие дни, соответствующие восстановительной фазе бури, включая день солнечного затмения. Во время бури наблюдалось дневное положительное возмущение, за которым последовала отрицательная фаза, на фоне которой и наблюдалось затмение. На суточной вариации затмение проявилось в виде впадины 20 марта в районе 09–11 UT.

gatywne efekty w TEC. W czasie trwania burzy magnetycznej w czasie dobowych zmian TEC obserwowane było również zjawisko zaćmienia w godzinach 20 marca 09–11 UT.

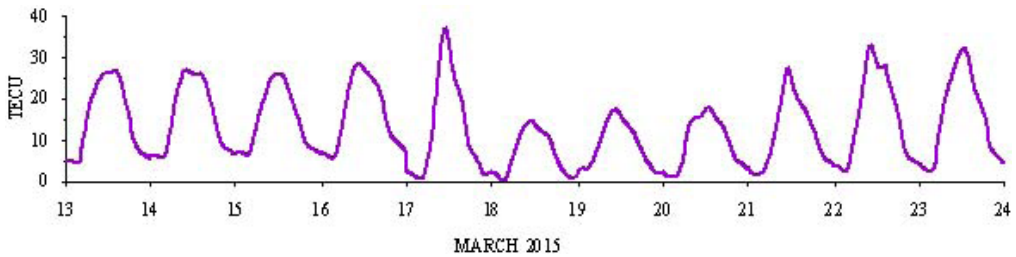


рис. 8. Суточные вариации ГЛОНАСС-TEC по станции Ламковко за период 13–23 марта 2015 года

rys. 8. Dobbowe zmiany TEC wyznaczone z obserwacji GLONASS w stacji Lamkowko w okresie 13–23 marca 2015 roku

2.3. Пространственно временная динамика TEC

Для анализа пространственного поведения во время затмения строились карты TEC над Европой. Для построения карт использовались ГЛОНАСС-наблюдения 110–130 европейских станций. Плотная разветвлённая сеть станций обеспечила получение карт с высоким пространственно-временным разрешением.

На рис.9 представлены карты TEC с одночасовым интервалом в период затмения 20 марта и для контрольных дней, предшествующих дню затмения и последующих за ним. Реакция ионосферы в виде понижения TEC началась проявляться после 08UT на широтах ниже 60°N. Максимальный эффект наблюдал-

2.3. Przestrzenno-czasowa dynamika TEC

Do analizy zachowań przestrzennych podczas zaćmienia skonstruowano regionalne mapy TEC dla całej Europy. Dla skonstruowania map wykorzystano obserwacje GLONASS z 110–130 europejskich stacji. Gęsta sieć stacji w Europie zapewnia konstrukcje map TEC z wysoką rozdzielczością czasowo-przestrzenną.

Rysunek 9 pokazuje mapę TEC w odstępach jednogodzinnych podczas zaćmienia w dniu 20 marca oraz dnia poprzedniego i następnego.

Reakcja jonosfery w postaci zmian parametru TEC zaczęła pojawiać się po 08UT na szerokościach poniżej 60°. Maksymalny efekt obserwowany był w

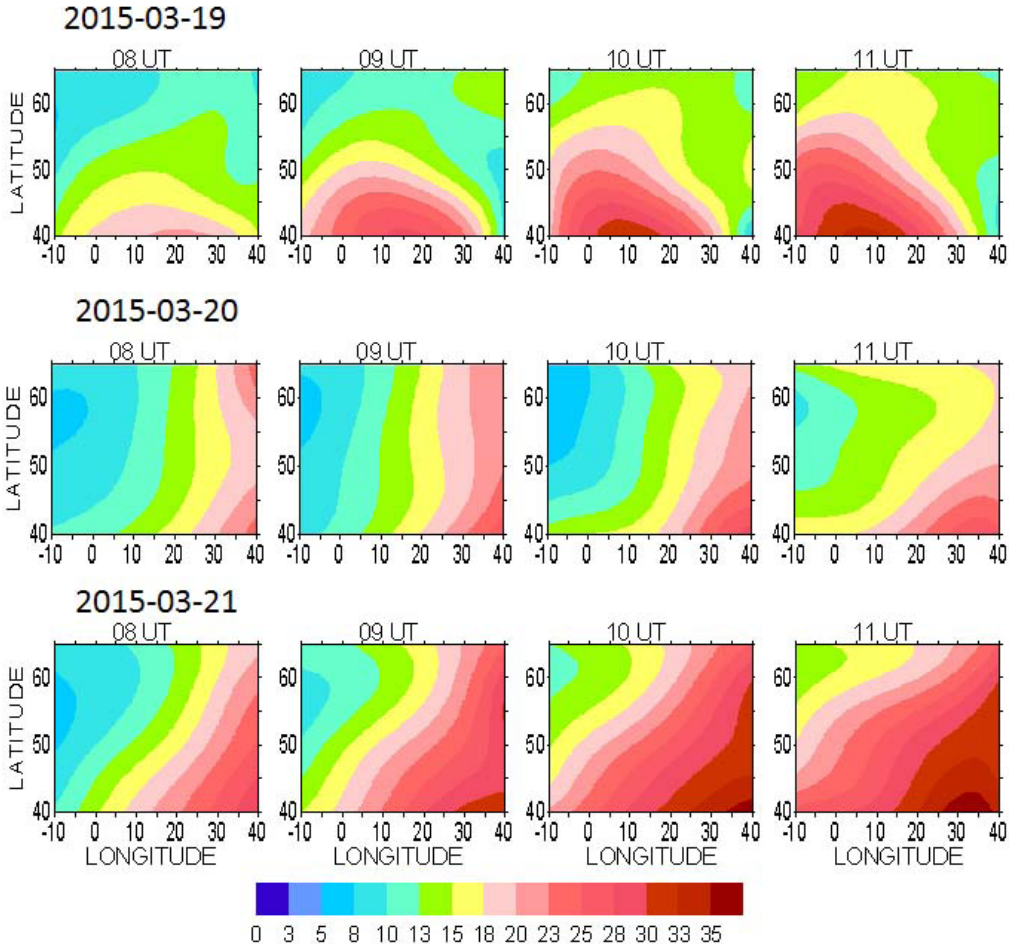


рис. 9. GLONASS-TEC карты над Европой 19, 20 и 21 марта 2015 г.

rys. 9. Mapy zmian TEC nad Europą wytworzone z obserwacji GLONASS w okresie 19, 20 i 21 marca 2015 roku

ся в западной части Европы. Детальная картина реакции ТЕС-ионосферы анализировалась на основе пятиминутных минутных карт, сформированных для интервала времени, когда наблюдался максимальный эффект затмения.

На картах (рис. 10) явно видна значительная депрессия ТЕС во время затмения по сравнению с контрольным днем. Большая разница в абсолютных величинах ТЕС для затмения и контрольного дня обусловлена в большей

zachodniej części Europy. Szczegółowa analiza zmian TEC możliwa była na podstawie generowanych pięciominutowych map, gdy zaobserwowano maksymalny efekt zaćmienia.

Na rys. 10 widoczna jest znaczna depresja TEC występująca w czasie zaćmienia w porównaniu do następnego dnia. Duża różnica w bezwzględnych wartościach TEC wynika przede wszystkim z większego nasycenia jonosfery po ujem-

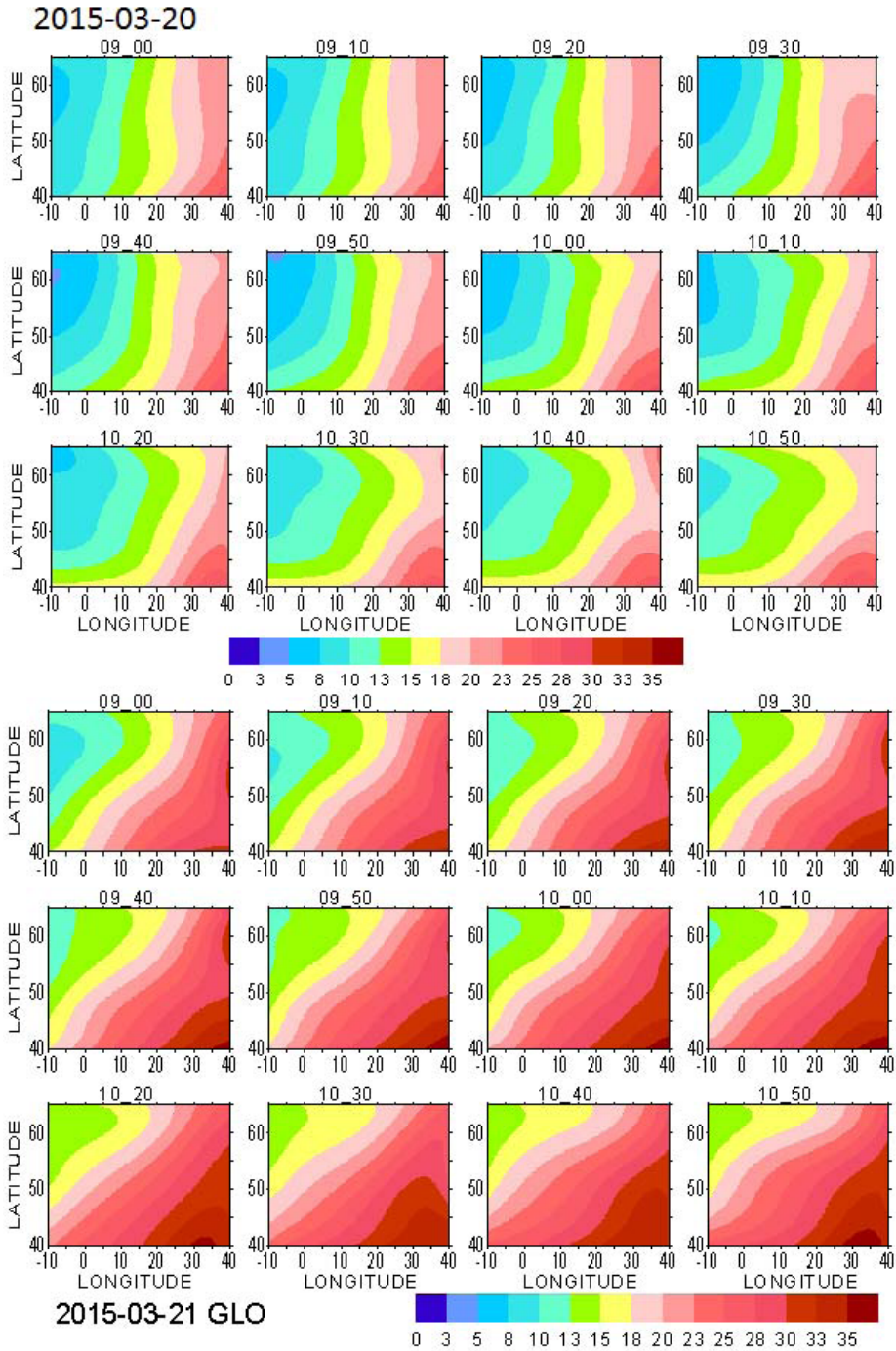


рис. 10. TEC карты над Европой с 10-минутным интервалом для дня затмения 20 марта и контрольного дня 21 марта.

rys. 10. 10-min. mapy TEC nad Europą dla dnia zaćmienia (20 marca) oraz dnia następnego (21 marca)

части насыщением ионосферы после отрицательной фазы бури. Повышенная величина TEC 21 марта наблюдалась и после окончания затмения, когда ионосфера должна восстановиться до нормального состояния. Эффект затмения в основном проявился в изменении пространственного распределения TEC над Европой. Затмение привело к явному изменению структуры широтных и долготных градиентов TEC. Карты TEC, сформированные с пятиминутным интервалом, демонстрируют динамику пространственно-временного поведения TEC во время затмения. Эффект затмения проявился на всех рассматриваемых широтах и долготах, с течением времени депрессия TEC продвигалась с запада на восток.

nej fазie burzy. Podwyższoną wartość TEC w dniu 21 marca po zakończeniu zaćmienia, obserwowano, gdy jonosfera przechodziła do swego normalnego stanu. Zaćmienie doprowadziło do znacznych zmian w strukturze szerokościowych i równoleżnikowych jonosferycznych gradientów.

Mapy TEC utworzone w 5 min. interwałach pokazują dynamikę przestrzenną-czasową rozłożenia TEC nad Europą w czasie zaćmienia. Efekt zaćmienia obserwowany był na wszystkich europejskich szerokościach i długościach. Z upływem czasu depresja TEC przechodziła z zachodu na wschód.

ЛИТЕРАТУРА

BIBLIOGRAFIA

- [Shagimuratov et al., 2009] *Shagimuratov I.I., Efshov I.I., Tepenitsyna N.Yu.* Similarities and differences of storm time occurrence of GPS phase fluctuations at northern and southern hemispheres // In Proceeding EuCAP, 2009.
- [Krankowski et al., 2005] *Krankowski A., Shagimuratov I.I., Baran L.W., Ephishov I.I.* Study of TEC fluctuations in Antarctic ionosphere during storm using GPS observations // *Acta Geophysica Polonica*. 2005.V. 53. № 2. P. 205-218.
- [Afraimovich et al., 2009] *Afraimovich E.L., Astafyeva E.I., Demyanov V.V., Gamayunov I.F.* Mid-latitude amplitude scintillation of GPS signals and GPS performance slips // *Advances in Space Research*. 2009. V. 43.P. 964-972.
- [Forte, Radicella, 2004] *Forte B., Radicella S.* Geometrical control of scintillation indices What happens for GPS satellites // *Radio Science*, 2004. V. 39. RS5014, DOI: 10.1029/2002RS002852.
- [Aarons, 1997] *Aarons J.* GPS system phase fluctuations at auroral latitudes // *Journal of Geophysical Research*, 1997. V. 102. № 8.P. 17219-17231.
- [Pi et al., 1997] *Pi X., Mannucci A.J., Lindqwister U.J., Ho C.M.* Monitoring of global ionospheric irregularities using the worldwide GPS network // *Geophysical Research Letters*, 1997. V. 24 . № 18. P. 2283.
- [Shagimuratov et al., 2012] *Shagimuratov I.I., Krankowski A., Efshov I.I., Cherniak Yu.V., Wielgosz P., Zakharenkova I.E.* High latitude TEC fluctuations and irregularity oval during geomagnetic storms // *Earth Planets Space*, 2012. V. 64. ; 6. P. 521-529.

In the report the effects for two geophysical events on the base GLONASS/GPS monitoring of the ionosphere are presented:

1. The results of investigations of GNSS signal phase fluctuations occurrence during the geomagnetic storm on October 2, 2013. During this space weather event the intense phase fluctuations have been registered at the permanent GNSS stations located not only in auroral and subauroral regions but even over midlatitude stations. In combination with optical and geomagnetic measurements this fact confirms the expansion of the auroral oval towards the equator. It brings in evidence also the behavior of the irregularity oval which was created using observations from 110–130 high latitude GPS stations.

2. The response of the total electron content (TEC) over Europe to solar eclipse 20 March 2015. The eclipse effects were analyzed on the basis of TEC maps which were created using GLONASS observations from more than 150 stations of the EUREF network. The high spatial and temporal resolution (5min) of TEC maps provides the dynamics of eclipse TEC changes to reveal. During the eclipse the spatial distribution of TEC over Europe has been modified.

ИНЖЕКЦИЯ

руководитель проекта
с российской стороны:

Ю. Михайлов

руководитель проекта
с польской стороны:

З. Клос

Одной из первых работ, посвященных исследованию распространения низкочастотных (НЧ) волн в околоземном космическом пространстве (ОКП) была монография Хеллиуэла [Helliwell, 1965]. В ней на основании магнитоионной теории рассматривалось распространение свистящих атмосфериков (СА) в магнитном поле Земли. Хеллиуэл привёл обширный атлас наблюдений НЧ-явлений, из которого следовало, что наряду со свистовыми сигналами, распространяющимися вдоль магнитного поля, наблюдается большой класс волновых явлений, которые имеют сложную временную структуру и не могут быть объяснены в рамках магнитоионной теории. Дальнейшие эксперименты Хеллиуэла подтвердили этот тезис. При регистрации передатчика Сайпл (Антарктида) на частоте 5000 Гц в северном полушарии на станции Квебек (Канада) им был отмечен следующий эффект. Импульсная модуляция сигнала с изменяющейся длительностью импульса послышки показала, что окончание импульса является источником индуцированного излучения, причём диапазон излучения может быть достаточно широк, а форма зависит от длительности импульса модуляции. Так, при длительности импульса 300 мс индуцированные излучения имели форму перевернутого хука (hook). Эти работы стимулировали проведение на спутнике «ИНТЕРКОСМОС-24» эксперимента с использованием электрического генератора.

INIEKCJA

kierownik projektu
ze strony Rosji:

Y. Mikhailov

Kierownik projektu
ze strony Polski:

Z. Kłos

Jedna z pierwszych prac na temat propagacji fal niskich częstotliwości (NCz) w wokółziemskiej przestrzeni kosmicznej była monografia Helliwell'a [Helliwell, 1965]. W monografii tej na podstawie teorii magnetycznej rozpatrywano propagacje świstów atmosferycznych w magnetycznym polu Ziemi. Helliwell przytoczył obszerny katalog badań zjawisk NCz. z którego wynikało, że wraz z sygnałem świstu atmosferycznego propagującego się wzdłuż pola magnetycznego, pojawia się duża klasa zjawisk falowych mających złożoną strukturę czasową i nie mogą być wyjaśnione w ramach teorii magnetycznej. Kolejne eksperymenty Helliwell'a potwierdziły tę hipotezę. Rejestracja sygnałów nadajnika ze stacji Siple (Antarktyda) na częstotliwości 5000 Hz prowadzona na półkuli północnej na stacji Quebec (Kanada) odnotowała następujący efekt. Impulsowa modulacja sygnału ze zmienną długością impulsu trwania pokazała, że koniec impulsu jest źródłem indukowanego promieniowania, przy czym zakres promieniowania może być dostatecznie szeroki a jego forma zależy od długości impulsu modulacji. Tak więc przy długości impulsu równej 300 msek indukowane promieniowanie miało formę odwróconego haku. Te prace stymulowały przeprowadzenie na satelicie INTERCOSMOS-24 eksperymentu z wykorzystaniem generatora sygnałów.

Предлагаемый эксперимент являлся продолжением упомянутых экспериментов. В этом эксперименте генератор электрических импульсов устанавливался на спутнике и излучал импульсы 250 мс, заполненные синусоидальными сигналами разных частот, начиная от 500 Гц до 19,5 кГц. Целью этого эксперимента было определение оптимальных условий возбуждения ОНЧ-волн. Как будет показано ниже, в нашем эксперименте также имело место возбуждение ОНЧ-излучений по окончании импульсов ОНЧ-волн. Интерпретация экспериментов потребовала разработки теоретической модели нелинейных триггеров при больших линейных инкрементах. Значительным шагом в понимании процессов был сделан в монографии Трахтенгерца и Райкрофта [Трахтенгерц, Райкрофт, 2011]. В нашей работе предложена интерпретация эксперимента, основанная на упомянутой монографии.

1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Спутник «ИНТЕРКОСМОС-24» был запущен 28 сентября 1989 года на орбиту с параметрами – апогей 2500 км, перигей 500 км, наклонение 82,5°. Одним из основных приборов являлся генератор электрических импульсов длительностью $\tau \approx 250$ мс с заполнением сигналами низких частот от 1,5 до 19,5 кГц с шагом $\Delta f = 1$ кГц и скважностью, равной 4. Амплитуда импульсов в четырёх последовательных циклах изменялась как 50, 100, 150 и 200 В. Ток в антенне измерялся и был равен 1,5 мА при напряжении 100 В. Переменное магнитное поле на расстоянии 1 м от антенны составляло было равно

Przeprowadzony eksperyment jest kontynuacją wspomnianych wyżej eksperymentów. W tym eksperymencie generator impulsów elektrycznych był umieszczony na satelicie i emitował impulsy 250 msek wypełnione sygnałami sinusowymi różnych częstotliwości od 500 Hz do 19,5 KHz. Celem eksperymentu było określenie optymalnych warunków wzbudzenia fal VLF. Jak pokazujemy poniżej w naszym eksperymencie też miało miejsce wzbudzenie fal VLF, po zakończeniu impulsów VLF. Interpretacja eksperymentów wymagała rozpracowania teoretycznych modeli nieliniowych trigger'ów z dużymi linowymi wzrostami. Znaczący krok w zrozumieniu tych procesów był dokonany w monografii Trahtengerz i Rycroft [Трахтенгерц, Райкрофт, 2011]. W naszej pracy jest przedstawiona interpretacja eksperymentu oparta na wspomnianej monografii.

1. OPISANIE EKSPERYMENTU

Satelita INTERKOSMOS-24 był wyniesiony 28 września 1989 r. na orbite z parametrami: apogeum 2500 km, perygeum 500 km, nachylenie 82,5 stop. Jednym z podstawowych przyrządów był generator impulsów długości $\tau \approx 250$ msek z wypełnionymi sygnałami niskich częstotliwości od 1,5 do 19,5 kHz z krokiem $\Delta f = 1$ k Hz i cyklem pracy równym 4. Amplituda impulsów w czterech kolejnych cyklach zmieniała się następująco: 50, 100, 150, i 200 V. Mierzony prąd w antenie był równy 1,5 mA przy napięciu 100 V. Zmienne pole magnetyczne na odległości od anteny 1m było równe 1,8 nT. Dla modu świstu takie pole od-

1,8 нТ. Для свистовой моды это поле соответствует напряжённости электрического поля ~ 70 мВ/м.

Общий вид спутника приведён на рис. 1. В качестве излучателя использовалась линейная антенна ПВП (прибор для возбуждения плазмы) с длиной луча 7,5 м. Нами представлено четыре случая наблюдения нелинейных процессов по окончании импульса ПВП.

powiada natężeniu pola elektrycznego ca 70 mV/m.

Ogólny widok satelity przedstawiono na Rys. 1. W charakterze emitera wykorzystywano antenę liniową PVP (podniecić urządzenie plazmowe) o długości 7,5 m. Poniżej przedstawiono cztery przypadki badania procesów nieliniowych po zakończeniu emisji impulsu PVP.



рис. 1. Общий вид спутника «ИНТЕРКОСМОС-24»
rys. 1. Ogólny obraz satelity INTERKOSMOS-24

В первом случае возбуждаемые ОНЧ-сигналы были зарегистрированы на витке 954 13.12.90 в $20^{\text{h}}21''$ МСК ($L=2,0$; $H=503$ км) [Mikhailov et. al., 1995]. Наблюдаемые сигналы представляли собой низкочастотные сигналы с частотами ниже частоты импульса ПВП во временном интервале, огра-

W pierwszym przypadku wzbudzone sygnały VLF były zarejestrowane na orbicie 954 w dniu 12.12.1990 o $20^{\text{h}} 21''$ czasu Moskiewskiego ($L=2,0$; $H=503$ км) [Mikhailov et. al., 1995]. Rejestrowane sygnały wyglądały jak sygnały niskoczęstotliwościowe na częstotliwościach poniżej częstotliwości PVP w przedzia-

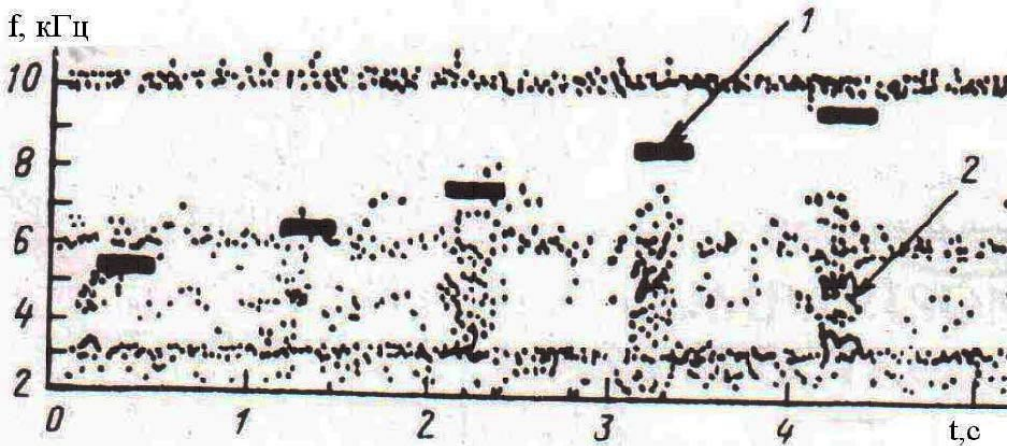


рис. 2. Спектрограмма записи ОНЧ-сигналов в полосе 2–10 кГц при работе ПВП на витке 941 спутника «ИНТЕРКОСМОС-24»

1 – импульсы ПВП, 2 – электростатические шумы

rys. 2. Spektrogramy zapisu sygnałów VLF w pasmie 2–10 kHz przy pracy PVP na orbicie 941, satelity INTERKOSMOS-24

1 – impulsy PVP, 2 – szумы elektrostatyczne.

ниченном импульсом накачки (рис. 2 [Mikhailov et. al., 1995]). На некоторых частотах между импульсом и полосой шума наблюдался разрыв. По своему характеру сигнал был определен как электростатический шум.

Во втором случае на витке 1238 5.01.90 в 17^h02'20" МСК была зарегистрирована группа сигналов искусственного происхождения (рис. 3). Спутник в это время находился на высоте 920 км и на L-оболочке 2,3. Возбуждаемый сигнал возникал в момент окончания импульса ПВП и резко падал по частоте до частот порядка 1 кГц, при этом наблюдалась глубокая структуризация сигнала. При прохождении индуцированным сигналом диапазона частот нижнегибридного резонанса (НГР) возбуждаются шумы, ограниченные временным интервалом ПВП и шириной ~1 кГц. На частотах 4,5 и 6,3 кГц наблюдалась затяжка импульса.

le czasowym, ograniczonym impulsem pompowania (Rys. 2 [Mikhailov et. al., 1995]). Na niektórych częstotliwościach pomiędzy impulsem a pasmem szumów występowała przerwa. Charakter sygnału wskazywał na to, że jest to шум elektrostatyczny.

W drugim przypadku na orbicie 1238 w dniu 05.01.1990 o 17^h02'20" zarejestrowano grupę sztucznego pochodzenia sygnałów (Rys. 3). W tym czasie satelita był na wysokości 920 km i na L=3,3. Wzbudzony sygnał pojawiał się w momencie zakończenia impulsu PVP i stromo spada po częstotliwości aż do 1 kHz przy czym występuje głęboka strukturyzacja sygnału. Przy przejściu sygnału indukowanego z zakresu częstotliwości lokalnego LHR (niższe hybrydowy rezonansu) wzbudzony zostaje шум, ograniczony zakresem czasowym pracy PVP o szerokości ca 1 kHz. Na częstotliwościach 4,5 i 6,3 kHz pojawia się rozciąganie impulsu.

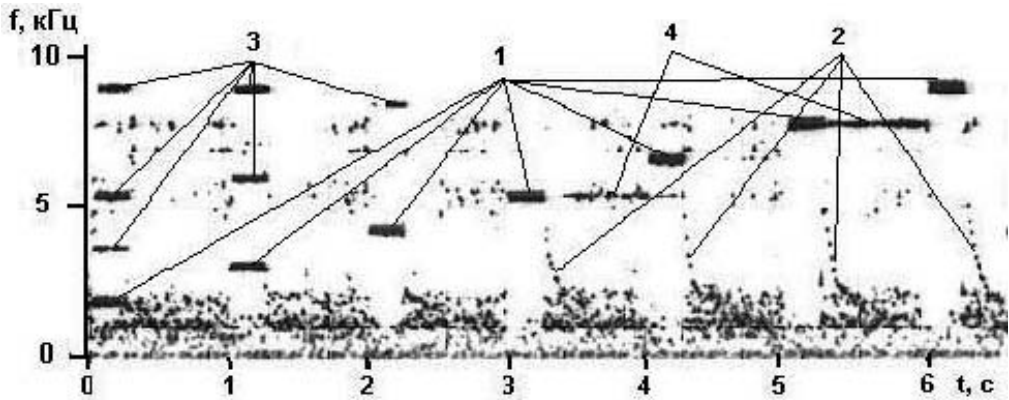


рис. 3. Спектрограмма ОНЧ-сигнала в полосе 0–10 кГц при работе ПВП с амплитудой 50 В на витке 1238 спутника «ИНТЕРКОСМОС-24». Начало цикла в 17^h02'20'' МСК ($t = 0$ с).

Орбитальные данные спутника: $H = 873$ км, $\varphi = 42^\circ$, $\lambda = 38^\circ$, $L = 1,8$.

Обозначения: **1** – сигналы ПВП; **2, 4** – излучения, **3** – гармоники ПВП

rys. 3. Spektrogramy szerokopasmowego zapisu sygnałów VLF (pasmo 0–10 kHz) przy pracy PVP z amplitudą 50 V na orbicie: 1238. Początek cyklu 17^h02'20''

(Czas Moskiewski ($t = 0$ s)). Dane orbitalne satelity: $H = 873$ км, $\varphi = 42^\circ$, $\lambda = 38^\circ$, $L = 1,8$.

Oznaczenia **1** – sygnały PVP; **2, 4** – promieniowanie, **3** – harmoniki PVP

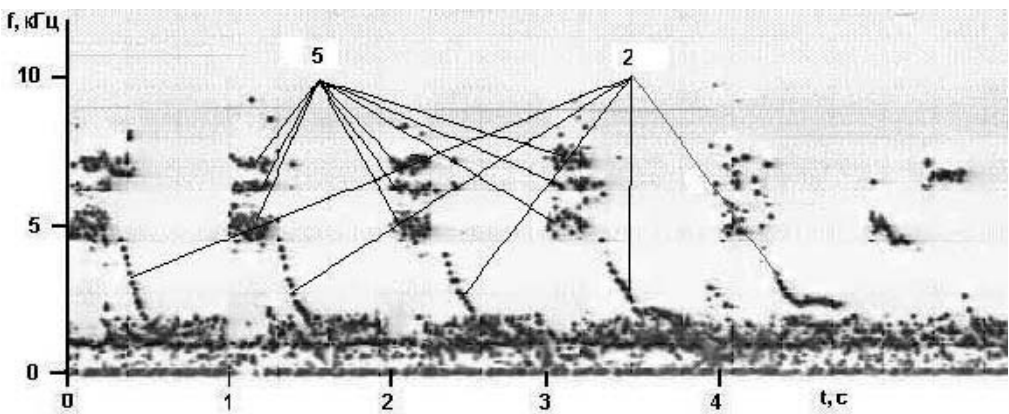


рис. 4. Спектрограмма ОНЧ-сигнала в полосе 0–10 кГц. Продолжение цикла с амплитудой 50 В на частотах от 11,5 до 19,5 кГц. На рисунке видна нижняя часть спектра. Сигналы с падающим спектром при прохождении полосы НГР возбуждают импульсы НГР продолжительностью 0,25 с в полосе шириной 2 кГц (обозначены цифрой 5). Цифрой 2 обозначены индуцированные сигналы с падающим спектром

rys. 4. Spektrogramy szerokopasmowego zapisu sygnałów VLF (pasmo 20 Hz – 20 kHz).

Przedłużenie cyklu z amplitudą 50 V na częstotnościach 11,5 do 19,5 kHz.

Na rysunku widoczna jest dolna część widma. Sygnały z opadającym widmem przy przechodzeniu pasma LHR wzbudzają impulsy LHR o trwaniu 0,23 s w pasmie szerokości 2 kHz (oznaczone jako – 5). Sygnały indukowane z opadającym widmem oznaczono jako – 2

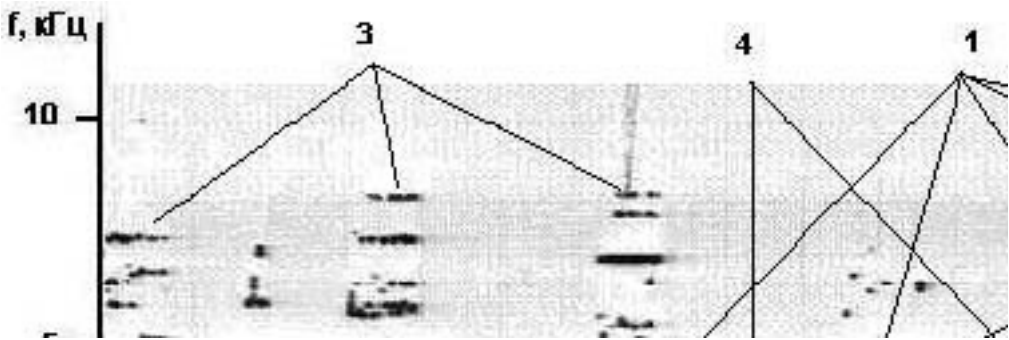


рис. 5. Спектрограмма ОНЧ-сигнала в полосе 0–10кГц. Начало цикла с амплитудой 100 В. Явление затяжки импульса выражено почти на всех частотах. Сигналы с падающим спектром имеют малую интенсивность. Обозначения те же, что и на рис. 3. Орбитальные данные в пределах погрешности совпадают с данными того же рисунка

rys. 5. Spektrogramy szerokopasmowego zapisu sygnałów VLF (pasmo 0–10kHz). Początek cyklu z amplituda 100 V. Zjawisko rozciągnięcia sygnału widoczne jest praktycznie na wszystkich częstotliwościach. Sygnały z opadającym widmami mają małą intensywność. Oznaczenia takie same jak na Rys. 4. Dane orbitalne w zakresie dokładności odpowiadają również danym tego rysunku

На рис. 4 представлено продолжение цикла, начатого в 17^h02'20'' (см. рис. 3). В этом случае для увеличения масштаба приведена только та часть спектра, которая относится к частотам 0–10 кГц. Сигналы ПВП на частотах от 10 до 19,5 кГц выходят за пределы диапазона, но на рис. 3 отчетливо видны явления, порождаемые ими в диапазоне ниже 10 кГц. Сигналы падающей частоты, проходя через интервал частот НГР, возбуждают полосовые шумы в диапазоне от 4,5 до 7,0 кГц, причем продолжительность этих шумов соответствует длительности импульса ПВП.

Следующий сигнал, наблюдаемый в 17^h03' МСК (рис. 5) подобен второму, но отличается по амплитуде возбуждающего импульса (100 В), в этом случае затяжка импульса регистрируется на всех частотах ПВП.

На рис. 6 приведен сигнал, относящийся к витку 1238 в 17^h04' МСК, где возбуждаемые сигналы появлялись с запаздыванием относительно импульса накачки. Эхо-сигналы наблюдались,

На Rys. 4 przedstawiono przedłużenie cyklu zaczynającego się o 17^h02'20'' (Rys. 3). W tym przypadku dla powiększenia skali przedstawiono tylko tę część widma, która odnosi się do częstotliwości 0–10 kHz. Sygnały PVP częstotliwościach 10–19,5 kHz wychadza za przedziały zakresu. Na Rys. 3 widoczne są zjawiska wywołane nimi w zakresie poniżej 10 kHz. Sygnały ze zmniejszającą się częstotliwością przechodząc przez zakres częstotliwości LHR wzbudzają szумы pasmowe w zakresie od 4,5 do 7,0 kHz.

Jednakże następny sygnał obserwowany o 17^h03' czasu moskiewskiego (Rys. 5) jest podobny poprzedniemu ale przedłużenie tych szumów odpowiada długości impulsu PVP ale różni się wielkością amplitudy wzbudzanego impulsu (100 V) i w tym przypadku rozciągnięcie impulsu rejestrowane jest na wszystkich częstotliwościach PVP.

