УДК 550.385.37; 550.388 № держреєстрації 0116U002870 Інв. №

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ РАДІОАСТРОНОМІЧНИЙ ІНСТИТУТ (РІ НАНУ) 61002, м. Харків - 2, вул. Мистецтв, 4 тел. (057) 706-14-15

ЗАТВЕРДЖУЮ **Директор РІ НАНУ** академік НАН України деф. м. наук, професор Л.М. Литвиненко M.H.YT ентифікаційни ко**к**02772070 2016 p. **3BIT**

ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ

БАГАТОПОЗИЦІЙНІ ІОНОСФЕРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ДЛЯ ПІДСУПУТНИКОВОГО СУПРОВОДУ НАЦІОНАЛЬНИХ І МІЖНАРОДНИХ КОСМІЧНИХ ПРОЕКТІВ. СТВОРЕННЯ СИСТЕМИ ЗБОРУ, ОБРОБКИ ТА АНАЛІЗУ НАЗЕМНИХ І БОРТОВИХ КОСМІЧНИХ GPS/ГЛОНАСС СПОСТЕРЕЖЕНЬ (ШИФР «ЛІРУС-2»)

Етап №2 «Магнітосферно-іоносферні дослідження за даними обсерваторій Системи підсупутникового моніторингу іоносфери»

Науковий керівник НДР В.о. завідувача відділу д. ф.-м. наук, с.н.с.

—— А.В. Залізовський

Харків – 2016

Результати роботи розглянуто Вченою Радою РІ НАН України, протокол № 11 від 23 листопада 2016 р.

СПИСОК ВИКОНАВЦІВ

Науковий керівник НДР В.о. зав. відд., д.ф.-м.н., с.н.с

А.В. Залізовський

Ю.М. Ямпольський

О.В. Колосков

В.М. Лисаченко

О.В. Пазнухов

С.Б. Кащеєв

Науковий консультант Гол.н.с., д.ф.-м.н., акад. НАНУ, проф.

J. hui Л.М. Литвиненко

Відповідальні виконавці Гол.н.с., д.ф.-м.н., чл.-кор. НАНУ, проф. С.н.с., к.ф.-м.н., с.н.с. С.н.с., к.т.н., с.н.с. Пров. інженер-радіофізик Інженер 1 кат.

Виконавці

Н.с., к.ф.-м.н.

М.н.с., к.ф.-м.н.

Пров. інженер-дослідник

Пров. інженер-дослідник

Інженер 1 кат., PhD

Інженер 1 кат.

Інженер 1 кат.

Інженер

au

А.О. Сопін О.В. Чаркіна Л.Д. Токарська Д.В. Шульга Є.М. Занімонський Б.Ю. Гаврилюк А.В. Соіна І.І. Пікулік

Організація-співвиконавець у 2016 році

ГАО НАНУ

РЕФЕРАТ

ЗВІТ ПРО НДР включає: сторінок 151, рисунків 49, таблиць 9, посилань 197. ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ – природні збурення іоносфери Землі, глобальні електромагнітні резонатори.

МЕТА РОБОТИ – Проведення досліджень електромагнітних резонансних явищ V геокосмосі 3 використанням супутникових та наземних комплексів. оригінальних вимірювальних Створення нових метолів підсупутникової багатопозиційної діагностики стану іоносфери та магнітосфери Землі.

Звіт включає в себе результати, що були отримані при виконанні НДР за Цільовою комплексною програмою з космічних досліджень у 2013-2016 роках. Було вирішено наступні задачі:

- Розвинуто оригінальний підхід використання природних електромагнітних резонаторів Землі в ролі "індикаторів" стану космічної погоди. Встановлена реакція шуманівського, іоносферного альфвенівського та магнітосферного резонаторів на сонячну активність у повному 11-річному сонячному циклі.

 Розроблено та реалізовано оригінальну методику побудови регіональних карт варіацій повного електронного вмісту за даними "регіональних" мереж ГНСС приймачів. Використання методики дозволило виявляти і наочно відображати природні обурення в геокосмосі на іоносферних висотах.

- Модернізовано глобальну мережу Інтернет-керованих приймальних систем УНЧ, СНЧ і ВЧ діапазонів для дистанційної підсупутникової діагностики іоносфери.

Забезпечено безперервне функціонування і проведено істотну модернізацію
електромагнітної обсерваторії на Українські антарктичній станції «Академік
Вернадський» як одного з пунктів підсупутникового моніторингу іоносфери.

Ключові слова: іоносфера, магнітосфера, система підсупутникового іоносферного моніторингу, глобальні електромагнітні резонатори, космічна погода, повний електронний вміст іоносфери.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ
РАЗДЕЛ 1. СТРУКТУРА ГЕОКОСМОСА
1.1 Магнитосфера 10
1.2 Ионосфера13
1.3 Атмосфера и литосфера 19
РАЗДЕЛ 2 МЕТОДИ І УСТАНОВКИ ЗОНДУВАННЯ ГЕОКОСМОСУ 22
2.1 Патруль космической погоды с помощью орбитальных аппаратов 22
2.2 Установки зондирования геокосмоса наземного базирования
2.2.1 Наземный патруль солнечных и галактических источников
2.2.2. Наземные системы диагностики состояния ионосферы Земли 25
РАЗДЕЛ 3. МЕТОДЫ, ОБСЕРВАТОРИИ И КОМПЛЕКСЫ РИ НАН
УКРАИНЫ
3.1 НЧО РИ НАН Украины как базовый элемент СПИМ 35
3.2. Электромагнитная обсерватория на УАС 42
3.3 Комплексы в Скандинавии и Сибири 48
3.4 Сеть интернет управляемых ВЧ приемников
3.4.1. Аппаратное обеспечение ПИК и программа сбора данных 55
3.4.2. Система интернет-трансляции обработки и визуализации данных
наблюдений59
РАЗДЕЛ 4. ГЛОБАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РЕЗОНАТОРЫ
КАК ИНДИКАТОРЫ СОСТОЯНИЯ ГЕОКОСМОСА
4.1 Природа шумановских резонансов67
4.2 Ионосферный альфвеновский резонатор 72
4.2.1. Природа ИАР, морфология сигналов

4.2.2 Наземно-космические наблюдения ИАР в эксперименте Чибис 77					
4.2.3 Методика восстановление критической частоты ионосферы по					
данным наб	блюдений ИАР				
4.2.4 Эффег	кт расщепления р	езонансных мод]	ИАР		
4.3. Магнитос	сферный резонато	эр			
4.3.1 Вероя	тности наблюден	ия пульсаций Рс1	•••••		
4.3.2 Вероя	тности наблюден	ия пульсаций Рс3	8-Рс4 на УАС	94	
4.3.3 Поляр	оизационные свой	ства пульсаций Р	с3-Рс4 по да	нным УАС и	
НЧО					
4.4 Глобальні	ые резонаторы в	l 1-летнем цикле с	солнечной ак	тивности 97	
РАЗДЕЛ 5.	ДИАГНОСТИ	КА ИОНОС	СФЕРЫ	МЕТОДАМИ	
доплеровс	КОГО	вч зоі	НДИРОВАН	ИЯ И	
РАДИОПРОС	ВЕЧИВАНИЯ С	ИГНАЛАМИ С	путников	В ГНСС 108	
5.1. Модерни	зация приемных	когерентных ВЧ в	комплексов		
5.1.1. Опис	ание алгоритма с	инхронизации вре	емени цифро	вого	
когерентно	го приемного ком	иплекса на сталии	обработки л	анных 110	
5.1.2 Измер	1		e o o puo o min p		
	ения на трассе Pl	ЗМ-УАС			
5.1.3 Измер	рения на трассе Pl рения на трассе Pl	ЗМ-УАС ЗМ-Тромсё			
5.1.3 Измер 5.1.4 Измер	рения на трассе PI рения на трассе PI рения на трассе PI	ЗМ-УАС ЗМ-Тромсё ЗМ-Свалбард (So	usy)		
5.1.3 Измер 5.1.4 Измер 5.1.5 Выдел	рения на трассе PI рения на трассе PI рения на трассе PI рения на трассе PI пения вариаций Д	ЗМ-УАС ЗМ-Тромсё ЗМ-Свалбард (So СЧ, связанных с р	usy)распростране	113 117 118 ением АГВ-	
5.1.3 Измер 5.1.4 Измер 5.1.5 Выдел ПИВ	рения на трассе Pl рения на трассе Pl рения на трассе Pl пения вариаций Д	ВМ-УАС ЗМ-Тромсё ЗМ-Свалбард (So CЧ, связанных с р	usy)	113 117 118 ением АГВ- 119	
5.1.3 Измер 5.1.4 Измер 5.1.5 Выдел ПИВ 5.2. Картогра	рения на трассе PI рения на трассе PI рения на трассе PI пения вариаций Д фирование вариа	ВМ-УАС ЗМ-Тромсё ЗМ-Свалбард (So СЧ, связанных с р ций полного элек	usy) распростране тронного сод	113 117 118 ением АГВ- 119 цержания 120	
5.1.3 Измер 5.1.4 Измер 5.1.5 Выдел ПИВ 5.2. Картогра ВЫВОДЫ	рения на трассе PI рения на трассе PI рения на трассе PI пения вариаций Д фирование вариа	ВМ-УАС ЗМ-Тромсё ЗМ-Свалбард (So СЧ, связанных с р ций полного элек	usy) распространс тронного сод	113 117 118 ением АГВ- 119 цержания 120 128	

введение

С началом космической эры во второй половине ХХ-го столетия геокосмос стал средой обитания человечества. Сотни наземно-космических комплексов непрерывно обеспечивают пользователей услугами радиосвязи, телевещания, глобальной навигации, мониторингом атмосферы, диагностики поверхности мирового недр, суши И океана, прогнозирования катастрофических явлений и другими жизненно важными потребностями цивилизации. Очевидно, что успешное функционирование уже существующих и создание новых систем требуют совершенствования наших знаний о среде "обитания" искусственных спутников Земли (ИСЗ), являющихся главным технологическим звеном в эксплуатации геокосмоса. Одним из ведущих научных направлений XXI-го века международным сообществом ученых провозглашена концепция космической погоды (КП), направленная на визуализацию состояния околоземного плазменного окружения и построение прогностических моделей его поведения в зависимости от солнечной активности.

Еще одним важным мотивом для развития исследований ионосферы и магнитосферы нашей планеты является фундаментальный научный аспект солнечно-земного взаимодействия. Ионосфера и магнитосфера являются гигантскими природными плазменными "лабораториями", позволяющими исследовать процессы, не реализуемые в наземных условиях.

В рамках Целевой комплексной программы НАН Украины по космическим исследованиям на 2012-2017 годы задачи Отдела Радиофизики геокосмоса Радиоастрономического института НАН Украины преимущественно состояли в разработке и модернизации методов и средств подспутниковой диагностики околоземного космического пространства. Разработанные новые и модернизированные методы использовались для развития и дополнения образа космической погоды с помощью наземных диагностических средств.

В связи растущим энергопотреблением И, С как следствие, электромагнитным загрязнением окружающей предпочтение среды, отдавалось методам, которые не требуют создания специальных передающих систем, а используют уже существующие виды электромагнитного излучения природного и искусственного происхождения. Разрабатывались новые подходы к дистанционному зондированию геокосмоса с использованием "индикаторов" космической природных погоды. В качестве таких "индикаторов" исследованы и апробированы глобальные электромагнитные резонаторы – Шумановский резонатор (ШР), ионосферный альфвеновский резонатор (ИАР), и магнитосферные резонаторы (МР). ШР образован между Землей и нижней ионосферой. ИАР сферической полостью сформирован высотным профилем электронной концентрации и структурой магнитного поля Земли (МПЗ). Нижняя граница ИАР расположена на высотах динамо области, а верхняя локализована во внешней ионосфере. МР образован силовыми трубками магнитного поля Земли, которые, как и в случае с ИАР, опираются на динамо-область, но в магнитосопряженных областях, расположенных в разных полушариях.

Собственными модами Шумановского резонатора являются электромагнитные волны СНЧ диапазона, длина волн которых соизмерима с длиной земной окружности. Резонансными колебаниями ИАР являются МГД волны УНЧ диапазона с пространственными масштабами порядка толщины ионосферы (1000 – 2000км). Колебания МР также связаны с МГД волнами, их периоды порядка единиц-сотен секунд, пространственный масштаб – десятки тысяч километров, на поверхности Земли они регистрируются в виде геомагнитных пульсаций.

Описанные выше резонансные системы применены для диагностики процессов в геокосмосе, стимулированных регулярными гелиофизическими цикличностями, спорадической активностью Солнца, мощными возмущениями в магнитосфере, тропосфере и на поверхности Земли. Проведенные исследования позволили обнаружить и изучить ряд новых физических явлений и процессов, таких как 11-летнюю вариацию в поведении ШР, ИАР и МР, расщепление спектров ИАР и др.

Изученные явления носят планетарный характер, поэтому для их диагностики была модернизирована созданная ранее сеть пространственнодействующих разнесенных, автономных, постоянно радиофизических комплексов дистанционной диагностики геокосмоса с использованием электромагнитных полей и сигналов УНЧ, СНЧ, ВЧ и УВЧ диапазонов, размешенных в Антарктике, Арктике и Европе. В рамках работ по Программе была разработана и реализована новая методика построения карт вариаций полного электронного содержания по данным региональных сетей ГНСС позволяющая приемников, контролировать И визуализировать ионосферные (ПИВ). перемещающиеся возмущения Также были модернизированы приемные когерентные ВЧ комплексы, расположенные на обсерваториях подспутникового ионосферного зондирования, с помощью которых проводится доплеровский мониторинг ПИВ.

Результаты, полученные В ходе решения Программы, задач опубликованы в следующих работах. Статьи [1, 2, 3, 4] посвящены изучению ШР, они базируются на накопленных в Антарктике данных. В статьях [5, 6, 7, 8, 9] изложены результаты исследования ИАР. Результаты по исследованию ионосферных неоднородностей методом радиопросвечивания сигналами ГНСС изложены в работах [10, 11, 12, 13]. Модернизация приемноизмерительных комплексов обсерваториях подспутникового на ионосферного мониторинга, и полученные в ее результате новые физические результаты, описаны в работах [14, 15, 16, 17, 18, 19]. Представленные в отчете результаты были опробованы на серии международных конференций [20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29]. Суммарный «импакт»-фактор журналов, в которых опубликованы статьи [3, 13, 19] составляет 10,258.

РАЗДЕЛ 1. СТРУКТУРА ГЕОКОСМОСА

Геокосмосом называется область межпланетного пространства вблизи Земли. включающая В себя нейтральную атмосферу, ионосферу И магнитосферу [30]. Слово геокосмос содержит две составляющие: "гео", которая происходит от древнегреческого слова Земля - "уŋ", и "космос" подревнегречески "χώρος" – мир, пространство. Это, как нельзя точнее, соответствует определению, согласно которому: геокосмосом называется часть околоземного пространства, на параметры которого оказывают воздействие атмосфера и магнитное поле Земли. Внешней границей геокосмоса принято считать магнитопаузу, отделяющую область. контролируемую магнитным полем Земли от межпланетной среды, свойства которой определяются потоками солнечного ветра [31]. Положение магнитопаузы определяется равенством динамического давления планетарного и межпланетного магнитных полей. В подсолнечной точке оно может быть оценено из соотношения:

$$(\rho \vartheta^2) \approx \left(\frac{4B(r)^2}{2\mu_0}\right),\tag{1.1}$$

Здесь: ρ и \mathcal{G} это плотность и скорость солнечного ветра соответственно; $B(r) = B_0/r^3$ - напряженность магнитного поля Земли; B_0 - ее магнитный момент; r – дистанция до магнитопаузы, называемая расстоянием Чепмена-Ферраро; μ_0 - магнитная проницаемость вакуума. Учитывая (1.1) r можно оценить, как:

$$r \approx \sqrt[6]{\left(\frac{2B_0^2}{\mu_0 \rho \mathcal{G}^2}\right)},\tag{1.2}$$

Входящие в (1.2) величины ρ и *9* зависят от текущей солнечной активности. Поэтому расстояние до магнитопаузы в подсолнечной точке изменяется в пределах от 6 до 15 радиусов Земли (~ 40 000 – 100 000 км). При этом в хвостовой части характерный размер магнитосферы значительно увеличивается и может составлять более миллиона километров, что в несколько раз превышает радиус орбиты Луны.