Na rys. 6 przedstawiono sygnał odnoszący się do orbity 1238 o 17^h04' kiedy wzbudzeni sygnału pojawiło się z opóźnieniem odpowiadającego impulsu pompowania. Ten sygnał był rejestrowany

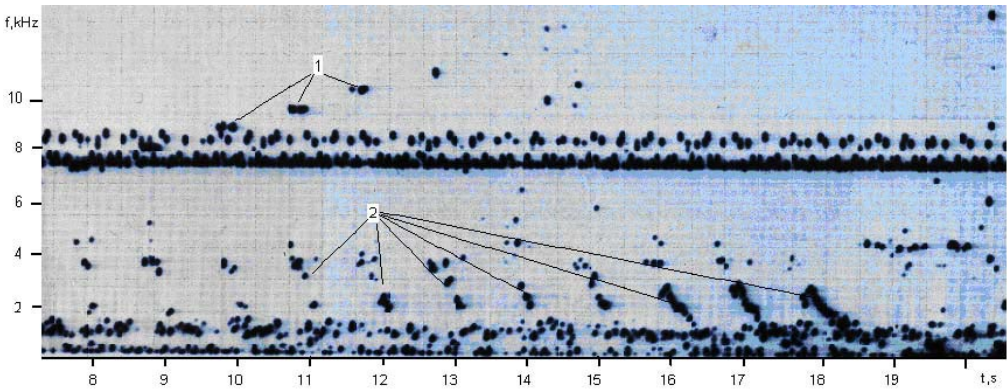


рис. 6. Спектрограмма широкополосной ОНЧ-записи сигналов (полоса 20 Гц – 20 кГц) на витке 1238 спутника «ИНТЕРКОСМОС-24» 5.01.90 г в 17^h04' МСК. Н = 1000 км, L = 2,3. Цифрой 1 обозначены импульсы прибора ПВП с амплитудой 50 В на частотах 8,5; 9,5 и 10,5 кГц, цифрой 2 обозначены индуцированные сигналы

rys. 6. Spektrogramy szerokopasmowego zapisu sygnałów VLF (pasmo 20 Hz – 20 kHz) na orbicie 1238 satelity INTERKOSMOS-24 w dniu 05.01.1990 o 17^h04' czasu moskiewskiego, Н = 1000 km, L=2,3. Impulsy PVP z amplitudą 50 V na częstotliwościach 8,5; 9,5 i 10,5 kHz oznaczono jako 1. Sygnały indukowane oznaczono jako 2

когда частота волн накачки менялась от 8 до 19,5 кГц (см. рис. 6, сигнал 1). В данном эксперименте импульсы накачки были зафиксированы чётко на частотах 8,9; 9,5; 10,5; 11,5 кГц. Последующие импульсы были выражены слабо в связи с высоким уровнем помех на спутнике. Каждому импульсу ПВП соответствовал эхо-сигнал с частотой, плавно уменьшающейся от 4,5 до 0,5 кГц (рис. 6, сигнал 2). Изменение частоты от времени $\partial f/\partial t$ на уровне 4,0 кГц равнялось 5 кГц/с, причем возбуждаемые сигналы появлялись с запаздыванием порядка 1,2 с относительно окончания возбуждающего импульса.

2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сигналы, наблюдавшиеся при работе ПВП (см. рис. 2–6), имеют аналоги, регистрировавшиеся в естественных условиях. Эти аналоги приведены в таблице. Рассмотрение аналогов позволяет нам предложить модели сигналов искусственного происхождения.

kiedy częstota fali pompującej zmieniała się od 8 do 19,5 kHz (rys. 6 sygnał 1) w przeprowadzonym eksperymencie impulsy pompujące były dokładnie ustawione na częstotliwościach 8,9; 9,5; 10,5; 11,5 kHz. Następujące impulsy były słabo widoczne w związku z wysokim poziomem szumów na satelicie. Każdemu impulsowi PVP odpowiadał sygnał echo z częstotliwością płynnie malejącą od 4,5 do 0,5 kHz (sygnał 2, Rys. 6). Zmiana częstotliwości od czasu $\partial f/\partial t$ na poziomie 4,0 kHz było równe 5 kHz/s przy czym wzbudzone sygnały pojawiały się z opóźnieniem rzędu 1,2 s względem zakończenia wzbudzanego impulsu.

2. PODSUMOWANIE REZULTATÓW

Sygnały rejestrowane w trakcie pracy ПВП (Rys. 2–6) mają analogi obserwowane w naturalnych warunkach. Te analogi przedstawione są w tablicy. Analiza tych analogów pozwala na przedstawienie modeli sygnałów nienaturalnego pochodzenia

искусственно возбуждаемые сигналы szuczne wzbudzenie sygnałów	природные аналоги naturalne analogi
а) низкочастотный шум (см. рис. 2) a) szумы niskoczęstotliwościowe	а) шум, наблюдаемый при передаче импульсных СДВ-сигналов a) szum występujący przy przekazie impulsowych sygnałów VLF
б) структурированные сигналы (СС) (см. рис. 3–5) b) sygnały z głęboką strukturą (SS) (Rys. 3–5)	б) пунктирные свисты b) Punktowe świsty
в) возбуждаемые СС-сигналами НГР-шумы (рис. 4) c) wzbudzone sygnały (SS) przez Szумы LHR (Rys. 4)	в) КНЧ-шумы, возбуждаемые короткими свистами c) szумы ELF, wzbudzone krótkimi świstami
г) затяжка импульсов (рис. 3, 5) d) rozciągnięte czasowo impulsy (Rys. 3, 5)	г) удлинение импульсных сигналов азбуки Морзе d) wydłużenie impulsowych sygnałów
д) укороченные сигналы свистового типа e) rozciągnięte czasowo sygnały rodzaju świstów	д) короткие свисты e) krótkie świsty

Рассмотрим группу сигналов:

а) Шумы, представленные на рис. 2, имеют диапазон частот значительно более низкий, чем частота накачки. Характерные свойства: относительная широкополосность, практическая независимость от частоты накачки позволяют отнести этот вид сигнала к электростатическому шуму.

б) Структурированные сигналы. Эти сигналы имеют аналоги в пунктирных свистах [Михайлова, Капустина, 1976].

При обработке пунктирных свистов [Михайлова, Капустина, 1976] было установлено, что когда на вход системы воздействуют два частично-модулированных сигнала разделённых малым интервалом времени δt , то цифровой фильтр способен разделить эти сигналы, если $\delta t > \delta t_{\text{opt}}$, которое зависит от полосы пропускания фильтра ΔF и скорости изменения частоты входного сигнала со временем β и определяется следующими условиями:

Rozpatrzmy grupy sygnałów

а) Szумы przedstawione na Rys. 2 mają zakres częstotliwości znacznie niższy od częstotliwości pompowania. Charakterystyczne właściwości: względnie szerokie pasmo, praktyczna niezależność od częstotliwości pompowania pozwala odnieść ten obraz sygnału do szumu elektrostatycznego.

б) Strukturyzowane sygnały: Te sygnały mają analogi w świstach punktowych [Михайлова, Капустина, 1976].

W trakcie opracowania punktowych świstów [Михайлова, Капустина, 1976] ustalono, że jeśli na wejściu systemu padają dwa sygnały modulowane częstotliwościowo, które są oddzielone małym przedziałem czasu δt , to filtr cyfrowy, może je rozdzielić jeśli $\delta t > \delta t_{\text{opt}}$, które zależy od pasma przepuszczania filtra ΔF i szybkości zmian częstotliwości sygnału wejściowego z czasem β określonym następująca zależnością:

$$\Delta F/4\beta \leq 0,1 \cdot \delta t_{\text{opt}} = 1,4\Delta t$$

Если это условие не выполняется, то в результате интерференции двух близких сигналов спектр этих сигналов содержит максимумы и минимумы, которые и образуют пунктирный след на сонограммах. Эта модель интерпретации сигналов группы «б» предлагается и в настоящей работе. Сигналам группы «в» соответствуют шумовые сигналы, возникающие от электронных свистов [Михайлов, Соболев, 2008]. Группу «г» образуют явления затяжки импульса.

Для случая на рис. 3 это явление возникает только на двух частотах: 4,5 и 6,0 кГц. На рис. 5 такое явление наблюдается практически почти на всех частотах ПВП. Его можно связать с появлением новых траекторий волны в плазме, по которым сигнал распространяется с задержкой. Продолжение сигнала или затяжка представляет собой возникновение шумового сигнала на частоте накачки. Если фаза сигнала, распространяющегося по различным траекториям, распределена по времени случайным образом, то суммарный сигнал формирует широкополосный шум. Но если фазы распределены по статическому закону, то суммарный сигнал может представлять собой узкополосный шум, что, по-видимому, и наблюдается в случаях, приведенных на рис. 3 и 5. Свистоподобные сигналы группы «д» рассматриваются как результат циклотронного резонанса на трассе силовой линии в области, примыкающей к её вершине. Форма сигнала является результатом нелинейного триггерирования в условиях больших линейных инкрементов [Трахтенгерц, Райкрофт, 2011]. Этот механизм находится в стадии разработки и будет опубликован в последующих работах.

Jeśli warunek ten nie jest spełniony, to w rezultacie interferencji dwóch bliskich sygnałów widmo ich zawiera maksima i minima, które tworzą punktowy ślad na sonogramach. Ten model interpretacyjny dla sygnałów grupy **b)** (Tabela) przyjęto też w niniejszej pracy. Sygnałami grupy **c)** są sygnały szumowe generowane elektronowymi świstami [Михайлов, Соболев, 2008]. Grupy **d)** przedstawiają ...impulsu.

Dla przypadku na Rys. 3 zjawisko to powstaje tylko na dwóch częstotliwościach: 4,5 i 6,0 kHz. Na Rys. 5 takie zjawisko obserwuje się praktycznie na wszystkich częstotliwościach PVP.

To można powiązać z wystąpieniem nowych trajektorii fal w plazmie, po których sygnał rozprzestrzenia się z opóźnieniem. Przedłużenie sygnału lub czasowe rozciągnięcie są wynikiem powstania sygnału szumu na częstotliwości pompowania. Jeśli faza sygnału propagującego się po różnych trajektoriach jest rozłożona przypadkowo po czasie, to sygnał sumaryczny tworzy szum szerokopasmowy. Jeśli fazy rozłożone są statystycznie w czasie, to sygnał sumaryczny może przedstawiać szum wąskopasmowy co jest w przypadku przedstawionych na Rys. 3 i 5. Świstopodobne sygnały grupy d) rozpatruje się jako wynik rezonansu cyklotronowego na trasie linii pola magnetycznego w obszarze przylegającym do górnej linii pola magnetycznego. Forma sygnału jest rezultatem nieliniowego trygerowania w warunkach dużych linowych wzrostów [Трахтенгерц, Райкрофт, 2011]. Ten mechanizm jest w stadium rozpracowywania i będzie opublikowany w przyszłych pracach.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные результаты показывают, что применение электрического генератора на спутнике для регистрации линейных и нелинейных плазменных процессов является весьма эффективным. Обработка результатов на основе современных теоретических работ позволяет объяснить важные стороны этих процессов.

ЛИТЕРАТУРА

- [Helliwell, 1965] *Helliwell R.A.* Whistlers and related ionospheric phenomena // Palo Alto Calif. Stanford Univ.Press. 1965. P. 350.
- [Трахтенгерц, Райкрофт, 2011] *Трахтенгерц В.Ю., Райкрофт М.Дж.* Свистовые и альфеновские мазеры в космосе. // М. Физматлит. 2011.
- [Mikhailov et. al., 1995] *Mikhailov Yu., Kapustina O.V., Ershova V.A., Roste O.Z., Shultahin Yu.A., Kochnev V.A., Shmilauer Ya.* Definition of the lower hybrid frequency by active wave methods on the INTERCOSMOS-24 satellite and comparison of these data with mass-spectrometric measurements // Adv. Space Res. 1995. V. 15. № 12. P. 147-150.
- [Михайлова, Капустина, 1976] *Михайлова Г.А., Капустина О.В.* О некоторых результатах анализа квазипериодической структуры сонограмм свистящих атмосфериков // Космич. исслед. 1976. Т. IV. Вып. 3. С. 458-460.
- [Михайлов, Соболев, 2008] *Михайлов Ю.М., Соболев Я.П.* Нелинейные волновые явления в ионосферной плазме. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Серия Б. Часть I. С. 325. 2008.

PODSUMOWANIE

Przedstawione rezultaty pokazują, że zastosowanie generatora sygnałów elektrycznych na satelicie w celu rejestracji liniowych i nieliniowych procesów plazmowych jest skuteczne. Obróbka wyników na podstawie współczesnych prac teoretycznych pozwala wyjaśnić ważne aspekty tych procesów.

BIBLIOGRAPHY

The results of study of VLF signals in the ionosphere, excited by electrical generator PVP on board INTERCOSMOS-24 satellite are presented. PVP emitted each second pulse duration 250 ms in the range 1,5 to 19,5 kHz. Frequency for each pulse was been changed on 1 kHz. Full range has been emitted successively by four cycles with amplitudes 50, 100, 150, 200 V. Antenna current has been measured and was been equal 1,5 mA at drop of potential 100 V. It was suited to amplitude of low frequency magnetic field near antenna as 10nT. The paper presents observations on orbit 941 (altitude 500 km, invariant latitude 45°) and orbit 1238 (altitude 920 km, L = 2,3). At first there were observed broadening to low frequencies, there were registered dotted dropped curves, LHR-noises excited by these pulses, prolonged signals, and short whistler signal, observed with delays relatively to pulses. These signals have their analogs in nature, that allow to propose model for their interpretation. At the same time associated processes were took in attention.

ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛАЗМЕННО-ВОЛНОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ИОНОСФЕРЕ И МАГНИТОСФЕРЕ (ПВО)

руководитель проекта
с российской стороны:
С. Климов

руководитель проекта
с польской стороны:
Х. Роткель

Проект «ПВО» является развитием совместных исследований плазменно-волновых процессов в ионосфере и магнитосфере Земли по методике высокочастотной (ВЧ) радио-спектрометрии являющейся одним из наиболее мощных методов исследования околоземной плазмы с борта ИСЗ. Причем, не на отдельных участках орбиты, как это делается в западных экспериментах, а именно в глобальном масштабе на нескольких витках, что позволяет видеть основные структурные образования околоземной плазмы, такие как экваториальная аномалия, главный ионосферный овал, полярная шапка и другие.

Высокочастотная радиоспектрометрии осуществляется с использованием радиочастотных анализаторов (РЧА) разработанных и изготовленных ЦКИ ПАН.

РЧА в проекте «ПВО» являются составной частью космических экспериментов:

1. «ОБСТАНОВКА (1-Й ЭТАП)»
НА БОРТУ РОССИЙСКОГО
СЕКМЕНТА МЕЖДУНАРОДНОЙ
КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ (РС МКС).

Космический эксперимент «Обстановка (1-й этап)» является международным проектом с участием учёных и спе-

BADANIA PLAZMOWO-FALOWYCH PROCESÓW W JONOSFERZE I MAGNETOSFERZE (PWO)

kierownik projektu
ze strony Rosji:
S.I. Klimow

kierownik projektu
ze strony Polski:
H. Rothkaehl

Projekt „PWO” stanowi kontynuację wspólnych badań plazmowo-falowych procesów w jonosferze i magnetosferze Ziemi za pomocą radio-spektrometrii wysokich częstotliwości, jednej z najbardziej efektywnej metody badań plazmy okołozemskiej z pokładu sztucznych satelitów Ziemi. Takie globalne monitorowanie pozwala na szczegółową diagnostykę plazmy okołozemskiej a w szczególności opis wielkoskalowych struktur jonosfery i magnetosfery takich jak anomalia równikowa, owal zorzowy czy czapa polarna i in.

Radio diagnostyka w zakresie wysokich częstości radiowych jest realizowana za pomocą analizatorów falowych pola elektrycznego RFA zaprojektowanych, opracowanych i wykonanych w CBK PAN.

Instrument RFA w projekcie „PWO” jest składową częścią kompleksu pokładowego eksperymentu kosmicznego:

1. „OBSTANOVKA (1-SZY ETAP)»
NA POKŁADZIE ROSYJSKIEGO
SEGMENTU MIĘDZYNARODOWEJ
STACJI KOSMICZNEJ (RS MSK).

„Obstanovka (1-szy etap)” to międzynarodowy projekt, w zaangażowani byli naukowcy i specjaliści z Anglii, Bułgarii,

циалистов 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 составная часть Российской Федеральной Космической Программы.

Участники данной работы из ИКИ РАН и ЦКИ ПАН осуществили в рамках подготовки КЭ методическую и техническую отработку РЧА в составе плазменно-волнового комплекса (ПВК).

В 2012–2013 гг. были выполнены:

- испытания лётного образца ПВК (ЛО ПВК) на комплексном стенде Служебного модуля Российского сегмента МКС (СМ РС МКС) в РКК «Энергия»;
- первичная обработка телеметрической информации, полученной в ходе испытаний ЛО ПВК на СМ РС МКС;
- проверка готовности электроспусков антенн РЧА-АД и РЧА-АМ (электроспуски раскрытия антенн установлены в исходные состояния);
- заключение о готовности ЛО РЧА к проведению лётных испытаний в составе ЛО ПВК на СМ РС МКС;
- 20 ноября 2012 года – доставка ЛО ПВК на космодром Байконур;
- декабрь 2012 года – космодром Байконур размещение ЛО ПВК в транспортном грузовом корабле (ТГК) «ПРОГРЕСС М-418»;
- 11 февраля 2013 года – старт ТГК «ПРОГРЕСС М-418» к МКС;
- 27–28 февраля 2013 года – подготовка и прокладка кабельной сети внутри Служебного модуля МКС для эксперимента «Обстановка (1-й этап)».

Węgier, Polski, Rosji, Ukrainy i Szwecji, w ramach „Długoterminowego programu aplikacyjnych badań naukowych i eksperymentów, planowanych na rosyjskim segmencie MSK” (wersja 2008 r.), będących składową częścią Rosyjskiego Narodowego Programu Kosmicznego.

Grupy badawcze i inżynierskie z instytutów IKI RAN i CBK PAN stworzyli w ramach projektu KE metodyczne i techniczne opracowanie umieszczenia i pracy analizatora RFA w kompleksie zespole plazmowo-falowego instrumentu PWK).

W latach 2012–2013 wykonano:

- Testy modelu lotnego PWK (FM PWK) na kompleksowym stanowisku serwisowym modułu rosyjskiego segmentu MSK (SM RS MSK) w RKK „Energia”;
- Wstępne opracowanie informacji telemetrycznych, pozyskanych w trakcie prób FM PWK na SM RS MSK;
- kontrola możliwości otwierania anten elektrycznych i magnetycznych analizatora RFA oraz ustawienie urządzeń uwalniających anteny w gotowości do otwarcia.
- Podjęcie decyzji o zakwalifikowaniu modelu lotnego kompleksu PWK po przeprowadzeniu testów na SM RS MSK;
- 20 listopada 2012 r. – dostawa modelu lotnego PWK na космодром Байконур;
- grudzień 2012 r. – космодром Байконур, umieszczenie kompleksu PWK na bezzałogowym transportowym statku kosmicznym „PROGRES M-418”;
- 11 lutego 2013 r. – start statku „PROGRES M-418” do MSK
- 27–28 lutego 2013 r. – przygotowanie i spakowanie instalacji kablowej wewnątrz serwisowego modułu MКС eksperymentu „Obstanovka (1-szy etap)”.

- *1 марта 2013 года* – установка (рис. 1) и подключение (рис. 2) к кабельной сети СМ МКС блока хранения телеметрической информации (БХТИ) российскими космонавтами Олегом Новицким и Евгением Тарелкиным ;
- *1 marca 2013 r.* – rosyjscy kosmonauci Oleg Nowickij i Jewgenij Tarelkin na pokładzie MSK zainstalowali (rys. 1) i podłączyli (rys. 2) do sieci MSK blok przechowywania danych telemetrycznych (BSTM).



рис. 1.
rys. 1.

- *25 марта 2013 года* – отработка специалистами РКК «Энергия» и ИКИ РАН с использованием технологического образца БХТИ на стенде РКК «Энергия» более 340 управляющих массивов ПВК, в том числе по прибору РЧА;
- *19 апреля 2013 года* – выход в 18:00 по московскому времени экипажа МКС35: Павела Владимировича Виноградова (рис. 3) и Романа Юрьевича Романенко (рис. 4) – в открытый космос для установки аппаратуры ПВК на внешней поверхности СМ МКС.
- *25 marca 2013 r.* – specjaliści RKK „Energia” i IKI RAN, wykorzystując technologiczny model BSTM, przygotowali na stanowisku RKK „Energia” ponad 340 komend sterowania PWK, w tym także przyrządem RFA
- *19 kwietnia 2013 r.* – o godz. 18.00 czasu moskiewskiego następuje wyjście ekipy MSK 35: Pawła Władimirowicza Winogradowa (rys. 3) i Romana Jurewicza Romanienko (rys. 4) w otwarty kosmos, żeby dokonać instalacji aparatury (sensorów) PWK na zewnątrz MKS.



рис. 2.
rys. 2.



рис. 3. Павел Владимирович Виноградов
rys. 3. Paweł Władimirowicz Winogradow



рис. 4. Роман Юрьевич Романенко
rys. 4. Roman Jurewicz Romanienko

Международная команда КЭ (рис. 5) в Центре управления полётами (ЦУП-М, Москва) наблюдала прямую телевизионную трансляцию работы экипажа с ПВК вне МКС.

Międzynarodowa grupa projektu (Rys. 5) w Centrum Sterowania Lotami (CUP-M, Moskwa) obserwowała bezpośrednią teletransmisję instalacji na MSK.



рис. 5. Международная команда КЭ в Центре управления полётами
rys. 5. Międzynarodowa grupa projektu w Centrum Sterowania Lotami

В ходе вне корабельной деятельности космонавтов ПВК был размещён на внешней поверхности СМ МКС (рис. 6, 7). Общий вид размещения ПВК представлен на рис.8 (фото выполнено космонавтом Г. Падалка во время выхода в открытый космос), где на левой штанге отчётливо видны 3-компонентные рамочная (магнитная, слева) и дипольные (электрическая, справа) антенны РЧА. Измерительные базы представлены на рис. 9.

Podczas prac kosmonautów na zewnątrz stacji umieszczono PWK na zewnątrz MSK (Rys. 6, 7). Ogólny widok rozmieszczenia instrumentów kompleksu PWK przedstawia zdjęcie na rys.8, zrobione przez kosmonautę G. Padałkę w czasie wyjścia w otwarty kosmos. Na lewej sztan-dze wyraźnie widać trzyskładowe anteny analizatora RFA, ramową antenę magnetyczną RFA AM, z lewej strony i dipolową antenę elektryczną RFA AD, z prawej strony. Schematy pomiarowe rozmieszczenia sensorów przedstawiono na Rys. 9.



рис. 6.
rys. 6.



рис. 7.
rys. 7.

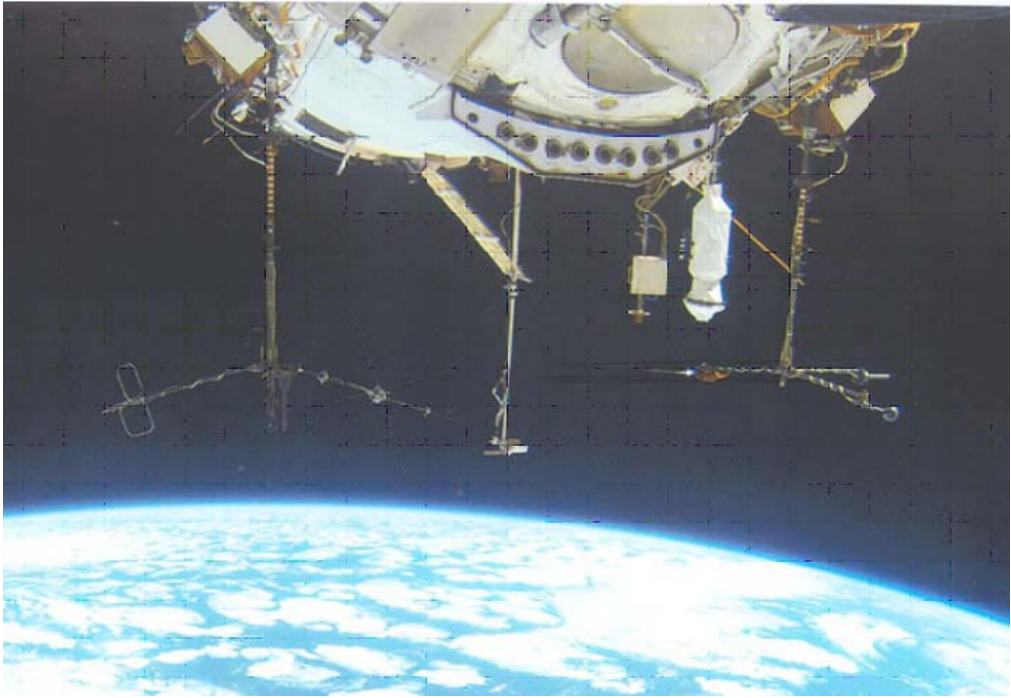


рис. 8. Фото космонавта Г. Падалка
rys. 8. Foto kosmonautę G. Podałkę

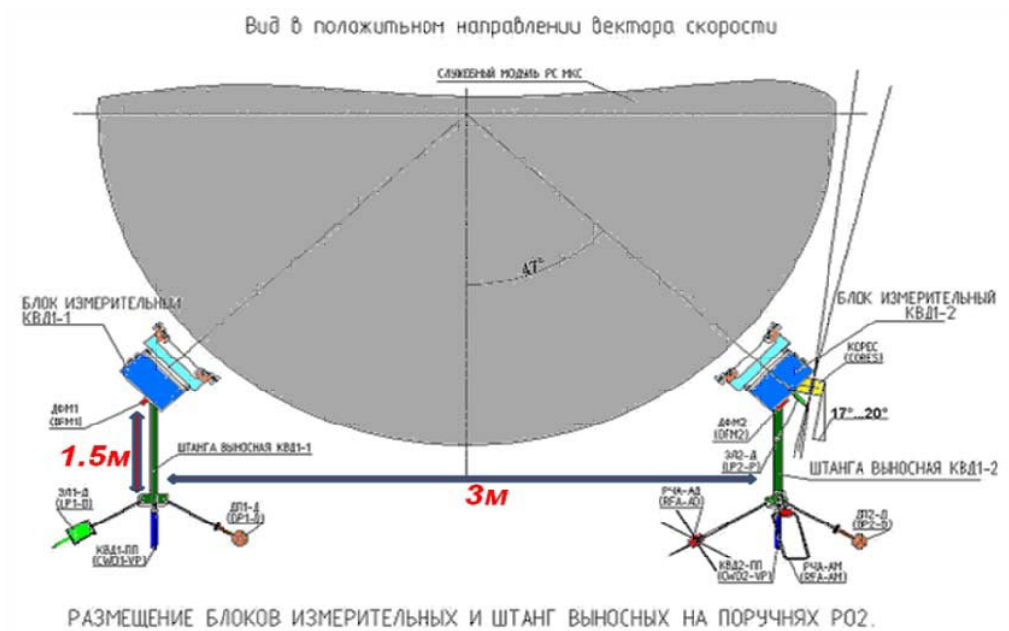


рис. 9. Схема размещения измерительных баз
rys. 9. Schematy pomiarowe rozmieszczenia sensorów

2. КОМПЛЕКС АНАЛИЗАТОРОВ НИЗКОЧАСТОТНОГО (НЧА) И ВЫСОКОЧАСТОТНОГО (ВЧА) ИЗЛУЧЕНИЯ НА БОРТУ МАЛОГО КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА (МКА-ПН2) РЭЛЕК (ВЕРНОВ).

Комплекс НЧА-РЧА предназначен для контроля электромагнитных излучений и тока в плазме в широком диапазоне частот. Это необходимо для комплексного изучения процессов в ионосфере. Аппаратура позволяет точно измерять значение и тонкую частотную структуру вариаций полей.

Комплекс НЧА-РЧА состоит из приборов НЧА и РЧА.

Блоки комплекса размещаются как на наружной штанге (рис. 10), так и на термостатированной платформе объекта. Изделие нормально функционирует и сохраняет свои характеристики в условиях пониженного давления до 10^{-14} мм рт. ст и температуре окружающей среды от -30 до $+50^{\circ}\text{C}$ для блоков, размещенных на платформе и от -150°C до $+150^{\circ}\text{C}$ для блоков, расположенных на штанге.

2.1. Радиочастотный анализатор РЧА

Прибор РЧА обеспечивает регистрацию высокочастотных излучений и состоит из блока анализатора РЧА-А (рис. 11) и антенны для измерения трёх электрических компонент электромагнитного поля РЧА-Е (см. рис. 10 в развёрнутом состоянии и в транспортном положении рис. 12). Физико-технические характеристики блоков прибора представлены в таблице.

2. „NCHA-RFA” MAŁEGO KOSMICZNEGO PRZYRZĄDU (MKA-PN2) RELEC („VENRNOV”).

Kompleks NChA-RFA przeznaczony jest do monitorowania i diagnozowania promieniowania elektromagnetycznego i prądu w plazmie w szerokim zakresie częstotliwości. Analiza ta jest niezbędna dla opisanego kompleksowych procesów fizycznych zachodzących w jonosferze. Dzięki tej aparaturze możliwe są dokładne pomiary wartości i drobnoskalowej struktury zmian pól elektromagnetycznych.

Kompleks NChA-RFA składa się z przyrządu NChA i przyrządu RFA.

Bloki kompleksu rozmieszczone na zewnętrznych sztangach a także (Rys. 10), na termostaticznej platformie obiektu. Instrumenty przystosowane są do pracy w warunkach obniżonego ciśnienia do 10^{-14} mm Hg i temperatury środowiska od -30 do $+50^{\circ}\text{C}$ dla bloków, rozmieszczonych na platformie i od -150°C do $+150^{\circ}\text{C}$ dla bloków rozmieszczonych na sztandze.

2.1. Analizator falowy w zakresie częstości radiowych RFA

Przyrząd RFA pozwala na diagnostykę promieniowania o wysokich częstotliwościach i składa się z bloku analizatora RFA-A (rys. 11) i anteny do pomiarów trzech elektrycznych komponentów pola elektromagnetycznego RFA-E (rys. 10 w stanie rozwiniętym i 12 w transportowym położeniu). Właściwości fizyczno-techniczne bloków przyrządu przedstawiono w tabeli.

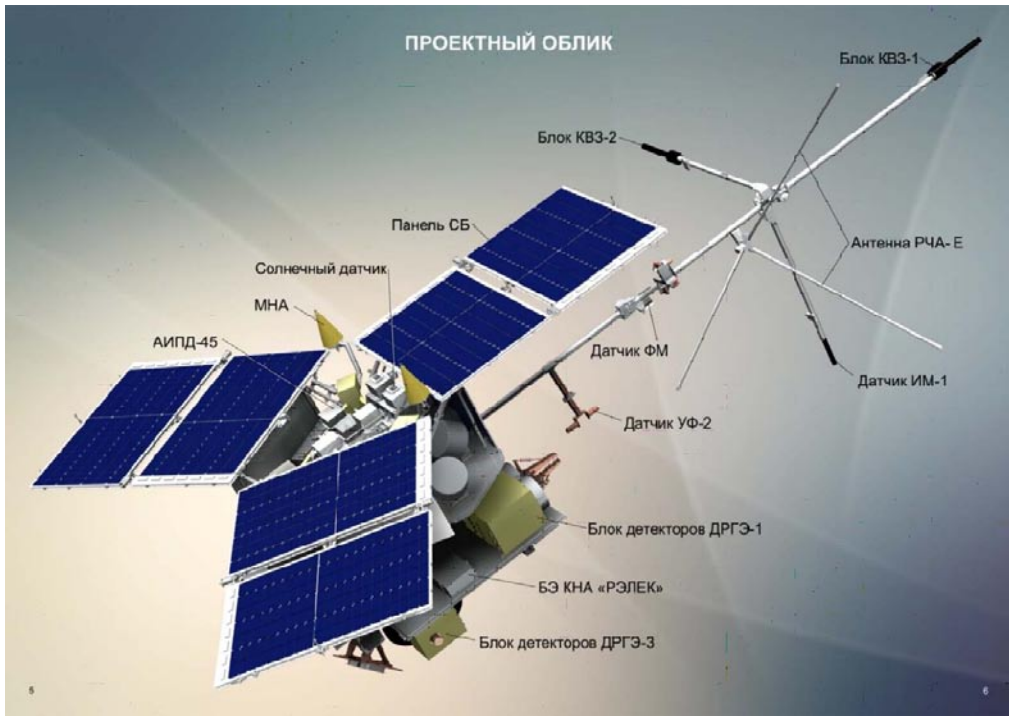


рис. 10.
rys. 10.

блок blok	размеры (мм) rozmiary (mm)	масса (кг) masa (kg)	потребление (Вт), zużycie energii (W)
РЧА-А RFA-A	$(192\pm 0,2) \times (149\pm 0,2) \times (91,5\pm 1)$	1,5±0,2	10,0
РЧА-Е RFA-E	54×26×66	0,2±0,02	0,1

Прибор РЧА измеряет три компоненты электрического поля, оцифровывает и анализирует принимаемые сигналы в диапазоне от 50 кГц до 15 МГц. Частотное разрешение 10 кГц, временное – 25 нс. Сжатая информация поступает в ТМ-систему спутника.

Модуль оцифровки волновой формы содержит три канала 12-разрядных АЦП преобразователей. Каждый аналоговый канал включает симметрирующий усилитель с напряжением сдвига сигнала для согласования уровней с вхо-

Przyrząd RFA mierzy trzy składowe pola elektrycznego, digitalizuje i analizuje otrzymane sygnały w zakresie od 50 kHz do 15 MHz. Z rozdzielczością częstotliwościową 10 kHz i czasową – 25 ns. Przetworzona i odpowiednio spakowana informacja wędruje do systemu telemetrii TM satelity.

Moduł digitalizacji falowej formy zawiera trzy kanały 12-składowych przetworników ADC. Każdy analogowy kanał zawiera wzmacniacz o natężeniu odchylenia sygnału dla uzgodnienia po-



рис. 11. Блок анализатора РЧА-А
 rys. 11. Blok analizatora RFA-A

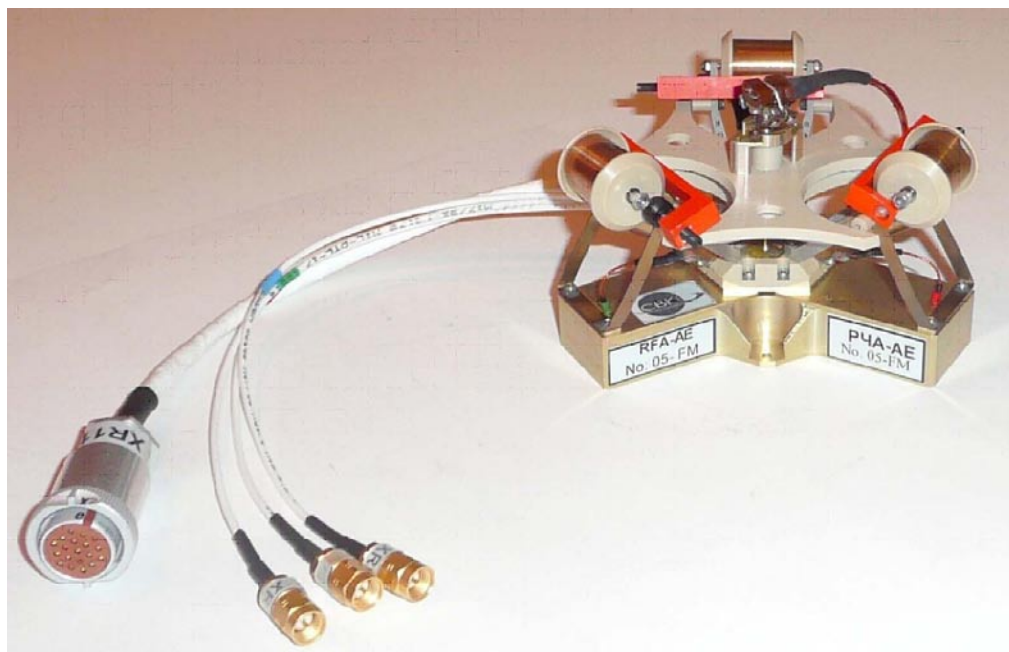


рис. 12. Антенны РЧА-Е в транспортном положении
 rys. 12. Anteny RFA-E w transportowym położeniu

дами АЦП. Оцифрованные сигналы хранятся во внутреннем буфере. Затем данные обрабатываются и сжимаются бортовым цифровым сигнальным процессором. В зависимости от режима работы и принятого алгоритма, на выходе могут быть волновые формы сигналов, сжатые волновые формы, отдельные волновые числа или полный спектр, сжатый набор спектров (спектральные режимы). Вычисления выполняются на FPGA (Field-Programmable Gate Array) в соответствии с запрограммированными режимами работы. Встроенная память может быть использована как циклический буфер или в виде однопроходного FIFO (First In, First Out), в зависимости от режима работы.

3. ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ РАДИОСПЕКТРОМЕТРИЯ В ПРОЕКТЕ ВЕРНОВ

Сложность интерпретации данных ВЧ радиоспектрометрии заключается в том, что на спектрах содержится информация как о локальных процессах вблизи космического аппарата, так и о сигналах, сгенерированных вдали от него. Точность интерпретации зависит от опыта исследователя и знаний основных процессов в космической плазме.

Рассмотрим этот процесс на основе задач, поставленных в проекте Вернов.

Несмотря на имеющиеся к настоящему времени результаты космических экспериментов, проблема транспорта, ускорения и потерь релятивистских электронов пока далека от окончательного решения. Поэтому проведение исследований в данном направлении представляет значительный фундаментальный и практический интерес. Неяс-

зиому wejść ADC. Digitalizowane sygnały przechowywane są w wewnętrznym buforze. Następnie dane są przetwarzane i konwertowane. W zależności od systemu pracy i przyjętego algorytmu, na wyjściu mogą pojawiać się formy falowe sygnałów, zredukowane formy falowe, pojedyncze formy falowe formy lub pełne widma spektralne, zredukowane widma spektralne). Technologia FPGA jest podstawową metodą zastosowaną w procesie digitalizacji dla różnych modów pracy przyrządu. Wbudowana pamięć może być wykorzystywana jako cykliczny bufor lub w postaci jednorazowego zrzutu danych, w zależności od systemu pracy.

3. RADIOWA DIAGNOSTYKA FALOWA W PROJEKCIE „VERNOV”

Złożoność interpretacji danych radiospектрометрии polega na tym, że na spektrach można znaleźć informacje zarówno o lokalnych procesach zachodzących w plazmie w pobliżu jak i o sygnałach generowanych w oddali. Trafność interpretacji zależy od doświadczenia badacza i znajomości złożonych procesów w plazmie kosmicznej.

Rozpatrzmy ten proces na podstawie zadań realizowanych w projekcie „Vernov”.

Mimo wielu lat badań, problem transportu, przyspieszenia i hamowania relatywistycznych elektronów jest dość daleki od końcowego rozwiązania. Dlatego przeprowadzenie badań ma praktyczną i fundamentalną wartość. Nie jest jasne także, jakie procesy są przyczyną obserwowanych dystrybucji energetycz-

но, какие процессы определяют интенсивность образующихся электронных потоков. Так, интенсивность регистрируемых на геостационарной орбите электронов слабо зависит от интенсивности магнитной бури. Результаты измерений потоков релятивистских электронов на малых L вблизи экваториальной плоскости имеют отрывочный характер. Все экспериментальные подтверждения действия предложенных механизмов ускорения релятивистских электронов имеют косвенный характер. Решение указанных вопросов потребовало проведения комплексных исследований, включающих как измерения потоков самих частиц и магнитного поля в различных областях магнитосферы, так и одновременные наблюдения УНЧ-ОНЧ волн в широком диапазоне частот.

Одной из целей в проекте являлось исследование высыпаний релятивистских электронов по данным полярных спутников и моделирование процессов ускорения и сброса энергичных электронов в процессе радиальной диффузии и взаимодействия с электромагнитными излучениями в конфигурационно-динамической магнитосфере.

Одновременные наблюдения с высоким временным разрешением вариаций потоков энергичных электронов и протонов и интенсивности низкочастотного электромагнитного-ВЧ излучения были направлены на:

- исследование магнитоволновых явлений в околоземном пространстве:
- исследование колебаний электрического и магнитного полей непосредственно в ионосфере в различных гелио- и геомагнитных условиях;
- изучение взаимосвязи электромагнитных явлений КНЧ-ОНЧ-

ных пучков релятивистских электронов. Интенсивность регистрируемых на геостационарной орбите электронов слабо зависит от степени интенсивности бури магнитной. Результаты измерений потоков релятивистских электронов на малых L вблизи экватора имеют отрывочный характер. Все экспериментальные подтверждения механизма ускорения релятивистских электронов имеют косвенный характер. Чтобы прояснить вышеуказанные вопросы необходимо провести комплексные исследования, включая измерения потоков частиц в различных областях магнитосферы, а также одновременно наблюдения волн ультра- и низкочастотного электромагнитного поля.

Одной из целей в проекте было исследование процесса высыпания релятивистских электронов на основе данных зарегистрированных на полярных орбитах и моделирование процессов ускорения и торможения релятивистских электронов в процессе радиационной диффузии и исследования взаимного взаимодействия с излучениями электромагнитными в магнитосфере.

Одновременные наблюдения с высокой разрешающей способностью изменений энергетических электронов и протонов и интенсивности низко- и высокочастотного электромагнитного излучения были направлены на:

- исследование процессов магнито-фаловых в пространстве околоземном:
- исследование изменений электрических и магнитных полей непосредственно в ионосфере в различных гелио- и геомагнитных условиях.
- исследование излучения электромагнитного и их взаимного взаимодействия в широком за-

ВЧ диапазонов в различных областях околоземного космического пространства;

- мониторинг космической погоды с целью отработки методики предсказания и анализа состояния ее изменений.
- исследование транзиентных явлений в атмосфере Земли

Общий характер данных ВЧ-радиоспектрометрии хорошо иллюстрируют данные РЧА проекта Вернов (рис. 13).

На рис. 13 представлены данные за три витка проекта Вернов. Учитывая то, что спутник находился в секторах местного времени 07–19 LT, трудно говорить о суточных вариациях (день – ночь). В зависимости от сезона часть орбиты может быть освещена, а часть – нет, а в период равноденствия практически вся орбита может быть освещена. Геофизические области здесь четко выделены.

Бернштейновские моды относятся к циклотронным излучениям, которые являются основным носителем волновой энергии в диапазонах, запрещенных для распространения электромагнитных волн. Наличие излучений в диапазоне Бернштейновских мод может свидетельствовать о наличии потоков частиц с неравновесным распределением по скоростям, а детальное исследование спектров позволяет оценивать вид функции распределения. Учитывая, что на высотах внешней ионосферы плазменная частота может принимать значения от 1 до 10 МГц, то наиболее интересный диапазон для исследования излучений в диапазоне бернштейновских мод может лежать в пределах 1–5 МГц.

kresie częstotliwości różnych obszarach strefach przestrzeni okołozemskiej.

- monitoring pogody kosmicznej w celu opracowania metodyki prognozy i analizy stanu jej zmian.
- badanie zjawisk przejściowych w atmosferze ziemskiej

Оgólny charakter danych otrzymanych za pomocą diagnostyki radiowej przyrządem RFA projektu „Vernov”, przedstawione zostały na rys. 13.

Na Rys. 13 przedstawiono dane z trzech orbit projektu „Vernov”. Biorąc pod uwagę to, że sztuczny satelita znajdował się w sektorach czasu miejscowego 07–19 LT, trudno tutaj mówić o dobowych zmianach (dzień – noc). W zależności od sezonu część orbity jest naświetlona, a część – nie, a w czasie zrównania dnia i nocy praktycznie cała orbita może być oświetlona. Bardzo wyraźnie widać struktury geofizyczne.

Mody promieniowania Bernstein są wynikiem promieniowania cyklotronowego, które okazuje się także źródłem transportu energii w zakresach niedostępnych dla standardowych zakresów propagacji fal elektromagnetycznych. Występowanie promieniowania w zakresie modów Bernstein może świadczyć o obecności strumieni cząstek o nie nierównomiernym rozkładzie prędkości. Szczegółowa diagnostyka tego promieniowania pozwala określić rozkład prędkości strumieni cząstek. Biorąc pod uwagę, że na wysokościach górnej jonosfery częstotliwość plazmowa może przyjmować wartości od 1 do 10 MHz, to najciekawsza skala dla badań promieniowania w zakresie modów Bernstein może znajdować się w przedziałach 1–5 MHz.

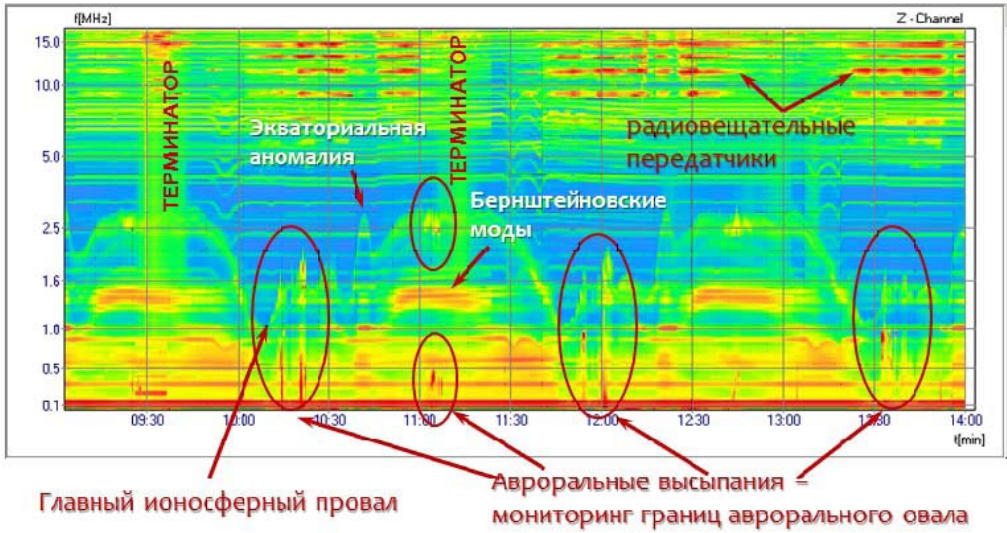


рис. 13. Данные РЧА проекта Вернов на трех орбитах 03.08.2014 г.
 rys. 13. Dane RFA projektu „Vernov” na trzech orbitach 03.08.2014 r.

Регистрация сигналов от радиовещательных передатчиков позволяет оценить паразитные потери энергии радиовещательных станций, т.е. ставится вопрос об экологии ионосферы, подвергающейся непрерывному воздействию и нагреву наземными радиосредствами.

Мониторинговые данные РЧА позволяют исследовать суточные вариации интенсивности ВЧ-излучений. В качестве примера использовались данные РЧА, полученные за 25 и 27 октября 2014 года и представленные на рис. 14. Эти данные свидетельствуют о достаточно синхронном прохождении характерных ионосферных областей, отмеченных на рис. 13.

Чисто наблюдательно, синхронность прохождения характерных ионосферных областей более отчетливо наблюдается в более низкочастотном (< 7 МГц) диапазоне, представленном на рис. 15, где некоторые временные расхождения могут быть связаны с неравномерно временной шкалой составных частей рис. 15.

Rejestracja sygnałów z radionadajników naziemnych przetworników pozwala ocenić straty energii ze względu na właściwości propagacyjne fal w jonosferze a z drugiej strony pozwala na zrozumienie problemu ekologii jonosfery, w związku z permanentnym jej nagrzewaniem przez fale elektromagnetyczne generowane przez sieć radiową

Rejestrowane dane z RFA pozwalają badać dobowe wahania intensywności promieniowania w zakresie radiowym. Jako przykład mogą posłużyć dane zarejestrowane 25 i 27 października 2014 r. i przedstawione na rys. 14. Dane te pokazują charakterystyczne emisje związane z różnymi obszarami jonosferycznymi a także emisje wywołane przez strumienie energetycznych cząstek, przedstawionych na rys. 13.

Emisje związane z promieniowaniem charakterystycznym dla poszczególnych wielkoskalowych obszarów jonosfery widać w niższych zakresach częstotliwości (< 7 MHz), jak przedstawiono na rys. 15, gdzie niektóre czasowe asymetrie emisji są związane z nierównomiernie czasową skalą zestawionych części rys. 15.

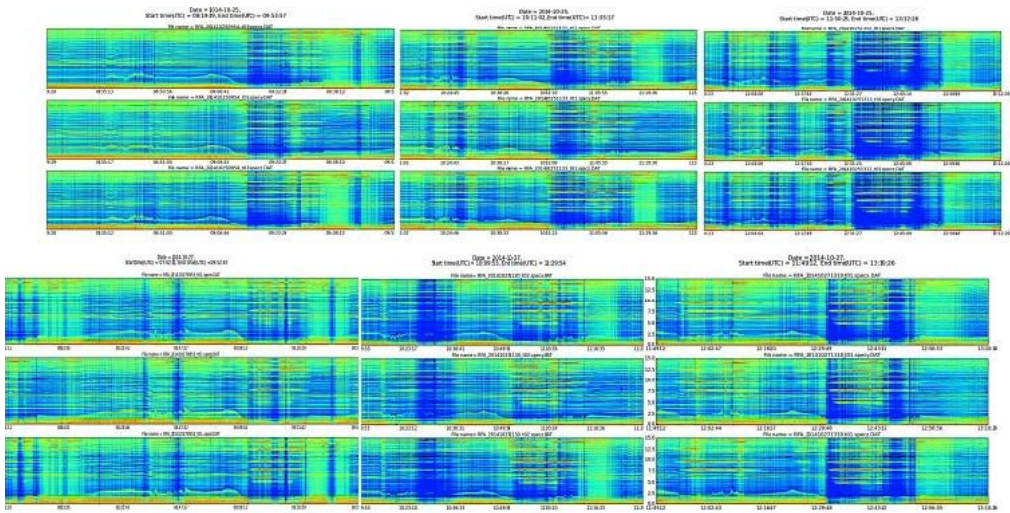


рис. 14. Пример данных РЧА за 25 и 27 октября 2014 г.
 rys. 14. Przykładdane zarejestrowane RFA 25 i 27 października 2014 r.

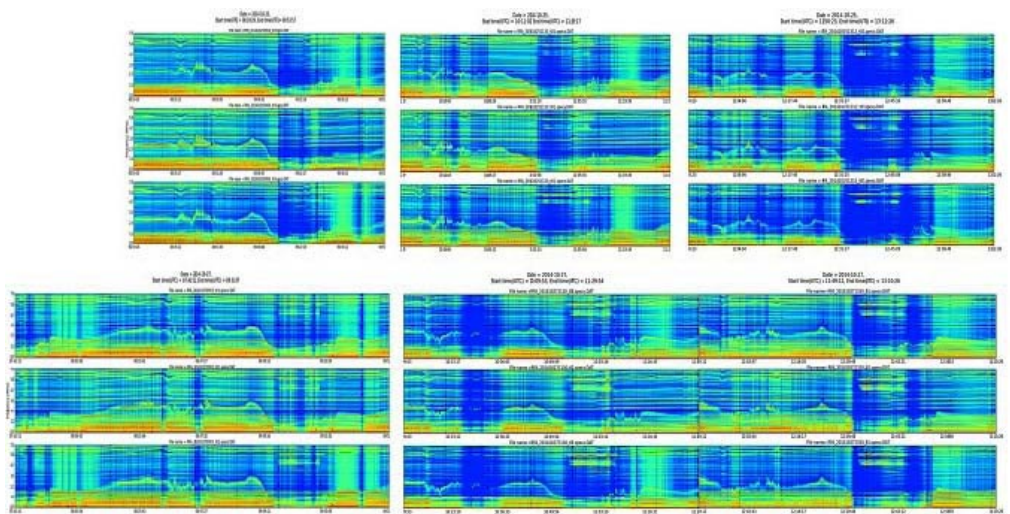


рис. 15.
 rys. 15.

С 20 июля 2014 года с космического аппарата Вернов на околоземной орбите было проведено более 600 сеансов связи с целью сброса научной информации, общим объёмом более 50 ГБ. В целях валидации данных были реализованы программы скоординированных наблюдений

Od 20 lipca 2014 r. z satelity „Ver-nov” przeprowadzono ponad 600 sesji telemetrycznych o ogólnej wielkości ponad 50 GB w przekazania na ziemi informacji naukowej zarejestrowanej na pokładzie satelit. W celu walidacji danych zrealizowano programy skoordynowanych badań zakresów promieniowania elektro-

электромагнитных излучений ОНЧ- и ВЧ-диапазонов совместно с микро-спутником «Чибис-М» и наземными экспериментами. Такие совместные эксперименты, как правило, определяемые временем работы наземных экспериментов, трудно синхронизируются по орбитальным данным. Пример такого пространственного расхождения в системе «Вернов» – «Чибис-М» – стэнд Сура представлен на рис. 16, где только «Чибис-М» находился в магнитосопряжённой с Сура точке.

magnetycznego niskich i wysokich częstotliwości razem z mikro-satelitą „Chibis-M” i naziemnymi eksperymentami. Takie połączone eksperymenty, z reguły są trudne do wykonania ze względu na synchronizację pracy systemów. Przykładem takiego przestrzennego porównania jest konfiguracja satelitów „Vernov” – „Chibis-M” – kompleksu nagrzewu elektromagnetycznego Sura, rys. 16, W tym układzie niestety tylko sateliat „Chibis-M” znajdował się linii sił pola magnetycznego instalacji Sura.

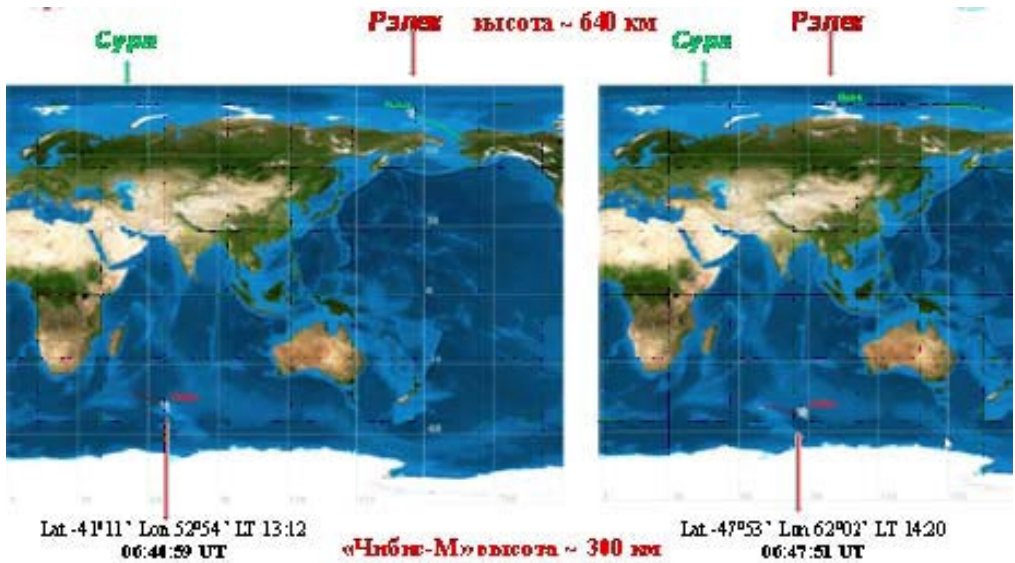


рис. 16. Пространственное распределение в синхронном эксперименте «Вернов» – «Чибис-М» – стэнд Сура

rys. 16. Rozdzielenie przestrzenne w synchronicznym eksperymencie „Vernov” – „Chibis-M” – kompleks Sura

Сопоставление синхронных данных в различных геофизических областях, даже в различных частотных диапазонах, как представлено на рис. 17, способствует комплексному анализу электромагнитных параметров космической погоды.

Zestawienie danych synchronicznych w różnych geofizycznych strefach, nawet w różnych zakresach częstotliwości, jak pokazano na rys. 17, wspomaga kompleksową analizę elektromagnetycznych parametrów pogody kosmicznej.

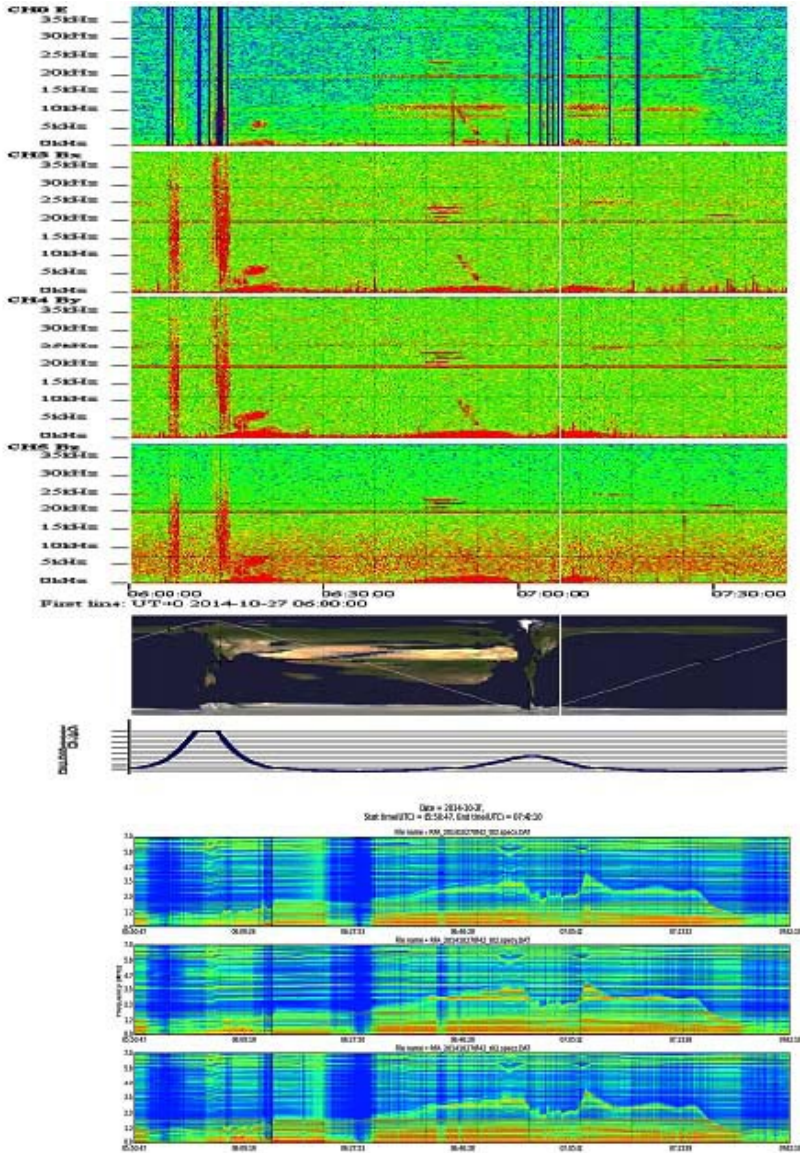


рис. 17. Синхронные данные НЧА и РЧА 27.10.2014 года 06:00:00–07:42:00 UT. Первая (верхняя) панель – электрическая компонента НЧА в диапазоне $<40 \text{ кГц}$; 2–4-я панели – три ортогональные магнитные компоненты НЧА в диапазоне $<40 \text{ кГц}$; 5-я панель – проекция орбиты спутника «Вернов» на земную поверхность; 6-я панель – значения L-параметра; 7–9 панели – три ортогональные электрические компоненты РЧА в диапазоне $<15 \text{ МГц}$

rys. 17. Dane synchroniczne NChA i RFA 27.10.2014 06:00:00–07:42:00 UT. Pierwszy (górný) panel – elektryczny komponent... w zakresie $<40 \text{ kHz}$; 2–4 panele – trzy ortonormalne składowe magnetyczne... w zakresie $<40 \text{ kHz}$; 5 panel – projekcja orbity sztucznego satelity „Vernov” na ziemską powierzchnię; 8 panel – wartość L-parametru; panele 9–11 – trzy prostokątne elektryczne komponenty RFA w zakresie $<15 \text{ MHz}$

4. ВЧ РАДИО-СПЕКТРОМЕТРИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ «ОБСТАНОВКА (1 ЭТАП)»

Эксперимент «Обстановка (1 этап)», проводящийся на борту РС МКС с 23 апреля 2013 года, нацелен на решение фундаментальной проблемы взаимосвязи плазменно-волновых явлений в системе магнитосфера – ионосфера – атмосфера – литосфера Земли с параметрами космической погоды. Конкретной фундаментальной задачей КЭ является поиск универсальных закономерностей трансформации и диссипации плазменно-волновой энергии в данной системе.

Важным направлением измерений, реализуемых в эксперименте, является получение данных о мощности и частотных спектрах электрических и магнитных полей в ионосфере.

Типичный пример мониторинговых данных РЧА вдоль орбиты МКС представлен на рис. 18. Характерные кривые на спектре связаны с локальными плазменными эмиссиями и отражают, в частности, электронную концентрацию на высотах МКС. Эти данные свидетельствуют о наличии интенсивных электромагнитных излучений при прохождении характерных ионосферных областей, в частности, исследуемых и в проекте «Вернов» (рис. 17). Однако, в случае «Обстановка (1 этап)» уровень электромагнитных шумов, генерируемых приборами и системами МКС, велик по сравнению с естественными плазменными эмиссиями. Спектр этих излучений представлен на рис. 19.

Получение новых данных об электромагнитных параметрах ионосферной плазмы необходимы для уточне-

4. HF RADIO-SPEKTROMETRA W EKSPERYMENCIE „OBSTANOVKA (1-SZY ETAP)”

Głównym zadaniem eksperymentu „Obstanovka (1-szy etap)” przeprowadzonym na pokładzie RS MSK od 23 kwietnia 2013 roku, był opis oddziaływań plazmowo-falowych w układzie magnetosfera-jonosfera-atmosfera-litosfera Ziemi wraz z zastosowaniem jego do programu Pogody Kosmicznej. W szczególności analiza dotyczyła opisu transportu i dyssypacji energii procesów falowych w plazmie kosmicznej

Natężenie i częstotliwość mierzonego pola elektrycznego i magnetycznego jest zasadniczym elementem prowadzonych pomiarów.

Typowy przykład danych zarejestrowanych analizatorem RFA wzdłuż 4 orbit MSK przedstawiono na rys. 18. Charakterystyczna krzywa na przedstawionym spektrogramie jest skutkiem naturalnego promieniowania plazmy i odzwierciedla lokalną gęstość elektronową w jonosferze na wysokości orbity międzynarodowej stacji kosmicznej. Dane te świadczą o obecności intensywnego elektromagnetycznego promieniowania charakterystycznych dla różnych obszarów struktur jonosferycznych podobnie jak w projekcie „Vernov” (rys. 17). Niestety w przypadku projektu Obstanovka wysoki poziom zakłóceń elektromagnetycznych generowanych przez systemy pokładowe i przyrządy stacji sprawia iż obserwowane widma są bardzo zakłócone i możemy obserwować tylko bardzo silne emisje. Pojedyncze spectrum pola elektrycznego przedstawiono na rys. 19.

Pozyskanie nowych danych na temat elektromagnetycznych parametrów plazmy jonosferycznej jest niezbędne dla

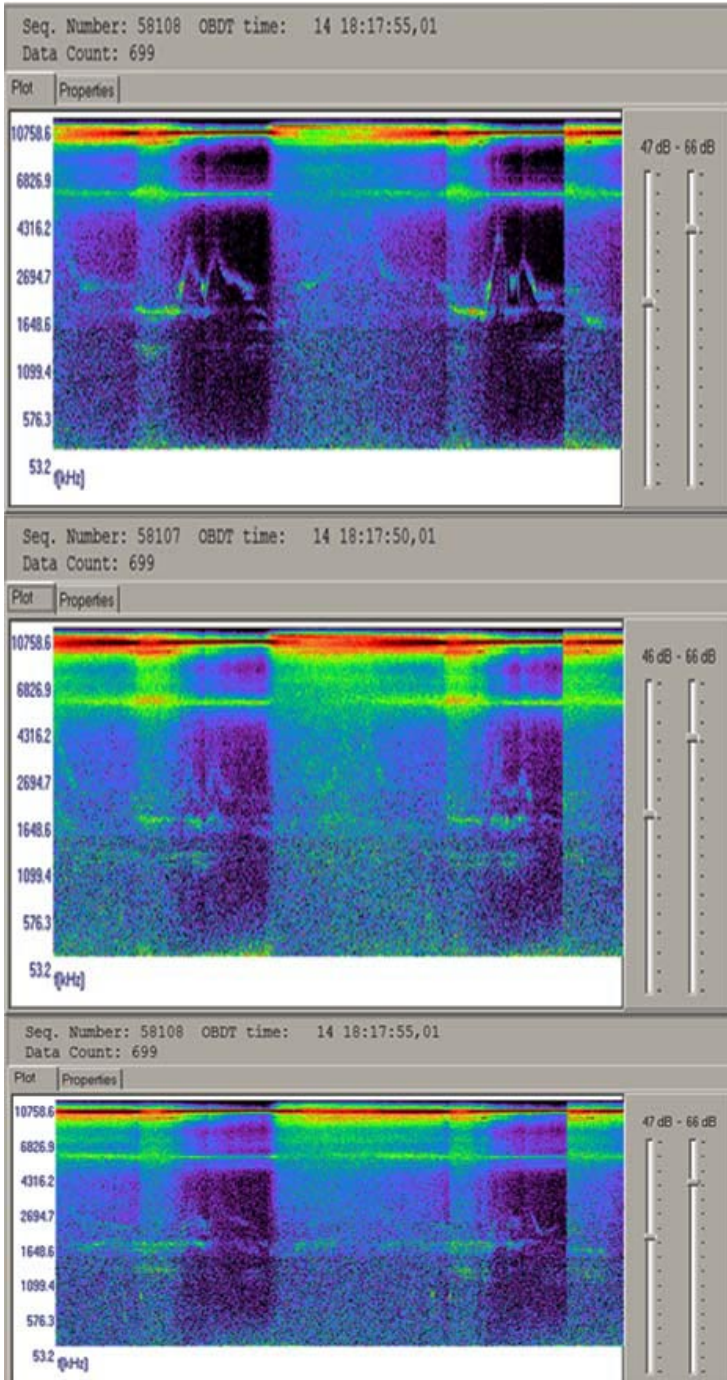


рис. 18. Данные 3-х ортогональных электрических компонент, регистрируемых прибором РЧА эксперимента «Обстановка (1 этап)»

rys. 18. Rejestracje 3-ch ortogonalnych składowych pola elektrycznego, zarejestrowanych za pomocą urządzenia RFA w eksperymencie „Obstanovka (1-szy etap)”

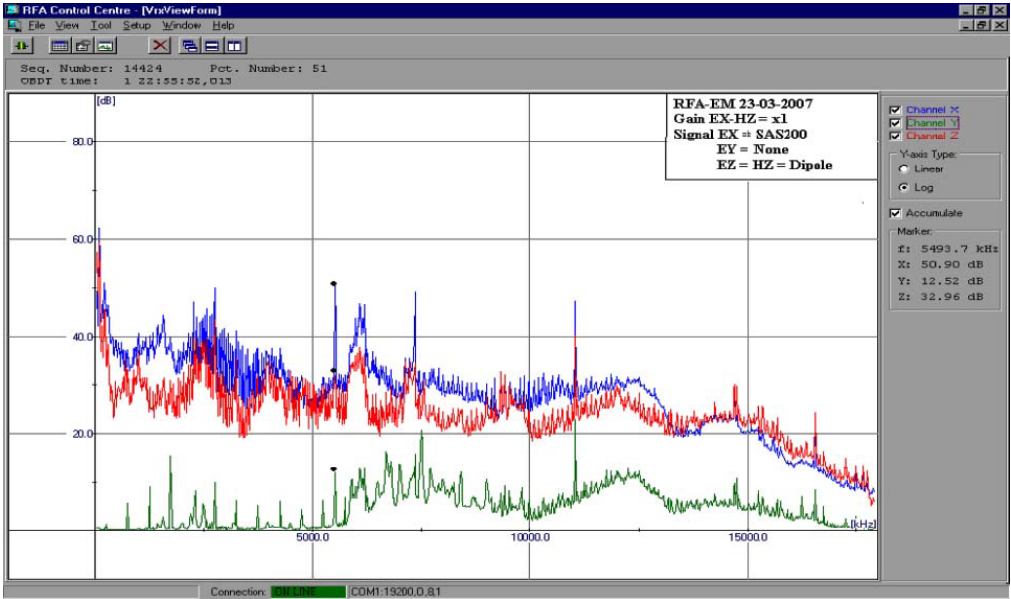


рис. 19. Примеры спектров электрической и магнитной компонент
rys. 19. Przykład z pomiarów z naziemnych testów

ния 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.

Одним из направлений исследований является изучение и предсказание космической погоды, то есть текущего и прогнозируемого состояния ионосферы.

Эти данные необходимы для оперативных групп, управляющих работой прикладных космических аппаратов (КА) на орбите, с целью обеспечения их долговременной активной работы. Например, не исключено, что при про-

modelowania bliskiego otoczenia Ziemi między innymi ze względu na możliwe długoterminowe loty z człowiekiem na pokładzie realizowane w tym obszarze.

Podczas długiego czasu funkcjonowania stacji orbitalnych (10-15 lat i więcej), na równi z krótkoterminowymi geomagnetycznymi zaburzeniami takimi jak; sub-burze i burze magnetyczne można także monitorować długoterminowe zmiany parametrów geofizycznych, np. 11-letni cykl słonecznej aktywności.

Badania te przyczyniają się także do tworzenia podstaw naukowych i serwisów programu Pogody Kosmicznej, poprzez bieżącą diagnostykę stanu jonosfery.

Takie dane są niezbędne dla grup operatorów koordynujących prace statków kosmicznych na orbicie w celu zapewnienia ich długoterminowej aktywnej pracy na orbicie. Np. przy prognozie silnych magnetosferycznych zaburzeń

гнозе сильных магнитосферных возмущений некоторые КА необходимо переводить в щадящий режим функционирования бортовой аппаратуры.

На данный момент основным результатом проведения КЭ «Обстановка 1-й этап» является накопление данных по целому ряду физических параметров плазмы и окружающих МКС электромагнитных полей. На основе этих данных создана и пополняется база данных, проводится предварительная обработка и анализ получаемой информации, что позволит в дальнейшем проводить достоверные методические оценки по предсказанию космической погоды.

Научно-методические вопросы КЭ «Обстановка 1-й этап» российские и польские ученые представили в ряде совместных публикаций и докладов на международных конференциях. Имеется сайт - <http://www.iki.rssi.ru/obstanovka/eng/index.htm>.

Рабочий коллектив со стороны ИКИ РАН

- Климов Станислав Иванович – проф., д.ф.-м.н., научный руководитель КЭ «Обстановка 1-й этап», заведующий лабораторией, ведущий научный сотрудник
- Грушин Валерий Аркадьевич – к.ф.-м.н., ведущий по ПВК, старший научный сотрудник
- Белякова Людмила Дмитриевна – главный специалист
- Новиков Денис Игоревич – ведущий конструктор
- Гречко Татьяна Васильевна – ведущий конструктор
- Беликова Алла Борисовна – ведущий инженер
- Мягких Валентин Дмитриевич – ведущий конструктор

niektóre statki kosmiczne należy wprowadzić w stan uśpienia funkcjonowania aparatury pokładowej.

Na chwilę obecną głównym rezultatem w eksperymencie „Obstanovka (1-szy etap)” jest nagromadzenie bazy danych o parametrach plazmy i pól elektromagnetycznych w pobliżu orbity stacji kosmicznej. Na tej podstawie, prowadzona jest analiza otrzymanych danych, co pozwoli następnie konstruować prognozy Pogody Kosmicznej.