Следует отметить, что существует и другое определение [30], в соответствии с которым к геокосмосу относится область межпланетного пространства от солнечной фотосферы до мезосферы Земли. В такой формулировке геокосмос включает фотосферу, хромосферу, корону, солнечный ветер, магнитосферу и ионосферу Земли. Данное определение что предполагает, процессы неявно все В геокосмосе полностью формируются под влиянием энергетических потоков, приходящих от Солнца. Несомненно, Солнце является главным фактором, контролирующим околоземное плазменное окружение. В то же время, научные результаты последних лет, в том числе и полученные в данной работе, показывают, что на состояние геокосмоса также оказывают влияние процессы, происходящие под, на и вблизи поверхности Земли [32, 33, 34]. Поэтому в использовано первое определение геокосмоса, как области межпланетного пространства, где сказывается влияние Земли, ее атмосферы и магнитного поля.

Далее кратко рассмотрим области околоземного пространства, входящие в состав геокосмоса.

1.1 Магнитосфера

Магнитосферой называется область, в которой динамика заряженных частиц контролируется не столько тепловыми процессами, сколько геомагнитным полем [35, 36]. Математически это выражается неравенством:

$$\frac{B^2}{2\mu_0} > nkT , \qquad (1.3)$$

где: *В* - индукция геомагнитного поля, *k* – постоянная Больцмана, *n* – концентрация плазмы, *T* – температура.

Изучение магнитосферы Земли было начато в 1600 году, когда английский физик Вильям Гильберт предложил простую "механистическую" модель магнитного поля Земли в виде намагниченного шара – тереллы (по латински "маленькая земля"). До середины 20-го века геомагнитное поле исследовалось с поверхности при помощи магнитометров, которые дали возможность описать структуру поля в зависимости от координат и времени. Ракетные измерения, начатые в конце 50-х годов прошлого века, позволили начать исследования "in situ". С этого времени спутниковые измерения стали главным способом получения информации о свойствах магнитосферы. Открытые в ходе космической миссии "Explorer-1" *радиационные пояса Ван-Аллена*, а также предложенная в 1958 г., американским астрофизиком Е. Паркером концепция солнечного ветра сформировали современные представления о структуре магнитосферы (см., рис. 1.1). Определяющее воздействие на нее оказывает конфигурация геомагнитного поля. Далее представлено ее краткое описание.

В спокойных условиях силовые линии, выходящие с геомагнитных широт до 80^0 дневного полушария, замыкаются над дневной стороной. Такая же система линий, но уже для меньшего диапазона широт присутствует и на ночной стороне. В области замкнутых силовых линий создаются условия для распространения вдоль них магнитогидродинамических (МГД) волн, которые отражаясь от магнитосопряженных участков ионосферы в Северном и Южном полушариях, образуют структуру стоячих волн. Они формируют глобальный магнитосферный резонатор [37], свойства которого можно изучать, регистрируя на поверхности Земли геомагнитные пульсации [38].

11



Рисунок 1.1 – Структура магнитосферы Земли (рисунок приведен согласно [39])

Силовые линии МПЗ, выходящие с более высоких широт, формируют область *полярного каспа* (воронки). Начиная с 70⁰, силовые линии ночной стороны оказываются сильно вытянутыми в антисолнечном направлении, магнитосферы. B образуя так называемый хвост плоскости, перпендикулярной направлению на Солнце, сечение хвоста напоминает греческую букву θ , перемычки которой разделяют геомагнитные силовые линии, направленные к Солнцу и от него. Поверхность, разделяющая силовые линии, идущие в противоположных направлениях, называется нейтральным слоем. Частицы, влетающие в магнитное поле долей хвоста, смещаются под действием силы Лоренца, образуя ток, направленный вдоль наружной поверхности хвоста от его вечерней стороны к утренней.

Приполюсная область, силовые линии которой уходят в хвост магнитосферы называется *полярной шапкой*. Проецируемая на Землю овальная зона, близкая к проекции сечения хвоста магнитосферы, обозначает область, связанную силовыми линиями с магнитосферным хвостом. Она называется *авроральным овалом*. Заряженные частицы, находящиеся в хвосте магнитосферы и движущиеся по магнитным силовым линиям попадают внутрь рассматриваемой зоны, вызывая там полярные сияния, поэтому эта область называется еще *овалом полярных сияний*. Овал приближается к геомагнитному полюсу на дневной стороне и удаляется от него на ночной. Размер овала и его положение сильно зависят от уровня солнечной активности. Во время мощных геокосмических бурь [36], таких как "событие Кэррингтона" 1859 года, полярные сияния могут наблюдаться даже в тропическом поясе [40]. Важно отметить изменчивость магнитосферы в зависимости от уровня активности Солнца. Условной границей между магнитосферой и *ионосферой* считается высота порядка 1000 км.

1.2 Ионосфера

Ионосферой называется ионизированная часть верхней атмосферы, расположенная в области высот примерно от 50 до 1000 км. Главной причиной ее возникновения является воздействие на нейтральную атмосферу высокочастотного ультрафиолетового и рентгеновского излучения Солнца, в результате чего происходит ионизация атомов и молекул [41]. Ионосфера Земли состоит из смеси газа нейтральных атомов и молекул (в основном молекулярных и атомных азота и кислорода) и квазинейтральной плазмы, в которой число отрицательно заряженных частиц (электронов) в среднем соответствует числу положительно заряженных ионов. Заряженные частицы околоземной плазмы влияют на распространяющиеся ней В электромагнитные волны, что позволяет использовать последние ДЛЯ дистанционной диагностики ионосферы. Определяющее влияние на распространение радиоволн оказывают наиболее легкие и подвижные из заряженных частиц — электроны, концентрация которых N_e определяется числом электронов в единице объема и характеризует пространственновременное состояние ионосферы.

Данные наблюдений показали, что структуру ионосферы можно в первом приближении считать сферически слоистой [35, 41, 42]. Основные классификацией, слои В соответствии с введенной английским исследователем Э. Эплтоном, обозначаются буквами E, F и D [43]. Типичная уровней структура ионосферы для разных солнечной активности представлена на рис. 1.2 [35].

Согласно современным представлениям ионосфера структурируется следующим образом:

Слой D – это самая нижняя область, расположенная на высотах 60-90 км. В вечернее время в нижней части области (60-70 км) может возникать выраженный слой C и "долина" на высотах 70-85 км. В дневное время слой Cобычно исчезает. В верхней части слоя D преобладают процессы фотоионизации, контролируемые уровнем солнечного излучения. В первую очередь ионизацию там обеспечивает солнечная линия L_{q} (λ = 1216 A),



Рисунок 1.2 – Высотные профили электронной концентрации в среднеширотной ионосфере при максимуме (1) и минимуме (2) солнечной активности (рисунок взят из [35])

которая ионизирует окись азота NO. Кроме того, жестким рентгеновским $(\lambda < 10 \text{ A})$ и ультрафиолетовым (1028 A < $\lambda < 118 \text{ A}$) излучением Солнца ионизируются молекулярные азот и кислород - N₂ и O₂. В нижней части области D в спокойных условиях ионизация происходит в основном за счет галактических космических лучей (ГКЛ) и слабо меняется в течении суток. В возмущенных условиях дополнительную ионизацию обеспечивают так же "высыпающиеся" высокоэнергичные солнечные частицы. Из-за высокого коэффициента рекомбинации концентрация заряженной компоненты в D слое значительно ниже, чем нейтральной. Плазма на этих высотах является слабой примесью, в дневное время ее концентрация обычно не превышает 10³ см⁻³. Во время солнечных рентгеновских и протонных вспышек электронная концентрация в слое и может значительно возрастать, вплоть до 10⁴ см⁻³. Кроме спорадических изменений в возмущенные периоды имеют место регулярные суточные и сезонные вариации электронной концентрации в D области, которые имеют различный характер для низко, средне и высокоширотных регионов. Все вышесказанное говорит о большом многообразии и сложности процессов, формирующих распределение Ne в области D, и подтверждает вывод авторов монографии [41] о том что: "вариации параметров *D*-области изучены в наименьшей степени по сравнению с другими высотными областями". Одной из причин этому является ограниченное число методов диагностики параметров *D*-области (метод частичных отражений [44], риометрические наблюдения [45], метод резонансного рассеяния на искусственных плазменных неоднородностях [46]). В то же время изучение *D*-области имеет не только фундаментальное, но и прикладное значение, поскольку изменения электронной плотности там существенно влияют на распространение радиоволн ВЧ, ОНЧ и СНЧ диапазонов. Следует отметить, что основное неотклоняющее поглощение ВЧ радиосигналы приобретают *D*-слое. Для определяющей именно В поглощение мнимой части χ комплексного показателя преломления *n* в пренебрежении магнитным полем можно записать следующее выражение [42]:

$$\chi = 4,6 \cdot 10^{-2} \frac{N_e \nu}{\omega^2 + \nu^2} \, \partial E / \kappa M, \qquad (1.4)$$

где: N_e - электронная концентрация, ν - частота соударений электронов с нейтралами, ω - круговая частота радиоволны. Учитывая уравнение (1.4) и характерные высотные профили N_e и ν можно показать (см., [42]), что максимум поглощения приходится на те высоты *D*-области, где $\omega = \nu$.

Во время мощных солнечных вспышек наблюдается сильное поглощение сигналов на ионосферных радиолиниях вплоть до полного прекращения ВЧ радиосвязи. Прогноз и минимизация последствий таких явлений весьма актуальны. Знание процессов, происходящих в *D*-области, важно для понимания условий распространения радиоволн СНЧ и ОНЧ диапазонов и исследования характеристик глобальной грозовой активности.

Слой Е соответствует диапазону высот 90-120 км. Исторически он был открыт раньше других слоев ионосферы и известен еще как "слой Кеннелли – Хевисайда" [47, 48]. Характеристики Е области хорошо контролируются солнечным излучением и близки к свойствам модели слоя Чепмена [49, 50]. Основным источником ионизации в области- Е является ультрафиолетовое и рентгеновское излучение [41]. Днем электронная концентрация составляет до 10^5 см⁻³, а ночью может падать до 10^3 см⁻³. Ночная концентрация поддерживается за счет диффузии электронов из F-области ионосферы и дополнительной метеорными ионизации потоками И галактических космических лучей (ГКЛ). Заметим, что в освещенной Е области фотохимические процессы преобладают над эффектами переноса, тогда как в неосвещенной части эти процессы могут конкурировать.

На высоты E слоя без заметного ослабления проникает солнечное рентгеновское излучения с $\lambda < 100$ Å (преимущественно 40...60 Å), и

длинноволновое ультрафиолетовое с $\lambda > 977$ Å. Рентгеновское излучение ионизирует нейтральные компоненты: N₂, O₂, O, длинноволновое – только О₂В спокойных условиях при средней солнечной активности вклад рентгеновского излучения невелик, и можно считать, что ионизируется только одна атмосферная компонента О₂. В сумеречных условиях становится важной ионизация NO линией L_{α} ($\lambda = 1216$ Å). Поскольку глубоко проникающая линия L_{α} ослабевает с ростом зенитного угла Солнца гораздо медленнее, чем интенсивность более коротковолнового излучения, то, несмотря на сравнительную малость концентрации n(NO), произведение $I(L_{\alpha})n(NO)$ в сумерках может стать достаточно большим, чтобы заряд q(NO)стал сравнимым с $q(O_2)$. Вследствие этого, ионы NO^+ становятся преобладающим над всеми остальными. Таким образом, Е область ионосферы – ЭТО область молекулярной плазмы, представленной преимущественно двухатомными ионами.

Е область в силу своих электродинамических свойств называется также динамо-областью, поскольку тут возбуждаются горизонтальные токовые системы. Именно здесь находятся "нижние стенки" магнитосферного и ионосферного альфвеновского резонаторов, которые определяют свойства Ε данных резонансных систем. В высоких широтах В области "закорачиваются" магнитосферные электрические токи, тем самым определяя механизмы ионосферно-магнитосферного взаимодействия.

Кроме регулярного *E*-слоя в диапазоне высот 90...150 км достаточно часто возникают спорадические *E* слои (E_s), как правило, достаточно тонкие образования, толщиной порядка 1 км. При этом электронная концентрация в них может быть весьма большой, превышающей концентрацию максимума *E* и *F* областей. В настоящее время общепринятой является теория "ветрового сдвига". Формирование среднеширотных спорадических слоев объясняется "сгонкой" заряженных частиц по вертикали с накоплением на некоторой высоте [41], конвергенцией металлических ионов, время жизни которых многократно превышает время жизни основных ионизированных молекулярных компонент области E [51]. На сезонно-суточное поведение среднеширотных спорадических слоев оказывают влияние ветры, а также приливные вариации, планетарные волны и АГВ [52, 53].

F область ионосферы расположена выше 130-140 км. Здесь на высотах 250-450 км формируется главный максимум электронной концентрации (10⁵ -10⁶см⁻³). В нижней части области *F* на высотах 160...200 км иногда может развиваться слой F₁, который проявляется как выступ или перегиб на профиле $N_{e}(h)$ между слоями *E* и F_{2} . Слой F_{1} наблюдается преимущественно летом в дневное время и практически отсутствует зимой. В области F₁ подобно регулярному слою Е преобладают фотохимические процессы и ионизация контролируется солнечным ультрафиолетовым излучением в диапазоне длин волн 100 A < λ <900 A [41]. Основные ионизируемые компоненты на этих высотах - азот и кислород, а преобладающими ионами являются NO^+ и O_2^+ , те же, что и в *E* - области. Начиная с высоты 200 км процессы переноса начинают преобладать над фотохимическими. Ионообразование как и в F_1 поддерживается ультрафиолетовым излучением с 100 A < λ < 900 A. Основная ионизируемая компонента это атомарный кислород, а преобладающий ион - O^+ . На больших высотах к нему добавляются атомарные ионы водорода и гелия H^+ и He^+ . В ночное время электронная концентрация поддерживается за счет потоков плазмы из протоносферы [41] И частично фотоэлектронов освещенной ИЗ магнитосопряженной области.

Выше 200 км определяющую роль в формировании слоя играют эффекты переноса, максимум области F2 формируется за счет амбиполярной O^+ скорости рекомбинации диффузии вниз, где выше. В силу "замагниченности" плазмы ($\omega_H > v$ гирочастоты больше частот соударений) диффузия осуществляется преимущественно вдоль магнитного поля. Поэтому большое влияние на вертикальное распределение плотности плазмы особенно в средних широтах оказывают нейтральные ветры, увлекающие плазму вверх или вниз [54]. В низких и высоких широтах важную роль играют дрейфы заряженных частиц в скрещенных электрических и магнитных полях. Кроме того, в *F* области присутствуют множество неоднородностей различных масштабов, связанных с прохождением солнечного терминатора [55], планетарных [56] и внутренних акустико-гравитационных волн [57, 58], а также неустойчивостей различной природы, которые приводят к турбулизации ионосферной плазмы [59].

Таким образом, F область является неоднородной и нестационарной средой, теоретическое и экспериментальное изучение которой еще далеко не окончено. Поэтому, несмотря на наличие, достаточно большого числа способов диагностики этой области ионосферы, разработка новых методик является весьма актуальной задачей. В этом контексте в 4 разделе отчета предложен новый метод определения критической частоты области F_2 по данным наблюдений ионосферного альфвеновского резонанса. Следует отметить, что особенно сложной областью для наблюдения является "долина" между слоями E и F, недоступная для большинства традиционных методов ионосферного зондирования, как с поверхности, так и из космоса. Ее исследование возможно только дорогостоящими и сложными для реализации методами некогерентного рассеяния [60], резонансного рассеяния на искусственных плазменных неоднородностях [61] и путем спутниковых наблюдений "in situ".

1.3 Атмосфера и литосфера

Хотя рассматриваемые в работе явления преимущественно локализованы в геокосмосе, т.е. на ионосферных и магнитосферных высотах, часть порождающих эти процессы источников (грозовая активность, мощные погодные фронты, землетрясения) находятся в тропосфере, на поверхности Земли и под ней. Ниже кратко приведены основные характеристики атмосферы и литосферы.

Атмосфера Земли (от. др.-греч. ἀτμός — "пар" и σφαῖρα — "сфера") это газовая оболочка планеты, удерживаемая около нее гравитацией. Свойства атмосферы зависят от высоты над поверхностью Земли, географических координат, времени суток и сезона. В вертикальном разрезе атмосфера делится на слои, которые принято классифицировать по высотному градиенту температуры (см., рис. 1.3 [62]).

Нижняя часть атмосферы, тропосфера, обладает отрицательным градиентом температуры (порядка -5...-10 $\frac{K}{KM}$) и простирается от поверхности Земли до тропопаузы, где градиент температуры обращается в нуль. Тропосфера – это основной слой атмосферы. В нем содержится около 80 % всей массы атмосферного воздуха. Грозовые разряды, которые являются основным источником шумановского [63, 64, 65] и ионосферного альфвеновского [66, 67] резонансов локализованы в тропосфере.