Rosyjscy i polscy badacze przedstawili naukowo- metodyczne zagadnienia Eksperymentu Kosmicznego „OBSTANOVKA etap 1-szy” w szeregu wspólnych publikacji i wykładów na konferencjach międzynarodowych. Istnieje strona internetowa: <http://www.iki.rssi.ru/obstanovka/eng/index.htm>

Skład zespołu CBK PAN:

- prof. nadzw. dr. hab. Hanna Rothkaehl, kierownik Zespołu Fizyki Plazmy, główny badacz
- Mgr. inż. Marek Morawski, główny konstruktor
- Mgr. inż. Marek Winkler, konstruktor mechanic
- Dr. Jerzy Grygorczuk konstruktor mechanic
- Mgr. inż. Marta Tokarz
- Mgr. inż. Jacek Krasowski, inżynier

ЛИТЕРАТУРА

BIBLIOGRAFIA

- Климов С.И., Грушин В.А., Белякова Л.Д., Новиков Д.И.* Разработка методики пространственно-временных измерений плазменно-волновых параметров в ионосфере с использованием инфраструктуры Российского сегмента МКС // Седьмая ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе», 6–10 февраля 2012 года, Москва, ИКИ РАН. С. 71.
<http://plasma2012.cosmos.ru/sites/plasma2012.cosmos.ru/files/plasma2012-program-0127.pdf>
- Klimov S.I., Korepanov V.E., Grushin V.A., Skalskiy A.A., Bodnar L., Ferenz Ch.* Plasma-wave Studies in the Solar Wind and the Terrestrial Ionosphere // Program for ISU's 16th annual International Symposium „Sustainability of space activities: international issues and potential solutions” ISU Central Campus, Strasbourg, 21–23 February, 2012, Session 3: Space Weather.
- Klimov S.I., Petrukovich A.A., Zelenyi L.M.* Global monitoring of the electromagnetic parameters of space weather in the frame of the ISS infrastructure // Proceedings „2012 ESA Workshop on Aerospace EMC”, Venice, Italy, (ESA SP-702, May 2012), s4_10klimov.pdf.
- Грушин В.А., Климов С.И., Корепанов В.Е., Дудкин Д.Ф.* Мониторинг электромагнитной обстановки в окрестности международной космической станции. Первые результаты // Девятая ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе», 10–14 февраля 2014 года, Москва, ИКИ РАН. Сборник тезисов. С. 75.
http://plasma2014.cosmos.ru//Abstract Book_Plasma-2014.pdf
- Богомолов В.В., Свертилов С.И., Июдин А.Ф., Панасюк М.И., Климов С.И., Гарипов Г.К., Роткель Х., Ференц Ч., Климов П.А., Мишинева Т.И.* Наблюдение атмосферных вспышек гамма-излучения в космическом эксперименте «РЭЛЕК» на спутнике «ВЕРНОВ» // Десятая ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе» 16–20 февраля 2015 года, Москва, ИКИ РАН. Сборник тезисов. С. 86-87.
<http://plasma2015.cosmos.ru/news/a-book> ,
- Грушин В.А., Климов С.И., Новиков Д.И., Корепанов В.Е., Белова И.Э., Салаи Ш., Балайти К., Надь Я.* Пространственно-временной анализ аномалий ионосферных электромагнитных полей, измеренных аппаратурой эксперимента «Обстановка (1 этап)» на борту Российского сегмента МКС. Десятая ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе» 16–20 февраля 2015 года, Москва, ИКИ РАН. Сборник тезисов. С. 88. <http://plasma2015.cosmos.ru/news/a-book>
- Мягкова И.Н., Панасюк М.И., Свертилов С.И., Богомолов В.В., Богомолов А.В., Калегаяев В.В., Баринаова В.О., Климов С.И., Грушин В.А., Корепанов В.Е., Рязанцева М.О., Сегеди П., Ференц Ч., Роткель Х.* Исследования вариаций потоков электронов на высотах 600-800 км с помощью аппаратуры РЭЛЕК на борту ИСЗ «ВЕРНОВ» // Десятая ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе» 16–20 февраля 2015 года, Москва, ИКИ РАН. Сборник тезисов. С. 112-113. <http://plasma2015.cosmos.ru/news/a-book>
- Панасюк М.И., Свертилов С.И., Климов С.И., Папков А.П., Богомолов В.В., Гарипов Г.К., Корепанов В.Е., Краснопеев С.В., В.А. Кудряшов, Пак И., Роткель Х., Ференц Ч., Беляев С.М., Богомолов А.В., Боднар Л., Бортников С.В., Демидов А.Н., Джеон Дж.-А., Ким Дж.-И., Июдин А.Ф., Калегаяев В.В., Ли Дж., Масельский П.В., Моравский М., Мягкова И.Н., Сегеди П.* Космический эксперимент РЭЛЕК по изучению высыпаний магнитосферных электронов и транзитных атмосферных явлений на спутнике «ВЕРНОВ» (МКА-ФКИ ПН2)//Десятая ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе» 16–20 февраля 2015 года, Москва, ИКИ РАН. Сборник тезисов. С. 113. <http://plasma2015.cosmos.ru/news/a-book>

- Климов С.И., Богомолов А.В., Богомолов В.В., Вавилов Д.И., Гречко Т.В., Грушин В.А., Дудкин Д.Ф., Корепанов В.Е., Мягкова И.Н., Новиков Д.И., Панасюк М.И., Ротхель Х., Свертилов С.И., Сегеди П., Ференц Ч.* Отработка методики комплексного анализа электромагнитных параметров КНА «РЭЛЕК» проекта «Вернов» // Десятая ежегодная конференция «Физика плазмы в солнечной системе» 16–20 февраля 2015 года, Москва, ИКИ РАН. Сборник тезисов. С. 169-170. <http://plasma2015.cosmos.ru/news/a-book>
- Климов С.И., Корепанов В.Е., Сегеди П., Грушин В.А., Новиков Д.И., Балаши К., Белякова Л.Д., Беляев С., Бергман Я., Ференц Ч., Георгиева К., Гаф М.П., Киров Б., Марусенков А., Моравски М., Надь Я., Недков Р., Ротхель Х., Станев Г., Салаи Ш.* Мониторинг электромагнитных параметров космической погоды в ионосфере. Результаты эксперимента «Обстановка (1 этап)» на Российском сегменте МКС // The 2nd International Conference „International Space Station. Research, Investigations and Experiments”, 09–11.04.2015, SRI RAS, Moscow, С. 204. http://knts.tsniimash.ru/ru/src/iss_2015.pdf
- Klimov S.I., Korepanov V.E., Szegedi P., Grushin V.A., Novikov D.I., Balajthy K., Belyakova L., Belyayev S., Bergman J., Ferencz Cs., Georgieva K., Gough M.-P., Kirov B., Marusenkov A., Morawski M., Nagy J.Z., Nedkov R., Rothkaehl H., Stanev G., Szalai S.* The monitoring of electromagnetic parameters of space weather in the ionosphere. The results of the experiment „Obstanovka (1 stage)” on the Russian ISS segment // The 2nd International Conference „International Space Station. Research, Investigations and Experiments”, 09–11.04.2015, SRI RAS, Moscow. P. 205. http://knts.tsniimash.ru/ru/src/iss_2015.pdf

ТЕРМО-ЛР

руководитель проекта
с российской стороны:

Е. Слюта

руководитель проекта
с польской стороны:

Ю. Григорчук

руководитель проекта
с немецкой стороны:

М. Гротт

ТЕРМО-ЛР – исследование свойств реголита, внутреннего теплового потока и геологии малых тел и планетных тел.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ЗАДАЧИ ПРОЕКТА:

1. Измерение температуры на поверхности в лунных полярных широтах в течение полной лунации и оценка вклада в температуру каждого из основных факторов (внутренний тепловой поток, солнечный ветер, отраженное излучение от близрасположенных освещенных участков и латеральная кондуктивная теплопроводность) в зависимости от степени освещенности.

2. Измерение и исследование зависимости теплофизических свойств реголита в полярных областях от трёх основных факторов – от состава реголита, содержания и состава летучих и экстремального температурного режима.

3. Исследование внутреннего теплового потока Луны (задача имеет фундаментальное значение и необходима для понимания происхождения, состава, внутреннего строения и эволюции Луны; невозможно построить современную модель Луны без привлечения смежных геофизических, геохимических и петрологических данных).

THERMO-LR

kierownik projektu
ze strony Rosji:

E. Slyuta

kierownik projektu
ze strony Polski:

J. Grygorczuk

kierownik projektu
ze strony Niemcy:

M. Grott

THERMO-LR – Badanie właściwości regolitu, wewnętrznego przepływu ciepła i geologii małych ciał niebieskich oraz planet.

Wielkość wewnętrznego strumienia ciepła jest istotnym warunkiem brzegowym dla odtworzenia cieplnej ewolucji Księżyca i nakłada pewne ograniczenia na geofizyczne i geochemiczne modele jego struktury wewnętrznej.

Badanie bocznego, globalnego i regionalnego występowania wewnętrznego strumienia ciepła jest również niezbędne dla analizy globalnych i regionalnych niejednorodności w strukturze skorupy i płaszczka księżycowego.

GŁÓWNE CELE NAUKOWE PROJEKTU:

1. Pomiar temperatury na powierzchni Księżyca podczas pełnej lunacji i ocena znaczenia każdego z głównych czynników (wewnętrznego przepływu ciepła, wiatru słonecznego, promieniowania odbitego od pobliskich obszarów oświetlonych, bocznej przewodności cieplnej) w zależności od poziomu oświetlenia.

2. Pomiar i analiza właściwości cieplnych regolitu w regionach polarnych w zależności od trzech głównych czynników – składu regolitu, obecności i składu substancji lotnych oraz skrajnych warunków temperaturowych.

ПРОВЕДЕНИЕ
ТЕМПЕРАТУРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ
НА ПОВЕРХНОСТИ ЛУНЫ
В ПОЛЯРНОМ РАЙОНЕ
ПОЗВОЛИТ ПОЛУЧИТЬ
СЛЕДУЮЩИЕ
НАУЧНЫЕ ДАННЫЕ:

- результаты экспериментальной оценки вклада основных факторов в интегральную (равновесную) температуру в постоянно затемненных участках при изменении температуры на поверхности в течение полной лунации;
- данные по глубине затухания суточных и годовых колебаний температуры в реголите в полярном районе;
- данные по теплофизическим свойствам реголита преимущественно анортозитового состава и содержащего летучие в древнем материковом районе Луны;
- данные по теплофизическим свойствам реголита при низких температурах;
- новые данные о региональном распределении теплового потока в зависимости от состава лунной материковой коры и от её мощности при измерении внутреннего теплового потока в древнем материковом районе Луны, характеризующегося повышенной мощностью коры и повышенной мощностью экранирующего рыхлого слоя реголита;
- новые данные по внутреннему тепловому потоку для уточнения тепловой эволюции Луны и, соответственно, геофизической и геохимической модели её внутреннего строения.

3. Zbadanie wewnętrznego strumienia ciepła Księżyca. Zadanie to ma fundamentalne znaczenie i jest kluczowe dla zrozumienia pochodzenia, składu, struktury wewnętrznej i ewolucji Księżyca. Nie jest możliwe zbudowanie rzeczywistego modelu Księżyca bez połączonych danych geofizycznych, geochemicznych i petrologicznych.

Mając na uwadze powyższe cele, podjęto decyzję o opracowaniu instrument naukowego THERMO-LR, który pozwoli na wykonywanie pomiarów na powierzchni gruntu księżycowego oraz pomiarów temperatury w otworze o głębokości przynajmniej 1,5 m. Wyposażenie naukowe zawiera jednostki elektroniczne, powierzchniowe czujniki termalne (STS) zamontowane na opuszczanym urządzeniu i podpowierzchniowe sensory termalne (DTS) z penetratorem.

OCZEKIWANE REZULTATY NAUKOWE:

- pomiar temperatury na powierzchni Księżyca podczas pełnej lunacji pozwoli na doświadczalną ocenę wpływu głównych czynników na całkowitą (zrównoważoną) temperaturę na stale zacienionych obszarach.
- informacja o głębokości zanikania dobowych i rocznych wahań temperatur w regolicie na obszarach polarnych Księżyca.
- informacja o cieplnych właściwościach regolitu składającego się głównie z anortozytu i zawierającego substancje lotne znajdującego się na Wyżynach Księżycowych.
- informacja o właściwościach cieplnych regolitu księżycowego w niskich temperaturach.

НОВИЗНА И ПРЕИМУЩЕСТВА ПРОЕКТА – ВПЕРВЫЕ БУДУТ ИЗМЕРЕНЫ:

- температура непосредственно на поверхности в полярной области на Луне;
- глубина затухания суточных и годовых колебаний температуры в реголите в полярном районе на Луне;
- теплофизические свойства реголита преимущественно анортозитового состава в материковом районе;
- теплофизические свойства реголита в полярном лунном районе, содержащего замороженные летучие, на глубину до 1,5 м;
- внутренний тепловой поток в материковом районе Луны, характеризующемся повышенной мощностью коры и экранирующего рыхлого слоя реголита.

Для данных целей проектируется научная аппаратура ТЕРМО-Л, которая позволит провести измерения на поверхности лунного грунта и температурные измерения в скважине глубиной не менее 1,5 м. В состав научной аппаратуры входят поверхностный термодатчик (ПТД), установленный на откидываемом устройстве; устройство внедрения с глубинными термодатчиками (ГТД) и блок электроники.

УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО ТЕРМОДАТЧИКА ПТД.

Конструктивно ПТД представляет собой цилиндр диаметром 41 мм и высотой 43 мм с фланцем (рис. 1) для крепления к откидываемому устройству. Термодатчик является пассивным преобразователем и не содержит полупроводниковых элементов. Поверх-

- новые данные на тему внутреннего потока теплопроводности на Выżynках Ксїєзчовых характеризующихся увеличенной толщиной покрытия и увеличенной толщиной верхнего слоя рыхлого реголита.

НОВОСТИ И ЗАЛЕТЫ ПРОЕКТА:

- температура реголита будет измерена по раз первый непосредственно на поверхности в регионе полярном Ксїєзчова.
- по раз первый, будет измерена глубина погружения суточных и годовых колебаний температур в реголите на участках полярных Ксїєзчова.
- свойства тепловые реголита на Выżynках Ксїєзчовых состоящего в основном из анортозита будут измерены по раз первый.
- тепловые свойства реголита на Выżynках Ксїєзчовых, содержащие замороженные вещества летучие на глубину до 1,5 м будут измерены по раз первый.
- внутренний поток тепла на Выżynках Ксїєзчовых, характеризующийся увеличенной толщиной коры и увеличенной толщиной верхнего слоя реголита, будет измерен по раз первый.

СТРУКТУРА И ЗАСАДА ДЗІАЛАНІА ПОВЕРХНІОВИХ СЕНСОРІВ ТЕРМАЛНИХ (STS)

STS є циліндром з діаметром 41 мм і висотою 43 мм з кінцевою (Рис. 1) для кріплення до похиланого/опущеного пристрою. Сенсор термічний є пасивним конвертером і не містить елементів напівпровідникових. Сенсор поверхніовий містить диск захисний

ностный термодатчик включает малоинерционный дисковый нагреватель (рис. 2) с мощностью около 0,04 Вт, а также три платиновых термометра сопротивления (рис. 3): температуры нагревателя (Т1), контрольной среды (Т2) и лучистого баланса поверхности грунта (реголита) (Т3).

Под действием лучистого теплопереноса в грунте формируется плоская тепловая волна, характеристики которой определяются в процессе сеанса измерений. Теплофизические характеристики грунта определяются по данным измерений методом подбора тепловых моделей грунта.

o małej bezwładności (Rys. 2) o mocy około 0,04 W oraz trzy platynowe termometry (Rys. 3):

- Termometr temperatury grzałki (T1),
- Termometr temperatury otoczenia kontrolnego (T2),
- Termometr bilansu promieniowania temperatury powierzchni gruntu (reogolitu) (T3).

Pod wpływem radiacyjnej wymiany ciepła w gruncie tworzy się płaska fala ciepła, której właściwości są określone w trakcie sesji pomiarowej. Określenie cieplnych właściwości gruntu jest możliwe dzięki odpowiedniemu doborowi parametrów termicznych gruntu w modelu.

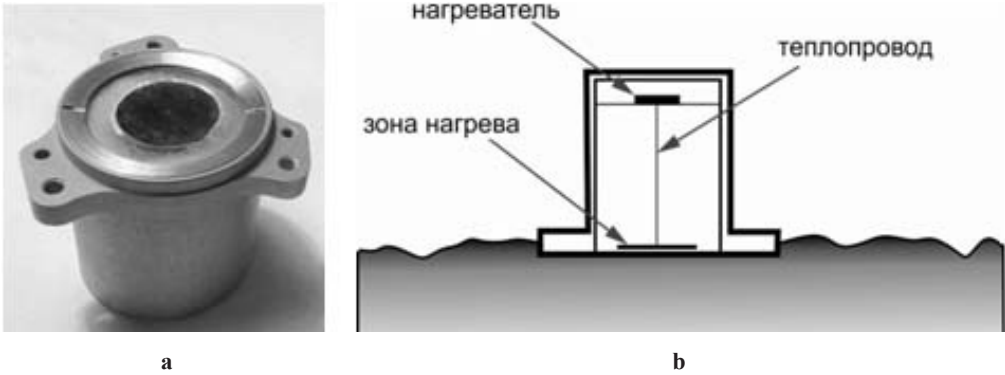


рис. 1. Внешний вид (а) и принципиальная схема (б) поверхностного термодатчика ПТД
rys. 1. Zdjęcie (a) i diagram schematyczny (b) STS

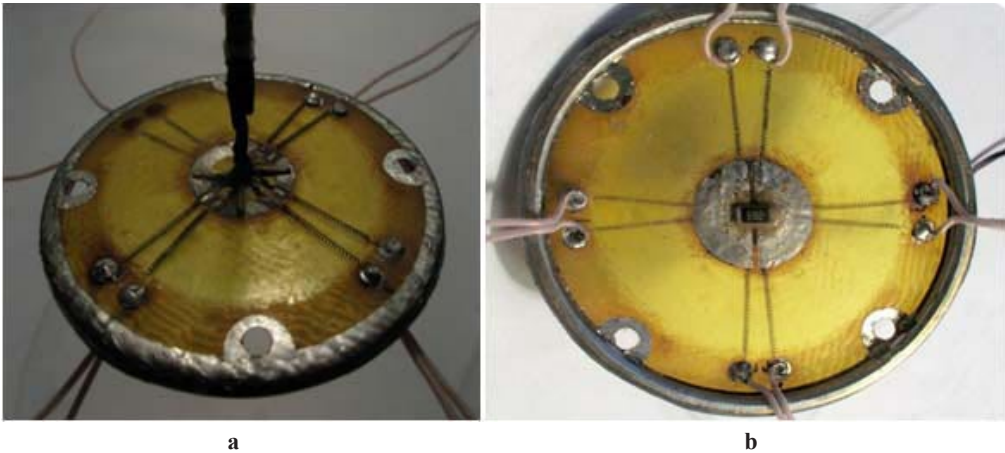


рис. 2. Узел дискового нагревателя со стороны теплопровода (а) и нагревателя (б)
rys. 2. Dysk grzewczy. Widok od strony przewodnika ciepła (a) i grzałki (b)

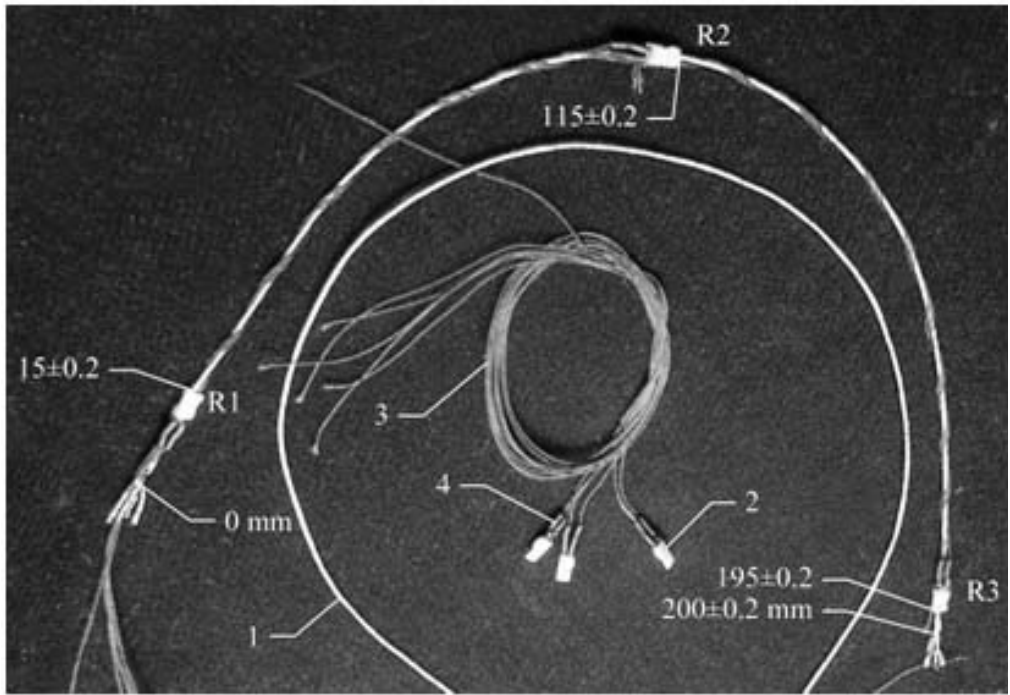


рис. 3. Теплопровод в сборе:

- 1 – медный жгут;
- 2 – датчики температуры (три платиновых термометра сопротивления);
- 3 – соединительные провода; 4 – термоусадочная трубка

rys. 3. Przewodnik ciepły:

- 1 – Wiązka przewodów miedzianych,
- 2 – czujniki temperatury (trzy platynowe termometry rezystancyjne),
- 3 – przewód łączący, 4 – rurki termokurczliwe

ПЕНЕТРАТОРЫ

Пенетраторы, разрабатываемые ЦКИ ПАН, – решение для проекта ЛУНА-РЕСУРС-1. Центр космических исследований Польской академии наук имеет обширный опыт в разработке ударных пенетраторов, включая лётные модели MUPUS для миссии ROSETTA ESA и СНОМІК для российской миссии ФОБОС-ГРУНТ.

Основная роль пенетратора, который будет разработан ЦКИ в рамках эксперимента – заглупление глубинных термодатчиков, предоставляемых DLR. Крайне важно разработать

PENETRATORY

Penetratory opracowane przez CBK PAN – rozwiązania możliwe do zastosowania w ramach misji LUNA-RESURS-1.

Centrum Badań Kosmicznych posiada bogate doświadczenie w opracowywaniu penetratorów młotkowych, w tym modeli lotnych takich jak MUPUS na misję ROSETTA (ESA) i CHOMIK na rosyjską misję PHOBOS-GRUNT. Kluczową rolą penetratora opracowywanego przez CBK w ramach eksperymentu THERMO-LR będzie transport pod powierzchnię sensorów termicznych dostarczanych przez DLR. Niezwykle ważne jest zastosowa-

устройство, которое позволит избежать нагрева летучих веществ во время заглубления устройства в реголит. На начальном этапе проекта рассматриваются два возможных типа ударных механизмов, первым из которых является HEEP (High Energy and Efficiency Penetrator), а вторым – EMOLE (mole penetrator driven by an electromagnetic direct drive). Глубина погружения HEEP зависит от длины стержня и может достигать 3 м, пенетраторы типа Mole могут погружаться на глубину до 5 м.

Принцип работы ударных пенетраторов основывается на механическом взаимодействии трех основных масс: массы ударника, массы стержня и контрмассы. Цикл работы состоит из пяти ступеней (рис. 4):

- (I) начальное положение;
- (II) ускорение ударника, который ударяет стержень и вызывает его движение;
- (III) одновременное перемещение контрмассы в противоположном направлении;
- (IV) постепенная трансформация кинетической энергии контрмассы в потенциальную энергию плоской пружины, которая расположена между стержнем и контрмассой (возвратная пружина);
- (V) возвращение контрмассы в начальное положение и повторный удар контрмассы.

Первый рассмотренный вариант – пенетратор HEEP, который обладает всеми преимуществами предыдущих пенетраторов, разработанных ЦКИ (MUPUS и CHOMIK) и характеризуется спектром инноваций. Высокая надежность и эффективность HEEP была достигнута в

не устройства, które pozwoli uniknąć ogrzewania substancji lotnych podczas penetracji regolitu. W początkowej fazie projektu bierze się pod uwagę dwa rodzaje mechanizmów młotkowych, z których pierwszy to HEEP (High Energy and Efficiency Penetrator – Penetrator o Wysokiej Efektywności Energetycznej) i drugi EMOLE (penetrator typu kret z bezpośrednim napędem elektromagnetycznym). Głębokość penetracji urządzenia HEEP może być regulowana w zależności od długości pręta, która może wynosić do 3 m, natomiast penetratory typu kret mogą zagłębić się na głębokość do 5 m.

Zasada działania penetratorów młotkowych opiera się na mechanicznej interakcji trzech głównych mas: masy młotka, masy zagłębianego pręta i przeciwmasy. Jeden cykl pracy składa się z pięciu następujących etapów (Rys. 4):

- (I) początkowa konfiguracja;
- (II) przyśpieszenie młotka, który uderza w pręt i powoduje jego ruch;
- (III) jednoczesny ruch przeciwmasy w kierunku przeciwnym;
- (IV) stopniowe przekształcenie energii kinetycznej przeciwmasy w energię potencjalną płaskiej sprężyny, która jest umieszczona pomiędzy prętem i przeciwmassą (nazywaną sprężyną powrotną);
- (V) powrót przeciwmasy do początkowej konfiguracji i powtórne uderzenie.

Pierwszym z rozważanych rozwiązań jest penetrator HEEP, który posiada wszystkie zalety wcześniejszych penetratorów opracowanych przez CBK (Rys. 5), tj. penetratorów MUPUS i CHOMIK, ale jednocześnie charakteryzuje się szeregiem innowacji. Niezawod-

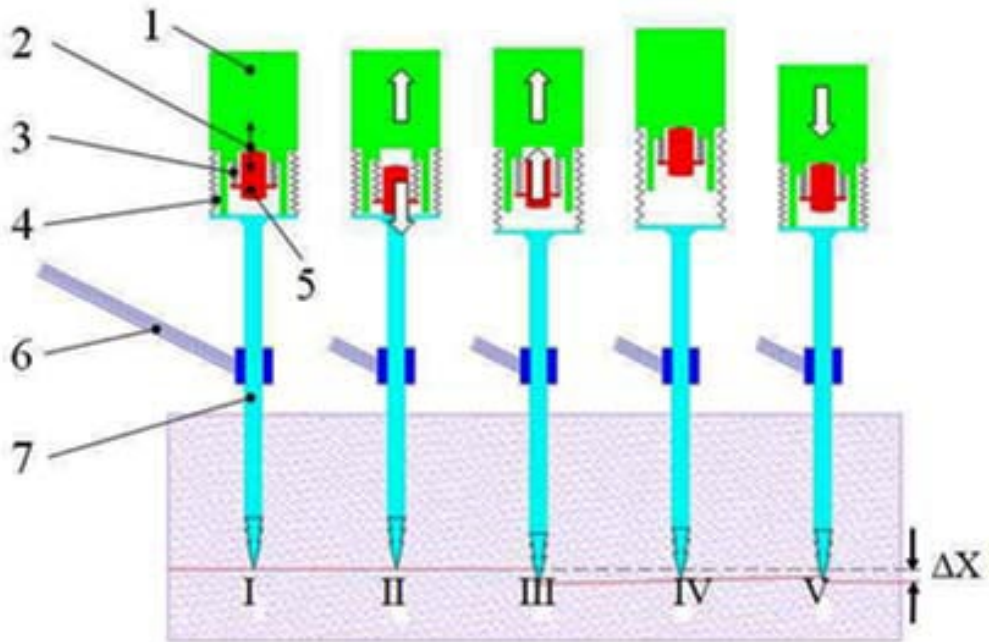


рис. 4. Принцип работы пенетратора MUPUS (основные части: 1 – контрмасса; 2 – место генерации ударной силы; 3 и 4 – пружинные подвески; 5 – ударник; 6 – рычаг манипулятора (1 м), заканчивающийся направляющим зажимом (0-1N); 7 – стержень)
rys. 4. Zasada działania penetratora MUPUS (główne części: 1 – przeciwmasa; 2 – miejsce generowania siły uderzenia; 3 i 4 – zawieszenie sprężyste; 5 – młotek; 6 – ramię manipulatora (1 m) zakończone zaciskiem ołowiowym (0-1N); 7 – pręt).

основном благодаря новой форме электромагнитного привода, подвеске всех подвижных частей без трения и восемью настройками мощности. Более того, маленькое поперечное сечение ударных элементов увеличивает скорость и эффективность ударного процесса. Этот тип пенетраторов (рис. 5) рассматривается как один из самых мощных космических пенетраторов, который способен как заглубляться в рыхлый реголит, так и раскалывать фрагменты твердых горных пород (например, гранит). Масса пенетратора HEEP составляет менее чем 1,4 кг, а его энергопотребление 4 Вт, но оба этих параметра при необходимости могут быть уменьшены до 1,2 кг и 1–2 Вт, соответственно.

ność oraz wysoka sprawność penetratora HEEP została osiągnięta głównie dzięki nowemu kształtowi elektromagnesu, beztarciowemu zawieszeniu wszystkich ruchomych części i zastosowaniu ośmiu poziomów zasilania. Ponadto małe pole przekroju poprzecznego wbijanych elementów zwiększa szybkość i wydajność procesu wbijania. Ten rodzaj penetratora jest uważany za jeden z najmocniejszych penetratorów kosmicznych zdolny zarówno do wbijania się w luźny reголит jak i do rozłupywania fragmentów skał litych (np. granitu). Masa penetratora HEEP nie przekracza 1,4 kg a pobierana moc kształtuje się na poziomie 4 W, obie wartości mogą zostać obniżone, w razie potrzeby, odpowiednio do 1,2 kg i 1–2 W.



рис. 5. Начальное положение НЕЕР-пенетратора в кварцевом песке (слева), после заглубления (справа)

rys. 5. Początkowe pozycja penetratora HEEP podczas testu w piasku kwarcowym (po lewej), po zakończeniu wbijania (po prawej)

Второй вариант – пенетратор EMOLE (рис. 6), который недавно был разработан в рамках контракта ESA PECS. Пенетратор EMOLE состоит из пяти электромагнитных приводных секций, в которых катушки, ферромагнитные сердечники и магнитные сепараторы совпадают с контрмассой, а корпуса электромагнитов с соединительным стержнем включают ударник. Все элементы электромагнитных це-

Drugim rozwiązaniem brany pod uwagę jest penetrator EMOLE (Rys. 6), który został niedawno opracowany w ramach projektu ESA PECS. EMOLE składa się z 5 sekcji z napędem elektromagnetycznym, w których cewka, rdzenie ferromagnetyczne i separator magnetyczny stanowią przeciwmasę, podczas gdy zwora elektromagnesu wraz z wałkiem łączącym stanowi młotek. Wszystkie elementy obwodów elektromagne-

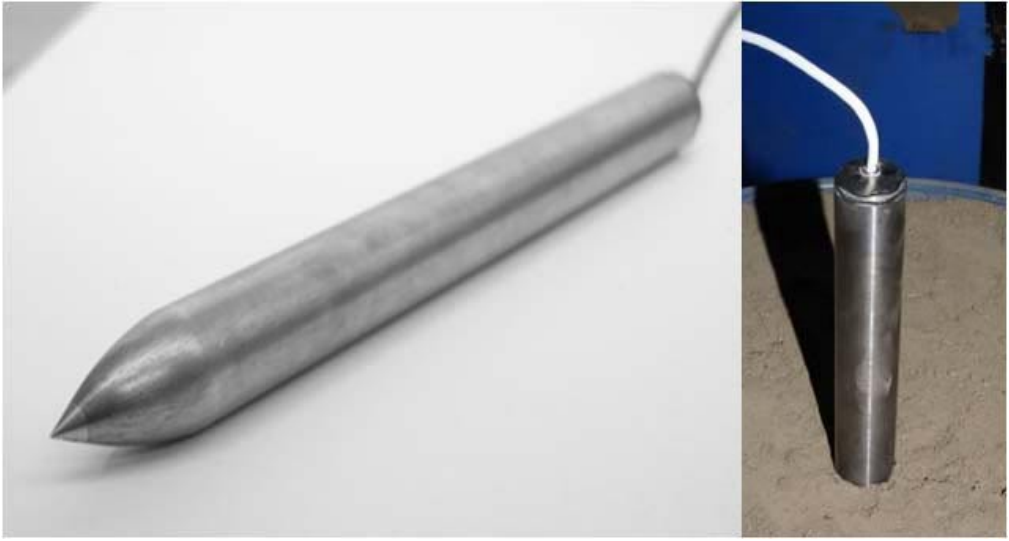


Рис. 6. Пенетратор EMOLE (слева), этот пенетратор во время теста (справа)

Rys. 6. Penetrator EMOLE (po lewej), EMOLE podczas testów w regolicie Syar (po prawej).

пей выполнены из «Пермендура 49», магнитные сепараторы – из вольфрамового сплава, а соединительный стержень сделан из титанового сплава.

Силовая установка (контрмасса + ударник) размещена в корпусе, который представляет собой длинный тонкостенный титановый рукав с наконечником из закаленной нержавеющей стали. Ударник направляется двумя трехшариковыми подшипниками, расположенными внутри контрмассы и уменьшающими потери энергии на трение, когда контрмасса движется внутри корпуса. Как и во всех предыдущих пенетраторах, созданных ЦКИ ПАН, стартовая позиция ударника (до удара) устанавливается ударной пружиной, а позиция контр-массы определяется тормозной пружиной, спроектированной таким образом, чтобы позволить пенетратору работать в средах без гравитации, т.е. без сторонней поддержки.

tycznych zostały wykonane z materiału Permendur 49, podczas gdy separatory magnetyczne wykonane są ze stopu wolframu, a wałek łączący ze stopu tytanu. Napęd (przeciwmasa i młotek) umieszczony jest w obudowie w kształcie cienkościennej tulei tytanowej zakończonej końcówką wykonaną ze stali nierdzewnej. Młotek jest prowadzony wewnątrz przeciwmasy przez dwa zestawy trzech kulek łożysk, co pozwala zmniejszyć straty energii powodowane tarciem, natomiast przeciwmasa ślizga się wewnątrz obudowy zewnętrznej. Analogicznie do poprzednich penetratorów opracowanych przez CBK PAN, położenie początkowe młotka (przed uderzeniem) jest wyznaczane przez sprężynę młotka, a pozycja przeciwmasy jest określona przez kolejną sprężynę zaprojektowaną tak, aby umożliwić penetratorowi pracę przy braku grawitacji bez żadnego zewnętrznego wsparcia. EMOLE ma 25 mm średnicy i 250 mm długości. Masa całkowita

Пенетратор EMOLE имеет длину 250 мм и диаметр 25 мм. Общая масса прибора составляет 520 г, а масса ударника и внешнего корпуса примерно 90 г.

СТРУКТУРА И ПРИНЦИП РАБОТЫ ГЛУБИННЫХ ТЕРМОДАТЧИКОВ (ГТД)

Термодатчики и связанная с ними электроника, которые будут использованы для оснащения пенетраторов, представленных ЦКИ, были разработаны для измерения внутреннего теплового потока Марса в миссии InSight NASA (рис. 7). Для измерения внутреннего теплового потока Луны необходимо определить тепловой градиент и теплопроводность. Глубинные термодатчики будут измерять тепловой градиент с использованием сенсоров PT100, расположенных вдоль пенетратора. Теплопроводность будет определена с помощью пенетратора в качестве модифицированного линейного источника тепла с использованием фольговых нагревателей.

Для повышения надежности измерений внутреннего теплового потока Луны, они должны проводиться на глубинах ниже влияния суточных колебаний температуры (1 м), также планируются измерения на глубинах 150, 120, 90 и 30 см, последние два будут содержать информацию о теплопроводности реголита, полученную путем измерения затухания суточной температурной волны как функции от глубины. Это даст независимую оценку теплопроводности реголита в дополнение к теплопроводности, определенной в эксперименте с активным нагревом.

urządzenia sięga 520 g, a młotek wraz z zewnętrzną obudową mają identyczną wagę 90 g.

STRUKTURA I ZASADA DZIAŁANIA PODPOWIERZCHNIOWYCH SENSORÓW TERMICZNYCH (DTS)

Sensory termiczne wraz z towarzyszącą im elektroniką, które zostaną umieszczone na penetratorze dostarczonym przez CBK, opracowano do pomiaru przepływu ciepła wewnętrznego na Marsie w ramach misji NASA InSight (Rys. 7). W celu zbadania wewnętrznego przepływu ciepła na Księżycu, należy określić gradient termiczny oraz przewodnictwo cieplne. Sensory DTS dokonają pomiaru gradientu termicznego przy użyciu czujników PT100 umieszczonych wzdłuż penetratora. Natomiast przewodnictwo cieplne zostanie zmierzone przy użyciu penetratora jako zmodyfikowanego źródła ciepła liniowego wykorzystującego grzałki foliowe.

W celu uzyskania wiarygodnych pomiarów wewnętrznego przepływu ciepła na Księżycu, pomiary temperatury należy przeprowadzić na głębokości poniżej codziennych wahań temperatury (1 m). Planuje się wykonanie pomiarów na głębokościach 150 cm, 120 cm, 90 cm, 60 cm i 30 cm. Dwa ostatnie pomiary ograniczą dyfuzję temperatury poprzez pomiar zanikania dobowych wahań temperatur w funkcji głębokości, zapewniając niezależne oceny dyfuzji temperatury w połączeniu z przewodnością określoną w doświadczeniach z aktywnym ogrzewaniem.

W doświadczeniu z aktywnym ogrzewaniem zostaną zastosowane foliowe

В эксперименте с активным нагревом будут использоваться фольговые нагреватели и кривая самонагрева инструмента будет измеряться как функция от мощности нагрева. Теплопроводность реголита может быть определена путем инверсии кривой нагрева при длительных измерениях (24 ч) с использованием аналитической тепловой модели инструмента.

Термодатчики и нагреватели будут откалиброваны в термолаборатории DLR. Абсолютная погрешность калибровки датчиков PT100 составляет 25 мК (2- σ). Определение разностей температур еще более точное, и погрешность измерений составляет 15 мК для используемых пенетраторных датчиков и ассоциированной считывающей электроники. Погрешность вычисления абсолютной температуры нагрева фольговых нагревателей составляет 50 мК, что обуславливает 5% погрешность определения теплопроводности.

Электроника ГТД включает малощумную схему с использованием 24-разрядных АЦП, которая измеряет температуру четырехпроводным методом Кельвина. Ток в измерительной цепи во избежание самонагрева датчиков, составляет 50 мкА; питание от источника постоянного тока. Шум от электроники при измерениях температуры составляет 1 мК. Второй источник тока предоставляет возможность выбора тока на нагревателях ГТД, в то время как температура опять же измеряется с использованием 24-разрядных АЦП. С учётом ожидаемого подповерхностного теплового градиента между 1 и 2 К м⁻¹ общая погрешность определения теплового потока датчиками ГТД будет составлять менее 10%.

грzałки мiedziane oraz zostanie zmierzona krzywa samonagrzewania się instrumentu w funkcji zastosowanej mocy ogrzewania. Przewodnictwo cieplne regolitu może zostać określone przez odwrócenie krzywej długotrwałego ogrzewania (24 h) przy użyciu numerycznego modelu termicznego instrumentu.

Czujniki temperatury i grzałki zostaną skalibrowane w laboratorium termicznym DLR. Absolutna dokładność kalibracji temperatur dla czujników PT100 wynosi 25 mK (2-sigma). Określenie różnic temperatur będzie jeszcze bardziej precyzyjne, a dokładność pomiaru wynosi 15 mK dla zastosowanych czujników PT i związanym z nimi elektronicznym urządzeniem odczytującym. Niepewność absolutnej temperatury folii grzewczych wynosi 50 mK, co przy określaniu przewodnictwa cieplnego odpowiada poziomowi błędowi równemu 5%.

Elektronika DTS składa się z obwodu z małymi zakłóceniami używającego 24-bitowego ADC, który mierzy temperaturę z wykorzystaniem 4-przewodowej metody Kelvina. Prąd pomiarowy wynosi 50 μ A w celu uniknięcia samonagrzewania się sensorów i jest dostarczany przez stałoprądowe źródło. Zakłócenia wzbudzane przez elektronikę przy pomiarach temperatury wynosi 1 mK. Drugie źródło prądu dostarcza wyselekcjonowany prąd do grzałek DTS, podczas gdy temperatura grzałki jest ponownie mierzona przy użyciu 24-bitowego ADC. Przyjmując oczekiwany gradient termalny pod powierzchnią na poziomie między 1 i 2 K/m, całkowity błąd sensorów DTS w określeniu przepływu ciepła wyniesie mniej niż 10%.



рис. 7. *Верхний левый:* каптоновая шина с датчиками; 14 датчиков PT100 расположены через 35 см. *Верхний правый:* базовая электроника зонда для измерения теплового потока в миссии InSight, использовавшаяся для управления активными нагревателями и пассивными датчиками. *Центр справа:* увеличенное изображение тонкоплёночных сенсоров PT100, установленных на шине. *Нижний левый:* зонд для измерения теплового потока в миссии InSight, интегрированный в корпус пенетратора. *Нижний правый:* электрическое соединение нагревателей внутри корпуса пенетратора

rys. 7. *U góry po lewej:* System oparty na taśmie kaptonowej. 14 czujników PT100 zostało przymocowanych na przyłutowanych podkładkach rozmieszczonych w odległości 35 cm. *U góry po prawej:* Elektronika typu back-end wykorzystywana na sondzie InSight do obsługi aktywnych grzałek i biernych sensorów. *W środku po prawej:* Obraz mikroskopowy cienkowarstwowych czujników PT100 zamontowanych na taśmie. *U dołu po lewej:* Aktywne grzałki sondy InSight osadzone w obudowie penetratora. *Na dole po prawej:* Połączenie elektryczne grzałek wewnątrz obudowy penetratora

УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ БЛОКА ЭЛЕКТРОНИКИ

Блок электроники (БЭ) прибора ТЕРМО-ЛР предназначен для преобразования сигналов первичных датчиков (термометров сопротивления) в цифровую форму, сохранения информации и вывода её по команде с объекта. Кроме того, автоматика БЭ обеспечивает управление системами расчеховки откидывающегося устройства и устройства внедрения, управление работой устройства внедрения и питанием нагревателя ПТД в соответствии с циклограммой работы прибора.

Блок электроники прибора ТЕРМО-ЛР конструктивно выполнен в виде моноблока, во внутреннем отсеке которого на стойках установлены печатные платы электронных модулей изделия.

Прибор ТЕРМО-ЛР разрабатывается с учетом надёжного функционирования и удовлетворения всем техническим требованиям в условиях полёта при воздействии электронного и протонного излучения естественных радиационных поясов Земли, солнечных и галактических космических лучей, а также высокоэнергетичных протонов и тяжёлых заряженных частиц.

STRUKTURA I ZASADA DZIAŁANIA JEDNOSTEK ELEKTRONICZNYCH

Pierwsza jednostka elektroniczna THERMO-LR jest przeznaczona do konwersji podstawowych sygnałów sensorów (RTD) w formie cyfrowej, zachowując informacje i przenosząc je na polecenie z obiektu. Ponadto, automatyka zapewnia system kontroli składanego urządzenia dla STS, penetratora, zarządzania i funkcjonowania STS, penetratora i sensorów DTS zgodnie z cyklogramem operacyjnym.

Kolejna jednostka elektroniczna dla instrumentu THERMO-LR została zaprojektowana do konwersji sygnału z sensorów (termometrów rezystancyjnych) w formę cyfrową, zapisywanie danych i wysyłanie ich na zewnętrzną komendę. Oprócz tego, automatyka jednostki elektronicznej zarządza systemem urządzenia penetrującego i mocą dla grzałek STS zgodnie z cyklogramem instrumentu naukowego.

Jednostki elektroniczne pod względem konstrukcyjnym ułożone są w formie monobloku, w wewnętrznej komorze, w której zainstalowano płytki obwodu modułów elektronicznych.

Wyposażenie naukowe instrumentu THERMO-LR ma zapewnić niezawodność działania i sprostać wszystkim wymaganiom technicznym dla urządzeń lotnych – pod wpływem elektronów i protonów naturalnego promieniowania Ziemi, promieniowania słonecznego i kosmicznego oraz wysokoenergetycznych protonów i cząstek.

The magnitude of internal heat flux is an important boundary condition for the restoration of thermal evolution of the Moon, and imposes certain limitations on geophysical and geochemical models of its internal structure. The study of the lateral global and regional distribution of internal heat flux is also necessary for the study of global and regional heterogeneities in the structure of the lunar crust and mantle.

The main scientific objectives of the project:

1. Temperature measurement on the surface of Moon polar latitudes during full lunation and evaluation of contribution of each of the main factors (internal heat flux, solar wind, reflected radiation from nearby lit areas, and lateral thermal conductivity) depending on level of illumination.

2. Measurement and analysis of dependence of thermal properties of regolith in the polar regions from three main factors – regolith composition, presence and composition of volatiles, and extremal thermal regime.

3. Study of internal heat flux of the Moon. This task has fundamental importance and crucial for understanding of origination, composition, internal structure and evolution of the Moon. It is impossible to build actual model of the Moon without combined geophysical, geochemical and petrological data.

To achieve the objectives the scientific equipment THERMO-LR is developed, which will allow performing measurements on the surface of lunar soil and temperature measurements in the borehole of at least 1,5 meters depth. Scientific equipment includes electronics unit, surface thermal sensor (STS), mounted on reclining device, and depth thermal sensors (DTS) with penetration device.

АСИМПТОТИКА

руководитель проекта
с российской стороны:

А. Попов

Руководитель проекта
с польской стороны:

Б.Атаманиук

Задачей проекта является развитие аналитических и численных методов описания волновых процессов в неоднородных средах с приложением к задачам распространения радиоволн и радиозондирования. Теория дифракции и распространения электромагнитных волн является основой большинства информационных технологий и методов дистанционного зондирования - от атомных до космических масштабов. Хотя фундаментальные законы электродинамики хорошо известны, прямые расчеты поведения волновых полей в реальных неоднородных средах весьма сложны и требуют больших вычислительных мощностей. В данном проекте развиваются асимптотические подходы, вскрывающие аналитические закономерности распространения волн в сложных средах и позволяющие создавать эффективные вычислительные алгоритмы решения прямых и обратных задач. Рассматриваются задачи **фундаментальной теории дифракции**, вопросы распространения радиоволн в ионосфере и межпланетной среде и проблемы подповерхностного зондирования.

Одним из эффективных асимптотических методов современной волновой теории является **параболическое уравнение** Леонтовича-Фока, аналогичное уравнению Шредингера в квантовой механике. Глубокий физический смысл и вычислительная эффективность сде-

ASYMPTOTYKA

kierownik projektu
ze strony Rosji:

A. Popov

kierownik projektu
ze strony Polski:

B. Atamaniuk

Celem projektu jest opracowanie metod analitycznych i numerycznych opisujących procesy falowe ośrodkach niejednorodnych w zastosowaniu do propagacji fal radiowych i radiowego sondowania. Teoria dyfrakcji i propagacji fal elektromagnetycznych jest podstawą dla większości technologii informatycznych systemów teledetekcji w skalach od atomowej do kosmicznej. Mimo, że podstawowe prawa elektrodynamiki są dobrze znane, bezpośrednie obliczenia pól falowych w rzeczywistych, niejednorodnych ośrodkach są bardzo złożone i wymagają dużej mocy obliczeniowej. W opisywanym projekcie rozwijane są metody asymptotyczne zajmujące się analitycznymi własnościami propagacji fal w złożonych ośrodkach pozwalające na tworzenie efektywnych algorytmów numerycznych do rozwiązywania zarówno problemów prostych jak i odwrotnych. Rozważamy: **podstawowe zagadnienia z teorii dyfrakcji**, zagadnienia rozchodzenia się fal radiowych w jonosferze, w ośrodku międzyplanetarnym i problemy podpowierzchniowego sondowania.

Jedną z efektywnych asymptotycznych metod współczesnej teorii falowej są paraboliczne równania Leontowicza-Focka, analogiczne do równania Schrödingera w mechanice kwantowej. Głęboki sens fizyczny i efektywność obliczeń numerycznych zrobiły z tego przybliże-

ляли это приближение базовым инструментом современной электродинамики. В данном проекте исследовались обобщения метода параболического уравнения и его связь с теорией псевдодифференциальных операторов.

Операторные методы позволили найти новые решения волновых уравнений, исследовать явления аномальной диффузии, понять аналитическую природу параболического приближения и граничных условий прозрачности.

В задаче **ионосферного распространения радиоволн** исследовалась эволюция гауссовых пучков в канале Земля - ионосфера, условия образования нелинейного волновода при распространении мощной радиоволны, отражение сверхширокополосного импульса от ионосферного слоя.

В связи с проблемой **подповерхностного зондирования** (георадар) была решена модельная задача восстановления пространственной плотности синхронно излучающих подповерхностных источников по измеренному на поверхности Земли электрическому полю.

В данном обзоре кратко излагаются некоторые результаты, полученные в ходе выполнения проекта.

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ДИФРАКЦИИ

Творческое сотрудничество польской и российской групп началось с обсуждения фундаментальных проблем теории дифракции. В классической работе Г.Д. Малюжинца [Малюжинец, 1955] рассматривалась задача излучения плоской гармонической волны с поверхности клина (рис. 1).

ния podstawowe narzędzie współczesnej elektrodynamiki. W tym projekcie były badane uogólniona metoda równania parabolicznego i jej związek z teorią operatorów pseudoróżniczkowych.

Metody operatorowe pozwoliły na znalezienie nowych rozwiązań równań falowych, zbadanie zjawisk anormalnej dyfuzji, zrozumienie analitycznego charakteru natury przybliżenia parabolicznego i warunków brzegowych dla ośrodków przezroczystych.

W zagadnieniu **jonosferycznej propagacji fal radiowych**, badana była ewolucja gaussowskich wiązek w kanale Ziemia-jonosfera, warunki formowania się nieliniowego falowodu podczas propagacji silnej fali radiowej, odbicia UWB (Ultrawideband) od warstwy jonosferycznej.

W odniesieniu do zagadnienia **sondowania podpowierzchniowego** rozwiązane zostało modelowe zagadnienie odtworzenia gęstości przestrzennej synchronicznych źródeł na podstawie zmierzonego pola elektrycznego na powierzchni Ziemi

W tym przeglądzie krótko podsumujemy wybrane wyniki otrzymane w trakcie realizacji projektu.

PODSTAWOWA TEORIA DYFRAKCJI

Współpracę polskich i rosyjskich grup zapoczątkowała dyskusja na temat podstawowych zagadnień teorii dyfrakcji. W klasycznej pracy Małyuzhynca [Małyuzhinec, 1955] rozważane było zadanie promieniowania fal harmoniczných z powierzchni klina (rys. 1).

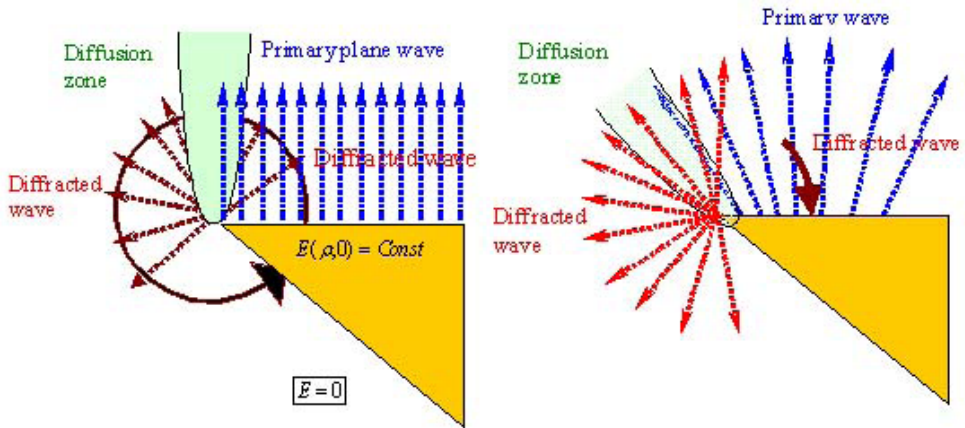


рис. 1. Излучение плоской волны, колеблющейся гранью клина, и более общее краевое условие
rys. 1. Promieniowanie fali płaskiej od oscylującej krawędzi klina i przypadek uogólnionych warunków brzegowych

Анализ точного решения показывает, что геометрическая граница освещенной области является источником дифрагированной цилиндрической волны $E = u(r, \varphi) \exp(ikr)$, описывающейся параболическим уравнением в лучевых координатах (r, φ) :

$$2ik \frac{\partial u}{\partial r} + ik \frac{u}{r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \varphi^2} = 0$$

Обобщение этого результата на случай произвольного распределения источников вдоль грани клина потребовало глубокого физического анализа [Zapunidi, Popov, 2007]. Примеры излучения неоднородных плоских или поверхностных волн (рис. 2) проясняют принцип фазового синхронизма: дифрагированная волна рождается на линии, где фазовая скорость первичной волны совпадает со скоростью волны, расходящейся от вершины клина. В общем случае возникает излучение с размытой границей тени и произвольной диаграммой направленности, описывающееся неоднородным параболическим уравнением:

Analiza dokładnego rozwiązania pokazuje, że geometryczna granica obszaru oświetlonego jest źródłem ugiętej cylindrycznej fali $E = u(r, \varphi) \exp(ikr)$, opisywanej parabolicznym równaniem we współrzędnych biegunowych (r, φ) :

Uogólnienie tego wyniku na przypadek, gdy źródła wzdłuż krawędzi klina rozmieszczone są dowolnie wymagało głębszej fizycznej analizy [Zapunidi, Popov, 2007]. Na Rys. 2 pokazane są przykłady promieniowania niejednorodnych fal płaskich lub powierzchniowych, wyjaśniające zasadę fazowej synchronizacji: fala dyfrakcyjna generowana jest na linii gdzie prędkości fazowe fali pierwotnej i fali rozchodzącej się z wierzchołka klina są takie same. W przypadku ogólnym mamy rozmytą granicą cienia i kierunki promieniowania opisywane niejednorodnym równaniem parabolicznym są dowolne:

$$2ik \frac{\partial u}{\partial r} + ik \frac{u}{r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \varphi^2} \approx -A(r, \varphi)$$

Задача отражения импульсного сигнала от границы плазменного полупространства, характеризуемого законом дисперсии Лоренца исследовалась в работах А. Циарковского [Ciarkowski, 2002; Ciarkowski, 2003].

Zagadnienie odbicia sygnału impulsowego od półprzestrzeni plazmy, opisywanego prawem dyspersji Lorentza badane było w pracach A. Ciarkowskiego [Ciarkowski, 2002; Ciarkowski, 2003].

$$n(\omega) = \sqrt{1 - \frac{b^2}{\omega^2 - \omega_0^2 + 2i\delta\omega}} = \sqrt{\frac{(\omega - \omega_2)(\omega - \omega_4)}{(\omega - \omega_1)(\omega - \omega_3)}}$$

Равномерная асимптотика позволяет описать головную часть отраженного импульса, определяющуюся рабочей и плазменной частотами ω и b , и его «хвост», зависящий от резонансной частоты ω_0 и поглощения δ . Разработанный аналитический аппарат был использован в совместной работе, посвященной импульсному радиозондированию ионосферы [Popov, Ciarkowski, 2008; 2009]. Рассматривалось отражение сверхширокополосного электромагнитного импульса от слоя ионосферной плазмы с линейно растущей электронной концентрацией $N_e(z) = p \frac{mc^2}{4\pi e^2} (z - h)$. Импульсная реакция среды $L(ct) = p^{1/3} \Lambda(\tau)$ (отклик на зондирующий дельта-импульс) дается преобразованием Фурье монохроматического коэффициента отражения:

Jednolite rozwiązanie asymptotyczne pozwala opisać główną część (głowę) odbitego impulsu, określonego przez częstotliwości pracy i plazmy ω i b , i jego „ogon”, zależący od częstotliwości rezonansowej ω_0 i absorpcji δ . Opracowana metoda analityczna wykorzystana została we wspólnych pracach [Popov, Ciarkowski, 2008; 2009], poświęconych impulsowemu sondowaniu. Badano odbicie ultra szerokopasmowego impulsu od jonosferycznej liniowej warstwy plazmy $N_e(z) = p \frac{mc^2}{4\pi e^2} (z - h)$. Impulsowa odpowiedź ośrodka $L(ct) = p^{1/3} \Lambda(\tau)$ (odpowiedź na impulsu typu delty Diraca) dana jest transformacją Fourier monochromatycznego współczynnika odbicia:

$$\tilde{R}(q) = \frac{qv(-q^2) + iv'(-q^2)}{qv(-q^2) - iv'(-q^2)}$$

Здесь $\tau = p^{1/3} ct$ – нормированное время, $q = \frac{\omega}{c} p^{-1/3}$ – нормированное волновое число, а $v(t) = \sqrt{\pi} Ai(t)$ – функция Эйри-Фока. Несмотря на сложность подынтегрального выражения, ин-

Gdzie $\tau = p^{1/3} ct$ – unormowany czas, $q = \frac{\omega}{c} p^{-1/3}$ – unormowana liczba falowa, а $v(t) = \sqrt{\pi} Ai(t)$ – funkcja Airy-Focka. Całka $\Lambda(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{R}(q) e^{-iq\tau} dq$,

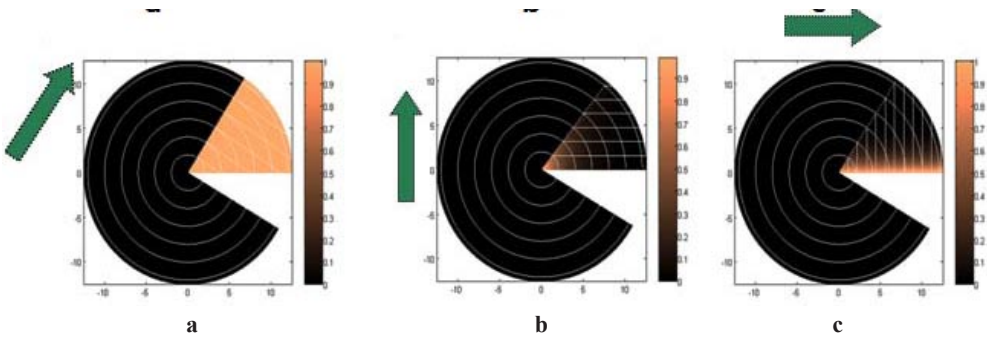


рис. 2. Излучение волн источником, распределенным вдоль грани клина: область существования и картина волновых фронтов для однородной (а), неоднородной (b) и поверхностной (c) плоской волны

rys. 2. Promieniowanie źródła fal, rozłożonych wzdłuż krawędzi klina: obszar istnienia i obraz frontów falowych dla jednorodnej (a) i niejednorodnej (b) płaskiej fali powierzchniowej (c)

теграл $\Lambda(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{R}(q) e^{-iq\tau} dq$ может быть вычислен асимптотическими методами (см. рис. 3). Начальный участок отраженного импульса описывается быстро сходящимся рядом Тейлора $\Lambda(\tau) \sim -\frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n}{(3n-1)!} \left(-\frac{\tau}{2}\right)^{3n-1}$, а при больших значениях τ интеграл сводится к вкладу седловых точек $q_s = \pm\sqrt{\tau}/2$ в комплексной плоскости q и его асимптотика выражается через вторую функцию Эйри $u(t) = \sqrt{\pi}Bi(t)$:

$$\Lambda(\tau) \sim \frac{2^{-2/3}}{\sqrt{\pi}} u\left(-2^{-2/3}\tau\right) \approx \frac{\tau^{-1/4}}{\sqrt{2\pi}} \cos\left(\frac{\tau^{3/2}}{3} + \frac{\pi}{4}\right)$$

В работе [Popov, Ciarkowski, 2008] была указана возможность восстановления неизвестного профиля электронной концентрации $N_e(z)$ по измеренной дисперсии сверхширокополосного зондирующего импульса $f(ct)$. Используя ВКБ приближение, можно показать, что при произвольном профиле $N_e(z)$ импульсный отклик среды $L(ct)$ определяется аналогичной асимптотической формулой:

помимо сложности функции подкалковой, может быть вычислена методами асимптотическими (Rys. 3). Начальной частью отбитого сигнала описывается быстро сходящимся рядом Тейлора $\Lambda(\tau) \sim -\frac{1}{2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n}{(3n-1)!} \left(-\frac{\tau}{2}\right)^{3n-1}$, а для больших значений τ интеграл сводится к вкладу седловых точек $q_s = \pm\sqrt{\tau}/2$ в комплексной плоскости q и его асимптотика выражается через вторую функцию Эйри $u(t) = \sqrt{\pi}Bi(t)$

В работе [Popov, Ciarkowski, 2008] показано, что из измерений ультраширокополосного сигнала $f(ct)$ возможно восстановление профиля концентрации электронов $N_e(z)$. Применяя приближение ВКБ, можно доказать, что для произвольного профиля $N_e(z)$ импульсная характеристика среды $L(ct)$ определяется аналогичным асимптотическим выражением:

$$L(\sigma) \approx \frac{1}{\sqrt{\pi I''(k)}} \cos \left[2I(k) - k\sigma - \frac{\pi}{4} \right]$$

Здесь $I(k) = \int_h^{z_0(k)} \sqrt{k^2 - k_p^2(z)} dz - \frac{\pi}{2}$ – фаза коэффициента отражения, зависящая от волнового числа $k = \frac{\omega}{c}$ и плазмен-

ного параметра $k_p(z) = \sqrt{\frac{4\pi e^2}{mc^2} N_e(z)}$, a .

В практической задаче импульсного зондирования информация о профиле электронной концентрации заключена в аргументе осциллирующего «хвоста» отраженного импульса

gdzie $I(k) = \int_h^{z_0(k)} \sqrt{k^2 - k_p^2(z)} dz - \frac{\pi}{2}$ – faza współczynnika odbicia zależna od liczby falowej $k = \frac{\omega}{c}$ i parametru plazmo-

wego $k_p(z) = \sqrt{\frac{4\pi e^2}{mc^2} N_e(z)}$, a . W praktycznych zagadnieniach sondowania impulsowego informacja o profilu koncentracji elektronów można znaleźć w argumencie oscylującego „ogona” odbitego impulsu

$$g(ct) = \int_0^{ct-2h} f(ct-2h-\sigma)L(\sigma)d\sigma$$

Спектральный анализ дает зависимость времени прихода монохроматической компоненты сигнала от частоты: $T(k) = \frac{2h}{c} + 2I'(k)$. Вычисляя производную, получаем классическое

Analiza widmowa daje składowej czasowej monochromatycznego sygnału przychodzącego od częstości: $T(k) = \frac{2h}{c} + 2I'(k)$. Z wyliczenia pochodnej otrzymujemy klasyczne wyrażenie na

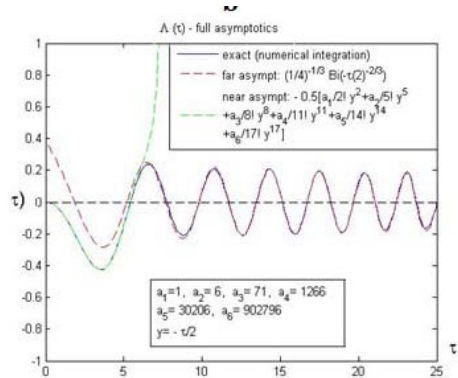
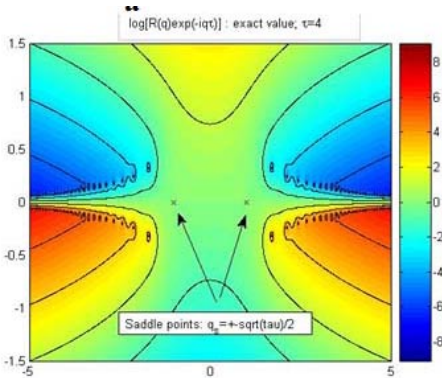


рис. 3. (а) Рельеф подынтегральной функции $\tilde{R}(q)e^{-iq\tau}$ и контур интегрирования, проходящий через седловые точки; **(б)** импульсная реакция плазменного слоя с линейно растущей электронной концентрацией – точное решение и асимптотическое представление

rys. 3. (а) Wykres funkcji podcałkowej $\tilde{R}(q)e^{-iq\tau}$ i kontur całkowania w płaszczyźnie zespolonej, przechodzący przez punkty siodłowe; **(б)** impulsowa odpowiedź warstwy plazmowej z linowo rosnącą koncentracją składowej elektronowej – dokładne rozwiązanie i asymptotyczna reprezentacja

уравнение вертикального зондирования ионосферы [Budden, 1985], аналитическое решение которого определяет профиль плазменного волнового числа в виде обратной функции $z(k_p)$:

$$T(k) = \frac{2k}{c} \int_h^{z_p(k)} \frac{dz}{\sqrt{k^2 - k_p^2(z)}}$$

Эксперименты по получению моноимпульсных ионограмм были проведены в ИЗМИРАН.

ПАРАБОЛИЧЕСКОЕ УРАВНЕНИЕ И ОПЕРАТОРНЫЕ МЕТОДЫ

В работах Б.Атаманиук и А.Турского [Turski, Atamaniuk, 2006; Atamaniuk, Turski, 2008] развиваются операторные методы решения задач математической физики. В частности, классический аппарат производных дробного порядка (интегралов Римана-Лиувилля)

$$D^q f(x) = \frac{1}{\Gamma(1-q)} \frac{d}{dx} \int_c^x (x-\xi)^{-q} f(\xi) d\xi$$

обобщающий понятие производной $Du = \frac{du}{dx}$, используется для построения новых решений волнового уравнения. В простейшем случае одномерного уравнения Гельмгольца $D^2u + k^2u = 0$ факторизация дифференциального оператора

$$D^2 + k^2 = (D - ik)(D + ik) = (D^{1/2} - e^{i\pi/4}\sqrt{k})(D^{1/2} + e^{i\pi/4}\sqrt{k})(D^{1/2} - e^{-i\pi/4}\sqrt{k})(D^{1/2} + e^{-i\pi/4}\sqrt{k})$$

порождает, кроме стандартных плоских волн $u(x) = \exp(\pm ikx)$, четыре «нелокальные собственные функции»:

$$u_{1,2}(x) = (D^{1/2} \mp e^{i\pi/4}\sqrt{k}) \exp(ikx),$$

pienowe sondowanie jonosfery [Budden, 1985], analityczne rozwiązanie tego równania określa profil plazmowej liczby falowej w zależności od funkcji odwrotnej $z(k_p)$:

$$z(k_p) = h + c \int_0^{k_p} \frac{T(k)dk}{\sqrt{k_p^2 - k^2}}$$

W IMIRAN przeprowadzony były eksperymenty w celu uzyskania jednoimpulsowych (monopulse) jonogramów.

RÓWNANIA PARABOLICZNE I METODY OPERATOROWE

W pracach B. Atamaniuk i A. Turskiego [Turski, Atamaniuk, 2006; Atamaniuk, Turski, 2008] rozwijane są metody operatorowe rozwiązywania zagadnień fizyki matematycznej. W szczególności, klasyczny aparat równań różniczkowych rzędu ułamkowego (całka Riemann-Liouville)

Uogólniający pojęcie pochodnej $Du = \frac{du}{dx}$, wykorzystywany jest do otrzymania nowych rozwiązań równania falowego. W najprostszym przypadku jednowymiarowego równania $D^2u + k^2u = 0$ faktoryzacja operatora różniczkowego

Daje, oprócz standardowych fal płaskich $u(x) = \exp(\pm ikx)$, cztery „nielokalne funkcje własne”:

$$u_{3,4}(x) = (D^{1/2} \mp e^{-i\pi/4}\sqrt{k}) \exp(ikx)$$

выражающиеся через интегралы Френеля. В частности,

$$u_1(x) = (D^{1/2} - e^{i\pi/4} \sqrt{k}) \exp(ikx) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{1}{\sqrt{x}} - ik e^{ikx} \int_x^\infty e^{-ik\xi} \frac{d\xi}{\sqrt{\xi}} \right) = \sqrt{\frac{k}{\pi}} e^{ikx} \int_x^\infty \exp(-it^2) \frac{d\xi}{t^2}$$

Такие «собственные функции», удовлетворяющие исходному уравнению с точностью до степенных поправок порядка $x^{-3/2}$, удобны для построения асимптотических решений волнового уравнения. Их физический смысл связан с дифракционными эффектами, что проявляется при факторизации волнового оператора $\Delta + k^2$ в случае двух пространственных переменных.

Другой тип псевдодифференциальных операторов возникает при построении асимптотических решений, описывающих однонаправленное распространение волновых пучков вдоль выделенного направления. В простейшем случае двумерного уравнения Гельмгольца

$$\frac{\partial^2 E}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 E}{\partial y^2} + k^2 E = 0$$

Хорошо известное параболическое уравнение Леонтовича-Фока [Фок, 1970] может рассматриваться как результат приближенной факторизации волнового оператора. Формальное разложение

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + k^2 = \left(\frac{\partial}{\partial x} - i\sqrt{k^2 + D^2} \right) \left(\frac{\partial}{\partial x} + i\sqrt{k^2 + D^2} \right), \quad D \equiv \frac{\partial}{\partial y}$$

разделяет решения, соответствующие волнам, распространяющимся в сторону возрастания или убывания переменной x : $\frac{\partial E^\pm}{\partial x} = \pm i(k^2 + D^2)^{1/2} E^\pm$, а замена псевдо-дифференциального оператора двумя членами ряда Тейлора $(k^2 + D^2)^{1/2} \approx k + \frac{1}{2k} D^2$ и переход к

выражающие się poprzez całki Fresnela. W szczególności,

Rozwiązania te spełniają wyjściowe równanie z dokładnością do poprawek rzędu $x^{-3/2}$ i przy ich pomocy można konstruować rozwiązania asymptotyczne równania falowego. Sens fizyczny tych rozwiązań związany jest z efektami dyfrakcyjnymi, co uwidacznia się, gdy faktoryzujemy operator falowy $\Delta + k^2$ w przypadku dwóch zmiennych przestrzennych.

Inny typ operatorów pseudoróżniczkowych pojawia się, gdy konstruujemy asymptotyczne rozwiązania opisujące jednokierunkową propagację wiązek falowych wzdłuż preferowanego kierunku. W najprostszym przypadku dwuwymiarowego równania Helmholtza

Dobrze znane paraboliczne równanie Leontovicha-Focka [Фок, 1970] może być rozpatrywane, jako wynik przybliżonej faktoryzacji równania falowego. Formalny rozkład

separuje rozwiązania odpowiadające falom, rozchodzącym się w kierunku wzrostu lub spadku zmiennej x : $\frac{\partial E^\pm}{\partial x} = \pm i(k^2 + D^2)^{1/2} E^\pm$, zamieniając operator pseudoróżniczkowy (frakcyjnalny) dwoma członami szeregu Taylora $(k^2 + D^2)^{1/2} \approx k + \frac{1}{2k} D^2$ dalej zakładając,

медленно меняющейся волновой амплитуде $u(x,y)$ по формуле $E^+ = u(x,y)e^{ikx}$ приводит к дифференциальному уравнению $2ik \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0$, описывающему распространение узконаправленных волновых пучков вдоль оси x . Использование рациональной аппроксимации

$$\text{Паде} \quad \left(k^2 + D^2\right)^{1/2} \approx \frac{k + \frac{3}{4k} D^2}{1 + \frac{1}{4k^2} D^2} \quad \text{так}$$

же сводит псевдодифференциальный волновой оператор к дифференциальному и порождает так называемое широкоугольное параболическое уравнение $2ik \left(1 + \frac{1}{4k^2} \frac{\partial^2}{\partial y^2}\right) \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0$, предложенное Дж. Клербаутом [Claerbout, 1985] для задач сейсмического зондирования.

Вычислительные преимущества метода параболического уравнения, указанные в пионерских работах Малюжинца [Малюжинец, 1959; Малюжинец и др., 1964], сделали его универсальным средством расчета волновых полей в самых различных областях физики – от гидроакустики до распространения радиоволн и рентгеновской оптики [Tappert, 1977; Levy, 2000; Kopylov et al., 1995]. Важным элементом численных алгоритмов, реализующих решение параболического волнового уравнения, является постановка и аппроксимация граничных условий, не приводящих к возникновению паразитных отражений от краев вычислительной области. Радикальным решением является использование нелокального граничного условия прозрачности,

że amplituda fali $u(x,y)$ jest wolnozmienna i dana wzorem $E^+ = u(x,y)e^{ikx}$ otrzymujemy równanie różniczkowe

$$2ik \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0, \text{ które opisuje rozchodzenie się wąsko ukierunkowanych wiązek falowych wzdłuż osi } x. \text{ Również wykorzystanie wymiernego przybliżenia}$$

$$\text{Padé} \quad \left(k^2 + D^2\right)^{1/2} \approx \frac{k + \frac{3}{4k} D^2}{1 + \frac{1}{4k^2} D^2}$$

sprowadza frakcyjny operator falo- wy do operatora różniczkowego, generuje tak zwane szerokokątne równanie $2ik \left(1 + \frac{1}{4k^2} \frac{\partial^2}{\partial y^2}\right) \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0$, które J.F. Claerbout [Claerbout, 1985] zaproponował do opisu problemów sondowania sejsmicznego.