Рисунок 1.3 – Вертикальная структура атмосферы (согласно [70])

Стратосфера – область атмосферы с положительным высотным градиентом температуры от тропопаузы до стратопаузы (50±5 км), на которой температура достигает величины 270±20 К. Рост температуры в стратосфере обусловлен наличием в ней слоя озона, эффективно поглощающего солнечное ультрафиолетовое излучение.

Мезосфера – область от стратопаузы до мезопаузы (80-90 км), в которой температура вновь падает с высотой, достигая на мезопаузе абсолютного минимума (~180 К).

Термосфера – область с положительным высотным градиентом расположенная мезопаузой. В термосфере температуры, над рост температуры с высотой замедляется, и наконец, выше некоторой высоты, называемой термопаузой, прекращается, И атмосфера становится изотермической по высоте.

Литосфе́ра (от греч. λίθος — "камень" и σφαίρα — "сфера") — твёрдая оболочка Земли. Она состоит из земной коры и верхней части мантии, до астеносферы, где скорости сейсмических волн понижаются, свидетельствуя об изменении пластичности пород. В строении литосферы выделяют подвижные области (складчатые пояса) и относительно стабильные платформы. В контексте настоящей работы из всего спектра литосферных процессов выделены землетрясения, представляющие собой подземные толчки и колебания земной поверхности. Они возникают из-за тектонических смещений и разрывов в земной коре или верхней части мантии Земли.

РАЗДЕЛ 2 МЕТОДИ І УСТАНОВКИ ЗОНДУВАННЯ ГЕОКОСМОСУ

2.1 Патруль космической погоды с помощью орбитальных аппаратов

В данном подразделе будут перечислены основные космические миссии, ориентированные на изучение космической погоды [68, 69]. Первыми установками, начавшими в 60-е годы патруль околоземного плазменного окружения, были орбитальные геофизические обсерватории Geophysical Observatory – OGO). Современные устройства (Orbiting представлены совместной миссией NASA-ESA STEREO (Solar-Terrestrial Relations Observatory). Два идентичных аппарата запущены в 2006 г., на солнечную орбиту, а один в 2012 г., на вытянутую эллиптическую орбиту вокруг Земли. Аппараты осуществляют мониторинг потоков солнечной радиации и заряженных частиц, а также состояния радиационных поясов Земли. Они в частности позволяют получать трехмерную структуру корональных выбросов массы. Аппарат NASA Advanced Composition Explorer (ACE) осуществляет мониторинг солнечного ветра в точке Лагранжа L1 системы Солнце-Земля с 1997 по настоящее время. Поскольку солнечное ультрафиолетовое излучение не может контролироваться с поверхности Земли, начиная с 1995 г., этот мониторинг также выполняется из точки L1 в рамках совместной миссии NASA-ESA Solar and Heliospheric Observatory (SOHO). Существует несколько серий специализированных космических аппаратов, сенсоры которых ориентированы на изучение космической погоды. Это: Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES) [70], Polar-orbiting Operational Environmental Satellite (POES) [71], Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) [72] Meteosat И (http://www.eumetsat.int/website/home/Satellites/

<u>CurrentSatellites/Meteosat/index.html</u>). В частности, аппараты серии GOES снабжены: датчиками рентгеновского излучения в двух диапазонах длин волн от 0,5 до 4 A и от 1 до 8 A; магнитометром, измеряющим напряженность межпланетного магнитного поля; ультрафиолетовым

сенсором и датчиками заряженных частиц, которые фиксируют ионы и электроны в диапазоне энергий от 50 кэВ до 500 МэВ. В феврале 2015 г., была запущена миссия Deep Space Climate Observatory (DSCOVR), основной задачей которой является предупреждение о корональных выбросах массы. Большую роль при изучении мировой грозовой активности сыграли аппараты Optical Transient Detector (OTD) [73] и Lightning Imaging Sensor (LIS) [74] выполнявшие регистрацию молниевых вспышек на поверхности Земли с 1995 по 2001 год и с 1997 по настоящее время соответственно. Данные этих аппаратов использованы для сопоставления с результатами наблюдений сигналов шумановского резонанса.

2.2 Установки зондирования геокосмоса наземного базирования

2.2.1 Наземный патруль солнечных и галактических источников

Наземный патруль состояния космической погоды включает в себя наблюдения за: солнечной радиационной и корпускулярной активностью, гелиосферным магнитным полем, потоками галактического излучения, вариациями магнитного поля Земли, состоянием околоземной плазмы. Обычно используются следующие стандартные характеристики:

Число Вольфа – это число солнечных пятен в фотосфере Солнца, регистрируемых в диапазоне видимого света на обращенном к Земле полушарии. Количество и общая площадь солнечных пятен связаны с потоком солнечного излучения в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах, а также числом солнечных вспышек и корональных выбросов массы (coronal mass ejection, CME).

Поток солнечного радиоизлучения с длиной волны 10,7 см (F10.7) хорошо коррелирует с потоком солнечного ультрафиолетового излучения. Его измерения проводятся с 1947 г., на обсерватории Dominion (Пентиктон, Британская Колумбия, Канада). Регистрация интенсивности солнечной радиации в сантиметровом диапазоне на уровне Земли не представляет проблем, в то время как ультрафиолетовое излучение существенно

поглощается атмосферой. Индекс F10.7, оценивается в единицах спектральной плотности потока солнечного излучения $(10^{-22} \text{ Bt m}^{-2} \Gamma \mu^{-1})$, фиксируется один раз в день в локальный полдень, и поступает в архив Национального центра геофизических данных США (National Geophysical Data Center, <u>ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/SOLAR DATA/</u>).

Фундаментальное значение для мониторинга космической погоды имеют данные наблюдений геомагнитного поля, выполняемые наземными магнитометрами. На некоторых обсерваториях эти результаты фиксируются уже более столетия. В настоящее время они поставляют оперативную информацию В режиме реального времени. Наиболее развитой И востребованной сетью магнитометров является мировая служба INTERMAGNET [75], включающая более 100 магнитных обсерваторий, размещенных на всех континентах.

Индекс D_{st} представляет собой оценку изменений магнитного поля на магнитном экваторе Земли, возникающих из-за вариаций кольцевого электрического тока. Индекс рассчитывается с дискретностью в 1 час по данным четырех наземных магнитных обсерваторий, расположенных между 21° и 33° магнитной широты. Индекс D_{st} накапливается в Мировом центре данных по Геомагнетизму (Киото, Япония. <u>http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstdir/index.html</u>).

Планетарные индексы K_p/A_p . Индекс A_p : соответствуют средней за 3 часа величине вариаций геомагнитного поля, полученной для сети из 13 среднеширотных магнитных обсерваторий (широты: 40°-50°). Индекс K_p представляет эту же величину в логарифмической шкале. Планетарные индексы рассчитываются путем усреднения локальных индексов K/A, рассчитанных для каждой обсерватории. Архив значений планетарных индексов K_p/A_p доступен с 1932 года.

Индекс A_E определяется путем усреднения данных о геомагнитных возмущениях, полученных на 12 магнитных обсерваторий, расположенных в авроральных областях. Он обладает высоким разрешением по времени (1 мин), однако доступен с отставанием во времени в 2-3 суток (<u>http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aedir/index.html</u>), что снижает его полезность для оперативного мониторинга космической погоды.

Нейтронные мониторы, размещенные на поверхности Земли, косвенно контролируют уровень космических лучей галактического и солнечного происхождения. Их принцип действия основывается на способности высокоэнергичных заряженных частиц от солнечных и галактических "широкий атмосферный ливень" источников вызывать (ШАЛ), энергичных частиц, представляющий собой поток образующийся В результате множественных каскадных реакций в земной атмосфере.

2.2.2. Наземные системы диагностики состояния ионосферы Земли

Традиционно, Радиоастрономический институт НАН Украины ведет мониторинг космического пространства с помощью, преимущественно, наземных средств диагностики. В рамках Целевой комплексной программы НАНУ по космическим научным исследованиям на 2012-2017 гг., РИ НАНУ модернизировал обсерватории и средства подспутникового мониторинга околоземного космического пространства.

В насноящем пункте остановимся на основных используемых в настоящее время методах и установках мониторинга геокосмоса

Сеть станций вертикального зондирования ионосферы (ВЗИ). зондирование ионосферы осуществляется с помощью Вертикальное ионозондов – импульсных локаторов ВЧ диапазона, предназначенных для восстановления высотных профилей электронной концентрации до высоты главного максимума ионизации. Наиболее совершенными ионозондами сегодня являются так называемые "дигизонды" (digisonde) [76], выпускаемые в University of Massachusetts Lowell's Center for Atmospheric Research (UMLCAR). Большинство из них объединено в единую сеть – Глобальную Ионосферную Радио Обсерваторию Global Ionospheric Radio Observatory (GIRO) [77] см., рис 2.1.

GIRO обеспечивает восстановление высотных профилей электронной плотности ионосферы в разных регионах земного шара более чем в 60-ти

пунктах наблюдений (см., рис. 2.1). Причем для 37 из них данные поступают в реальном времени. Это позволяет оперативно получать информацию и производить картографирование основных параметров ионосферы в масштабах всей планеты. Такие карты в режиме реального времени доступны по веб-ссылке: (<u>http://giro.uml.edu/IRTAM/</u>) см., рис 2.2.

Кроме того, подробные базы данных ионосферных параметров для индивидуальных ионозондов открыты для публичного доступа через DIDBase, а также инструменты пользовательского программного обеспечения для анализа данных, SAO Explorer, и Drift Explorer.

Радары некогерентного рассеяния (НР). Метод НР является одним из наиболее информативных способов ионосферной диагностики [78, 79]. Суть метода заключается в импульсном зондировании ионосферы в УВЧ диапазоне волн мощным радаром (импульсная мощность существующих установок более 1 МВт, рабочие частоты от 50 до 1600 МГц) и последующем спектральном или корреляционном анализе обратно рассеянных сигналов. Методом НР измеряется высотная (в диапазоне высот 120-1500 км) зависимость мощности зондирующего сигнала, обратно рассеянного на флуктуациях электронной плотности. В приближении равновесной плазмы интенсивность рассеяния пропорциональна электронной плотности, что позволяет восстанавливать высотный профиль концентрации. Анализ спектра рассеяния дает возможность оценивать температуры электронов и ионов в широком интервале высот вплоть до границ внешней ионосферы. Сегодня в мире работает 11 установок НР (3 – в США, 1 – в Перу, 3 – в Норвегии, 1 – в Гренландии, 1 – в Японии и по одной в Украине и России). Расположенный вблизи Харькова радар НР Института Ионосферы НАН-МОН Украины является единственной установкой такого типа в среднеширотной Европе. С его помощью проводятся комплексные исследования ионосферы над Украиной для различных сезонов и уровней солнечной активности. Важным результатом является создание на базе данных установки НР Центрально Европейской региональной модели ионосферы Central Europe Regional Ionospheric Model (CERIM IION) [80].



Рисунок 2.1 – Сеть дигизондов – Глобальная Ионосферная Радио Обсерватория (<u>http://giro.uml.edu/</u>)





Определение полного электронного содержания (ПЭС) по данным Глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС). В состав ГНСС входят 3 основных сегмента: космический, наземный и пользовательский. Космический сегмент состоит из автономных спутников, равномерно распределенных по высоким почти круговым орбитам. Каждый спутник излучает на двух или трех частотах навигационные и служебные сигналы. Наземный сегмент - сеть станций слежения, с помощью которых вычисляются и контролируются орбиты спутников, корректируется собственное время бортовых часов спутников, и др.

Основная часть третьего сегмента — это ГНСС приемники, а также международные организации, предоставляющие услуги конечным пользователям. Основным типом ионосферных данных являются глобальные ионосферные карты (Global Ionospheric Maps – GIM, см., рис. 2.3) полного электронного содержания в вертикальном столбе ионосферы единичной площади [81].

На этих картах представлено глобальное распределение ПЭС в узлах сетки с шагом $2,5^{\circ}$ по широте, 5° по долготе и 1 час по времени, отражающее общие тенденции процессов в ионосфере, например, суточную цикличность и реакцию на планетарные геомагнитные возмущения. Данные в виде ежесуточных таблиц доступны на сайте <u>http://www.aiub.unibe.ch/download/</u> **CODE**/. GIM представляет собой сглаженную картину, математически она сферическим гармоникам моделируется рядом по 15-го порядка. Достоинством генерализированного представления такого является возможность построения наглядных карт поведения ПЭС над обширными территориями с малой густотой перманентных стаций. Но сглаженный характер пространственного распределения ПЭС и часовая дискретность по времени не позволяют проводить исследований относительно быстрых локальных процессов в ионосфере. В 5 разделе отчета представлена новая методика восстановления региональных карт ПЭС по данным "густых" ГНСС сетей, которая устраняет этот недостаток и дает гораздо лучшую детализацию неоднородной структуры ионосферы, чем карты GIM.

Радары системы SuperDarn – это система когерентных ВЧ радаров, расположенных в авроральных областях Земли. 12 в северном полушарии и 7 в южном. Система была разработана для наблюдения и изучения дрейфов плазмы в ионосфере (см., рис. 2.4) [82].



Рисунок 2.3 – Global Ionospheric Maps (<u>http://iono.jpl.nasa.gov/gim.html</u>)

Радары, входящие в систему, схожи между собой: это импульсные радары с пиковой мощностью 9600 Вт, работающие в КВ диапазоне на частотах 8-20 МГц. Радары формируют многолепестковую диаграмму направленности (ДН), состоящую из 16-ти частично перекрывающихся в горизонтальной плоскости лучей. Каждый луч имеет узкую в азимутальной плоскости (порядка 6°) и широкую в угломестной плоскости (порядка 30°) диаграмму направленности. Радары засвечивают сектор азимутальных углов ~50°-60° на дальности до 4 тысяч километров с разрешением по дистанции 45 км. Основным объектом наблюдений для радаров SuperDARN являются плазменные неоднородности на высотах E- и F-областей ионосферы. Оценки скоростей их движений позволяют восстанавливать электрические поля в полярной термосфере.

Важным объектом исследований при изучении состояния геокосмоса являются глобальные электромагнитные резонансы Земли: шумановский и ионосферный альфвеновский. Исследованию их реакции на различные низкочастотные процессы в геокосмсе посвящена значительная часть отчета.



Рисунок 2.4 – Конвекция плазмы в полярной области северного полушария по данным SuperDARN (<u>http://www.superdarn.ac.uk/about/how-does-it-work/</u>)

По-видимому, впервые в работе предпринята попытка использования этих природных резонаторов в качестве "индикаторов" состояния космической погоды. В таблице 2.1 представлены обсерватории, где проводятся измерения ШР (а на некоторых и ИАР). Данные о существующих приемных УНЧ – СНЧ станциях любезно предоставлены профессором Массачусетского технологического института, Ерлом Вилльямсом (Earle Williams).

Из приведенного выше перечня следует, что на сегодняшний день в мире существует значительное число систем, поставляющих диагностическую информацию в УНЧ-СНЧ диапазоне. Однако, большинство из них не поставляют непрерывные многолетние ряды наблюдений, что не возможность использовать ИХ для диагностики долговременных дает процессов в геокомосе. Многие из них расположены в промышленно развитых регионах с высоким уровнем техногенных помех, что делает невозможным одновременное патрулирование ИАР и ШР. От всех этих недостатков свободен УНЧ-СНЧ комплекс, функционирующий В Антарктиде, на УАС "Академик Вернадский" [83].

Таблица 2.1 – УНЧ-СНЧ обсерватории (обсерватории РИ НАНУ и организаций-партнеров, выделены серым тоном; n/c – калибровка отсутствует; N.A. – опция отсутствует)

Географи- Ед., изм		-	Частотный	Частота		
Станция	ческие	Ez	Bew	BNS	диапазон,	оцифровки,
	координаты		- E W	-115	Гц	lц
LFO IRA, Ukraine (MAR)	$+49.9^{\circ},$ $+37.0^{\circ}$	n/c	пТл	пТл	[0.5-40]	125
Vernadsky, Antarctica (VRN)	-65.3 °, -64.3 °	N.A	пТл	пТл	[0.001-300]	600
Svalbard, Arctica (SOUSU)	+78.15°, +16.4°	N.A	пТл	пТл	[0.001-80]	256
Sayany Russia, (SSO)	+51.27°, -100.92°	N.A	пТл	пТл	[0.001-30]	128
Canberra, Australia	-35.31° +149.36°	N.A.	пТл	пТл	[0-1600]	4000
Sutherland, South Africa	-32.37^{0} +20.81 ⁰	N.A.	пТл	пТл	[0-1600]	4000
Pinon Flat, California, USA	$+33.61^{\circ} - 116.46^{\circ}$	N.A.	пТл	пТл	[0-1600]	4000
Eskdalemuir, Scotland	$+55.29^{\circ}-3.17^{\circ}$	N.A.	пТл	пТл	[0-1600]	4000
Shillong, India (SHL)	+25.6° +91.9°	N.A.	нТл	нТл	[5-30]	64
Mitzpe Ramon, Israel (MRN)	$+30.61^{\circ}$ +34.8°	?	?	?	?	?
Hylaty, Poland (HYL)	$^{+49.19^{0}}_{+22.55^{0}}$	N.A.	пТл	пТл	[0.03 - 55]	176
Belsk, Poland (BLK)	+51.8° +20.8°	мВ/м	пТл	пТл	~[5–40]	100
Hornsund, Poland (HRN)	$+77^{0}+15.55^{0}$?	?	?	?	?
Arrival Heights, Antarctica (ARH)	-77.82^{0} +166.65 ⁰	?	?	?	?	?
AGO, Modra, Slovakia (MOD)	$^{+48.37^{0}}_{+17.27^{0}}$	n/c	N.A.	N.A	[5-100]	200
Lekhta, Russia (LEH)	$+64.43^{0}$ +33.97 ⁰	?	?	?	[4-40]	?
Nagycenk, Hungary (before 2005) (NCK)	$+47.6^{\circ}+16.7^{\circ}$	мВ/м	пТл	пТл	~[5-35]	100
Nagycenk, Hungary (from 2005) (NCK)	$+47.6^{\circ}+16.7^{\circ}$	мВ/м	пТл	пТл	~[5-35]	514
Moshiri, Japan (MOS)	+44.3° +142.2°	n/c	пТл	пТл	[0.0001- 1000]	4000

Rhode Island, USA (RID)	$+41.6^{\circ}-71.7^{\circ}$	n/c	пТл	пТл	[5-130]	200.4812
Syowa, Antarctica (SYO)	-69.018° +39.506°	N.A.	пТл	пТл	[1-100]	400
Sonderstrom, Greenland	+67.01 ° - 50.71 °	?	?	?	?	?
Onagawa, Japan	+38.433 ° +141.483 °	?	?	?	[1-100]	400
Esrange, Sweden	+21.1 ° +67.833 °	?	?	?	[1-100]	400
QiaoJia, China (QIA)	+26.9°, +102.93°	N.A.	пТл	пТл	[3-32]	100
Tonghai, China (TON)	+24.1 °,+102.76°	N.A.	пТл	пТл	[3-32]	100
Yongsheng, China (YON)	+26.7°, +100.75°	N.A.	пТл	пТл	[3-32]	100
Weihai, China (WEI)	+37.11°, +121.76°	N.A.	пТл	пТл	[3-32]	100
Mangshi, China (MAN)	+24.42°, +98.59°	N.A.	пТл	пТл	[3-32]	100

Продолжение Таблицы 2.1

РАЗДЕЛ 3. МЕТОДЫ, ОБСЕРВАТОРИИ И КОМПЛЕКСЫ РИ НАН УКРАИНЫ

В настоящем разделе описаны измерительные комплексы и методики обработки экспериментальных разработанные данных, В Радиоастрономическом институте НАН Украины. К НИМ относятся электромагнитные сенсоры Низкочастотной обсерватории РИ НАНУ, сети магнитометрических станций УНЧ-СНЧ диапазона и когерентных ВЧ приемников. Кроме обработки привлекались того, для данные комплексов организаций-партнеров РИ НАНУ. измерительных Были разработаны также пакеты прикладных программ Интернет – управления, обработки и визуализации данных в реальном времени. Карта расположения пунктов наблюдения показана на рис. 3.1.



Рисунок 3.1 – Карта размещения УНЧ-СНЧ и ВЧ измерительных установок

В таблице 3.1 приведены данные о расположении и приборном оснащении пунктов наблюдения.

№	Наименование	Координаты	Перечень устройств		
	Низкочастотная обсерватория	49°56'01'' с.ш.,	УНЧ-СНЧ комплекс, ВЧ приемник		
	(НЧО) РИ НАНУ, с. Мартовая,	36°57'10'' в.д.	(1 канал), Магнитометр,		
1	Украина		Метеостация, Мюонный телескоп,		
			ГННС приемник, Фотометр		
			(AERONET)		
			Интернет управление		
	Радиоастрономическая	49°38'18'' пн.ш.,	ВЧ приемник (6 каналов),		
2	обсерватория (РАО) РИ НАНУ,	36°56'25'' в.д.	Автономное управление		
	п. Граково, Украина				
	Украинская антарктическая	65°14'45'' ю.ш.,	УНЧ-СНЧ комплекс, ВЧ приемник		
	станция (УАС), о. Галиндес,	64°15'27''з.д.	(2 канала), Ионозонд,		
3	Антарктика		Магнитометр, Метеостанция,		
			ГНСС приемник,		
			Спектрофотометр Добсона		
			Автономное управление		
	Обсерватории KHO и SOUSY	78°08'53'' с.ш.,	УНЧ-СНЧ комплекс, ВЧ приемник		
4	Университетский центр,	16°02'35'' в.д.	(2 канала), Ионозонд,		
	о. Свадбард, Норвегия		Интернет управление		
	Арктический Университет	69°39'41'' с.ш.,	ВЧ приемник (2 канала), Ионозонд,		
5	Норвегии	18°56'30'' в.д	ГНСС приемник		
	(UiT), г. Тромсе, Норвегия		Интернет управление		
	Лагоский университет (Lagos),	06°26' с.ш.,	ВЧ приемник (1 канал)		
6	г. Лагос, Нигерия	03°25' в.д.	Интернет управление		
	Обсерватория Jicamarca, Перу	11°57'05'' ю.ш.,	ВЧ приемник (1 канал)		
7		76°52'27'' з.д.	Автономное управление		
	Саянская солнечная обсерватория	51°37' с.ш.,	УНЧ-СНЧ комплекс		
8	(ССО), Россия	100°55' в.д.	Автономное управление		
	Институт солнечно-земной	52°45' с.ш.,	ВЧ приемник (2 канала), Ионозонд		
9	физики (ИСЗФ), г. Иркутск,	103°49' в.д.	Автономное управление		
	Россия				
1.0	ИЗМИРАН, г. Троицк, Россия	55°28'39'' с.ш.,	ВЧ приемник (2 канала), Ионозонд		
10		37°18′53′′ в.д.	Автономное управление		
	Мурманский Государственный	68°57' с.ш.,	ВЧ приемник (2 канала)		
11	Технический Университет	33°04' с.ш.	Автономное управление		
	(МІ ТУ), г. Мурманск, Россия				

Таблица 3.1 – Расположение пунктов наблюдений (установки РИ НАНУ выделены серым фоном).

Далее рассмотрим состав измерительных комплексов, принципы их работы, методики регистрации, системы трансляции, архивирования и оперативной обработки потоков данных.

3.1 НЧО РИ НАН Украины как базовый элемент СПИМ

Большой объем данных был получен на НЧО РИ НАНУ. В аппаратный парк обсерватории входят: магнитометр УНЧ-СНЧ диапазона, автоматическая метеомагнитная станция (AMMC) Lemi-017m для измерения вариаций магнитного поля и атмосферного давления, двухчастотный ГНСС приемник для определения ПЭС, приемный ВЧ комплекс на базе цифрового приемника WinRadio G313i, мюонный монитор, метеорологическая станция и солнечный фотометр CIMEL CE318N системы AERONET.

Автоматическая метеомагнитная станция (AMMC) Lemi-017т разработана в ЛЦ ИКИ НАНУ-ГКАУ. Она предназначена для синхронных непрерывных измерений вариаций 3-х компонент магнитного поля Земли и атмосферного давления. Основные характеристики станции приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Технические параметры Lemi-017m.

Магнитометр	
Диапазон измерений	± 65 000 нТл
Частотный диапазон	0-1 Гц
Разрешающая способность	0.01 нТл
Уровень шумов на частоте 1Гц	< 15 нТл/√Гц
Ошибка ортогональности	< 30 угл.мин.
Температурный дрейф	< 0.2 нТл/С°
Ошибка линейности коэффициента преобразования	< 0.01%
Барометр	
Диапазон измерений	953 - 1113 гПа
Разрешающая способность	1 Па
Уровень шумов на частоте 1 Гц, не больше	1 Па√Гц

АММС состоит из 2-х блоков: блока датчиков и блока электроники. Оба бункере блока немагнитном активной размещены В подземном с термостабилизацией. В состав блока датчиков входят три феррозондовых датчика. Блок электроники включает барометр на базе тензорезисторного датчика давления и дополнительный термометр для измерения температуры внутри блока. Цифровые данные в реальном времени передаются по проводной линии связи в аппаратный зал обсерватории и регистрируются на компьютере. Параллельно осуществляется резервное копирование данных на FLASH карту блока электроники. Синхронизация работы станции осуществляется от встроенного приемника GPS. Темп съема данных составляет одну секунду.

Двухчастотный ГНСС приемник Ashtech-MD12 установлен на НЧО с целью мониторинга ПЭС над обсерваторией. Получаемые записи применяются для изучения вариаций ПЭС, сопровождающие геомагнитные и тропосферные возмущения. Оценка ПЭС по данным двухчастотного просвечивания ионосферы основана на существовании дисперсии показателя преломления для радиоволн в плазме (см., [84]). Приемник подключен к компьютеру через последовательный интерфейс RS232. Темп регистрации первичных данных составляет пять секунд.

Приемный ВЧ комплекс создан на базе цифрового приемника WinRadio WR-G313i и предназначен для изучения динамических процессов в ионосфере путем мониторинга излучения широковещательных и специальных ВЧ передатчиков. Более подробно комплекс будет описан в следующем подразделе.

Мюонный монитор является усовершенствованным вариантом Аделаидского мюонного телескопа (разработки университета города Аделаида, Австралия). Прибор предназначен для исследования корреляции вариаций потоков мюонов с изменениями атмосферного давления, температуры и магнитного поля Земли. Детектор мюонов, входящий в состав монитора, регистрирует частицы, проходящие сквозь сцинтиллятор и оставляющие в нем ионизационные потери из расчета 2 МэВ/(г см²). Минимальная энергия,
которой должен обладать мюон, чтобы быть зарегистрированным составляет приблизительно 50 МэВ. Основная часть регистрируемых мюонов лежит в области нескольких сотен МэВ. Мюонный телескоп работает в непрерывном мониторинговом режиме. Регистрируются данные о числе частиц в течение каждой секунды. Временная синхронизация обеспечивается с помощью GPS приемника.

Метеорологическая станция Oregon Scientific Wireless Weather Station *WMR200* включает датчики, измеряющие температуру и влажность воздуха, скорость и направление ветра, а также количество осадков. Датчики температуры и влажности воздуха размещены в психрометрической будке, расположенной на высоте 2 метра над поверхностью. Датчик скорости и направления ветра (анеморумбометр) установлен на высоте 10 метров. высоте 1 метр. Данные с каждого сенсора Осадкомер закреплен на регистрируются с темпом 1 минута и передаются на базовую станцию, расположенную в помещении НЧО. Трансляция данных от датчиков к устройству сбора информации осуществляется по беспроводному радиоканалу. Точность и дискретность измерений параметров составляют: 0,1 градус Цельсия для температуры и точки росы, 1 % для относительной влажности, 0,1 м/с для скорости ветра, 1 градус для направления ветра и 1 мм для количества осадков.

Вся измерительная аппаратура НЧО компьютеризирована и работает в непрерывном режиме. Все приборно-компьютерные комплексы объединены в единую сеть сбора, хранения и передачи данных по сети Интернет на файл – сервер РИ НАНУ в г. Харькове. Предварительная обработка данных осуществляется в автоматическом режиме на сервере РИ НАНУ и публикуется на web-странице в сети Интернет. Кроме данных НЧО, на странице отображаются результаты УНЧ – СНЧ наблюдения на обсерватории SOUSY и ВЧ регистраций на обсерваториях КНО, гг. Тромсе и Лагос. Процедуры обработки и визуализации данных рассмотрены в следующем подразделе.

Все основные комплексы смонтированы в лабораторном помещении НЧО. В состав аппаратуры входят (см. рис. 3.2):

- Компьютеры 1-6;
- коммутатор Ethernet (D-Link DES 1016);
- ADSL модем;

• переключатель КВМ (D-Link DKVM-4K) с комплектом монитор, клавиатура, мышь;

• УНЧ-СНЧ приемник (автономный блок регистрации на удалении 2.5 км);

- Солнечный фотометр (вне помещения);
- ВЧ приемник (дипольная антенна вне помещения);
- ГНСС приемник (антенна вне помещения);
- Метеостанция (вне помещения);
- Мюонный монитор;

• блок бесперебойного питания AMMC (сама станция размещена в подземном немагнитном термостатированном бункере);

• блок бесперебойного питания компьютеров, и приборов с двумя внешними аккумуляторными батареями.

Внешний вид основной стойки с оборудованием показан на рис. 3.3.

Компьютерный комплекс подключен к локальной сети Ethernet. Комплекс перманентно соединен с Интернет сетью с помощью ADSL модема максимальной передачи 10 Мбит/с. Интернетс скоростью данных провайдером является оператор УкрТелеком. Модем установлен на компьютере (1), который является Интернет-шлюзом. Время в локальной сети комплекса синхронизируется с серверами времени Интернет по протоколу NTP. В случае аварийного отключения от глобальной сети и работы комплекса в автономном режиме предусмотрена возможность синхронизации времени с помощью GPS приемника.



Рисунок 3.2 – Блок-схема аппаратуры НЧО РИ НАНУ



Рисунок 3.3 – Основная стойка с оборудованием

Программное обеспечение (ПО) комплекса организовано таким образом, чтобы обеспечить полностью автоматическое функционирование обсерватории И свести К минимуму необходимость вмешательства технического персонала. Реализовать такой режим работы оказалось возможным, поскольку все измерительные системы НЧО соединены с ПК. Для каждой измерительной системы (ННЧ комплекс, ФМ (AMMC), солнечный фотометр, ВЧ приемник, ГНСС приемник, метеостанция, мюонный монитор) создано специализированное ПО, которое в соответствии с заранее составленным расписанием управляет режимом регистрации и обеспечивает запись первичных данных на жесткий диск соответствующего ПК. ПО также контролирует непрерывность поступления данных с устройств, и в случае появления сбоев в записи "перезапускает" программу регистрации. На ПО измерительных систем также возложена функция автоматического копирования первичных данных в единую базу данных, размещенную на сервере НЧО (ПК 1). В зависимости от потребностей программ обработки (запускаются на сервере в РИ НАНУ, г. Харьков) и технических возможностей измерительных систем периодичность обновления данных в базе составляет от 5-ти минут (ВЧ приемник) до одних суток (УНЧ-СНЧ комплекс). При этом архивная копия первичных данных жестких дисках ПК измерительных остается на комплексов, что обеспечивает резервирование информации.

Сервер НЧО не сопряжен ни с одним из измерительных комплексов. Он выполняет функции:

1) файл сервера для хранения базы данных всех измерительных систем НЧО;

2) системы Интернет-трансляции данных на сервер РИ НАНУ (расположен в г. Харьков);

 шлюза для обеспечения перманентного подключения к сети Интернет и поддержки соединения локальной сети НЧО с компьютерной сетью РИ НАНУ.

Первая из перечисленных функций обеспечивается измерительными системами, а другие, выполняются специализированным ПО, установленным на сервере. Сервер НЧО поддерживает перманентное подключение к Интернет глобальной сети И режим защищенного соединения С компьютерной сетью РИ НАНУ через VPN туннель. Таким образом, компьютерная сеть НЧО фактически является частью локальной сети РИ НАНУ. Это обеспечивает возможность удаленного управления любым компьютером комплекса при помощи стандартного удаленного рабочего стола OC Windows по протоколу RDP. Применение RDP управления позволяет выполнять модернизацию ПО компьютерной системы и, в большинстве случаев, устранять сбои в работе программного обеспечения дистанционно с сервера РИ НАНУ не выезжая на обсерваторию.

3.2. Электромагнитная обсерватория на УАС

Второй позицией РИ НАН Украины, обеспечивающий непрерывный подспутниковый мониторинг геоксмоса, является созданная на УАС современная электромагнитная обсерватория. Украинская антарктическяа станция (УАС) "Академик Вернадский" (географические координаты 65°15′ ЮШ, 64°16′ ЗД.), до 1996 года – Британская антарктическая база "Фарадей", является одной из старейших электромагнитных обсерваторий в Антарктике. Востребованность и высокое качество данных, получаемых на УАС, обусловлено рядом причин:

- станция удалена от источников техногенных и природных электромагнитных источников излучений (таких, например, как теле-радио передатчики и местные грозы), что обеспечивает рекордно низкий уровень активных помех;

- удачное расположение станции относительно экваториальных центров мировой грозовой активности упрощает пространственную селекцию источников таких излучений;

 магнитная сопряженность северной части Антарктического полуострова с восточным побережьем США, где расположено большое число электромагнитных обсерваторий, позволяет синхронно исследовать собственные резонансы внутренней магнитосферы;

 - близость пролива Дрейка, как одного из самых метеорологически активных мест на планете, дает возможность организовать мониторинг тропосферно – ионосферного взаимодействия и исследовать механизмы возбуждения атмосферных гравитационных волн;

- большое различие географических и геомагнитных широт (магнитная широта УАС) позволяет разделять на ионосферных высотах процессы электродинамической и термодинамической природы, а также исследовать особенности аномального сезонного поведения высотного профиля электронной концентрации, обусловленного этим разделением.