Maluzhiynets w swoich pionierskich pracach [Малюжинец, 1959; Малюжинец и др., 1964] pokazał obliczeniowe zalety metody równań parabolicznych, które zrobiły z niej uniwersalne narzędzie obliczeniowe do obliczania pól falowych w różnych dziedzinach fizyki – od hydroakustyki do fal elektromagnetycznych i optyki rentgenowskiej [Tappert, 1977; Levy, 2000; Kopylov et al., 1995]. Ważnym elementem obliczeń numerycznych, które realizują rozwiązania parabolicznych równań falowych jest sformułowanie przybliżonych warunków brzegowych, które nie prowadzą do parasożytniczych od krawędzi domeny. Radikalnym rozwiązaniem jest wykorzystanie przezroczystych nielokalnych warunków granicznych,

$$\frac{\partial u}{\partial z}(x,a) = -\sqrt{\frac{2k}{\pi i}} \frac{\partial}{\partial x} \int_0^x u(\xi,a) \frac{d\xi}{\sqrt{x-\xi}} \equiv -\sqrt{\frac{2k}{i}} \frac{\partial}{\partial x} u(x,a)$$

предложенного в работах российских участников проекта [Baskakov, Popov, 1991; Popov, 2006]. Его вывод, сводящийся к факторизации параболического оператора Леонтовича аналогичен построению уравнений односторонней поперечной диффузии [Turski et al., 2003].

które były zaproponowane w pracach [Baskakov, Popov, 1991; Popov, 2006] rosyjskich uczestników projektu. Wyrowadzenie sprowadza się do faktoryzacji parabolicznego operatora Leontowicha i jest analogiczne jak w przypadku wyrowadzenia równań jednostronnej poprzecznej dyfuzji [Turski et al., 2003].

$$2ik \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} = \left(\frac{\partial}{\partial z} + \sqrt{-2ik \frac{\partial}{\partial x}} \right) \left(\frac{\partial}{\partial z} - \sqrt{-2ik \frac{\partial}{\partial x}} \right)$$

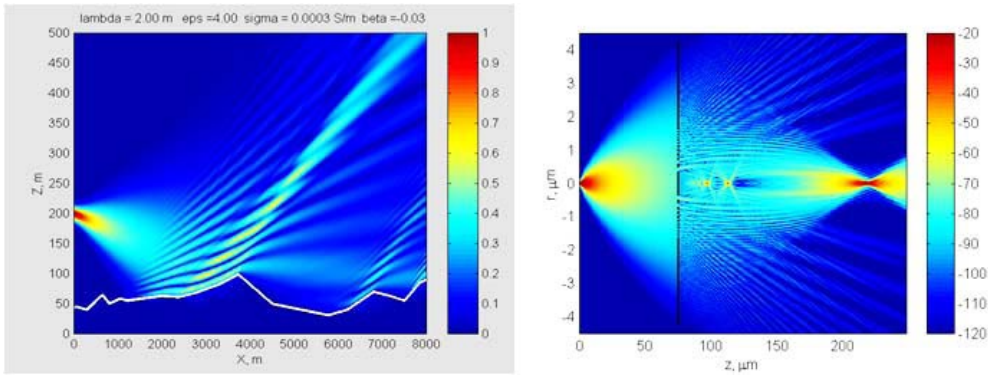


рис. 4. Использование граничных условий прозрачности для ограничения вычислительной области при расчете распространения радиоволн и фокусировки рентгеновского излучения

rys. 4. Wykorzystanie przezroczystych warunków w celu ograniczenia obszaru obliczeń numerycznych dla obliczenia propagacji fal radiowych i ogniskowania promieniowania rentgenowskiego

Другим приложением развивавшейся в работах А. Турского и соавторов теории является описание процессов аномальной диффузии, возникающей в аморфных полупроводниках, жидких кристаллах, полимерах и биологических системах. Было исследовано уравнение диффузии в дробных производных, описывающее случайные процессы с длинным «хвостом» распределения вероятности длины и времени ожидания случайных скачков частиц, имеющим не гауссов, а степенной характер, что приводит к замене стандартного уравнения диф-

Innym zastosowaniem operatorów pseudoróżniczkowych rozwijanym przez A.J. Turskiego i współautorów jest wykorzystanie ich do badania procesów anomalnej dyfuzji, która występuje w amorficznych półprzewodnikach, ciekłych kryształach polimerach i układach biologicznych. Zbadano frakcjonalne równanie dyfuzji opisujące procesy losowe, w których rozkłady prawdopodobieństwa charakteryzują się długimi „ogonami”. Prowadzi to zamiany standardowego równania dyfuzji $\partial_t W(x,t) = \frac{1}{2} \partial_x^2 W(x,t)$ równaniem

фузии $\partial_t W(x,t) = \frac{1}{2} \partial_x^2 W(x,t)$ уравнением в дробных производных $\partial_t W(x,t) = D_{|x|}^\alpha W(x,t)$, $0 < \alpha < 2$ или $(\partial_t + \partial_x^2)^\beta W(x,t) = \frac{W(x,0)}{\Gamma(1-\beta)}$ (рис. 5).

frakcjonalnym $\partial_t W(x,t) = D_{|x|}^\alpha W(x,t)$, $0 < \alpha < 2$ lub $(\partial_t + \partial_x^2)^\beta W(x,t) = \frac{W(x,0)}{\Gamma(1-\beta)}$ (rys. 5).

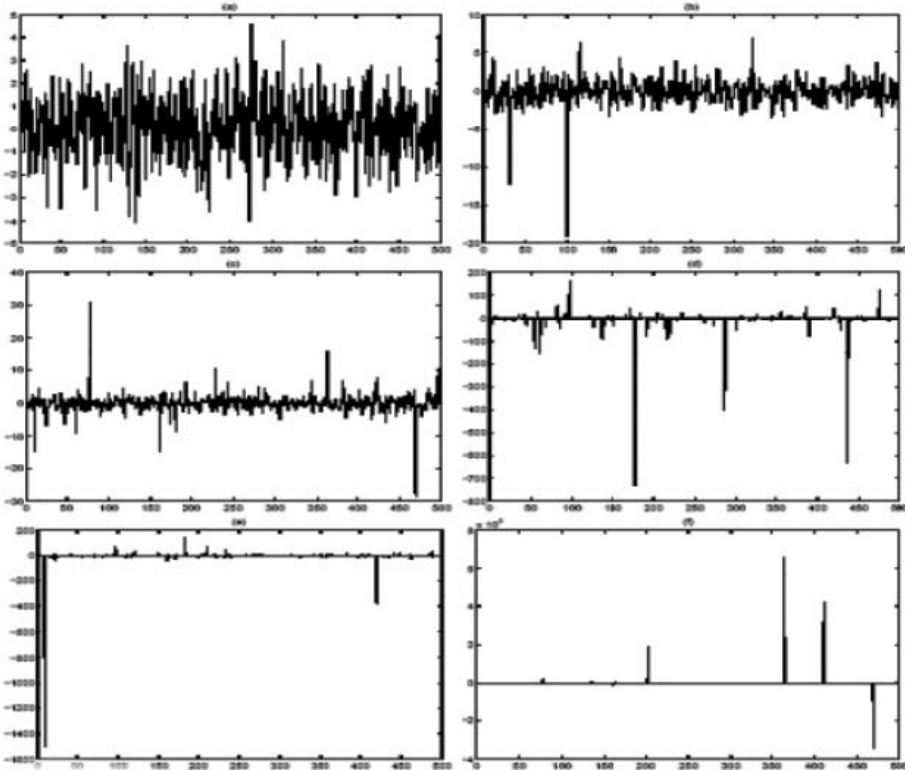


рис. 5. Примеры случайных последовательностей с параметром $\alpha = 2,0; 1,95; 1,5; 0,85; 0,45$
 rys. 5. Przykłady sekwencji losowych z parametrem $\alpha = 2,0; 1,95; 1,5; 0,85; 0,45$

ИОНОСФЕРНОЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

В совместной работе [Molotkov, Atamaniuk, 2011] исследовалось наклонное распространение узких пучков декаметровых радиоволн в ионосфере и возникающие при этом нелинейные эффекты взаимодействия электромагнитного излучения с ионосферной плазмой. Эта задача интересна в связи с

PROPAGACJA FAL RADIOWYCH W JONOSFERZE

We wspólnych pracach [Molotkov, Atamaniuk, 2011] Zbadano ukośne rozchodzenie się wąskich, dekametrowych wiązek fal radiowych w jonosferze i wynikające stąd nieliniowe oddziaływanie promieniowania elektromagnetycznego z plazmą jonosferyczną. Zagadnienie to jest związane z eksperymentalnymi da-

экспериментальными данными об образовании нелинейного волнового канала при наклонном и возвратно-наклонном зондировании ионосферы мощным радиоизлучением [Бочкарев, и др., 1979; Калинин, 2012]. Этот эффект подтверждается численным решением нелинейного параболического уравнения – рис. 6:

$$2ik \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + k^2 [\varepsilon(x, z, |u|) - 1] u = 0$$

Физической механизм нелинейной фокусировки связан с повышением диэлектрической проницаемости вследствие разогрева ионосферной плазмы мощным радиоизлучением [Черкашин, Еременко, 2009].

nymi, które pokazują, że przy ukośnym i powrotno ukośnym sondowaniu jonosfery silną wiązkową radiową tworzy się nieliniowy kanał falowy. [Бочкарев, и др., 1979; Калинин, 2012]. Efekt ten potwierdzony został numerycznym rozwiązaniem równania – rys. 6:

Fizyczny mechanizm nieliniowego ogniskowania związany jest ze wzrostem stałej dielektrycznej w wyniku grzania plazmy jonosferycznej silnym promieniowaniem radiowym [Черкашин, Еременко, 2009].

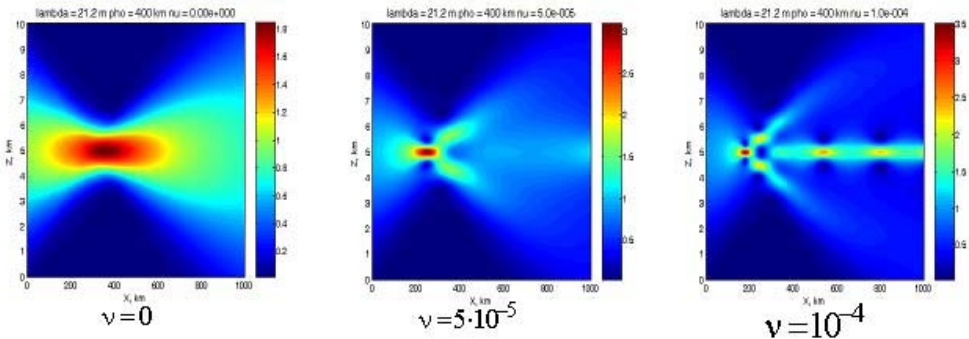


рис. 6. Преобразование сходящегося гауссова пучка в нелинейную волноводную моду при увеличении параметра нелинейности

rys. 6. Konwersja zbieżnej wiązki Gaussa przy wzroście parametru nieliniowości w nieliniowy mod falowy

Строгий асимптотический подход к описанию сосредоточенных нелинейных волн в неоднородных средах был развит в работах И.А. Молоткова [Молотков, 2003]. Им было предложено обобщение вариационного принципа Ферма

Ścisłe asymptotyczne podejście do opisu rozchodzenia się nieliniowych fal w ośrodkach niejednorodnych został opracowany w pracach I.A. Mołotkova [Молотков, 2003]. W pracy sformułowano uogólnioną zasadę wariacyjną Fermata

$$\delta \int n(x, z, A) ds = 0, \quad n = \frac{\varepsilon \left(\varepsilon + \sqrt{\varepsilon^2 + 4A^2 a^2} \right) + \frac{4}{3} A^2 a^2}{\left(\varepsilon + \sqrt{\varepsilon^2 + 4A^2 a^2} \right)^{3/2}}$$

позволяющее найти траекторию мощного сосредоточенного пучка, зависящую как от неоднородности среды $\varepsilon(x,z)$, так и от полной энергии волны A^2 . В приложении к задаче ионосферного распространения коротких радиоволн эта теория предсказывает возможность создания искусственного волнового канала в окрестности максимума F -слоя (рис. 7а) при напряженности электрического поля сопоставимой с характерным значением плазменного поля $E_p = \frac{\omega}{c} \sqrt{3mk\delta T_e} \sim 0,1$ В/м [Molotkov et al., 2013; Atamaniuk et al., 2013]. Кроме того, оказывается, что, несмотря на малость нелинейных эффектов, они могут приводить к существенному искажению лучевых траекторий при приближении к уровню нелинейного волновода (рис. 7б).

позволяającą znaleźć trajektorię silnej wiązki falowej, zależnej zarówno od niejednorodności ośrodka $\varepsilon(x,z)$, jak i od całkowitej energii fali A^2 . W zastosowaniu do propagacji krótkich fal w jonosferze teoria ta przewiduje możliwość pojawienia się, w pobliżu maksimum warstwy F, sztucznego kanału falowego (rys. 7a) gdy natężenie pola elektrycznego jest porównywalne z wartością pola plazmy $E_p = \frac{\omega}{c} \sqrt{3mk\delta T_e} \sim 0,1$ V/m [Molotkov et al., 2013; Atamaniuk et al., 2013]. Oprócz tego, okazuje się, że nawet słabe efekty nieliniowe przy zbliżaniu się do poziomu nieliniowego falowodu, mogą prowadzić do istotnego zniekształcenia trajektorii promieni (rys. 7b).

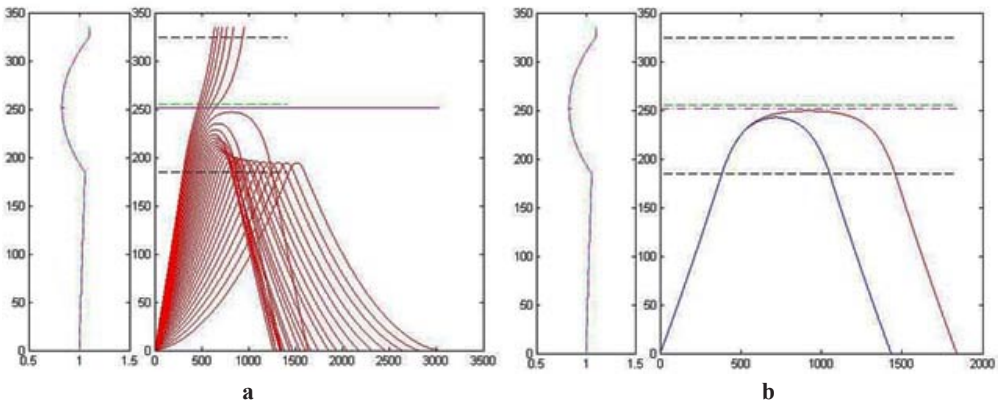


рис. 7. Картина лучевых траекторий в параболическом слое (в линейном приближении) и ось нелинейного волнового канала (а); искажение траектории луча вблизи уровня нелинейного волновода (б)

rys. 7. Grafika trajektorii w warstwie parabolicznej (przybliżenie liniowe) i oś nieliniowego kanału (а); zniekształcenie trajektorii promienia w pobliżu osi nieliniowego (b)

Для оценки возможности запитки нелинейного волновода передатчиком, расположенном на земной поверхности, была изучена эволюция гауссовых пучков радиоволн, распространяющихся

Aby ocenić możliwość zasilania nieliniowego falowodu nadajnikiem znajdującym się na powierzchni Ziemi, badano ewolucje Gaussowskich wiązek fal radiowych, rozchodzących się w nie-

ся вдоль заданной лучевой траектории в неоднородной ионосфере [Егоров и др., 2012]. При отражении от ионосферного слоя гауссов пучок испытывает фокусировку, компенсирующую дифракционную расходимость и приводящую к существенному увеличению интенсивности электрического поля. Расчеты показывают, что для фокусировки гауссова пучка в окрестности оси нелинейного волнового канала (рис. 8) и достижения величины электрического поля порядка $E_p \sim 0,1-0,3$ В/м требуется использование передатчика мощностью порядка сотен киловатт, работающего на частоте близкой к максимально применимой, и фазированной антенной решетке с километровой апертурой.

w jednorodnej jonosferze wzdłuż zadanej trajektorii wiązki [Егоров и др., 2012]. Po odbiciu od warstwy jonosfery wiązka gaussowska jest ogniskowana, kompensując dyfrakcję, co prowadzi do istotnego wzrostu natężenia pola. Obliczenia pokazały, że dla zogniskowania wiązki gaussowskiej w otoczeniu osi nieliniowego falowodu (rys. 8) i osiągnięcia natężenia pola elektrycznego rzędu $E_p \sim 0,1-0,3$ V/m konieczne jest wykorzystanie nadajnika rzędu kilkuset kilowatów, pracującego na częstotliwości zbliżonej do maksymalnej, i macierzą antenową z kilometrową aperturą.

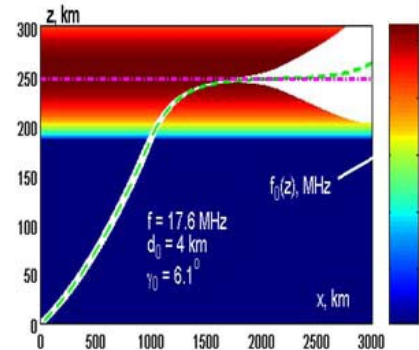
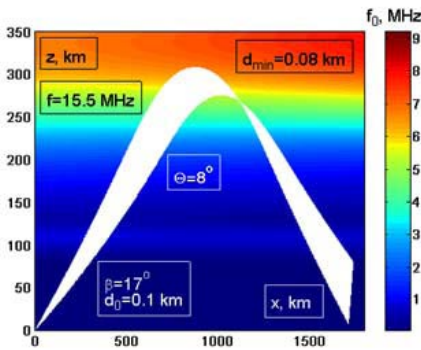


рис. 8. Примеры эволюции ширины гауссова пучка для различных от частот и начальных углов возвышения

rys. 8. Przykłady ewolucji szerokości wiązki gaussowskiej dla różnych kątów elewacji

ТЕОРИЯ КОЛЕБАНИЙ И ВОЛНЫ В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

В работе по этому разделу проведены исследования нелинейных туннельных эффектов и явлений нелинейного гистерезиса. Аналитически изучены эффекты туннелирования в случае нелинейного барьера постоянной высоты. Использован метод малоамплитудного приближения. Получены явные фор-

REZONANS PARAMETRYCZNY I FALE W OŚRODKACH PERIODYCZNYCH

W tym rozdziale prezentujemy między innymi prace, w których prowadzone są badania nad nieliniowymi efektami tunelowania i nieliniowej histerezy. Badano analitycznie efekt tunelowania dla przypadku nieliniowej bariery stałej wysokości. Zastosowano przybliżenie małej amplitudy. Otrzymano wyrażenia

мулы для поля как внутри барьера, так и после его прохождения. Специально исследовано взаимодействие волны с низким барьером, непрозрачным для линейной среды и прозрачным для нелинейной. Проведен численный анализ, который позволил расширить амплитудный диапазон полученных результатов [Молотков, Маненков, 2007].

Изучены волны нагрузки и разгрузки в нелинейной релаксирующей и диссипативной среде типа уплотняемого грунта. Для построения решений, описывающих волны в такой среде, использованы метод Стокса и малодистантный асимптотический метод. Получены явные приближенные решения при различных значениях параметров релаксации и вязкости. Описано влияние типа среды на вид гистерезисных кривых [Молотков, 2008].

Теория распространения волн в периодических средах тесно связана с явлением параметрического резонанса, возникающего при периодической модуляции собственной частоты линейного осциллятора

$$u'' + \omega^2(t)u = 0, \quad \omega(t+T) = \omega(t)$$

Несмотря на полуторавековую историю вопроса, начинающуюся с фундаментальных результатов Флоке и Хилла, физическая теория параметрического резонанса ограничивалась случаем малых возмущений и хорошо изученным уравнением Матье. В работе [Попов, 2008] предложен аналитический подход, позволяющий построить континуум точных решений уравнения колебаний и в замкнутом виде найти инкремент параметрического резонанса. Метод основан на переходе к новой не-

на поле zarówno wewnątrz jak i na zewnątrz bariery. W szczególności badane były fale o niskiej barierze nieprzezroczystej w przypadku ośrodka liniowego ale przezroczystej dla nieliniowego. Przeprowadzona analiza numeryczna pozwoliła rozszerzyć zakres amplitudy dla otrzymanych rezultatów [Молотков, Маненков, 2007].

Zbadano fale obciążenia i odprężenia w nieliniowym, relaksacyjnym z dyssypacją ośrodkiem typu ubitego gruntu. Rozwiązania równań falowych w takim ośrodku otrzymywane są przy użyciu metody Stokesa i metody najszybszego spadku. Otrzymano przybliżone rozwiązania dla różnych parametrów relaksacji i lepkości. Opisano wpływ typu ośrodka na postać krzywej histerezy [Молотков, 2008].

Teoria propagacji fal w ośrodkach periodycznych jest ściśle związana ze zjawiskiem rezonansu parametrycznego, występującego podczas okresowej modulacji wartości własnych oscylatora liniowego

Pomimo półtorawiekowej historii problemu, począwszy od fundamentalnych wyników Floqueta i Hilla, fizyczna teoria rezonansu magnetycznego ograniczała się do przypadku małych zaburzeń i dobrze znanego równania Mathieu. W pracy [Popov, 2008] zaproponowano podejście analityczne pozwalające zbudować kontinuum ścisłych rozwiązań równania oscylacyjnego i przedstawić w zamkniętej postaci przyrost rezonansu parametrycznego. Metoda bazuje na przejściu

зависимой переменной, определенной как фаза ангармонических колебаний:

$$\psi(t) = \text{arccctg} \frac{u'(t)}{\omega(t)u(t)}, \quad \omega(t) = \Omega(\psi)$$

Было показано, что при замене $u = U(\psi)$, $t = T(\psi)$ уравнение колебаний преобразуется в систему нелинейных уравнений, интегрирующихся при любой зависимости $\Omega(\psi)$, а резонанс определяется единственной гармоникой b_{2m} в ряде Фурье для функции $g(\psi) = -\ln \Omega(\psi)$.

da nowej zmiennej niezależnej – fazy drgań anharmonicznych:

Pokazano, że przy zamianie $u = U(\psi)$, $t = T(\psi)$ równanie oscylatora przechodzi w nieliniowy układ równań, całkowalny dla dowolnej zależności $\Omega(\psi)$, a rezonans określony jest przez jedną b_{2m} w szeregu Fouriera na funkcję $g(\psi) = -\ln \Omega(\psi)$.

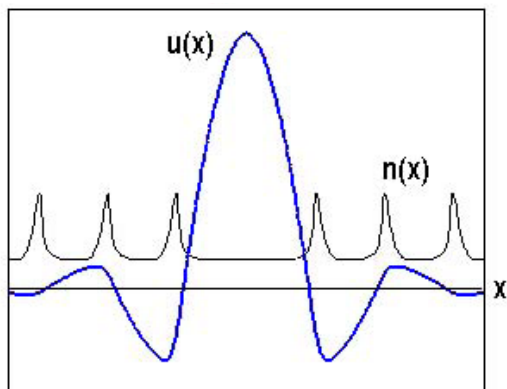
$$g(\psi) = a_0 + \sum_{m=1}^{\infty} (a_{2m} \cos 2m\psi + b_{2m} \sin 2m\psi)$$

Аналогично выводится явная формула для декремента затухания волн в периодической среде. Подобно тому как ребенок легко находит оптимальный способ раскачивания качелей, подстраиваясь к текущей фазе колебаний, метод фазового параметра позволяет найти оптимальный профиль показателя преломления в периодической оболочке брэгговского волновода [Попов и др., 2009], обеспечивающий быстрое затухание электромагнитного поля – рис. 9b.

Analogicznie wyprowadza się jawną postać dla współczynnika tłumienia fal w ośrodku periodycznym. Podobnie jak dziecko łatwo znajduje optymalną metodę rozbijania huśtawki dostrajając się do fazy drgań, metoda parametru fazowego pozwala znaleźć optymalny zapewniający szybkie tłumienie profil współczynnika [Попов и др., 2009] pola elektromagnetycznego – Rys. 9b.



a



b

рис. 9. Раскачивание качелей (а); профиль показателя преломления, обеспечивающий быстрое затухание поля в оболочке брэгговского волновода (b)

rys. 9. Rozhuśtanie huśtawki (a); profil współczynnika załamania zapewniający szybkie tłumienie pola w obszarze falowodu Bragga (b)

Для этого строится параметрическое решение одномерного волнового уравнения $w'' + q^2(x)w = 0$, аналогичного уравнению линейного осциллятора – с точностью до замены $t \rightarrow x$, $\omega(t) \rightarrow q(x)$, где $q(x) = kn(x)$, $k = \omega/c$ – волновое число, а $n(x)$ – переменный показатель преломления. Затухание поля в периодической среде аналогично остановке качелей за счет противоположной фазы периодического изменения параметров осциллятора (антирезонанс).

Описание распространения волн в зонах прозрачности оказывается более сложной задачей, поскольку требуется дать адекватное определение фазы комплексного решения волнового уравнения. Математический аппарат для этого случая развит в совместной работе [Popov, Kovalchuk, 2013]. Фаза бегущей волны в неоднородной среде $n(x)$ определяется как $\psi = \frac{1}{2i} \ln \frac{w' + iqw}{w^* - iqw^*}$.

Используя уравнение осциллятора, этому выражению можно придать вид

$$\psi = \int \left[q + \frac{q'}{2} \frac{ww^* + w'w^*}{|w'|^2 + iq(ww' - w'w^*) + q^2|w|^2} \right] dx$$

уточняющий понятие адиабатической фазы $\psi = \int q dx$. Параметрическое решение волнового уравнения $x = X(\psi)$, $w[X(\psi)] = W(\psi)$, $q[X(\psi)] = Q(\psi)$ ищется в виде $W(\psi) = W_0 \exp(\int H(\psi) \dot{X}(\psi) d\psi)$. Подстановка в исходное уравнение приводит к нелинейному дифференциальному уравнению для комплексного адмитанса, $H(\psi) = \frac{\dot{W}(\psi)}{\dot{X}(\psi) W(\psi)}$ и удается найти континуальное множество

W tym celu buduje się rozwiązanie jednowymiarowego równania falowego $w'' + q^2(x)w = 0$, podobnie jak dla liniowego oscylatora – z dokładnością do $t \rightarrow x$, $\omega(t) \rightarrow q(x)$, gdzie $q(x) = kn(x)$, $k = \omega/c$ – liczba falowa, a $n(x)$ – zmienny współczynnik załamania. Tłumienie pola w ośrodku periodycznym jest analogiczne do zatrzymania huśtawki i jest wynikiem przeciwnych w fazie zmian parametrów oscylatora (antyrezonans).

Bardziej złożonym zadaniem jest opisanie propagacji fal w ośrodku przezroczystym, ponieważ w tym celu musimy mieć odpowiednią definicję fazy dla zespolonego rozwiązania równania falowego. Odpowiedni aparat matematyczny dla tego przypadku został rozwinięty w pracy [Popov, Kovalchuk, 2013]. W ośrodku niejednorodnym fazę fali $n(x)$

określa się jak $\psi = \frac{1}{2i} \ln \frac{w' + iqw}{w^* - iqw^*}$.

Korzystając z równania oscylatora można otrzymać wyrażenie

Które uściśla pojęcie fazy adiabaticznej $\psi = \int q dx$. Parametrycznego rozwiązania równania falowego $x = X(\psi)$, $w[X(\psi)] = W(\psi)$, $q[X(\psi)] = Q(\psi)$ poszukuje się w postaci $W(\psi) = W_0 \exp(\int H(\psi) \dot{X}(\psi) d\psi)$. Podstawienie do wyjściowych równań prowadzi do nieliniowego równania różniczkowego na zespoloną admittance, $H(\psi) = \frac{\dot{W}(\psi)}{\dot{X}(\psi) W(\psi)}$ i znalezienia konti-

решений, описывающих модулированные бегущие волны в периодических средах (рис. 10).

num rozwiązań, które opisują modu-
lowane fale biegnące w ośrodkach perio-
dycznych (rys. 10).

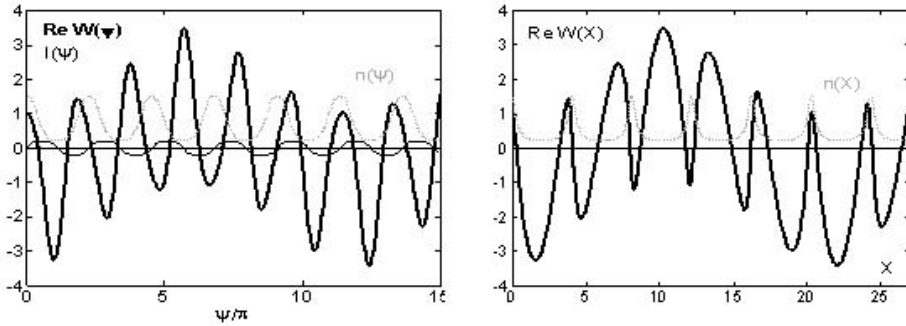


рис. 10. Амплитуда бегущей волны в периодической среде $n(x+h) = n(x)$ в параметрическом представлении и физических переменных

rys. 10. Admitancja fali biegnącej w o rodku periodycznym $n(x+h) = n(x)$ w reprezentacji parametrycznej i w zmiennych fizycznych

ЛИТЕРАТУРА

BIBLIGRAFIA

- [Малюжинец, 1955] *Малюжинец Г.Д.* Излучение звука колеблющимися гранями произвольного клина // *Акустический журнал*. 1955. Т. 1. № 2. С. 144-164.
- [Zarunidi, Popov, 2007] *Zarunidi S.A., Popov A.V.* Physical pattern of wave emission in a wedge-shaped region: generalization of the transverse diffusion method // *Comput. Math. Math. Physiscs*. 2007. V. 47. P. 1514-1527.
- [Ciarkowski, 2002] *Ciarkowski A.* On Sommerfeld precursor in a Lorentz medium // *Journ. Tech. Physics*. 2002.V. 43. № 2. P. 187-203.
- [Ciarkowski, 2003] *Ciarkowski A.* Dependence of the Brillouin precursor form on the initial signal rise time. *Journ. Tech. Physics* // 2003. V. 44. № 2. P. 181-192.
- [Popov, Ciarkowski, 2008] *Popov A., Ciarkowski A.* Interaction of electromagnetic pulse with vertically non-homogeneous ionospheric layer // *Proc. of the 2nd Symposium on Applied Electromagnetics*. 2008. Zamosc, Poland. P. 159-161.
- [Popov, Ciarkowski, 2009] *Popov A., Ciarkowski A.* A model problem for ultra-wide band ionospheric sounding // *Wave Motion*. 2009. V. 46. P. 480-487.
- Попов А.В., Циарковски А.* Модельная задача импульсного радиозондирования ионосферы // XXII Всероссийская научная конференция «Распространение Радиоволн», Труды конференции. Ростов-на-Дону, 2008. Т. 3, С. 153-157.
- [Budden, 1985] *Budden K.G.* The Propagation of Radio Waves in Ionosphere // *Cambridge Univ. Press, London, N.Y.* 1985.
- [Turski, Atamaniuk, 2006] *Turski A.J., Atamaniuk B.* Application of fractional derivative operators to some electromagnetic problems // *SAEM'2006, Ohrid, Macedonia*, 2006.
- [Atamaniuk, Turski, 2008] *Atamaniuk B., Turski A.J.* Wave propagation and diffusive transport of oscillations in pair plasmas with dust // *SAEM'2008, Zamosc, Poland*, 2008.

- [Фок, 1970] *Фок В.А.* Проблемы дифракции и распространения электромагнитных волн // М.: Советское радио, 1970.
- [Claerbout, 1985] *Claerbout J.F.* Fundamentals of geophysical data processing // Pennwell Books, 1985.
- [Малюжинец, 1959] *Малюжинец Г.Д.* Развитие представлений о явлениях дифракции // Успехи физ. наук. 1959. Т. 69. № 2. С. 321-334.
- [Малюжинец и др., 1964] *Малюжинец Г.Д., Попов А.В., Черкашин Ю.Н.* Тбилиси, 1964.
- [Tappert, 1977] *Tappert F.* The parabolic equation method. in: Wave Propagation and Underwater Acoustics // Eds. J.B. Keller and J.S. Papadakis. Springer, 1977.
- [Levy, 2000] *Levy M.* Parabolic Equation Methods for Electromagnetic Wave Propagation // IEE, London, 2000.
- [Kopylov et al., 1995] *Kopylov Yu.V., Popov A.V., Vinogradov A.V.* Application of the parabolic wave equation to X-ray optics // Optics Communications, 1995. V. 118. P. 619-636.
- [Baskakov, Popov, 1991] *Baskakov V.A., Popov A.V.* Implementation of transparent boundaries for numerical solution of the Schroedinger equation // Wave Motion. 1991. V. 14. P. 123-128.
- [Popov, 2006] *Popov A.V.* Computation of paraxial wave fields using transparent boundary conditions // Computational Mathematics and Mathematical Physics. 2006.V. 46. № 9. P. 1595-1600.
- [Turski et al., 2003] *Turski A.J., Atamaniuk B. and Turska E.* Fractional derivative analysis of Helmholtz and paraxial-wave equations // J. Tech. Physics. 2003.V. 44. № 2.
- [Molotkov, Atamaniuk, 2011] *Molotkov I.A., Atamaniuk B.* Oblique sounding of the ionosphere by powerful wave beams // Advances in Space Research, 2011, V. 47. № 7. P. 1181-1186.
- [Бочкарев, и др., 1979] *Бочкарев Г.С., Ким В.Ю., Лобачевский Л.А., Лянной Б.Е., Мигулин В.В., Сергеев О.С., Черкашин Ю.Н.* Взаимодействие декаметровых радиоволн на частотах вблизи МПЧ F2 при наклонном распространении // Геомагнетизм и Аэронавигация, 1979. Т. 19, С. 830-833.
- [Калинин, 2012] *Калинин Ю.К.* Вопросы ионосферной геофизики и радиофизики // М.: Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова, 2012.
- [Черкашин, Еременко, 2009] *Черкашин Ю.Н., Еременко В.А.* Эволюция солитонных пучков в регулярно неоднородных средах // Электромагнитные волны и электронные системы. 2009. Т. 14. № 8. С. 13-16.
- [Молотков, 2003] *Молотков И.А.* Аналитические методы теории нелинейных волн // М.: Физматлит, 2003.
- [Molotkov et al., 2013] *Molotkov I.A., Atamaniuk B., Popov A.V.* Interaction of oblique wave beam with ionospheric layer F2 // Advances in Space Research, 2013. V. 51. № 12. P. 2333-2341.
- [Atamaniuk et al., 2013] *Atamaniuk B., Molotkov I.A., Popov A.V.* Oblique Sounding of the Ionosphere Layer F2 by Powerful Wave Beams // PIERS, Progress in Electromagnetics Research Symposium, Taipei, Taiwan. 2013. P. 299.
- [Егоров и др., 2012] *Егоров И.Б., Еременко В.А., Молотков И.А., Попов А.В., Черкашин Ю.Н.* Особенности распространения узкого мощного волнового пучка в ионосферной плазме // 1-я Украинская конференция «Электромагнитные методы исследования окружающего пространства»: Тезисы докладов. Харьков, 2012. С. 58-61.

- [Молотков, Маненков., 2007] *Молотков И.А., Маненков А.Б.* О нелинейных туннельных эффекта // Радиотехника и электроника, 2007. Т. 52. № 7. С. 799-806.
- [Молотков, 2008] *Молотков И.А.* Гистерезис в акустической среде с релаксирующей нелинейностью и вязкостью // Акустический журнал, 2008. Т. 54. № 5. С. 725-731.
- [Попов, 2008] *Попов А.* Parametric theory of parametric resonance // 5th International Workshop on Electromagnetic Wave Scattering, Antalya, Turkey. 2008. P. 2-9 – 2-13.
- [Попов и др., 2009] *Попов А.В., Виноградов А.В., Прокопович Д.В.* О явном параметрическом описании волн в периодических средах // Журнал вычисл. математики и матем. физики, 2009. Т. 49. № 6. С. 1119-1130.
- [Попов, Kovalchuk, 2013] *Попов А., Kovalchuk V.* Parametric representation of wave propagation in non-uniform media (both in transmission and stop bands) // Math. Methods in Applied Sciences, 2013. V. 36. № 11. P. 1350–1362.

ТУРБУЛЕНТНОСТЬ И ПЫЛЕВАЯ ПЛАЗМА

руководители проекта
с российской стороны:

Л. Зеленый, С. Попель, А. Волокитин

руководитель проекта
с польской стороны:

Б. Атаманиук

Представлены результаты исследований по выявлению роли пылевой плазмы в приповерхностном слое над Луной. Получено выражение, описывающее распределение фотоэлектронов над поверхностью освещенной части Луны. Произведен расчет распределений по размерам и высотам подъема заряженных пылевых частиц над освещенными участками поверхности Луны для различных значений угла между местной нормалью и направлением на Солнце. Приведена схема эксперимента по измерению квантового выхода и работы выхода лунного реголита, важных с точки зрения формирования плазменно-пылевой системы, непосредственно на поверхности Луны в рамках будущих лунных миссий. Рассмотрены линейные и нелинейные волны в приповерхностной лунной плазме. Обсуждается формирование аналога плазменного слоя в области лунного терминатора. Показано, что данный эффект может быть использован для объяснения свечения над областью лунного терминатора, которое наблюдалось космическими аппаратами Surveyor. Проведено исследование отрыва пылевых частиц от лунной поверхности в результате ударов метеороидов.