Эти особенности послужили побудительным мотивом организации действующей полярной постоянно станции В данном регионе, специализирующейся на мониторинговых наблюдениях параметров атмосферы И геокосмоса. Регулярные измерения метеопараметров, магнитных полей, полного содержания озона и ионосферное зондирования 1957 г.. были начаты там В BO время Первого Международного Геофизического Года. В 80-е годы прошлого века на станции были начаты измерения шумов и радиосигналов в диапазоне ОНЧ. На настоящий момент эти массивы данных являются самыми продолжительными в Антарктике. Часть этих массивов была использована для анализа момента начала ОНЧ восходных изменений параметров радиосигналов диапазона, принимаемых в Антарктике в зависимости от длины и ориентации трассы относительно терминатора, частоты сигнала и изменений общего содержания озона [85].

После передачи станции Украине в 1996 г., британские исследовательские программы по диагностике геокосмоса были продолжены и развиты учеными РИ НАНУ, который является головной организацией по геокосмическим исследованиям Украины в Антарктике. Многие

действующие измерительные комплексы были модернизированы, а также установлены новые оригинальные системы радиодиагностики геокосмоса. В 2001 г., были проведены первые тестовые измерения электромагнитных шумов в УНЧ-СНЧ диапазоне. С марта 2002 г. во время 7-й Украинской антарктической экспедиции (УАЭ), был начат непрерывный мониторинг УНЧ-СНЧ полей, продолжающийся по настоящее время. Во время 10-й УАЭ был внедрен новый алгоритм обработки данных наблюдений шумановского (ШР) и ионосферного альфвеновского (ИАР) резонаторов. В этот же период была разработана и реализована методика мониторинга излучения энергосетей североамериканского континента.

В 2002 г., на УАС был установлен многоканальный когерентный измерительный ВЧ комплекс, который до этого был апробирован в ходе морской части экспедиции во время трансатлантического рейса Севастополь-УАС. В течение морской экспедиции с его помощью были исследованы характеристики ионосферы и морского волнения, а результаты изложены в работах [86, 87]. В последующем комплекс был использован во время многомесячной измерительной кампании по диагностике перемещающихся ионосферных возмущений В регионе Антарктического полуострова. Основные результаты этих исследований изложены в работе [88]. В дальнейшем ВЧ аппаратура была дополнена когерентной установкой, состоящей из 2-х цифровых приемников WinRadio G-313, которая входит в состав глобальной ВЧ сети, созданной сотрудниками РИ НАНУ в последние 10 лет. Более подробно структура этой сети описана в подразделе 3 данного раздела. В 2005 г. на УАС был установлен двухчастотный приемник ГНСС который позволяет в мониторинговом режиме проводить диагностику полного электронного содержания (ПЭС).

В состав комплекса радиодиагностики ионосферы входят также станция вертикального зондирования (ионозонд) и когерентный цифровой ВЧ передатчик. С мая 2015 года приемная система нового когерентного ВЧ комплекса развернута и непрерывно функционирует на Американской антарктической станции "Палмер", расположенной в 54 километрах севернее УАС. Диагностическое оборудование для этого комплекса было создано совместно с коллегами из университета Бостон колледж (США).

Следует также упомянуть прецизионные магнитометрические установки магнитной обсерватории AIA, расположенной на УАС, функционирующей в непрерывном режиме и включенной в систему "INTERMAGNET".

Приведенный выше краткий обзор измерительных установок УАС показывает, что станция – это хорошо укомплектованная электромагнитная обсерватория, которая позволяет производить комплексные исследования нейтральной атмосферы и околоземного плазменного окружения. Поскольку большая часть результатов получена при использовании данных индукционных магнитометрических комплексов УНЧ-СНЧ диапазона, далее они будут рассмотрены более подробно.

Широкополосный магнитометрический Lemi112, комплекс установленный на УАС в 2002 году, предназначен для измерений вариаций геомагнитного поля в диапазоне частот от 0.1 мГц до 80 Гц, что позволяет использовать его для изучения широкого класса низкочастотных процессов в околоземном Прибор пространстве. изготовлен Львовским центром института космических исследований (ЛЦ ИКИ) НАНУ-ГКАУ. Следует отметить высокую чувствительность на уровне лучших мировых образцов и возможность длительной многолетней работы в мониторинговом режиме. Комплекс состоит из пяти магнитных зондов индукционного типа, двух электрических каналов, коммуникационного и измерительного блока Lemi-419ANT, регистрирующего компьютера и коммуникационных кабелей.

Индукционные зонды (далее – зонды) предназначены для исследования флуктуаций магнитного поля. Всего есть три вида зондов:

Lemi112E (2 шт.) – ВЧ зонды, регистрирующие вариаций магнитного поля в диапазоне частот 0.001-80 Гц и имеющие практически "плоскую" амплитудно-частотную характеристику в диапазоне 1-80 Гц..

Lemi112A3 (2 шт.) - Зонды подобные Lemi112E, но имеют более узкий частотный диапазон 0.1 мГц -10 Гц и линейную АЧХ в этой полосе частот.

Lemil12A3P (1 шт.) - Индукционный рамочный зонд, предназначенный для исследования флуктуаций вертикальной компоненты магнитного поля в диапазоне частот 0,01-80 Гц.

Зонды Lemi112E и Lemi112A3 установлены на расстоянии около 100 м к востоку от СНЧ павильона УАС на специальных бетонных фундаментах, которые сооружены непосредственно в скальном грунте. Датчики жестко закреплены на фундаментах с помощью металлических немагнитных креплений. Такая конструкция практически полностью нейтрализует "ветровую" помеху, и позволяет эффективно проводить измерения на частотах ниже 3 Гц. Зонды ориентированы вдоль географических меридиана и параллели (каналы юг-север и восток-запад). Зонд Lemi112A3P имеет вид петли на земной поверхности, радиусом 10 м и измеряет вертикальную компоненту вариаций магнитного поля.

Электрические каналы комплекса позволяют регистрировать напряженности E_x и E_y составляющих электрического поля и оценивать теллурические токи, однако для задач НИР не используются.

Блок электроники Lemi-419ANT и регистрирующий компьютер расположен в СНЧ павильоне (приблизительно в 500 м к востоку от главного корпуса станции). Все промежуточные преобразования и оцифровка сигналов осуществляется измерительным блоком, а на регистрирующий компьютер данные поступают в цифровом виде. Вид блока электроники показан на рис. 3.4. Его технические характеристики приведены в таблице 3.3.

Компоненты электрического поля измеряются неполяризованными электродами, компоненты магнитного поля - индукционными датчиками. Схема измерительных каналов одинакова как для магнитных датчиков, так и для электрических. Каждый канал состоит из предварительного усилителя с программируемым коэффициентом усиления (1, 10, 100, 1000) и низкочастотного фильтра четвёртого порядка (БФ). Частота среза БФ для ВЧ каналов и электрометра – 80 Гц и для НЧ каналов – 10 Гц. БФ также включает режекторный фильтр с центральными частотами 150 Гц и 50 Гц.



Левая панель



Правая панель



Рисунок 3.4 – Блок электроники Lemi-419 ANT

Таблица 3.3 – Технические параметры Lemi-419ANT

Число каналов:		
переменного магнитного поля	5	
электрического поля	2	
Диапазон измерений магнитного поля	± 0.25, 2.5, 25, 250 нТл	
Разрешающая способность маг. сигналов	0.01 пкТл	
Частотный диапазон:		
- Для 3-х магнитных каналов ВЧ	0.001-80 Гц	
- Для 2-х магнитных каналов НЧ	0.0001-10 Гц	
- Для электрических каналов	0-80 Гц	
Продавление сетевых помех	>38 дБ	
Частота дискретизации:	320 отсчетов/с	
Разрешение АЦП:	24 бита	
GPS синхронизация и определение координат		
Рабочий диапазон температур	минус 20 до +40°С	
Напряжение питания	+12 B	
Мощность	< 3 BT	
Вес блока электроники LEMI-419ANT	3.9 кг	

Измеренные данные оцифровываются АЦП и затем через RS-422 интерфейс записываются в память персонального компьютера. Блок электроники снабжен GPS приемником, который осуществляет синхронизацию данных с UT.

3.3 Комплексы в Скандинавии и Сибири

Анализ УНЧ-СНЧ данных полученных за несколько лет наблюдений на УАС показал эффективность и перспективность проведения синхронных измерений сигналов с большим разнесением в пространстве. Для их обеспечения с 2008 г., мониторинг низкочастотных вариаций магнитного поля в диапазоне частот 0.5 - 40 Гц был начат в 80 км от г. Харькова на Низкочастотной обсерватории РИ НАНУ (НЧО). Несмотря на удаленность от города качественные измерения УНЧ-СНЧ сигналов непосредственно на обсерватории оказались невозможными из-за высокого уровня помех. Поэтому регистрация сигналов на НЧО осуществляется выносным приемным устройством разработки РИ НАНУ, установленным в лесном массиве на расстоянии примерно 2.5 км от обсерватории, а трансляция данных в пункт регистрации и обработки выполняется по УКВ каналу связи [89].

По инициативе РИ НАНУ с 2010 г., мониторинг УНЧ-СНЧ сигналов осуществляется коллегами из Института солнечно-земной физики на Саянской солнечной обсерватории (рис. 3.1, табл. 3.1). Для регистрации вариаций горизонтальных составляющих магнитного поля используется прибор Lemi-30 разработки ЛЦ ИКИ НАНУ-ГКАУ. Он отличается от описанных выше устройств только диапазоном частот, который составляет 1 мГц - 30 Гц.

Низкочастотные приборные комплексы, расположенные на НЧО и ССО существенно расширили возможности для исследований ШР и ИАР, и способствовали получению новых результатов, изложенных в разделе 4 данного отчета. В то же время принципиальным недостатком среднеширотных обсерваторий является высокий уровень помех от местных гроз в летний период. Характерный вид суточной спектрограммы искаженной местной грозой показан на рис. 3.5.



Рисунок 3.5 – Суточная спектрограмма сигналов на НЧО с характерными помехами

Для получения неискаженных помехами записей на больших удалениях от УАС совместно с коллегами из Арктического университета Норвегии UiT с сентября 2013 г., на обсерватории SOUSU (о. Свалбард, арх. Шпицберген) установлен магнитометрический комплекс Lemi-30i разработки ЛЦ ИКИ НАНУ-ГКАУ. На рис. 3.6 показан процесс установки магнитных зондов на обсерватории SOUSY и организации системы влаго- и ветрозащиты необходимых в условиях вечной мерзлоты в Заполярье.

Диапазон рабочих частот магнитометра 1 мГц - 80 Гц согласован с характеристиками прибора на УАС, что упрощает взаимную обработку и интерпретацию Следует данных. также отметить, что данные С SOUSY НЧО магнитометров на И В режиме реального времени транслируются на файл-сервер РИ НАНУ, обрабатываются и отображаются на веб-странице НЧО <u>http://geospace.com.ua/data.html</u> совместно с данными других сенсоров.



Рисунок 3.6 – Установка магнитных зондов на о. Свалбард (слева) и монтаж системы влаго- и ветрозащиты (справа, (а-г))

Высокие чувствительность, частотная стабильность И помехозащищенность описанной выше глобальной сети магнитометров позволяют с их помощью производить диагностику не только естественных шумов, но и излучения техногенного происхождения. В качестве источников пробных сигналов могут использоваться, например, специальные передающие системы УНЧ-СНЧ диапазона волн. Регистрация искусственных сигналов представляет интерес как с точки зрения изучения характеристик канала информации распространения, возможности передачи на сверхдальние расстояния и обнаружения техногенных циклов в окружающем пространстве. В частности, в рамках экспериментов FENICS-2009 и 2014 [90] изучено взаимодействие электромагнитных волн УНЧ и СНЧ диапазонов (0.1–200 Гц) с земной корой и ионосферой в поле двух взаимно ортогональных промышленных линий электропередачи (ЛЭП) длиной 109 и 120 км, расположенных на Кольском полуострове. Впервые сигналы промышленных ЛЭП уверенно зарегистрированы на о. Свалбард (арх, Шпицберген) и Низкочастотной обсерватории (НЧО) РИ НАНУ вблизи г. Харьков (с. Мартовая) на рекордных удалениях от источника излучений 1180 и 2110 км соответственно. Но и такие расстояния не являются предельными. Когда в роли источника выступает энергосистема всего североамериканского континента, ее излучение на частоте 60 Гц удалось уверенно зарегистрировать в Антарктике, на удалении более 10 Мм от источника.

3.4 Сеть интернет управляемых ВЧ приемников

Одним из эффективных способов исследования процессов в ионосфере является доплеровский метод [42, 91, 92]. В РИ НАНУ метод доплеровского зондирования ионосферной плазмы используется уже более 30 лет. Ранее было исследовано поведение спектров ВЧ сигналов на радиотрассах различной ориентации и протяженности, включая дальние и сверхдальние [17, 93], что позволило изучить характеристики различных естественных ионосферных процессов. К ним относятся перемещающиеся ионосферные возмущения [88, 94], плазменные неоднородности в высоких широтах, стимулированные авроральными активациями, градиенты электронной концентрации, вызванные прохождением солнечного терминатора и лунной тенью во время солнечного затмения [95, 96].

Одни из первых наблюдений ВЧ сигналов при помощи приемноизмерительного комплекса (ПИК) были выполнены на УАС "Академик Вернадский". В частности, в июле 2006 г. была проведена специальная измерительная кампания по регистрации сигналов, излучаемых тремя пробными передатчиками Института солнечно земной физики (ИСЗФ) СО РАН, которые располагались вблизи Иркутска (52,75° с.ш., 103,63° в.д.), Магадана (59,57° с.ш., 150,47° в.д.) и Норильска (69,12° с.ш., 88,17° в.д.). Ее целью являлось исследование условий распространения ВЧ сигналов в диапазоне 5÷20 МГц на сверхдальних радиолиниях, включая как прямые, так и обратные. Анализ спектральных характеристик пробного излучения показал, что зависимости амплитуды сигналов от времени суток и частоты при отсутствии магнитных возмущений качественно совпадают с данными моделирования, полученными в ИСЗФ СО РАН в рамках волноводного механизма распространения ВЧ сигналов для международной справочной модели ионосферы IRI. Результаты этой измерительной кампании подробно представлены в работе [93].

Как уже отмечалось, данные сети ПИК могут быть также использованы для диагностики глобальных ионосферных возмущений, таких как солнечное затмение (СЗ). Примером могут служить результаты эксперимента по ВЧ зондированию области СЗ 1 августа 2008 г. В качестве пробного излучения ΒЧ CO использовались сигналы трех передатчиков ИСЗФ PAH, расположенных вблизи Иркутска, Магадана и Норильска (Россия). Прием сигналов осуществлялся вблизи Харькова на РАО им. С.Я. Брауде РИ НАНУ и на острове Свалбард, КХО (Норвегия). Таким образом, было организовано зондирования, для каждой ИЗ которых наблюдались шесть трасс существенные вариации частоты пробных сигналов во время пересечения лунной тенью. всех соответствующей радиолинии Для радиотрасс обнаружены общие закономерности в поведении ДСЧ пробных сигналов. В частности, показано, что сдвиг частоты близок к нулю и обладает наибольшей скоростью изменения в момент максимальной затененности радиолинии. Обнаружено, что ДСЧ сигналов обратно пропорционально рабочей частоте. Это означает, что преобладающим механизмом его формирования во время затмения являлось изменение коэффициента преломления в нижней части ионосфере вдоль трассы распространения. Проведено моделирование вариаций ДСЧ, вызванного изменением интегральной освещенности радиотрасс во время СЗ, результаты которого качественно и количественно совпадают с экспериментальными данными. Более детально эти результаты изложены в работе [96].

Спектральный анализ ВЧ сигналов на сверхдальней радиолинии обнаружить природный эффект позволил кроссмодуляции пробного излучения И Шумановских резонансов СНЧ диапазона [97]. При исследовании нелинейных эффектов, стимулированных в ионосферной плазме мощным электромагнитным излучением нагревных стендов (HC), изучению спектральных особенностей основное внимание уделялось BЧ ионосферной сигналов областью искусственной рассеяния турбулентности (ИИТ). В результате были изучены динамика стимулированных неоднородностей в режиме стационарного нагрева [98]. ионосферной плазмы процессы релаксации, взаимодействие искусственных плазменных образований с крупномасштабными природными волновыми процессами [99]. Впервые были обнаружены и интерпретированы эффекты "саморассеяния" мощного сигнала на им же созданных плазменных возмущениях [100, 101].

Для доплеровской диагностики ионосферы в РИ НАНУ было разработано несколько поколений специальных приемных систем. В восьмидесятых прошлого столетия Радиоастрономической годах на обсерватории им. С. Я. Брауде РИ НАНУ (РАО) была установлена стационарная многоканальная когерентная приемная установка, успешно эксплуатировавшаяся во многих измерительных кампаниях [102]. Позднее несколько мобильных приемных было создано комплексов, хорошо зарекомендовавших себя в ходе морского трансатлантического перехода на УАС [103] и затем установленных на станции "Академик Вернадский" (УАС) [104]. Разработанные В РИ НАНУ методики многопозиционной доплероскопии ионосферы позволяют использовать для диагностики не только специальные передатчики, но и многочисленные широковещательные ВЧ станций. По данным Международного Союза Электросвязи (International Telecomunication Union) в мире функционирует свыше 5000 вещательных передатчиков. Это дает возможность, используя уже существующие источники пробного излучения, проводить доплеровские измерения практически в любом регионе земного шара. Особый интерес представляют исследования в высоких широтах, где ионосфера характеризуется сильной ионосфера изменчивостью. Высокоширотная используется многими исследовательскими группами, как "природная плазменная лаборатория". В настоящее время два из четырех действующих нагревных стендов расположены в полярных областях. Это HAARP (The High Frequency Active Auroral Research Program, мощность 3,6 МВт, координаты 62,4° с.ш., 145,2° з.д., Аляска, США) и HC EISCAT (European Incoherent Scatter Scientific Association, мощность 1,2 МВт, 69,6° с.ш., 19,2° в.д., г. Тромсе, Норвегия). Одной из основных научных задач НС является создание "управляемых" режимов генерации ИИТ. Доплеровский метод ВЧ зондирования является эффективным способом экспериментального изучения динамики искусственной плазменной турбулентности и широко применяется на практике. В качестве зондирующих сигналов используется излучение пробных ВЧ передатчиков [98] и самих нагревных стендов. Отметим, что информативность доплеровского метода существенно возрастает в случае применения нескольких пространственно-разнесенных приемных пунктов, объединенных в единую сеть. Опыт, накопленный в РИ НАНУ, и возможности современных компьютерных и сетевых технологий позволили разработать оригинальный компактный доплеровский приемноизмерительный комплекс (ПИК) на основе цифрового приемника фирмы WinRadio Communications. Первый образец опытный ПИК начал эксплуатироваться в 2006 г. на УАС. В 2007 г. в рамках программы "Ассоциированного членства Украины в EISCAT" аналогичный ПИК был установлен (см., рис. 3.7) на обсерватории им. Кйелла Хенриксена (КХО) на острове Свалбард (архипелаг Шпицберген).

В настоящее время создана сеть из девяти пространственноразнесенных приемных ВЧ комплексов (см., рис 3.1., табл. 3.1), расположенных в высоких, средних и низких широтах, четыре из которых работают в режиме дистанционного интернет-управления. Результаты наблюдений с помощью этих установок автоматически обрабатываются и отображаются на веб-станице отдела Радиофизики геокосмоса РИ НАНУ http://geospace.com.ua/data.html.

Данный подраздел посвящен описанию аппаратного и программного обеспечения ПИК. Рассмотрены принципы построения сети многопозиционной доплеровской диагностики ионосферы, интернет – управления, трансляции, автоматической обработки и визуализации данных наблюдений. Рассмотрены перспективы развития сети, модернизации аппаратуры и методик обработки данных измерений.

3.4.1. Аппаратное обеспечение ПИК и программа сбора данных

При приемно-измерительного создании комплекса учитывались следующие требования. Устройство должно быть мобильным с небольшим энергопотреблением и сравнительно невысокой стоимостью. Необходимо обеспечить реализацию принципов цифрового управления, записи и доступа к данным наблюдений, и пригодность для длительной автономной работы. Чтобы удовлетворить этим требованиям аппаратная часть ПИК была создана на базе стандартного ПК, работающего под управлением операционной системы Windows и серийно выпускаемых компонент. Все модули ПИК, приемной антенны, смонтированы внутри системного блока кроме компьютера, что обеспечивает компактность устройства. Возможности цифрового управления, записи и доступа к данным реализованы с помощью программного обеспечения (ПО), разработанного в РИ НАНУ. Регистрацию ВЧ сигналов обеспечивают цифровые приемные модули WR-G313i фирмы WinRadio Communications. В корпус ПК может быть установлено до 3-х устройств, что позволяет организовать столько же приемных каналов. Аппаратная часть комплекса также включает высокостабильный генератор



Рисунок 3.7 – Схема размещения приемного ВЧ комплекса в обсерватории КХО а) расположение обсерватории относительно сторон света; б) план лабораторного помещения и схема размещения элементов комплекса; в) антенна север-юг; г) антенна запад восток; д) управляющий компьютер

опорной частоты 10 МГц и систему временной синхронизации данных на базе приемника GPS. Ниже рассмотрим более подробно каждый модуль комплекса.

Приемный модуль представляет собой плату, подключаемую к слоту расширения материнской платы настольного ПК. Функциональная схема WR-G313i представлена на рис. 3.8. Приемник WR-G313i реализован по супергетеродинной схеме с двумя аппаратными преобразованиями частоты. Третье преобразование является полностью цифровым и осуществляется при встроенного сигнального процессора, предназначенного помощи ДЛЯ демодуляции и передачи волновой формы сигнала в память ПК. Такая схема регистрации не использует вычислительных ресурсов компьютера и многоканальный ПИК позволяет реализовать на базе ΠК средней производительности. Диапазон рабочих частот приемника 9 кГц-30 МГц. Основные технические характеристики WR-G313i приведены в таблице 3.4.



Рисунок 3.8 – Функциональная схема цифрового приемного модуля WR-G313i

Диапазон рабочих частот	9 кГц – 30 МГц	
Точность настройки частоты	1 Гц	
Динамический диапазон	90 дБ (108 дБ с учетом аттенюатора)	
Чувствительность	0,05 мкВ	
Рабочие полосы частот	500 Гц, 1 кГц, 2 кГц, 4 кГц,8 кГц, 16 кГц, 48 кГц	
Промежуточные частоты:		
ПЧ1	45 МГц	
ПЧ2	16 кГц (перестраиваемая 12-22 кГц)	
Антенный вход	50 Ом	
Форм-фактор	PCI 2.2 совместимая карта	
Bec	330 г	

Таблица 3.4 – Технические характеристики приемника WR-G313i

качестве генератора опорной частоты В 10 МГц используется термостабилизированный кварцевый осциллятор ОСХО 131-1000 фирмы Isotemp Research inc., относительная нестабильность которого не хуже 10^{-8} . Следует отметить, ЧТО аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) приемника WR G-313i не имеет внешнего запуска. Поэтому для временной пространственно-разнесенных синхронизации пунктов И привязки получаемых данных к единой шкале времени была разработана схема записи меток точного времени GPS приемника (импульсы PPS) непосредственно в файлы данных. Устройство собрано на базе микросхемы-мультиплексора AD8170 (250 MHz, 10nS Switching Multiplexers w/Amplifier) фирмы ANALOG DEVICES. Метки точного времени подаются В канал данных С периодичностью в 1 час.

В типовом ПИК используется активная рамочная антенна диаметром 1,5 м с широкополосным антенным усилителем. Коэффициент усиления составляет ~20 дБ в диапазоне частот 3-15 МГц. Рамочная антенна вместе с

усилителем выполнена в герметичном варианте, что позволяет ее использовать в сложных климатических условиях Антарктики и Арктики. Возможна также установка антенн других типов (горизонтальный диполь, вертикальная штыревая антенна и др.).

Для управления ПИК и сбора данных было создано приложение WinRadioMetr, разработанное на языке программирования C++. Приложение поддерживает независимую работу до 3-х приемных модулей WR-G313i одновременно. Процедура управляет частотой настройки (шаг перестройки 1 Гц), включением входного аттенюатора 18 дБ, коэффициентом усиления (диапазон от +20 до -90 дБ с шагом в 10 дБ), шириной полосы выходного цифрового фильтра (от 0,5 до 22 кГц) и частотой оцифровки сигнала (допустимые частоты оцифровки 1, 2, 4, 8, 16, 48 кГц). Программа также производит включение-выключение оцифровки и записи данных на жесткий диск ПК. Текущие режимы работы и параметры настройки приемных модулей, а также вид спектра и огибающей сигнала отображаются в основном окне программы.

3.4.2. Система интернет-трансляции обработки и визуализации данных наблюдений

Приложение WinRadioMetr запускается при старте операционной системы, производит инициализацию приемных модулей и переводит ПИК в режим ожидания команд управления. Последние передаются процедуре из текстовых файлов-расписаний, составляемых оператором, в соответствии с специально разработанным для этой цели протоколом управления. Применение файлов-расписаний позволяет управлять ПИК, как с локального компьютера, так и удаленно по сети Интернет. В последнем случае необходимо обеспечить возможность передачи файлов расписаний с удаленного ПК, осуществляющего управление. Процедура WinRadioMetr генерирует несколько типов выходных файлов. Основными являются

протоколы переключений и файлы данных, которые создаются во время сеанса записи и могут передаваться на удаленный управляющий компьютер по сети Интернет. Протоколы переключений сохраняют историю настроек приемных модулей. Файлы данных делятся на два типа – файлы волновых форм ("сырые" данные, используемые при обработке) и файлы визуализации (применяемые для отображения в сети Интернет компактные файлы, содержащие средние спектры и огибающие сигналов), что необходимо для восстановления фактического расписания работы. Существуют файлы данных двух типов, а именно, файлы "сырых" данных, сохраняющие волновые формы сигналов и файлы визуализации. Первые содержат полную информацию о сигнале и являются основными для обработки. Однако, из-за больших объемов, они не могут передаваться в режиме реального времени по "медленным" интернет линиям. Поэтому для оперативной визуализации сигналов используется второй тип файлов. Эти файлы визуализации содержат средние спектры и огибающие сигналов, обновляющиеся каждые 12,288 секунды.

Четыре из девяти ВЧ установок, перечисленных в табл. 2.1 работают в режиме удаленного интернет-управления. Изложим принципы контроля работы ПИК из единого центра управления (ЦУП), организованного на базе сервера РИ НАНУ и предназначенного для управления сетью удаленных комплексов, а также сбора, обработки, хранения и визуализации данных. ЦУП также выполняет функции веб-сервера, что упрощает алгоритм публикации данных в сети Интернет. Отметим также, что кроме обработки и визуализации данных сети ВЧ приемников, ЦУП выполняет аналогичные функции для сенсоров НЧО РИ НАНУ и УНЧ-СНЧ установки, размещенной на обсерватории SOUSY (о. Свалбард, арх. Шпицберген).

Автоматический режим функционирования ПИК обеспечивается не только за счет взаимодействия с центром управления, но и благодаря работе программного обеспечения, на самих пунктах наблюдения. Блок-схема работы ПО всей системы в целом показана на рис. 3.9. Для удаленного



Рисунок 3.9 – Блок-схема, иллюстрирующая взаимодействие удаленных пунктов регистрации с центром управления, www сервером РИ НАНУ и серверами нагревных стендов НААRP и EISCAT

управления и передачи данных на регистрирующих ПК установлено стандартное клиентское, а на сервере ЦУП серверное ПО, реализующее протокол sftp. Это позволяет получать файлы расписания в пунктах наблюдения и передавать файлы данных с ПК-клиентов на сервер ЦУП. Файлы расписания для всех пунктов наблюдения размещаются на ЦУП и далее специальное ПО с периодичностью в 5 с перемещает их на каждый из ПИК. Такой алгоритм управления упрощает работу оператора, избавляя его избавляет оператора от необходимости обслуживать каждый приемный комплекс отдельно. При регистрации сигналов нагревных стендов EISCAT и HAARP, когда расписание их работы заранее неизвестно, применяется алгоритм автоматического отслеживания частоты HC. Для этого на каждом ПИК используются процедуры, которые по протоколу http подключаются к интернет-серверам HC EISCAT и/или HAARP, анализируют информации о текущих режимах работы стендов и в "реальном времени" формируют соответствующие изменения расписания работы ПИК.

Передача данных сервер ЦУП автоматизирована. на также Специальное ПО постоянно синхронизирует текущие протоколы работы приемников и файлы визуализации, генерируемые на ПИК процедурой управления и сбора данных с архивами, которые размещены на сервере ЦУП. Таким образом, оператор сервера ЦУП может анализировать on-line информацию о работе любого приемного пункта. Кроме того, на сервере ЦУП, который как уже отмечалось, является и веб-сервером, каждый час происходит стандартная обработка данных, в ходе которой рассчитываются суточные спектрограммы и временные зависимости амплитуд сигналов, а также создаются таблицы переключений режимов работы ПИК. Эта информация доступна в сети Интернет на веб-сайте РИ НАНУ. Кроме того, каждые сутки специальное ПО выполняет архивацию и передачу файлов "сырых" данных (волновых форм сигнала) в архив ЦУП. Такие записи в последующем используются для детальной обработки.

Схема функционирования сети автономных пунктов ВЧ регистрации обеспечивает их автоматическую работу, при которой функции оператора сведены к администрированию сервера ЦУП и генерации на нем файлов расписания работы для предстоящих измерений. Однако, при возникновении нештатных ситуаций на ПН, оператор имеет возможность перейти в режим удаленного управления регистрирующим компьютером любого ПИК, используя удаленный рабочий стол ОС Windows. В зависимости от конфигурации локальной сети ПИК, подключение по протоколу RDP осуществляется напрямую либо через VPN туннель, создаваемый между

ЦУП и ПИК. Такой подход дает возможность, с одной стороны, оперативно устранять последствия возможных сбоев сценариев автоматической работы ПН, а, с другой, модифицировать и совершенствовать ПО сети пунктов ВЧ регистрации непосредственно с сервера ЦУП.

Рассматривая перспективы дальнейшего развития сети ПИК, следует возможность добавления отметить новых приемных пунктов, совершенствование аппаратного обеспечения приемных комплексов и увеличение числа используемых методик ионосферной диагностики. В РИ НАНУ разрабатывается новый вариант ПИК, позволяющий, кроме частотной и импульсной селекции, оценивать также углы прихода принимаемых сигналов – частотно-угловое зондирование ионосферы (ЧУЗИ) [15]. Такая возможность реализуется за счет применения метода доплеровской интерферометрии [105] (в русскоязычной литературе его принято называть фазовой пеленгацией с доплеровской фильтрацией [92]). Углы прихода сигналов для каждой спектральной компоненты определяются по разности фаз сигналов, принятых малоразмерными пространственнотремя разнесенными антеннами. Применение частотной, импульсной и угловой селекции сигналов позволит существенно расширить диагностические возможности рассмотренной сети приемных комплексов. Проведение с ее помощью измерений в северной Скандинавии может оказаться полезным дополнением к данным радара некогерентного рассеяния нового поколения, создаваемого в настоящее время в рамках перспективного проекта EISCAT-3D и ориентированного на восстановление характеристик объемных неоднородностей околоземной плазмы.

РАЗДЕЛ 4. ГЛОБАЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РЕЗОНАТОРЫ КАК ИНДИКАТОРЫ СОСТОЯНИЯ ГЕОКОСМОСА

Взаимодействие корпускулярных и радиационных потоков солнечной энергии с магнитосферой и ионосферой Земли в основном определяет состояние космической погоды. Их вариабельность порождает разнообразные плазменные неоднородности и приводит к возмущениям электрических полей в геокосмосе. Пространственномагнитных И ионосферно-магнитосферной временные распределения концентрации плазмы формируют В УНЧ-СНЧ диапазонах три природных (ШР), ионосферный электромагнитных резонатора: шумановский альфвеновский (ИАР) и магнитосферный (МР). В Радиоастрономическом HAH Украины разрабатывается научная институте концепция «использование глобальных электромагнитных резонаторов, как индикаторов состояния космической погоды» [106, 107]. Для реализации этой концепции в институте проводится непрерывный многолетний мониторинг характеристик резонаторов на обсерваториях, размещенных в разных регионах земного шара. Пункты наблюдений расположены в Антарктике на Украинской антарктической станции "Академик Вернадский" (УАС), в Украине на среднеширотной Низкочастотной обсерватории РИ НАНУ (НЧО) вблизи г. Харькова и в Арктике на обсерватории SOUSY (о. Свалбард, Норвегия).