В настоящее время немаловажная роль в космических исследованиях принадлежит выявлению свойств и прояв-

TURBULENCJA PLAZMA PYŁOWA

kierownik projektu
ze strony Rosji:

L. Zelenyi, S. Popel, A. Volokitin

kierownik projektu
ze strony Polski:

B. Atamaniuk

Przedstawiono wyniki badań określające rolę plazmy pyłowej w warstwie powierzchniowej nad powierzchnią Księżyca. Otrzymano wyrażenie opisujące rozkład fotoelektronów nad powierzchnią oświetlonej części Księżyca. Przeprowadzono obliczenia rozkładu względem wielkości i wysokości wznoszenia się naładowanych cząsteczek pyłu nad oświetlonymi obszarami powierzchni Księżyca dla różnych wartości kąta między normalną lokalną a kierunkiem do Słońca. Pokazano schemat eksperymentu mierzenia wydajności kwantowej i funkcji wyjścia dla księżycowego reholitu, istotnych dla powstawania układu plazmowo-pyłowego bezpośrednio na powierzchni Księżyca. Pomiar tego typu będą mogły być wykonywane w przyszłych misjach kosmicznych. Rozważone zostały fale liniowe i nieliniowe w powierzchniowej księżycowej plazmie. Dyskutowane jest formowanie się analogu warstwy plazmowej w obszarze księżycowego terminatora. Wykazano, że efekt ten może być wykorzystany dla wyjaśnienia świejących emisji zaobserwowanych ze statku kosmicznego Surveyor w rejonie terminatora. Badano oddzielania się cząsteczek pyłu od powierzchni księżycyca w wyniku uderzeń meteorytów.

Obecnie ważną rolę w badaniach kosmicznych jest określenie właściwości i manifestacji naładowanego pyłu

лений заряженной пыли у поверхности Луны и в лунной экзосфере. В России готовятся миссии ЛУНА-25 и ЛУНА-27. На посадочных модулях станций «ЛУНА-25» и «ЛУНА-27» предполагается разместить аппаратуру, которая будет как непосредственно детектировать пылевые частицы над поверхностью Луны, так и осуществлять оптические измерения. В недавней американской миссии LADEE (Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer – «Исследователь лунной атмосферы и пылевой среды») лунная пыль изучалась с помощью наблюдений с орбиты.

Наблюдения лунной пыли имеют довольно давнюю историю. Астронавты, побывавшие на Луне, выяснили, что слой пыли на лунной поверхности составляет несколько сантиметров. Первые указания о присутствии пыли в приповерхностном слое над Луной были получены автоматическими спускаемыми космическими аппаратами SURVEYOR, которые с помощью телевизионной камеры получили изображения лунного горизонта после заката Солнца. Эти изображения обнаруживают приповерхностное (с характерными высотами ~10–30 см) свечение над областью лунного терминатора (линии светораздела, отделяющей освещённую часть Луны от неосвещённой части). Объяснение этого эффекта обычно связывают с рассеянием солнечного света в области терминатора на заряженных микрометровых пылевых частицах. В миссиях Apollo проводились наблюдения субмикронной пыли в лунной экзосфере на высотах вплоть до (примерно) 100 км. Аналогичные выводы можно сделать из недавних наблюдений лунного орбитального аппарата LADEE, в рамках которых было продемонстрировано су-

на поверхности и в экзосфере Кsiężyca. W Rosji przygotowywana jest misja „ŁUNA-25” i „ŁUNA-27”. Na lądownikach stacji „ŁUNA-25” i „Łuna-27” proponowane jest umieszczenie aparatury, która będzie równocześnie wykrywać cząsteczki pyłu i przeprowadzać pomiary optyczne. W ostatniej amerykańskiej misji („Lunar Atmosphere and Dust Environment Explorer”) pył księżycowy był badany przy pomocy obserwacji z orbity.

Obserwacje pyłu księżycowego mają dość długą historię. Astronauci, którzy przebywali na Księżycu wyjaśnili, że warstwa pyłu jest tam kilku centymetrowa. Pierwsze przejawy obecności pyłu w warstwie powierzchniowej nad powierzchnią Księżyca otrzymane zostały z automatycznych lądowników opuszczanych ze statku kosmicznego SURVEYOR, które za pomocą kamery telewizyjnej przesłały obrazy księżycowego horyzontu po zachodzie Słońca. Te obrazy pokazały przypowierzchniowy (z charakterystycznymi wysokościami ~10–30 cm) poświata nad obszarem księżycowego terminatora (linie światła, oddzielające oświetloną część Księżyca od nieoświetlonej). To zjawisko wyjaśnia się zazwyczaj rozpraszaniem światła słonecznego obszarze terminatora na naładowanych mikrometrowych cząsteczkach. W trakcie misji Apollo zaobserwowano submikronowy pył w ekzосferze Księżyca na wysokościach (przykładowo) do 100 km. Podobne wnioski można wyciągnąć z ostatnich obserwacji zrobionych na orbiterze księżycowym LADEE, wykazano, że na wysokościach od 30 do 110 km obecne są cząstki pyłu mające prędkość rzędu pierwszej prędkości kosmicznej dla Księży. Fakt, że pył może unosić się nad

ществование на высотах от 30 до 110 км пылевых частиц со скоростями порядка первой космической скорости для Луны. Тот факт, что пыль может парить над поверхностью Луны, способствует объяснению ряда кратковременных лунных явлений, таких как потемнения, красноватое и голубоватое сияние, смутная видимость, зори, а также теневые и контрастные эффекты.

Фактически общепринятым в настоящее время считается, что пыль над лунной поверхностью является составной частью плазменно-пылевой системы. Поверхность Луны заряжается под действием электромагнитного излучения Солнца, плазмы солнечного ветра, плазмы хвоста магнитосферы Земли. При взаимодействии с солнечным излучением поверхность Луны испускает электроны вследствие фотоэффекта, что приводит к формированию над поверхностью слоя фотоэлектронов. К появлению фотоэлектронов приводит также их испускание пылевыми частицами, парящими над поверхностью Луны, вследствие взаимодействия последних с электромагнитным излучением Солнца. Пылевые частицы, находящиеся на поверхности Луны или в приповерхностном слое, поглощают фотоэлектроны, фотоны солнечного излучения, электроны и ионы солнечного ветра, а если Луна находится в хвосте магнитосферы Земли, то электроны и ионы плазмы магнитосферы. Все эти процессы приводят к зарядке пылевых частиц, их взаимодействию с заряженной поверхностью Луны, подъёму и движению пыли.

Интерес к описанию плазменно-пылевой системы в окрестности Луны резко возрос в конце 1990-х годов, что было связано с разработкой к этому времени методов исследования пыле-

поверхности Кsiężyca, pomaga wyjaśnić szereg krótkookresowych zjawisk występujących na Księżycu, takich jak zaciemnienia, czerwonawe niebieskawe poświaty, mglistość, zorze, efekty cienia i kontrastu.

Aktualnie powszechnie przyjęte jest uważać, że pył nad powierzchnią Księżyca jest częścią jego plazmowo-pyłowego systemu. Powierzchnia Księżyca ładuje się promieniowaniem elektromagnetycznym Słońca, plazmą wiatru słonecznego, plazmą ogona magnetosfery. Podczas oddziaływania promieniowania słonecznego z powierzchnią Księżyca w wyniku fotoefektu emitowane są elektrony w wyniku, czego nad powierzchnią Księżyca formuje się warstwa fotoelektronowa. Fotoelektrony pojawiają się również w wyniku oddziaływania unoszących się nad powierzchnią Księżyca cząstek pyłu z elektromagnetycznym promieniowaniem Słońca. Cząstki pyłu znajdujące się na powierzchni Księżyca lub w warstwie nad jego powierzchnią, absorbują fotoelektrony, fotony, elektrony i wiatru słonecznego i jeżeli Księżyc znajduje się w ogonie magnetosfery Ziemi to również jony i elektrony plazmy magnetosferycznej. Wszystkie te procesy prowadzą do ładowania cząsteczek pyłu i w wyniku ich oddziaływania z naładowaną powierzchnią Księżyca następuje ich unoszenia i ruch.

Zainteresowanie opisaniem w otoczeniu Księżyca układu plazmapył gwałtownie wzrosło w końcu lat 1990-tych, związane to było z opracowaniem w tym okresie metod badania plazmy pyłowej, w szczególności plazmy pyłowej występującej w przyrodzie. Duża uwaga była zwrócona na eksperymentalne metody badawcze sy-

вой плазмы, в том числе и в природных системах. Существенное внимание уделялось экспериментальным методам исследований, моделирующим условия вблизи поверхности Луны. Что касается теоретических исследований плазменно-пылевой системы в приповерхностном слое Луны, то сначала они осуществлялись, главным образом, на основе рассмотрения движения единичных заряженных пылевых частиц (см., например, [Golub et al., 2012]). При этом пренебрегалось влиянием фотоэлектронов от парящих пылевых частиц, поскольку для описания этого эффекта необходимо иметь данные о приповерхностной концентрации пыли на Луне. Однако для того, чтобы дать адекватное теоретическое описание концентраций заряженной пыли над Луной, необходимо проводить учет влияния фотоэлектронов от пылевых частиц, которые воздействуют на заряды (и, соответственно, траектории) последних. Такой учёт был осуществлен в работах [Popel et al., 2013a; Popel, Zelenyi, 2013]. Анализ плазменно-пылевого слоя, образующегося вблизи освещенной части поверхности Луны, проводился также в работах [Lisin et al., 2013; Popel et al., 2014a]. В результате были определены характерные параметры плазменно-пылевой системы над поверхностью освещенной части Луны, что представляется важным [Popel, Zelenyi, 2014] с точки зрения развития экспериментальных методов анализа частиц лунной пыли, выявления свойств плазмы над Луной, измерения электрических полей у лунной поверхности в рамках будущих лунных миссий и т.д.

Перечислим основные свойства плазменно-пылевой системы в приповерхностном слое над освещенной

mulujące warunki blisko powierzchni Księżyca. Teoretyczne badania układu plazmowo-pyłowego w przypowierzchniowej warstwie Księżyca to opierały się one głównie na rozważaniu ruchu pojedynczych naładowanych cząstek (patrz np. [Golub' et al. 2012]). Zaniedbywano wpływ fotoelektronów unoszonych przez cząsteczki pyłu, ponieważ aby opisać ten efekt konieczne były dane o przypowierzchniowej koncentracji pyłu na Księżycu. Jednak dla adekwatnego teoretycznego opisu koncentracji naładowanych cząstek pyłu nad powierzchnią Księżyca, niezbędne jest uwzględnienie wpływu fotoelektronów pochodzących od cząstek pyłu, które oddziałują na ich ładunki (i odpowiednio, na ich trajektorie). Takie obliczanie zostały zrobione w pracach [Popel et al., 2013a; Popel, Zeleny, 2013]. Analiza warstwy pyłowo-plazmowej tworzącej się w oświetlonej części powierzchni Księżyca była przeprowadzona również w pracach [Lisin et al. 2013; Popel et al. 2014a; Popel et al. 2014b]. W rezultacie zostały określone charakterystyczne parametry układu plazmowo-pyłowego nad oświetloną powierzchnią Księżyca, znajomość tych parametrów jest istotna [Popel, Zeleny, 2014] z punktu widzenia opracowania eksperymentalnych metod analizy cząstek pyłu księżycowego, własności plazmy nad Księżycem, pomiarów pól elektrycznych na powierzchni Księżyca w przyszłych misjach kosmicznych itp.

Poniżej przedstawimy podstawowe własności plazmowo-pyłowego układu w warstwie przypowierzchniowej nad oświetloną częścią Księżyca, wtedy, gdy Księżyc nie znajduje się ogonie magnetosfery Ziemi, to znaczy, że oddziaływanie plazmy ogona magnetosfery Ziemi na oświetloną część powierzchni Księ-

частью Луны в ситуации, когда Луна не находится в хвосте магнитосферы Земли, и, соответственно, влияние плазмы хвоста магнитосферы на освещенную сторону Луны несущественно. В этой ситуации составными частями плазменно-пылевой системы являются нейтралы разреженной лунной атмосферы, электроны и ионы солнечного ветра, заряженные частицы пыли, фотоэлектроны, образующиеся при взаимодействии с солнечным излучением поверхности Луны, и пылевых частиц, парящих над поверхностью Луны. Химические составляющие разреженной лунной атмосферы, полученные в рамках LACE (Lunar Atmospheric Composition Experiment), приведены в таблице.

życa można zaniedbać. Wtedy komponentami układu plazmowo-pyłowego cząstki neutralne rozrzedzonej atmosfery Księżyca, elektrony i jony wiatru słonecznego, naładowane cząsteczki pyłu, fotoelektrony, фотоэлектроны powstające w wyniku promieniowania słonecznego na powierzchni Księżyca i cząstek pyłowych unoszących nad jego powierzchnią. W tab. 1 przedstawiony jest skład chemiczny rozrzedzonej atmosfery Księżyca otrzymany w LACE (Lunar Atmospheric Composition Experiment).

Таблица. Химические составляющие лунной атмосферы
Tabela. Wymiary i gęstość mikrocząstek pyłu kosmicznego

вещество	He	Ar	CH ₄	N ₂	CO	CO ₂
концентрация, см ⁻³	2·10 ³ (днём); 4·10 ⁴ (ночью)	1·10 ⁵ (днём); 4·10 ⁴ (ночью)	1·10 ⁴ (перед восходом Солнца)	8·10 ² (перед восходом Солнца)	1·10 ³ (перед восходом Солнца)	1·10 ³ (перед восходом Солнца)

Несмотря на существование нейтралов в лунной атмосфере над освещенной частью Луны с концентрацией порядка 10⁵ см⁻³, фотоионизацией нейтралов и, соответственно, возникновением электронов и ионов в результате фотоионизации можно пренебречь, поскольку значительные временные масштабы фотоионизации (порядка 10–100 земных дней) и быстрый (~1 с) захват ионов солнечным ветром ограничивают концентрации электронов и ионов, образующихся в результате фотоионизации нейтралов, величинами порядка ~1 см⁻³, что существенно меньше, чем концентрации электронов и ионов солнечного ветра ~10 см⁻³.

Pomimo istnienia, w atmosferze Księżyca nad jego oświetloną częścią, neutralnych cząstek z koncentracją rzędu 10⁵ cm⁻³ można zaniedbać fotojonizację cząstek neutralnych a w związku, z czym pojawienie się elektronów jonów w wyniku fotojonizacji można pominąć, ponieważ znaczące skale fotojonizacji (rzędu 10–100 ziemskich dni) i szybkie (~1 s) wychwytywanie jonów wiatru słonecznego ograniczają koncentrację elektronów i jonów powstających w wyniku fotojonizacji cząstek neutralnych wielkościami rzędu ~1 cm⁻³, co jest zdecydowanie mniej niż koncentracja elektronów i jonów wiatru słonecznego ~10 cm⁻³.

Вычисление распределений пыли и электронов в приповерхностном слое освещённой части Луны производится на основе теоретической модели [Popel et al., 2013a], в которой зарядка пылевых частиц над поверхностью Луны вычисляется на основе зондовой модели с учетом влияния фотоэлектронов, электронов и ионов солнечного ветра, а также солнечного излучения. Не учитывается воздействие светового давления на динамику пылевых частиц, поскольку, как показывают оценки, указанное воздействие сказывается лишь на частицах с размерами, заведомо не превышающими 1 нм. Учитываются фотоэлектроны как от лунной поверхности, так и от поверхностей парящих над Луной пылевых частиц. Рассмотрение фотоэлектронов от поверхностей пылевых частиц требует самосогласованного описания, поскольку фотоэлектроны влияют на распределения пылевых частиц, в то время как эти распределения определяют количество фотоэлектронов. Ввиду самосогласованного характера задачи решить её удастся только численными методами, использующими итерации. В нулевом приближении пренебрегается эффектами фотоэлектронов от поверхностей пылевых частиц. При этом определяются распределения пыли над поверхностью Луны, после чего вычисляются распределения фотоэлектронов от поверхностей пылевых частиц для тех распределений пыли, которые были рассчитаны на предыдущем шаге. Далее, вычисляются распределения пыли, но уже с новыми распределениями фотоэлектронов над поверхностью Луны. Затем для вычисленных таким образом распределений пыли определяются распределения фотоэлектронов и т.д.

Obliczenia rozkładu pyłu w i elektronów w przypowierzchniowej warstwie oświetlonej części Księżyca są oparte na modelu teoretycznym [Popel et al., 2013a], w którym ładunek pyłu nad powierzchnią Księżyca obliczany jest w oparciu o modele sondujące z uwzględnieniem zarówno fotoelektronów, elektronów i jonów wiatru słonecznego jak i [promieniowania Słońca. Natomiast nie uwzględnia się wpływu ciśnienia światła na dynamikę cząstek pyłu, ponieważ, oszacowania pokazują, że ten wpływ jest istotny jedynie dla cząstek nieprzewyższających 1nm. Przeprowadzone jest wyliczenie unoszonych fotoelektronów zarówno od powierzchni Księżyca jak i od powierzchni unoszonych cząsteczek pyłu. Aby uwzględnić fotoelektrony pochodzące z powierzchni cząstek pyłu konieczny jest opis samouzgodniony, ponieważ fotoelektrony wpływają na rozkład cząstek pyłowych i równocześnie rozkład cząstek pyłowych określa liczbę fotoelektronów. Ze względu na samouzgodniony charakter problemu, Zagadnienie to można rozwiązać tylko przy użyciu numerycznych metod iteracji.. W zerowym przybliżeniu zaniedbuje się fotoelektrony pochodzące z powierzchni cząstek pyłu To pozwala określić rozkład pyłu nad powierzchnią Księżyca. Następnie wyliczamy rozkład fotoelektronów pochodzący od wyliczonego w zerowym przybliżeniu rozkładu pyłu. Następnie wyliczamy rozkład pyłu z uwzględnieniem wyliczonego rozkładu fotoelektronów nad powierzchnią Księżyca. Następnie ponownie wyliczamy rozkład fotoelektronów... itd.

Ważnym parametrem, niezbędnym do obliczeń numerycznych, jest koncentracja fotoelektronów na powierzch-

Важным параметром, необходимым для расчетов, является концентрация фотоэлектронов непосредственно у поверхности Луны, которые возникают, главным образом, от её поверхности (но не от поверхностей парящих пылевых частиц) при взаимодействии с солнечным излучением [Popel et al., 2014a; 2014b]. Функция распределения фотоэлектронов по энергиям определяется стандартным образом на основе расчета плотности потока фотоэлектронов, испускаемых твёрдым телом под действием излучения. Полученная таким образом функция распределения может быть использована для нахождения концентрации фотоэлектронов у поверхности Луны N_0 и их температуры T_e . При вычислении функции распределения фотоэлектронов, их концентрации и температуры важными параметрами являются квантовый выход и работа выхода лунного реголита. Несмотря на существенные вариации количества энергии, излучаемой Солнцем в ультрафиолетовом диапазоне (основном с точки зрения испускания фотоэлектронов), эти вариации не приводят к серьезным (на порядки величины) изменениям значений N_0 и T_e [Popel et al., 2014a]. Типичные значения работы выхода W для лунного реголита, как полагают, варьируются в пределах 5–6 эВ. К сожалению, имеющиеся значения квантового выхода лунного реголита недостаточно обоснованы, что, в частности, обусловлено большой сложностью обеспечить доставку лунного грунта так, чтобы избежать его взаимодействия с земной атмосферой. В этой связи значительный интерес представляет использование возможности измерения квантового выхода и работы выхода лунного реголита не-

ни Кsiężyca pochodzących głównie z jego powierzchni (nie z powierzchni cząstek pyłu), powstają one w wyniku oddziaływania z promieniowaniem Słońca [Popel et al. 2014a; Popel et al., 2014b]. Funkcja rozkładu energii fotoelektronów jest określana na podstawie standardowych metod obliczania gęstości strumienia fotoelektronów wydzielanych z ciała stałego przez promieniowanie. Otrzymana w ten sposób funkcja rozkładu może być wykorzystana do określenia koncentracji fotoelektronów na powierzchni Księżyca N_0 ich temperatury T_e . Dla obliczania rozkładu, koncentracji i temperatury fotoelektronów istotne są parametry wydajności kwantowej i funkcja pracy wyjścia dla księżycowego regolitu. Pomimo znaczących w ilości energii różnic wypromieniowywanych przez Słońce w zakresie ultrafioletu (przede wszystkim w odniesieniu do emisji fotoelektronów), nie powoduje to istotnych (o rzędy wielkości) zmian wartości N_0 i T_e [Popel et al. 2014a]. Typowe wartości pracy wyjścia W dla księżycowego regolitu zawarte są w przedziale 5–6 eV. Niestety, dostępne wartości wydajności kwantowej księżycowego regolitu nie są dostatecznie znane i uzasadnione, wynika to w szczególności z trudnościami dostarczenia próbek gruntu księżycowego tak, aby uniknąć jego oddziaływania z atmosferą Ziemi. W związku z tym istotne będzie wykorzystanie możliwości zmierzenia wydajności kwantowej oraz funkcji pracy księżycowego regolitu bezpośrednio na powierzchni Księżyca w przyszłych misjach księżycowych. Schemat odpowiedniego eksperymentu [Popel et al. 2014a] pokazano rys. 1. Źródłem promieniowania elektromagnetycznego w tych eksperymentach jest

посредственно на поверхности Луны в рамках будущих лунных миссий. Схема соответствующих экспериментов [Popel et al., 2014a] приведена на рис. 1. Источником электромагнитного излучения в указанных экспериментах является Солнце. При этом для создания перенаправленного фотонного пучка используется оптический канал, состоящий из зеркал и/или оптического кабеля. Использование зеркал, с одной стороны, модифицирует спектр излучения, что следует учесть при анализе окончательных результатов, а с другой – может служить для усиления (в несколько раз) интенсивности излучения, взаимодействующего с лунной поверхностью, что позволит получить более надёжные результаты экспериментов. В качестве источника излучения могут также использоваться лазерные светодиоды, ртутная лампа и пр. Однако при этом оказывается необходимым подбирать энергетический спектр излучателя в соответствии с солнечным, используя, например, максимумы в спектре солнечного излучения. Зонд Ленгмюра может зарегистрировать поток фотоэлектронов с шагом ~ 5 В в диапазоне от -100 до 100 В, как в случае освещения источником света лунной поверхности, так и в его отсутствие, регистрируя энергетический спектр электронов. В свою очередь энергетический спектр электронов коррелирует с вольт-амперной характеристикой зонда Ленгмюра. Сравнение вольт-амперных характеристик, полученных в случае освещения источником света лунной поверхности и в его отсутствие, дает возможность определить квантовый выход и работу выхода лунного реголита.

Słońce. Tak, więc, aby stworzyć przekierowaną wiązkę fotonów wykorzystuje się kanał optyczny, składający się z luster i / lub kabla optycznego. Wykorzystanie luster może z jednej strony zmieniać widmo emisyjne (należy to uwzględnić przy analizie wyników), z drugiej strony może być wykorzystane do kilkukrotnego wzmocnienia natężenia promieniowania oddziałującego z powierzchnią Księżyca, pozwoli to do uzyskania bardziej wiarygodnych wyników. Jako źródło promieniowania można zastosować diody laserowe, lampy rtęciowe, etc. Należy przy tym pamiętać o wyborze emitera, którego widmo energii będzie zgodne ze widmem słonecznym, można to uzyskać wykorzystując piki w widmie promieniowania słonecznego? Sonda Langmuira może rejestrować strumień fotoelektronów z krokiem ~ 5 V w zakresie od -100 V do 100 V, rejestrując energetyczne widmo elektronów zarówno przy oświetlonej jak i nieoświetlonej przez źródło powierzchni Księżyca. Z kolei, widmo energii elektronów jest skorelowane z charakterystyką prądowo-napięciową sondy Langmuira. Porównanie charakterystyk prądowo-napięciowych otrzymanych przy oświetlonej i nieoświetlonej przez źródło powierzchni księżycy pozwala określić wydajność kwantową i pracę wyjścia księżycowego reholitu.

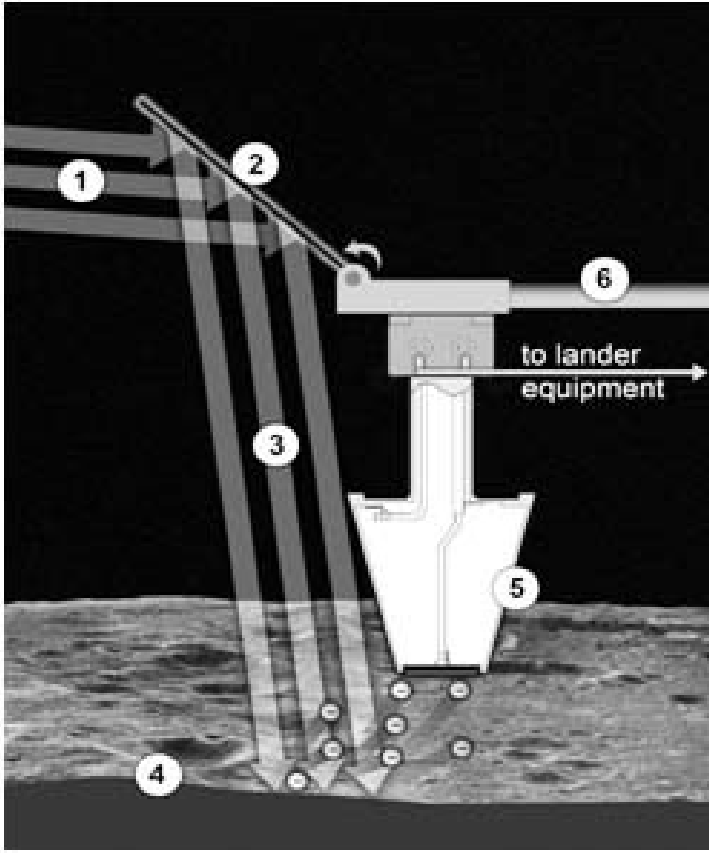


рис. 1. Схема эксперимента для измерений квантового выхода и работы выхода лунного реголита: 1 – световой поток от источника излучения; 2 – зеркало; 3 – световой поток, преобразованный зеркалом; 4 – лунная поверхность; 5 – зонд Ленгмюра; 6 – штанга, на которой укреплено оборудование для измерений

rys. 1. Schemat eksperymentu do pomiaru wydajności kwantowej i pracy wyjścia księżycowego regotitu. 1 – strumień światła ze źródła promieniowania, 2 – lustro, 3 – strumień świetlny przekształcony lustrem, 4 – powierzchnia księżycy, 5 – sonda Langmuira, 6 – pręt, do którego umocowanej est urządzenie pomiarowe

Зависимость концентрации фотоэлектронов $n_{e,ph}$ как функция высоты h исследовалась численными методами в диапазоне углов θ между местной нормалью и направлением на Солнце от 0 до 89° [Popel et al., 2013a]. Эта зависимость с хорошей точностью может быть описана формулой

Zależność koncentracji elektronów $n_{e,ph}$ od wysokości h była określana metodami w zakresie kątów θ między normalną a kierunkiem Słońce od 0° do 89° [Popel et al., 2013a]. Zależność ta, z dobrą dokładnością może być opisana wzorem

$$n_{e,ph} \approx N_0 \frac{\cos \theta}{\left[1 + \sqrt{\cos \theta / 2} (h / \lambda_D)\right]^2} + N_e (h / h_1)^p, \quad (1)$$

где $h_1=1$ см, λ_D – дебаевский радиус фотоэлектронов у поверхности Луны, p и N_e зависят от работы выхода вещества лунного грунта, и для участков лунного реголита представлены на рис. 2. Анализ соотношения (1) показывает, что уже на высотах в несколько сантиметров и выше над поверхностью Луны фотоэлектроны от поверхностей парящих пылевых частиц (описываемые вторым слагаемым в правой части (1)) превалируют над фотоэлектронами от поверхности Луны (описываемыми первым слагаемым в правой части этого соотношения). Выражение (1) справедливо вплоть до высот порядка нескольких десятков метров, когда либо нарушается квазинейтральность в солнечном ветре, либо определяемая выражением (1) концентрация фотоэлектронов сравнивается с концентрацией электронов солнечного ветра. Образование фотоэлектронов в приповерхностном слое Луны – важный эффект, связанный с формированием плазменно-пылевой системы.

gdzie $h_1=1$ cm, λ_D – promień Debye'a fotoelektronów na powierzchni Księżyca, p i N_e zależą od funkcji pracy księżycowego gruntu, dla fragmentów księżycowego regolitu przedstawione są na rys. 2. Analiza związku (1) pokazuje, że nawet na wysokości kilku centymetrów nad powierzchnią księżyca, fotoelektrony pochodzące z powierzchni pyłu (opisywane drugim członem w prawej części (1)) przeważają nad fotoelektronami z powierzchni Księżyca, (opisywane pierwszym członem w prawej części (1)). Wyrażenie (1), można stosować do wysokości rzędu kilkudziesięciu metrów, gdzie zostaje naruszona quasi neutralności wiatru słonecznego lub koncentracja fotoelektronów określona przez (1) jest w porównywalna z koncentracją elektronów w wietrze słonecznym. Pojawienie się fotoelektronów w przypowierzchniowej warstwie Księżyca jest ważnym efektem związanym z formowaniem się układu plazmowo – pyłowego.

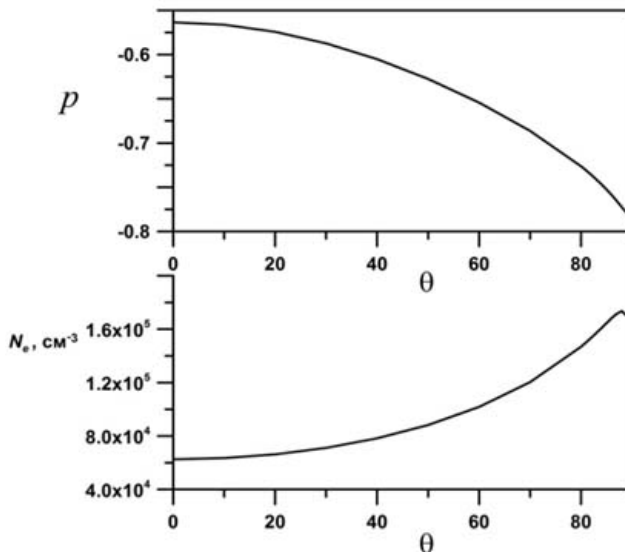


рис. 2. Величины p и N_e в зависимости от угла θ для участков лунного реголита
 rys. 2. wielkości p i N_e w zależności od kąta θ dla fragmentów księżycowego

Данные, характеризующие распределения пылевых частиц для условий, соответствующих участкам лунного реголита, полученные на основе метода, развитого в [Popel et al., 2013a] приведены на рис. 3 для данных $N_0 = 2,1 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$, $T_e = 0,15 \text{ эВ}$. На рис. 3 (a)–(c) представлены гистограммы, описывающие результаты расчетов концентраций пылевых частиц над поверхностью Луны для углов θ между местной нормалью и направлением на Солнце, равных 77° , 82° и 87° . Длина одноцветного горизонтального участка на каждом из этих графиков характеризует концентрацию частиц (в см^{-3}) на соответствующих высотах h с размерами в соответствующем интервале (указанном на шкале в верхней правой части графика). Общая длина горизонтального участка на графике соответствует общей концентрации частиц с размерами, представленными на этом графике. Рисунок 3 (d)–(f) представляет, соответственно, результаты вычислений максимально возможных высот подъема пылевых частиц различных размеров, высотных распределений зарядовых чисел Z_d пылевых частиц и концентраций фотоэлектронов для различных значений угла θ .

Описание линейных и нелинейных волн в приповерхностной лунной плазме проводилось в работах [Popel et al., 2013b; Morozova et al., 2015]. Как было показано [Popel et al., 2014a], функция распределения фотоэлектронов (по скоростям) может быть представлена в виде суперпозиции двух функций распределения, характеризуемых различными температурами электронов: электроны с меньшей энергией выбиваются из лунного реголита фотонами с энергиями, близкими к работе выхода реголита, тогда как происхождение электронов с

На рис. 3. для $N_0 = 2,1 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$, $T_e = 0,15 \text{ эВ}$ показаны данные характеризующие распределение частиц пыли, в условиях соответствующих для части лунного реголита, использовано метод развинутой [Popel et al., 2013a]. На рис. 3 (a)–(c) представлено гистограммы описывающие результаты численных расчетов концентраций пылевых частиц над поверхностью Луны для углов θ между локальной нормалью и направлением на Солнце, 77° , 82° и 87° . Концентрация частиц (в см^{-3}) характеризуют длины горизонтальных монохроматических участков на каждом из рисунков (b) на соответствующих высотах h и о размерах в определенном диапазоне (показанных на шкале в правой верхней части графика). Общая длина горизонтальных участков графика соответствует общей концентрации частиц с размерами, представленными на этом рисунке. Рис. 3 (d)–(f) представляют результаты вычислений максимальной высоты подъема пыли с различных размеров, распределения заряда (Z_d) пыли относительно и концентрации фотоэлектронов для различных углов θ .

В работах [Popel et al. 2013b; Morozova et al. 2015] были описаны линейные и нелинейные волны для приповерхностной лунной плазмы. В работах [Popel et al. 2014a] показано, что функцию распределения фотоэлектронов (относительно скорости) можно представить в виде суперпозиции двух функций распределения, характеризующихся различными температурами электронов: низкоэнергетическими электронами выбитыми с лунного реголита фотонами с энергиями, близкими к работе выхода реголита, высокоэнергетические электроны связаны с фотонами, отвечающими

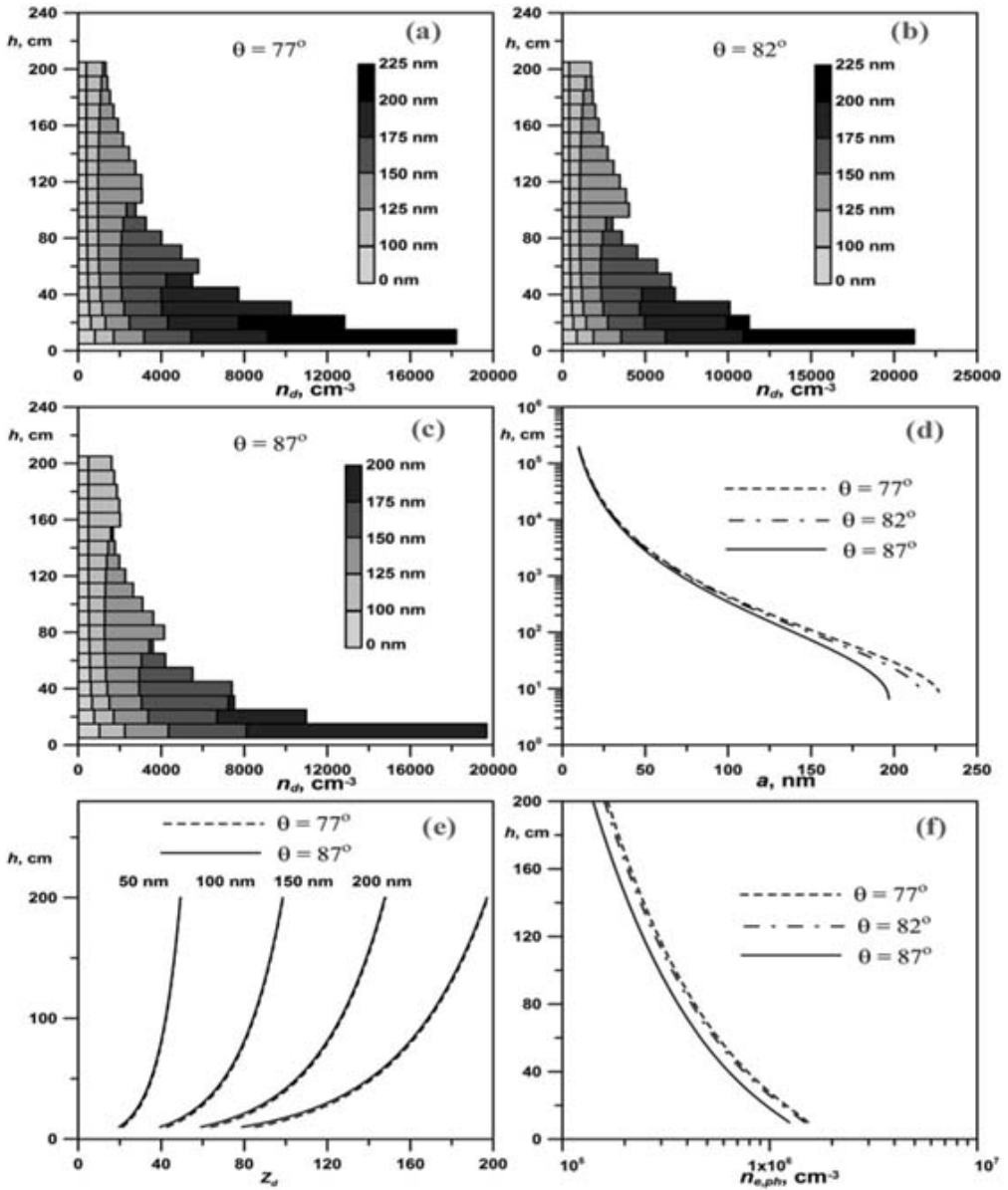


рис. 3. Распределения пылевых частиц над поверхностью Луны для значений $\theta = 77^\circ$ (a), 82° (b) и 87° (c), а также максимально возможные высоты подъема пылевых частиц (d), высотные распределения зарядовых чисел Z_i пылевых частиц (e) и концентраций фотоэлектронов (f) для условий, соответствующих участкам лунного реголита **rys. 3.** Rozkład pyłu nad powierzchnią Księżyca dla $\theta = 77^\circ$ (a), 82° (b) и 87° (c), maksymalne wysokości wznoszenia się cząstek pyłu (d), rozkład względem wysokości ładunków cząstek Z_i (e) i koncentracji fotoelektronów (f) dla warunków odpowiednich dla danych obszarów księżycowego regotitu

большей энергией связано с фотонами, соответствующими пику 10,2 эВ в спектрах солнечного излучения. Нарушение изотропии функции распределения электронов в приповерхностной лунной плазме связано с движением солнечного ветра относительно фотоэлектронов и заряженных пылевых частиц, что приводит к развитию неустойчивости и возбуждению высокочастотных волн с частотами в диапазоне ленгмюровских и электромагнитных волн. Кроме того, возможно распространение пылевых звуковых волн, возбуждение которых может, например, происходить в окрестности лунного терминатора. Найдены решения в виде пылевых звуковых солитонов, соответствующие параметрам плазменно-пылевой системы в приповерхностном слое освещенной части Луны (рис. 4). Определены области возможных чисел Маха и амплитуд солитонов.