Глобальные электромагнитные резонаторы можно условно разделить на две группы - ионосферные и магнитосферные. К первой относятся шумановский и ионосферный альфвеновский резонаторы. Верхняя граница ШР формируется на высотах D-области ионосферы, его собственными модами являются электромагнитные волны. Пиковые частоты ШР зависят от расположения источников (центров мировой грозовой активности) относительно наблюдателя, а также определяются глобальными свойствами нижней ионосферы. Характерный размер полости Земля – ионосфера и длины волны основного мода ШР примерно равен окружности земного шара, а соответствующая резонансная частота близка к значению 8 Гц.

ИАР формируется внутренней и внешней границами ионосферы на высотах Е и F-областей. Нормальными волнами этого резонатора являются МГД колебания вдоль магнитной силовой линии, пронизывающей ионосферу пунктом наблюдения. Резонансные частоты ИАР зависят над OT геомагнитной широты наблюдателя распределения электронной И концентрации вдоль силовой трубки. Характерные размеры резонатора и длины основного мода МГД волн варьируются с широтой от 1000 до 2000 км. Соответствующие им резонансные частоты варьируются от десятых долей до одного герца.

Микропульсации магнитного поля Земли (МПЗ) классов Pc3 и Pc4 – это полоидальные и тороидальные резонансные МГД колебания внутренней магнитосферы, формирующей MP. Собственные частоты таких магнитосферных резонансных систем определяются длиной L – оболочек и электронным содержанием вдоль них, а также поперечными проводимостями ионосферы на высотах динамо – области. Характерный частотный диапазон собственных колебаний MP от десятков до сотен мили герц.

Очевидно, что все структурные составляющие, исключая поверхность Земли для ШР, зависят от состояния ионосферно-магнитосферной плазмы, поведение которой формирует образ космической погоды. Следует отметить, что основными источниками, возбуждающими ШР, ИАР и МР, являются глобальная грозовая активность, вариации токовых систем в ионосферной динамо – области, высыпания частиц во время полярных активаций, широкополосные МГД колебания внешней магнитосферы на фронте ударной волны и различные плазменные неустойчивости. Схематично структура резонаторов изображена на рисунке 4.1.



Рисунок 4.1 – Схема глобальных резонаторов в околоземной космической плазме

На рис. 2 в качестве примера приведена зарегистрированная на УАС суточная спектрограмма СНЧ шумов, на которой отчетливо видны резонансные колебания трех типов: нескольких мод ИАР, первой моды ШР и микропульсации МПЗ класса Рс-1. Такие колебания генерируются на частотах ионно-циклотронных резонансов в магнитосфере Земли и выглядят на спектрограммах как весьма частотно стабильные треки.



Рисунок 4.2 – Пример суточной спектрограммы, рассчитанной по данным индукционного магнитометра, установленного на УАС. Первый резонансный мод ШР1 (SR mode 1) существует в течение всех суток, с 0 до 10 UTC прослеживаются линии ИАР (IAR SRS), около 15 часов в полосе частот 0-2 Гц видно пульсации класса Рс1

На рисунке 3 показаны характерные квазипериодические вариации горизонтальной Н – компоненты магнитного поля, соответствующие резонансам МР класса Рс4.



Рисунок 4.3 – Пример микропульсаций класса Pc4 (период ~ 60 с), которые наблюдались в вариациях Н -компоненты магнитного поля на УАС 01.01.2015 около 16:40 UTC

Как правило, микропульсации Рс3 и Рс4 относительно — ЭТО МПЗ колебания периодами 10-45 c. 45-150 c. узкополосные С И соответственно. Чем выше геомагнитная широта пункта наблюдения, тем протяженнее силовая линия магнитного поля и тем больше период резонансных МГД колебаний. Вариации амплитуд микропульсаций этих классов изменяются от десятых долей до единиц нанотесла.

4.1 Природа шумановских резонансов

Идея о том, что область пространства между хорошо проводящими (в СНЧ диапазоне) Землей и нижней ионосферой может являться резонатором для низкочастотных волн, длина которых соответствует длине окружности земного шара появилась еще в конце позапрошлого века. В 1893 году ирландский физик Джордж Фитцджеральд предположил, что при наличии на высоте около 100 км хорошо проводящего слоя в полости Земля-ионосфера возникнут электромагнитные волны с периодом около 0.1 сек [108]. В начале

20-го века сербский инженер и изобретатель Никола Тесла предложил Земного шара, как глобального радиоустройства [109] концепцию запатентовал свою идею [110] и попытался возбудить электромагнитный сигнал с длиной волны в окружность Земли. Однако он не предполагал наличия проводящего ионосферного слоя, и его оценки частоты резонанса оказались неверными [111]. Систематическое изучение этого резонанса, началось в середине 20-го столетия, когда профессор Мюнхенского университета В.О. Шуман высказал предположение о существовании и описал основные свойства резонанса электромагнитных волн в полости Земля-ионосфера. В своей оригинальной работе [112] исследователь колебания, возникающие в проанализировал сферическом объёмном резонаторе. При этом он полагал, что поверхность Земли имеет постоянную проводимость около $\sigma = 10^{-3}$ См/м, а проводимость ионосферы на высотах 70—90 км меняется в пределах $\sigma = 10^{-5}$ —10⁻³ См/м. Из-за этого средняя скорость распространения электромагнитной волны $V(\sigma)$ примерно на 20 % меньше, чем при отражении от сферы с бесконечной проводимостью. Для частоты n-й гармоники f_n Шуман получил выражение:

$$f_n = \frac{V(\sigma)}{L} \sqrt{n(n+1)} \approx 6, 0\sqrt{n(n+1)}, n = 1, 2, ...,$$
(4.1)

где $L \approx 40\,000$ км соответствует длине окружности Земли. Такая модель для 5ти первых пяти гармоник даёт величины 8,5 - 14,7 - 20,8 - 26,8 - 32,9Гц, что весьма близко к данным, получаемым из эксперимента.

Экспериментальное подтверждение наличия резонансов Шумана в 1960 году [113] послужило началом интенсивному изучению глобального резонанса. Интерес к исследованию данного явления обусловлен возможностью использовать резонансные сигналы как для диагностики нижней ионосферы, число методов изучения которой весьма ограничено, так и для мониторинга глобальной грозовой активности, играющей важную роль при формировании климата Земли. Кроме того, практическая необходимость обеспечения стабильной радиосвязи с погруженными объектами, послужила мощным стимулом к разработке систем радиосвязи в СНЧ диапазоне (проекты "Sanguine" [114] и "Зевс" [115] военно-морских сил США и СССР соответственно), а также теории распространения радиоволн этого диапазона, природный фон в котором, определяют сигналы ШР [116]. Большой вклад в изучение глобального резонанса внесли украинские ученые. В 1977 году специалисты ИРЭ АН УССР издали монографию [63], в которой описывалось текущее состояние дел с изучением ШР в СССР и мире. В дальнейшем, один из авторов этой работы профессор А.П. Николаенко совместно с японским коллегой профессором М. Хаякавой опубликовал еще две монографии [64, 65].

Как уже отмечалось, основным источником сигналов ШР является глобальная грозовая активность, сосредоточенная в приэкваториальных грозовых центрах, локализованных в Юго-Восточной Азии, Африке и Америке. По разным оценкам на земном шаре ежесекундно происходит от 30 до 100 [63, 117] индивидуальных молниевых разрядов. При временах накопления (десятки секунд), необходимых для спектрального разделения основных резонансных мод, характеристики ШР носят усредненный характер. Информация о характеристиках источника содержится в параметрах мод ШР, форму спектра которых y(f) принято описывать кривой Лоренца (лоренцианом) [65]:

$$y(f) = y_0 + \frac{A}{(f - f_0)^2 + \left(\frac{f_0}{2Q}\right)^2},$$
(4.2)

где: y_0 – некоторая константа, A – амплитуда резонансного сигнала, f_0 – пиковая частота, Q – добротность спектральной линии, связанная с ее шириной Δf ($Q = f_0 / \Delta f$). Величины y_0 , A, f_0 и Q для нескольких мод ШР

определяются по экспериментальным записям горизонтальных магнитных и вертикальной электрической компоненты СНЧ сигнала и могут быть использованы для оценки характеристик мировых гроз и параметров нижней ионосферы даже по данным одной шумановской обсерватории. Для решения такой обратной задачи используются различные модели грозовых центров, начиная от простейших представлений в виде точечного источника [118, 119], движущегося вдоль экватора вблизи 17-18 LT, нескольких [120, 121] точечных источников, ДО более реалистичных пространственнораспределенных источников, основанных на данных оптических наблюдений молниевых вспышек из космоса [122, 123]. В простейшем случае ионосферу внутри резонансной полости можно считать изотропной в горизонтальном направлении [63, 64]. Более точные модели могут учитывать анизотропию, связанную с неоднородностью день-ночь [124, 125], особыми условиями в полярных областях и [64] т.д., а также гиротропию, вызванную наличием магнитного поля Земли [126]. Отметим, что, несмотря, на потенциальную привлекательность ШР как "индикатора" возмущений КП, его практическое использование может быть ограничено сложностью исследуемого явления. Например, полученные в эксперименте временные вариации параметров ШР могут быть объяснены, как изменениями положений и активностей источников, так и модуляцией свойств ионосферы (см., например [65] и цитируемую в ней литературу). Поэтому, в каждом случае для корректного решения обратной задачи восстановления параметров источника либо свойств среды, необходим тщательный выбор адекватной физической модели и методики расчетов [127]. Следует отметить, что существенную помощь, в разделении эффектов источника и среды распространения оказывают расчета, основанные методики использовании синхронных на измерений параметров ШР [128.] 129]. Другой многопунктовых возможностью является анализ параметров шумановских сигналов во время мощных протонных [130, 131], рентгеновских [132, 133] и гамма вспышек [121], когда изменения в ионосфере происходят в известное время и имеют

относительно небольшую продолжительность, что упрощает разделение эффектов среды и источников. Поскольку патруль за спорадическим солнечным и галактическим излучением в последние десятилетия непрерывно осуществляется, как с поверхности Земли, так и из космического пространства, его данные могут быть использованы для независимой оценки изменений в нижней ионосфере, и впоследствии для "калибровки" моделей ШР. В рамках этого направления исследований предложена и развита концепция использования глобальных электромагнитных резонаторов в роли "индикаторов" космической погоды (см., раздел 5 работы).

Другой важной особенностью, обнаруженной при исследованиях ШР является связь интенсивности резонансных линий с изменениями глобальной температуры в субтропическом поясе [134]. Связь между резонансом Шумана и ростом температуры проявляется в нелинейном увеличении частоты молниевых разрядов [134]. Нелинейность этого отношения делает ШР глобальным "термометром", чувствительным помогающим диагностировать климатические изменения на планете. Кроме того, водяной пар в верхней тропосфере является одним из ключевых элементов, формирующих климат Земли, подобно парниковым газам, а также косвенно влияет на химию тропосферы посредствам взаимодействия с облаками и Тропосферный водяной пар гораздо аэрозолями. сильнее изменяет интенсивность парникового эффекта, чем водяной пар вблизи поверхности [135], но является ли это влияние положительным, или отрицательным пока точно не установлено. Одной из основных проблем является сложность мониторинга водяного пара в глобальном масштабе и в течение длительного периода времени. Автор работы [136] предложил, получать данные о концентрации тропосферного пара из шумановских записей. Следуют описанные выше исследования требуют отметить, ЧТО организации непрерывного патруля шумановских сигналов, который должен выполняться протяжении десятилетий. Однако, В литературе насчитывается на незначительное число ссылок на достаточно долгосрочные измерения

сигналов ШР, а имеющиеся характеризуются значительным количеством пропусков. Поэтому в 2002 году непрерывный мониторинг ШР был организован на Украинской антарктической станции (УАС) и непрерывно ведется до настоящего времени.

Кроме того, идентичные наблюдения были начаты в 2008 году на НЧО и в 2013 году в Арктике (арх. Шпицберген, обсерватория SOUSY). Создание еще двух далеко разнесенных пунктов мониторинга ШР дало возможность базу УНЧ-СНЧ получить данных, пригодную реализации для многопозиционных алгоритмов восстановления средних характеристик мировой грозовой активности. Синхронная регистрация резонансных полей местоположение позволяет восстанавливать одиночных сверхмощных молниевых вспышек, так называемых Q-bursts [137]. Оригинальные методики, основанные на поляризационной локации, были применены ранее для обработки совместных наблюдений сигналов ШР, выполненных на УАС, японской антарктической станции Showa и обсерватории Onagawa (Япония). В отличие от описанных в литературе [138, 139, 140] способов, методики, разработанные в РИ НАНУ, учитывают смещение линии пеленга на источник, связанное с гиротропией ионосферы [141]. Следует отметить, что многие Q-bursts ассоциируются со сверхмощными разрядами, такими как спрайты (sprite), голубые струи (blue jet) и эльфы (ELVES). Локация таких разрядов сегодня представляет значительный молниевых физический интерес, поскольку природа их возникновения изучена недостаточно.

4.2 Ионосферный альфвеновский резонатор

Еще одной природной резонансной УНЧ-СНЧ системой является ионосферный альфвеновский резонатор (ИАР) [142]. В отличие от ШР ИАР формируется в верхней ионосфере, а собственными модами резонатора являются магнитогидродинамические (МГД) волны.
4.2.1. Природа ИАР, морфология сигналов

При распространении МГД волн в ионосфере и магнитосфере Земли могут быть сформировано несколько резонансных систем. На рис. 4.4., заимствованным из работы [67], схематически показаны две из них: магнитосферный и ионосферный альфвеновский резонаторы. Для обеих систем нижними границами является проводящий слой в *E*- области ионосферы (высоты 100-130 км), характеризующийся максимальными значениями поперечных проводимостей (педерсеновской и холловской).



Рисунок 4.4 – Схематическое изображение ионосферного альфвеновского (ИАР) и магнитосферного (МР) резонаторов. (1) ионосферный волновод; (2) Е-слой ионосферы; (3) нейтральная атмосфера; (4) ИАР; (5) МР (согласно [67])

Резонанс формируют альфвеновские волны, распространяющиеся вдоль силовых линий магнитного поля. Для магнитосферного резонатора границы находятся в магнитосопряженных областях ионосферы в разных полушариях. На высотах внешней ионосферы (600-1200 км) за счет быстрого спадания электронной концентрации возникает резкий градиент альфвеновской скорости, который формирует полупрозрачную "стенку" для алфвеновских волн. В результате в ионосфере возникает резонансная полость ИАР. Резонансные структуры спектров (РСС) наблюдаются в зависимости от его добротности в интервале частот от долей до нескольких герц [67].

ИАР. существование Изучение которого было предсказано С.Н. Поляковым (НИРФИ, Россия) в 1976 году [143]. интенсивно проводилось многими исследователями [144, 145, 146]. Существование ИАР и его морфология были проанализированы по данным наблюдений в низких [147, 148], средних [144, 147, 149, 150] и высоких [66, 151, 152] широтах. Эти наблюдения выполнялись с помощью наземных магнитометров. В современной литературе приводятся свидетельства о регистрации ИАР космическими аппаратами [153, 154, 155, 156].

Несмотря на то, что ИАР изучается уже в течении достаточно длительного времени многие вопросы, связанные с его формированием, динамикой поведения и количественным описанием еще далеки от своего разрешения. Например, нет устоявшегося единого мнения об источниках ИАР. В качестве возможных механизмов ИХ генерации называют: возбуждение различными плазменными нестабильностями [145, 146, 157], молниевыми разрядами [158, 159, 160, 161, 162, 163], а также электромагнитными волнами, проникающими в ионосферу из космоса [164]. Хотя основные морфологические свойства ИАР в зависимости от времени суток, сезона года, солнечной активности и характеристик ионосферы и т.д., в целом известны, однако большая часть результатов получена на основе эпизодических наблюдений. Многие исследователи отмечают, что необходим непрерывный многолетний мониторинг резонансных полей в разных регионах земного шара.

Как отмечалось выше, такие систематические измерения резонансных полей были организованы РИ НАНУ в Антарктике на УАС, в Украине на

НЧО, в Арктике на о. Свалбард, и в Восточной Сибири на Саянской Солнечной Обсерватории Института Солнечно-Земной Физики (г. Иркутск). Это позволило обнаружить ряд новых эффектов в поведении РСС ИАР и систематически исследовать суточные, сезонные и одиннадцатилетние особенности его поведения в разных регионах земного шара.