Волновые движения в приповерхностном слое освещенной части Луны (или те или иные их проявления) могут быть зафиксированы с помощью аппаратуры, которую предполагается разместить на спускаемых аппаратах станций «ЛУНА-25» и «ЛУНА-27». Так, в состав выносных датчиков на станции «ЛУНА-27», входит зонд Ленгмюра, с помощью которого возможны локальные измерения флуктуаций концентрации и потенциала в плазме. С другой стороны, возможность возникновения волновых движений в приповерхностной лунной плазме должна быть учтена при обработке вольт-амперной характеристики зонда Ленгмюра и интерпретации данных наблюдений.

Итак, согласно результатам исследований [Popel et al., 2013a], характерный размер a и характерная концентра-

ми энергии 10,2 eV – т.е. энергии пика в спектре излучения. Нарушение изотропии функции распределения электронов в приповерхностной лунной плазме связано с движением солнечного ветра относительно фотоэлектронов и наэлектризованных частиц пыли, приводит к развитию неустойчивости и возбуждению волн высокой частотности, в диапазоне частотности волн плазменных и электромагнитных. Кроме того, возможно распространение пылевых звуковых волн, возбуждение которых может, например, происходить в окрестности лунного терминатора. Найдены решения в виде пылевых звуковых солитонов, соответствующие параметрам пылево-плазменного układu в освещенной части Кsiężyca (rys. 4). Определены возможные значения Маха и амплитуды.

Рух фаловы в прыповярхнявоў вай варшаві асвятленай часткі Ксіэжыца (lub нектырэ яго пражавы) можа быць баданы апаратурай, ктыра бэды ўмешчана на ладункавых „LUNA-25” і „LUNA-27”. Поняваж здальне ладункавы „LUNA-27” бэды ўпасажаны ў сондэ Langmuira мжлыве бэды локальне пмяры канцэнтрацыі і птэцыялу ў плазмьі. З другьей строны, мжлывоць пажавьення сьі фал ў прыповярхнявоў вай плазмьі ксіэжыца павьнна быць ўвзглэдньна ў характэрыстыцы прадово-напьцівоў вай сонды Langmuira і інтэрпратэцыі даных абсэрвэцыньных.

Zgodnie z [Popel et al., 2013a] charakterystyczny rozmiar a i koncentracja n_d naэлектризованных частиц пыли в прыповярхнявоў вай варшаві асвятленай часткі Ксіэжыца сь рэду 100 nm і 10^3 cm^{-3} адповьдно. Так вьсока

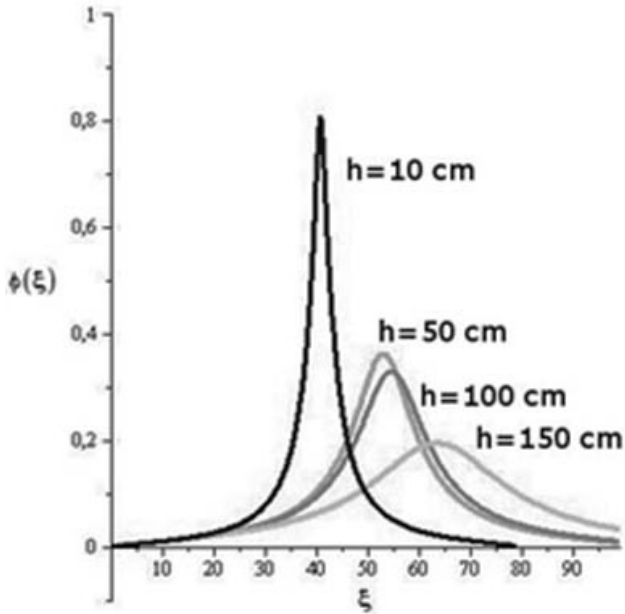


рис. 4. Профили электростатического потенциала $\phi(\xi)$, характеризующие пылевые звуковые солитоны на различных высотах h при $\theta = 82^\circ$, число Маха $M = 2,1$ и параметры плазменно-пылевой системы, вычисленные при $N_0 = 2,1 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$, $T_e = 0,15 \text{ эВ}$. Переменная ξ характеризует пространственную координату в системе отсчета, движущейся вместе с солитоном, нормированную на электронный дебаевский радиус у поверхности освещенной части Луны

rys. 4. Profil potencjału elektrostatycznego $\phi(\xi)$, charakteryzującego pyłowe fale akustyczne na różnych wysokościach h dla $\theta = 82^\circ$, liczba Macha $M = 2,1$ i parametry plazmowo-pyłowego układu wyliczono dla $N_0 = 2,1 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}$, $T_e = 0,15 \text{ eV}$. Zmienna ξ charakteryzuje współrzędna przestrzenną w układzie poruszającym się z solitonem i jest unormowana do promienia Debye'a elektronów na powierzchni oświetlonej części Księżyca

ция n_d заряженных пылевых частиц в приповерхностном слое освещенной части Луны определяются, соответственно, значениями порядка 100 нм и 10^3 см^{-3} . Столь высокая концентрация пыли возникает в связи со значительной концентрацией фотоэлектронов над Луной (в том числе и фотоэлектронов, выбиваемых фотонами солнечного излучения с поверхностей парящих пылевых частиц). Над темной частью Луны фотоэлектроны отсутствуют. Концентрация заряженной пыли оценивается при этом из соотношения $n_d \sim n_{e,s}/|Z_d|$, где $n_{e,s}$ – концентрация фотоэлектронов солнечного ветра. Для пылевых частиц

концентрация пыли связана jest z wysoką koncentracją fotoelektronów na (w tym фотоэлектронов выбиваемых фотонами солнечного излучения с поверхности несущихся частиц пыли). Над темной стороной Кsiężyca фотоэлектронов nie. Концентраcję наładowanego pyłu określamy stosunkiem $n_d \sim n_{e,s}/|Z_d|$, gdzie $n_{e,s}$ – концентрация электронов wiatru słonecznego. Oceny koncentracji pyłu o wymiarach rzędu 100 nm na ciemnej stronie Księżyca dają $n_d \sim 10^{-2} - 10^{-1} \text{ cm}^{-3}$. Widać, że w obszarze terminatora mamy istotny skok koncentracji pyłu i w związku z tym należy oczekiwać, że zachowanie

с размерами порядка 100 нм оценка их концентрации над тёмной частью Луны дает $n_d \sim 10^{-2} - 10^{-1} \text{ см}^{-3}$. Таким образом, имеется существенный скачок концентрации пыли в области терминатора, при этом можно ожидать достаточно сложного поведения характеристик плазменно-пылевой системы. Изучение плазменно-пылевой системы в области лунного терминатора проводилось в работе [Popel et al., 2015a].

Основными составляющими плазмы над освещённой частью Луны являются фотоэлектроны и положительно заряженные пылевые частицы (см., например, [Popel et al., 2013a]), тогда как над тёмной частью основной вклад вносят электроны солнечного ветра (имеющие большую компоненту скорости, перпендикулярную направлению распространения солнечного ветра, из-за больших значений температуры электронов в нём), электроны и ионы хвоста магнитосферы Земли, а также отрицательно заряженные пылевые частицы. В приповерхностном слое концентрации электронов и пылевых частиц над освещённой частью всегда значительно выше, чем соответствующие концентрации над тёмной частью Луны. Возникает резкая граница между этими частями (терминатор), и такая ситуация жёстко поддерживается внешними факторами, в частности, непрерывным действием солнечного излучения на освещённую часть Луны, а также её вращением. Электроны и пылевые частицы стремятся покинуть освещённую часть, попасть в область терминатора (и дальше в почти пустое пространство над тёмной частью Луны). Поскольку тепловая скорость у электронов намного выше, чем у пылевых частиц, потеря электронов происходит гораздо быстрее и в плазме (над освещённой ча-

стью плазмowo-пылевого systemu będą skomplikowane. Badanie układów plazmowo-pyłowych w obszarze księżycowego terminatora przeprowadzono w pracy [Popel et al., 2015a].

Podstawowymi składnikami plazmy nad oświetloną częścią Księżyca są fotoelektrony i dodatnio naładowane cząstki (np, [Popel et al., 2013a]), nad ciemną stroną podstawowymi składnikami są elektrony wiatru słonecznego (są one wysokoenergetyczne i mają dużą składową prędkości, prostopadłą do kierunku wiatru słonecznego), elektrony i jony ogona magnetosfery Ziemi jak również ujemnie naładowane cząstki. W warstwie przypowierzchniowej koncentracja elektronów i pyłu jest zawsze znacznie większa nad oświetloną niż nad ciemną częścią. Istnieje ostra granica między cząstkami (terminator), zjawisko to podtrzymywane jest czynnikami zewnętrznymi, w szczególności ciągłym działaniem promieniowania słonecznego na oświetloną część Księżyca i jego obrotem. Elektrony i cząstki pyłu dążą do opuszczenia oświetlonej części, aby przejść do terminatora (a następnie do prawie pustej przestrzeni na ciemnej stronie Księżyca). Ponieważ prędkość cieplne elektronów jest znacznie większa od prędkości pyłu ubytek elektronów jest znacznie szybszy, dlatego w plazmie (nad oświetloną częścią Księżyca w otoczeniu terminatora) gromadzi się swobodny dodatni ładunek. W rezultacie potencjał plazmy (nad oświetloną częścią Księżyca) w stosunku do terminatora jest dodatni, tzn., że potencjał terminatora jest ujemny. Różnica potencjałów między terminatorem a plazmą (nad oświetloną częścią Księżyca) nie może być rozłożona w całej objętości plazmy,

стью Луны в окрестности терминатора) накапливается свободный положительный заряд. Вследствие этого потенциал плазмы (над освещенной частью Луны) относительно терминатора должен стать положительным, т.е. потенциал терминатора будет меньше нуля. Перепад потенциалов между терминатором и плазмой (над освещенной частью Луны) не может распределиться по всему объему плазмы, поскольку из-за дебаевского экранирования изменение потенциала должно происходить у терминатора в области толщиной в несколько дебаевских радиусов. Эта область, которая должна существовать в окрестности терминатора, представляет собой аналог плазменного слоя. Такой слой создает потенциальный барьер в области терминатора, благодаря которому в плазме за счёт электростатических сил удерживаются более подвижные частицы (в рассматриваемом случае электроны). Для терминатора выполняется критерий, аналогичный критерию Бома для образования слоев, что обусловлено достаточно большими значениями (несколько метров в секунду) скорости терминатора. Поведение электрического поля и концентрации пылевых частиц в области терминатора показано на рис. 5. Ширина плазменной возмущенной области, связанной с терминатором, составляет величину $\sqrt{2}\lambda_{Di} \sim 10$ м, где λ_{Di} – ионный дебаевский радиус у поверхности Луны. В этой области возникают значительные электрические поля с напряженностью $E \sim 300$ В/м, которые приводят к подъему положительно заряженных микронных пылевых частиц на высоты порядка нескольких десятков сантиметров. Предложенный эффект может быть использован для объяснения свечения над областью лунного терминатора, которое наблюдалось космическими аппаратами SURVEYOR.

zmiana potencjału w obszarze terminatora może być tylko rzędu kilku długości Debye'a. Ten obszar w otoczeniu terminatora jest analogiem warstwy plazmowej. Warstwa ta w obszarze terminatora tworzy barierę potencjału, dzięki której w plazmie ze względu na działanie sił elektrostycznych utrzymywane są bardziej mobilne cząstki (w tym przypadku elektrony). Dla terminatora spełnione jest kryterium analogiczne do kryterium Bohma formowania się warstw plazmowych, wynika to z dostatecznie dużej (rzędu kilku m/s) prędkości terminatora. Zachowanie się pola elektrycznego i koncentracji cząstek pyłu w obszarze terminatora pokazane jest na rys. 5. Szerokość zaburzonego obszaru związanego z terminatorem, wynosi $\sqrt{2}\lambda_{Di} \sim 10$ m, gdzie λ_{Di} – jonowy promień Debye'a na powierzchni Księżyca. W tym obszarze powstają silne pola elektryczne o natężeniu $E \sim 300$ V/m, które powodują unoszenie się mikronowych cząsteczek pyłu, które prowadzą do podnośności dodatnio naładowanych mikronowych pyłowych cząstek na wysokości rzędu kilkudziesięciu centymetrów. Zaproponowany efekt może być wykorzystany do wytłumaczenia obserwacji wykonanych przez sondę kosmiczną SURVEYOR, świecenia nad powierzchnią księżycową.

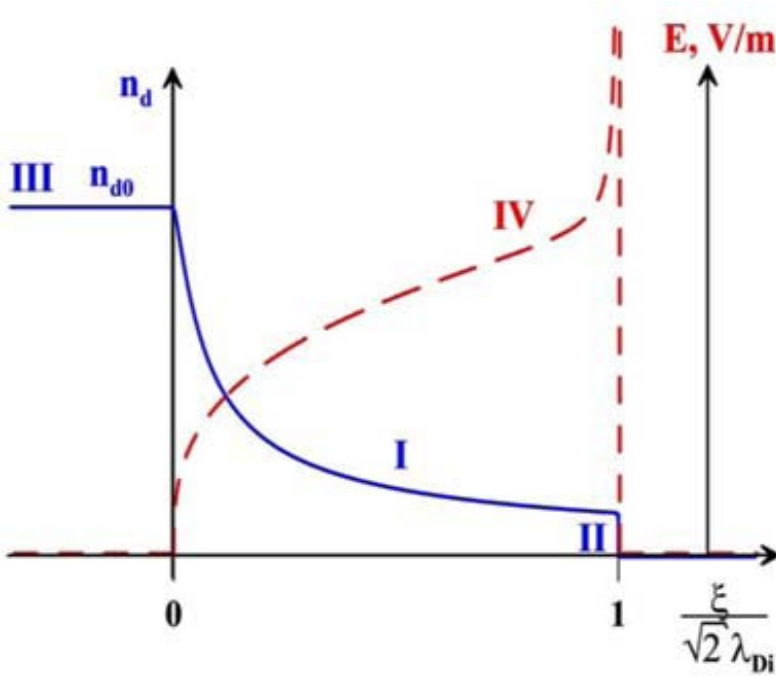


рис. 5. Концентрация пылевых частиц (синяя кривая) и электрическое поле (красная кривая) в окрестности лунного терминатора. Невозмущённые зоны соответствуют освещённой ($\xi < 0$) и тёмной ($\xi > \sqrt{2}\lambda_{Di}$) сторонам Луны. Зона $0 < \xi < \sqrt{2}\lambda_{Di}$ представляет собой плазменную возмущённую область, связанную с терминатором. Римские цифры I, II, III характеризуют участки синей кривой с различными зависимостями концентрации пыли. Участок IV на красной кривой обозначает ту же область, что и участок I на синей кривой. Переменная ξ характеризует пространственную координату в системе отсчета, движущейся вместе с терминатором

rys. 5. Koncentracja cząstek pyłu (linia niebieska) i pole elektryczne (linia czerwona) w otoczeniu księżycowego terminatora. Niezaburzone obszary odpowiadają oświetlonej ($\xi < 0$) i ciemnej ($\xi > \sqrt{2}\lambda_{Di}$) stronie Księżyca. Obszar $0 < \xi < \sqrt{2}\lambda_{Di}$ zaburzony obszar plazmy związanej z terminatorem. Rzymskie cyfry I, II, III charakteryzują części krzywej niebieskiej z różnymi zależnościami koncentracji. Część IV czerwonej krzywej oznacza ten sam obszar, co I na krzywej niebieskiej. Zmienna ξ charakteryzuje przestrzenne współrzędne w układzie odniesienia poruszającym się z terminatorem.

Важным механизмом образования пыли над поверхностью Луны являются удары высокоскоростных метеороидов о её поверхность. Функция распределения метеороидов, ударяющихся о поверхность Луны, по скоростям представлена на рис. 6. Исследование влияния ударов высокоскоростных метеороидов на плазменно-пылевую систему в окрестностях Луны проводилось в работе [Popel et al., 2015b].

Istotnym mechanizmem powstania pyłu nad Księżycem są uderzenia szybkich meteoroidów w jego powierzchnię. Funkcja rozkładu meteoroidów uderzających o powierzchnię Księżyca w zależności od prędkości pokazana jest rys. 6. Badanie wpływu uderzeń szybkich meteoroidów na układ plazmowo-pyłowy w otoczeniu Księżyca opisano w pracy [Popel et al. 2015b].

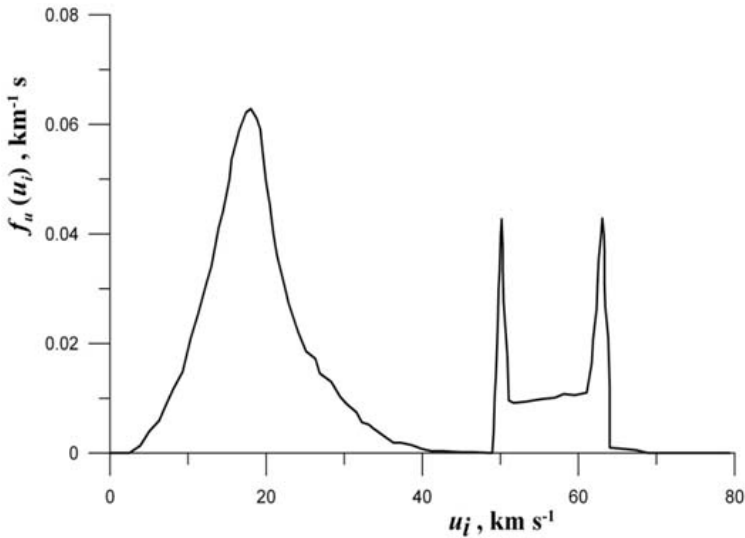


рис. 6. Функция распределения метеороидов, ударяющихся о поверхность Луны, по скоростям
rys. 6. Funkcja rozkładu meteorytów uderzających o powierzchni Księżyca w zależności od prędkości.

При высокоскоростном ударе метеороида о поверхность Луны вещество в ударнике и мишени сильно сжимается и нагревается. Под действием возникающего высокого давления происходит расширение и вытеснение среды с образованием сильной ударной волны, в первом приближении полусферической формы. Распространяясь от центра удара, ударная волна охватывает всё большую массу вещества мишени, значительно превышающую массу ударника. В стадии быстрой механической разгрузки происходит испарение и плавление вещества. Для полного испарения вещества, сжатого ударной волной с последующей быстрой разгрузкой, удельная энергия во фронте волны более чем примерно в 5 раз должна превышать энергию связи, что соответствует скорости ударника больше 10 км/с. По мере удаления от центра удара первоначально сильная сверхзвуковая ударная волна ослабевает и постепенно становится звуковой волной, в которой

В wyniku uderzenia z dużą prędkością meteorytu o powierzchnię Księżyca następuje silna kompresja i nagrzewanie zarówno impaktora jak i tarczy. Pod wpływem wysokiego ciśnienia zachodzi ekspansja i wyrzucenia ośrodka z równoczesnym powstaniem silnej fali uderzeniowej (w pierwszym przybliżeniu półkulistej). Rozprzestrzeniając się od środka fala uderzeniowa obejmuje całą dużą masę tarczy przewyższając znacznie jej masę. Na tym etapie substancja ulega odparowaniu i stopieniu. Aby substancja skompresowana falą uderzeniową uległa całkowitemu odparowaniu, energia właściwa na froncie fali powinna przewyższać przykładowo pięciokrotnie energię wiązania, odpowiada to 10 km/s prędkości impaktora. W miarę oddalania się od centrum uderzenia silna naddźwiękowa fala przechodzi w falę dźwiękową, w której maksymalna prędkość i ciśnienie są do siebie. Proporcjonalne. Fakt, że podstawowym parametrem przy uderzeniach z

максимальное давление и максимальная массовая скорость прямо пропорциональны друг другу. При высокоскоростном ударе основным параметром, характеризующим источник возмущения на больших расстояниях от точки удара, является кинетическая энергия ударника. Это обстоятельство позволяет воспользоваться ударно-взрывной аналогией и законами энергетического подобия, согласно которым параметры, описывающие удар и взрыв, могут быть связаны одними и теми же уравнениями, если все линейные размеры будут нормированы на корень кубический из полной выделившейся энергии вне зависимости от источника быстрого энерговыделения. В процессе механической разгрузки вещества и ослабления ударной волны за зоной испарения формируются области плавления, разрушения и необратимой деформации частиц реголита. В этой области при распространении ударной волны максимальное давление в ударной волне ещё остается выше динамического предела упругости материала частиц реголита. За областью дробления и необратимых деформаций следует область упругих деформаций частиц реголита, характеризующаяся максимальным давлением в ударной волне ниже динамического предела упругости. В области упругих деформаций частиц реголита звуковая волна может разрушить обусловленную силами адгезии связь между частицами реголита и оторвать их друг от друга и от лунной поверхности. Условием отрыва частицы реголита от лунной поверхности может служить превышение максимального давления в звуковой волне над пределом прочности реголита на растяжение. Данные рассуждения позволяют определить среднее число

dużą prędkością podstawowym parametrem jest kinetyczna energia impaktora pozwala wykorzystać zastosować prawa energetycznego, zgodnie z tymi prawami parametry opisujące uderzenie i wybuch mogą, być opisane tymi samymi równaniami, jeśli wszystkie liniowe rozmiary będą znormalizowane do sześciennego pierwiastka całkowitej wydzielanej energii niezależnie od źródła szybkiego uwalniania energii. W tym procesie, poza falą uderzeniową i obszarem parowania formują się obszary B процессе механической разгрузки вещества и ослабления ударной волны за зоной испарения формируются области топления и необратимого разрушения и деформации реголита. W tym obszarze maksymalne ciśnienia w trakcie rozchodzenia się fali uderzeniowej jest ciągle powyżej dynamicznej granicy sprężystości materiału cząstek reголита. Za obszarem kruszenia i nieodwracalnych deformacji następuje obszar odkształceń sprężystych, scharakteryzowane przez maksymalnym ciśnieniem fali oderzeniowej poniżej dynamicznej granicy sprężystości. E obszarze sprężystych deformacji reголита fala akustyczna może rozerwać, związane ze sobą siłami adhezji, cząsteczki reголита i oderwać je od powierzchni Księżyca. Warunek oderwania się cząsteczki od powierzchni Księżyca może być spełniony, gdy maksymalne ciśnienie fali akustyczne przewyższa wytrzymałość reголита na rozciąganie. Powyższe rozważania pozwalają określić średnią liczbę cząstek reголита wybijanych na różne wysokości w jednostce czasu z jednostki powierzchni Księżyca w wyniku bombardowania meteorytami. Na przykład wyliczenia dla wysokości $h = 0,1$ m, 1 m i 10 m dają następujące wartości liczby czą-

частиц реголита, покидающих в результате метеороидной бомбардировки лунную поверхность с единицы площади лунной поверхности в единицу времени на различных высотах над поверхностью Луны. Например, вычисления для высот $h = 0,1; 1$ и 10 м дают следующие значения среднего числа частиц реголита, покидающих лунную поверхность: $N = 65, 20$ и $7 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$. Функция распределения выбрасываемых метеороидами частиц по размерам, нормированная на единицу, приведена на рис. 7.

stek opuszczających powierzchnię Księżyca: $N = 65 \text{ m}^{-2} \text{ doba}^{-1}$, $20 \text{ m}^{-2} \text{ doba}^{-1}$, $7 \text{ m}^{-2} \text{ doba}^{-1}$. Na rys. 7 pokazana jest znormalizowana do jedności funkcja rozkładu, wybijanych przez meteoryty, cząsteczek w zależności od ich rozmiarów,

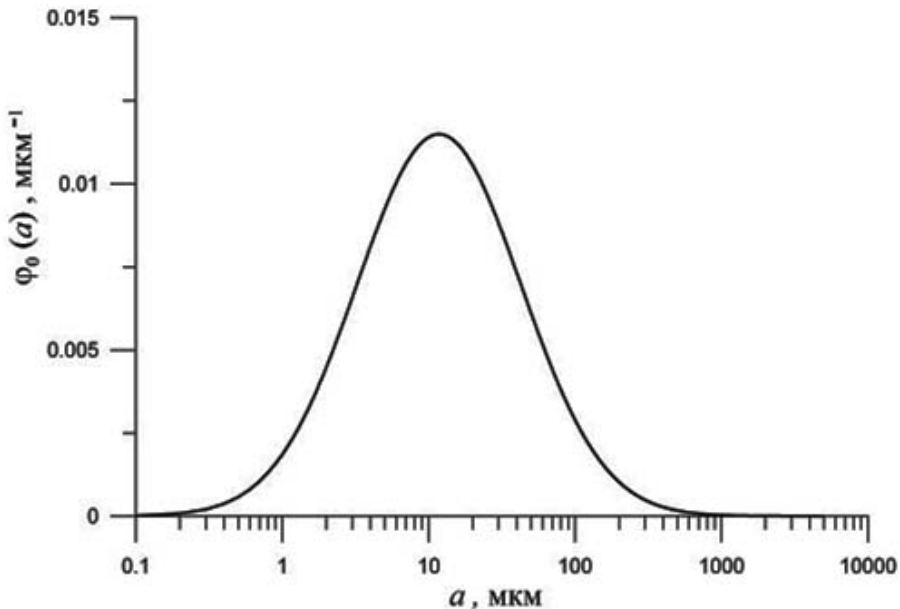


рис. 7. Функция распределения выбрасываемых метеороидами частиц по размерам
rys. 7. Funkcja rozkładu wybijanych przez meteor cząsteczek w funkcji rozmiarów

ЛИТЕРАТУРА

BIBLIOGRAFIA

- [Golub et al., 2012] *Golub' A.P., Dol'nikov G.G., Zakharov A.V., Zelenyi L.M., Izvekova Yu. N., Kopnin S.I., Popel S.I.* Dusty Plasma System in the Surface Layer of the Illuminated Part of the Moon // JETP Letters. 2012. V. 95. № 4. P. 182-187.
- [Lisin et al., 2013] *Lisin E.A., Tarakanov V.P., Petrov O.F., Popel S.I., Dol'nikov G.G., Zakharov A.V., Zelenyi L.M., Fortov V.E.* Effect of the Solar Wind on the Formation of a Photoinduced Dusty Plasma Layer near the Surface of the Moon // JETP Letters. 2013. V. 98. № 11. P. 664-669.

- [Morozova et al., 2015] *Morozova T.I., Kopnin S.I., Popel S.I.* Wave Processes in Dusty Plasma near the Moon's Surface // *Plasma Physics Reports*. 2015. V. 41. № 10. P. 799-807.
- [Popel et al., 2015a] *Popel S.I., Atamaniuk B., Zelenyi L.M.* Electric Fields and Dust Particle Rise near the Lunar Terminator // *The Sixth Moscow Solar System Symposium (Moscow, Russia)*. 2015. 6MS3-DP-06, P. ab-92--ab-93.
- [Popel et al., 2014a] *Popel S.I., Golub' A.P., Izvekova Yu. N., Afonin V.V., Dol'nikov G.G., Zakharov A.V., Zelenyi L.M., Lisin E.A., Petrov O.F.* On the Distributions of Photoelectrons over the Illuminated Part of the Moon // *JETP Letters*. V. 99. № 3. P. 115-120.
- [Popel et al., 2015b] *Popel S.I., Golub' A.P., Izvekova Yu. N., Atamaniuk B., Dolnikov G.G., Lisin E.A., Zakharov A.V., Zelenyi L.M.* Meteoroid Impacts and Dust Particle Release from the Lunar Surface // *The Sixth Moscow Solar System Symposium (Moscow, Russia)*. 2015. 6MS3-DP-07. P. ab-94--ab-95.
- [Popel et al., 2014b] *Popel S.I., Golub' A.P., Zelenyi L.M.* Photoelectron Distribution Function over the Illuminated Part of the Moon // *The European Physical Journal D*. 2014. V. 68. № 9. P. 245, 5 pages.
- [Popel et al., 2013a] *Popel S.I., Kopnin S.I., Golub' A.P., Dol'nikov G.G., Zakharov A.V., Zelenyi L.M., Izvekova Yu. N.* Dusty Plasmas near the Surface of the Moon // *Solar System Research*. 2013. V. 47, № 6. P. 419-429.
- [Popel et al., 2013b] *Popel S.I., Morfill G.E., Shukla P.K., Thomas H.* Waves in a Dusty Plasma over the Illuminated Part of the Moon // *Journal of Plasma Physics*. 2013. V. 79. № 6. P. 1071-1074.
- [Popel, Zelenyi, 2013] *Popel S.I., Zelenyi L.M.* Future Lunar Missions and Investigation of Dusty Plasma Processes on the Moon // *Journal of Plasma Physics*. 2013. V. 79. № 4. P. 405-411.
- [Popel, Zelenyi, 2014] *Popel S.I., Zelenyi L.M.* Dusty Plasmas over the Moon // *Journal of Plasma Physics*. 2014. V. 80. № 6. P. 885-893.

Results of research on identification of the role of dusty plasmas in the surface layer over the Moon are presented. An expression that describes the distribution of photoelectrons over the illuminated part of the lunar surface is obtained. The size and elevation distributions of the charged dust particles located over the illuminated part of the lunar surface are calculated for different subsolar angles. Layout of the experiment on the measurements of the quantum yield and work function of lunar regolith, which are important from the viewpoint of the formation of dusty plasma system, directly on the surface of the Moon is given. Such measurements can be performed in the framework of future lunar missions. Linear and nonlinear waves in the plasma near the Moon's surface are considered. Formation of analogue of plasma sheath in the region of the lunar terminator is discussed. It is shown that this effect can be used for explanation of horizon glow and streamers observed by space apparatuses Surveyor above the lunar surface. Lunar dust particle launching process due to meteoroid impacts is studied.

ОСНОВНЫЕ ИСПОЛНИТЕЛИ

1. ХЕМИКС – РЕНТГЕНОВСКИЙ СПЕКТРОМЕТР БРЭГГА ДЛЯ СОЛНЕЧНО-ГЕЛИОСФЕРНОЙ МИССИИ ИНТЕРГЕЛИОЗОНД

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

В. Кузнецов

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

С. Кузин

2. РЕНТГЕНОВСКИЙ ТЕЛЕСКОП «СОРЕНТО»

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

С. Богачев

3. РЕНТГЕНОВСКАЯ СПЕКТРОФОТОМЕТРИЯ СОЛНЦА (РЕСИК)

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

Кузнецов В.Д.

GLÓWNI AKTORZY

1. CHEMIX: RENTGENOWSKI SPEKTROMETR BRAGGA NA MIĘDZYPLANETARNĄ MISJĘ INTERHELIOPROBE

Centrum Badań Kosmicznych Polskiej
Akademii Nauk (CBK PAN), Wrocław
***M. Siarkowski, J. Sylwester, J. Bąkała,
Ż. Szaforz, Z. Kordylewski***

2. TELESKOP RENTGENOWSKI «SORENTO»

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

3. SPEKTROSKOPIA RENTGENOWSKA SŁOŃCA (RESIK)

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

4. «СОЛЬПЕКС»:
СПЕКТРОМЕТРОПОЛЯРИМЕТР
МЯГКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СОЛНЦА

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

С. Кузин, С. Шестов

5. ТРАНЗИЕНТ

Институт космических исследований
Российской Академии наук (ИКИ РАН),
г. Москва

А. Позаненко

6. ИЗЛУЧЕНИЕ»

Институт космических исследований
Российской Академии наук (ИКИ РАН),
г. Москва

***М. Мозилевский, Т. Романцова,
И. Моисеенко***

7. ИОНОСФЕРА:
МОДЕЛИРОВАНИЕ
ИОНОСФЕРНОЙ ПОГОДЫ
ДЛЯ РАДИОСВЯЗИ

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

***Т. Гуляева, И. Крашенинников,
Л. Пустовалова***

4. «SOLPEX»: SPEKTROPOLARIMETR
MIĘKKIEGO PROMIENIOWANIA
RENTGENOWSKIEGO SŁOŃCA

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

***S. Płoceniak, M. Stęślicki, J. Bąkała,
Ż. Szaforz, D. Ścisłowski, M. Kowaliński,
Z. Kordylewski***

5. TRANZYT

Centrum Fizyki Teoretycznej Polskiej
Akademii Nauk (CFT GFY), Warszawa

L. Mankiewicz

6. PROMIENIOWANIE

Centrum Badań Kosmicznych Polskiej
Akademii Nauk (CBK PAN), Toruń, Warszawa

R. Schreiber, H. Rothkaehl

7. JONOSFERA:
MODELOWANIE POGODY
JONOSFERYCZNEJ
DLA ŁĄCZNOŚCI RADIOWEJ

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

***I. Stanisławska, B. Dziak-Jankowska,
Ł. Tomasiak***

8. ГЛОНАСС/GPS
МОНИТОРИНГ
ИОНОСФЕРЫ

Западное отделение Институт
земного магнетизма, ионосферы
и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова Российской Академии
наук (ЗО ИЗМИРАН), г. Калининград
**И. Шагимуратов, И. Захаренкова,
Ю. Черняк, И.Ефишов**

9. ИНЖЕКЦИЯ

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

10. ИССЛЕДОВАНИЯ
ПЛАЗМЕННО-ВОЛНОВЫХ
ПРОЦЕССОВ В ИОНОСФЕРЕ
И МАГНИТОСФЕРЕ (ПВО)

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

11. ТЕРМО-ЛР

Институт геохимии и аналитической
химии им. В.И.Вернадского РАН
Е. Слюта

8. MONITORING JONOSFERY
PRZY UŻYCIU OBSERWACJI
GPS/GLONASS

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

9. «INIEKCJA»

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

10. BADANIA
PLAZMOWO-FALOWYCH
PROCESÓW W JONOSFERZE
I MAGNETOSFERZE (PWO)

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

11. THERMO-LR

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

Institute of Planetary Research, Research
Scientist Department of Planetary Physics,
Berlin
M. Grott

12. АСИМПТОТИКА

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

13. ТУРБУЛЕНТНОСТЬ
И ПЫЛЕВАЯ ПЛАЗМА

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

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

12. ASYMPTOTYKA

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

13. TURBULENCJA
PLAZMA PYŁOWA

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

ВЫХОДНЫЕ ДАННЫЕ