Для обработки данных ИАР использованы массивы спектров и поляризационных параметров, рассчитанные с частотным разрешением 0.1 Гц. Оператор с помощью специально разработанной компьютерной программы выделяет линии ИАР, которые автоматически оцифровываются (см., рис 4.5). При этом отдельно определяется частотный ход резонансных максимумов в каналах "юг-север" (красные кривые) и "запад-восток" (черные кривые). При определении средней разности частот между линиями ИАР – dF данные обоих каналов усредняются. Программа также автоматически определяет факт обнаружения ионосферных альфвеновских для каждого 10-минутного интервала регистрации. ИАР резонансов считается обнаруженным, если для данного интервала времени зафиксировано 3 или более резонансные линии. Кроме того, для пунктов наблюдения, где установлены ионосферные станции (УАС, SOUSY, ССО) оценивается величина критической частоты слоя F2 ионосферы – f0F2. На выходе стандартной процедуры обработки для каждого 10-минутного интервала определяются: факт наличия ИАР, частотный ход резонансных линий в каналах "юг-север" и "запад-восток", средняя разность резонансных частот - dF, критическая частота ионосферного слоя F2 - f0F2.

Таким образом, для каждого пункта наблюдения формируется база данных спектральных и поляризационных параметров ШР и ИАР, которые хранятся на файл-сервере отдела радиофизики геокосмоса РИ НАНУ. Эти данные использовались для получения результатов, описанных в последующих разделах. Данные визуализации ШР и ИАР доступны в сети интернет по ссылке: <u>http://geospace.com.ua/data.html</u>



Рисунок 4.5 – Пример спектрограммы с выделенными линиями ИАР

B ланном подразделе представлены результаты исследования поведения ИАР [66, 165]. Его существование обусловлено высотным профилем электронно-ионной плазмы с учетом влияния магнитного поля Земли. ИАР формируется вдоль силовой трубки геомагнитного поля. Характерные периоды колебаний (доли секунд) и длины волн (тысяча – полторы тысячи километров) резонансных мод зависят о геомагнитной широты, состояния ионосферной плазмы, а, следовательно, от времени суток, сезона года и солнечной активности. Такие зависимости позволяют использовать поведение характеристик ИАР для оценки состояния практически всей ионосферной толщи. Кроме ИАР в околоземной плазме существует структурно связанный с ним Магнитосферный резонатор (МР) [166, 167]. Собственными модами МР являются альфвеновские волны и быстрый магнитный звук (БМЗ). В нем формируются объемные резонаторные системы (cavity resonances), ограниченные всей полостью внутренней магнитосферы. Вдоль силовых линий МПЗ возникают резонансные колебания известные как FLR (field line resonances) [37]. Структура FLR формируется отражением МГД волн от ионосферных границ В магнитосопряженных областях Южного и Северного полушарий. Собственные частоты MP- FLR варьируются в зависимости от геомагнитных широт и состояния околоземной плазмы от десятков до сотен миллигерц. Оба ИАР MP структурно общими резонатора, И связанны границами, расположенными на высотах областей ионосферного "динамо тока".

4.2.2 Наземно-космические наблюдения ИАР в эксперименте Чибис

В рамках настоящей работы был проведен наземно-космический эксперимент с использованием бортового комплекса микроспутника «Чибис-М» и сети наземных подспутниковых магнитных обсерваторий, находящихся под управлением РИ НАНУ. Основная идея эксперимента заключалась в одновременном наблюдении колебаний ионосферных альфеновского резонатора с борта ИСЗ и с поверхности Земли в период, когда спутник находился на одной силовой трубке МПЗ с наземным пунктом. Синхронные магнитометрические измерения проводились на обсерваториях, НЧО РИ НАНУ (Мартова), на Саянской обсерватории ИСЗФ СО РАН близ Иркутска, а также в Антарктиде на обсерватории УАС «Академик Вернадский».

В космосе было проведено 6 циклов экспериментов по регистрации бортовыми датчиками ИСЗ «Чибис-М» сигналов электрического поля Земли в УНЧ-ННЧ диапазоне с помощью сенсора, который функционирует в диапазоне частот 0,1 Гц - 40 МГц. Эксперименты проводились во времена, когда спутник пролетал в непосредственной близости от наземных пунктов регистрации ИАР, в окружности радиусом 1000 км от наземного пункта наблюдения и вблизи магнитосполученого регионов каждой из наземных обсерваторий.

Эксперименты проводились в следующие дни:

- 23.02 18: 56-19: 01 UT, 01.03.2014 15: 25-15: 32 UT с центром в магнитной станции Саянской солнечной обсерватории Монди ИСЗФ СО РАН (далее Саянская обсерватория).

- 01.03.2014 20: 06-20: 13 UT с центром в НЧО (23.02 и 01.03 резонансная структура, отвечающая ИАР, не отмечено ни в спутниковых данных, ни в данных наземных магнитометров)

- 05.03.2014 20: 18-20: 25 UT с центром в НЧО.

- 07.03.2014 03: 21-03: 37 UT с центром в сагнитосопряженной точке к УАС (05.03 и 07.03 спутниковые данные не удалось очистить от помех).

- 22.02.2014 18: 12-18: 18 UT с центром в Саянской обсерватории.

На рисунке 4.6.а в качестве примера представлена спектрограмма, которая была рассчитана по данным спутниковых наблюдений (пролет 22.02.2014) со временем накопления данных 10 с и перекрытием 70%. Как видно, в регистрации присутствует большое количество помех. Для очистки от помех было разработано программное обеспечение, которое убирает нули, заменяя их средним значением предыдущего и последующего отсчета исключает «нефизичные» мгновенные перескоки в волновой форме, приводя



Рисунок 4.6 - спектрограмма, полученная по спутниковым данным 22.02.2014 а) до обработки, б) после обработки.

значение к величине, которая была до перескока; и применяет фильтр Баттерворта третьего порядка в полосе частот 1-5 Гц. Пример спектрограммы после очистки приведен на рисунке 4.6.б.

На рисунке 4.7 представлены результаты эксперимента 22.02.2014. Оба регистратора, и наземный магнитометр, и расположенный на спутнике сенсор, зарегистрировали резонансную структуру спектра. На наземной спектрограмме (рис. 4.7.а) выделен временной интервал пролета спутника в районе Саянской обсерватории. Спектрограмма, построенная ПО спутниковым данным, представлена не за все время эксперимента, а только за то время, когда наблюдались резонансные максимумы (рис. 4.7.б., спектрограмма за все время эксперимента представлены на рисунке 4.6.б). Время, когда наблюдаются резонансные максимумы на карте пролета, выделено цветом (рис. 4.7.в). Расстояние между резонансными максимумами по данным спутниковых измерений составляет 0,76 Гц. По данным наземных измерений, среднее расстояние между максимумами ИАР также равно 0,76 Гц. Однако, величины собственных частот ИАР, зарегистрированных на спутнике и на поверхности Земли не совпадают.



Рисунок 4.7 – Результаты эксперимента 22.02.2014

а) спектрограмма, полученная по данным наземного магнитометра в Саянской обсерватории с 14:00-24:00, б) спектрограмма, полученная на спутнике «Чибис-М» 18:56:38-18:57:48. в) карта с траекторией пролета спутника.

Таким образом, по результатам данных экспериментов, можно сделать вывод, что резонансная структура колебаний соответствует ИАР. Она одновременно наблюдается или не наблюдается как внутри резонатора, так и на поверхности Земли. В случае, когда ИАР был зарегистрирован, расстояние между резонансными максимумами оказалось одинаковым как на поверхности Земли, так и на спутнике.

4.2.3 Методика восстановление критической частоты ионосферы по данным наблюдений ИАР

В литературе [165] описана связь между характеристиками ионосферы и параметрами ИАР, согласно которой расстояние между максимумами dF обратно пропорционально критической частоте слоя F2, и высказано предположение, что эту зависимость можно использовать для оценки f_0F_2 по данным анализа ИАР. Результаты анализа связи dF с критической частотой по данным регистрации РСС на большом массиве данных в нескольких пунктах наблюдения подтверждают Наличие такую возможность. ионозондов вблизи пунктов регистрации УАС и ССО позволило сопоставить выявленные закономерности поведения параметров РСС с критической частотой ионосферного слоя f_0F_2 . Критическая частота ионосферы была выбрана для анализа, поскольку возможность ее оценки по наблюдениям ИАР представляет значительный практический интерес. С другой стороны, от $f_0 F_2$ зависит величина альфвеновского показателя преломления [66, 165], и поэтому она должна существенно влиять на значения собственных частот ИАР. Проведенный анализ продемонстрировал, что как вероятность регистрации РСС, так и dF находятся в противофазе с f_0F_2 . Наиболее показательной и хорошо оцениваемой количественно, оказалась зависимость величины dF от критической частоты слоя F_2 ионосферы. Эта связь четко прослеживается на рис. 4.8, где представлены графики критической частоты ионосферы совместно с величиной частотного разноса между максимумами РСС для годового (Рис 4.8.а) и суточного (Рис 4.8.б) интервалов. Сплошной линией показана критическая частота, пунктирной – *dF*.



Рисунок 4.8 – Полученные на УАС зависимости для величин dF (пунктирные кривые) и f_0F_2 (сплошные кривые). а) за 2010 год, б) среднесуточный график

Наличие явной зависимости между величиной dF и критической частотой ионосферы, позволило поставить и решить задачу об оценке критической частоты слоя F_{2} , по данным наблюдений РСС.

Согласно [165, 168]:

$$dF = \frac{c}{2n_A L}, \qquad (4.3)$$

где с - скорость света; L = h + l - линейный размер резонатора, обусловленный толщиной главного ионосферного максимума - h и характерным масштабом спада альфвеновского показателя преломления выше максимума F2-слоя - l; n_{A} - альфвеновский показатель преломления

$$n_A = \frac{c\sqrt{4\pi\rho}}{B_0} \propto \frac{\sqrt{M_{eff} \cdot N_e}}{B_0}.$$
(4.4)

Здесь: B_0 - напряженность магнитного поля Земли; ρ и N_e - плотность плазмы и электронная концентрация; M_{eff} - эффективная масса ионов. Для упрощения дальнейших выкладок, следуя [165], будем считать, что электронная концентрация в ионосферном слое толщиной L не зависит от высоты и равна электронной концентрации в максимуме слоя F2 - N_{emax} (т.е. ионосфера является однородной). Учтем также, что электронная концентрация является квадратичной функцией от плазменной частоты f_p [169]:

$$N_e = 0.0124 \cdot f_p^2 \,. \tag{4.5}$$

Для электронной концентрации в максимуме слоя F2 - N_{emax} можно написать следующее простое выражение: $N_{emax} = 0,0124(f_0F2)^2$. Таким образом, учитывая (4.4-4.5) и предполагая, что ионосферная плазма является однокомпонентной, получаем

$$n_A \propto \frac{f_0 F2}{B_0} \,. \tag{4.6}$$

Если считать, что линейные размеры резонатора меняются слабо, то, учитывая выражения (4.3-4.6), получим, что критическая частота слоя F2 обратно пропорциональна разнице частот между соседними резонансными максимумами. Откуда можно записать выражение для оценки критической частоты слоя F2 по измеряемым в эксперименте величинам *dF*:

$$f_0 F_2 = \alpha / dF. \tag{4.7}$$

В коэффициент α явным образом входит величина геомагнитного поля. Для определения коэффициента пропорциональности в выражении (4.7) была построена экспериментальная зависимость критической частоты от *dF* в двух пунктах на VAC и на Саянской обсерватории. Для этого массив f_0F_2 был разбит по диапазонам *dF* с шагом 0,1 Гц. Для каждого такого диапазона проводилось усреднение критических частот. Далее, была произведена замена переменных и построены графики в координатах $f_0F_2 - 1/dF$. В полученную кривую с помощью метода наименьших квадратов была вписана прямая, проходящая через начало координат. Наклон данной прямой определяет величину коэффициента α . Для Саянской обсерватории он оказался равен α_{trk} =3,45, а для VAC - α_{UAS} =2,2. После чего была проведена обратная замена переменных, и построен график модельной кривой (см., рис. 4.9).



Рисунок 4.9 – Зависимости критической частоты f_0F_2 от расстояний между максимумами, построенные по результатам анализа данных ИАР полученных на Саянской обсерватории (слева) и УАС (справа). Вертикальными линиями показаны доверительные интервалы. Также на графике приведены модельные кривые $f_0F_2 = \alpha/dF$ (пунктирная линия) и вписанный полином 5-ой степени (точки)

Средние величины геомагнитного поля над Саянской обсерваторией и над УАС за рассматриваемый период составляют $\langle B_{0,Irk} \rangle = 51418$ нТл и

 $\langle B_{0,UAS} \rangle = 34156$ нТл соответственно (<u>http://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web</u>). Соотношение коэффициентов α для двух пунктов должно равняться отношению величин локальных геомагнитных полей. Результаты расчета подтвердили это: отношение α_{Irk} к α_{UAS} с погрешностью менее 5% равно отношению $\langle B_{0,Irk} \rangle$ к $\langle B_{0,UAS} \rangle$. Тем самым подтверждена адекватность используемой модели, что позволяет на практике проводить оценку критической частоты для произвольного пункта наблюдений ИАР, для которого известна величина магнитного поля.

Для проверки точности восстановления критической частоты ионосферы по данным анализа ИАР была проведена оценка f_0F_2 над Саянской обсерваторией и УАС с помощью (4.7). Для верификации использовались данные за период с конца локальной осени по начало локальной весны, т.к. этот период характеризуется наибольшей вероятностью регистрации РСС. На рис. 4.10 показан пример такого восстановления (жирные пунктирные линии) для каждого из пунктов наблюдений вместе. приведены критические частоты, полученной Здесь же ПО данным ионозондов (сплошные линии). Наблюдается не только качественное сходство, но и хорошее количественное соответствие оцененных двумя способами значений критических частот.



Рисунок 4.10 – Графики критических частот слоя F2 по данным ионозонда и восстановленные по модельному приближению и по эмпирической модели за несколько дней для Саянской обсерватории (слева) и для УАС (справа)

Среднеквадратические отклонения разности сравниваемых величин для обоих пунктов не превышают сотни килогерц.

Для лучшего количественного подобия восстанавливаемой по данным ИАР критической частоты относительно данных ионозонда была использована эмпирическая модель, В которой экспериментальная зависимость f_0F_2 от dF представлялась в виде полинома. Оказалось, что нужно использовать полином пятой степени, чтобы модельная кривая не выходила за пределы доверительных интервалов (см., рис. 4.9). На рис. 4.10 критической приведён пример восстановления частоты С помощью полиномиального приближения (пунктирная линия). Применение аппроксимирующих кривых улучшает соответствие сравниваемых оценок критических частот.

4.2.4 Эффект расщепления резонансных мод ИАР

Анализ данных многопунктовых измерений выявил не известный ранее эффект расщепления низших мод ИАР (введем обозначение величины расщепления ΔF_{spl}). Наиболее контрастно этот эффект проявляется в частотно-временных зависимостях для коэффициента эллиптичности r(f,t). В качестве примера на рис. 4.11 приведена суточная зависимость r(f,t), построенная по данным ССО для 10 декабря 2010 г. Как видно из этой иллюстрации, начиная с 12 UT (19 LT) моды ИАР расщепляются на два "сателлита", расстояние между которыми плавно растет до 0.8-1 Гц в 20 UT (3 LT). К 24 UT (7 LT – локального времени) величина ΔF_{spl} уменьшается.

Эффект четко прослеживается для 3-х первых мод ИАР, причем с увеличением номера резонансного мода ИАР момент возникновения расщепления незначительно сдвигается в ночные часы. Оба "сателлита" и нерасщепленные участки линий ИАР имеют практически круговую поляризацию с направлением вращения по часовой стрелке (коэффициент



Рисунок 4.11 – Расщепление линий ИАР в коэффициенте эллиптичности. Данные ССО для 10/12/2010 г.

эллиптичности близок к 1). Анализ данных показал, что другие поляризационные и спектральные характеристики ИАР на расщепленных участках суточной зависимости также являются идентичными и не могут быть использованы для селекции сателлитов. Такое поведение является типичным для всех 104 событий расщепления, зарегистрированных на ССО и УАС за четыре года (с 2010 по 2013).

Результаты анализа суточных закономерностей поведении В расщепления на СОО и УАС представлены на рис. 4.12.а и 4.12.б. Сезонная вероятность регистрации расщепления и зависимость от 11-ти летнего цикла солнечной активности продемонстрированы на рис. 4.13.а и 4.13.б. Из рисунка 4.12 видно, что расщепление в обоих пунктах регистрируется только локальной Время наблюдения для большинства событий ночью. соответствует интервалу максимальной вероятности регистрации ИАР, который на ССО длится с 18 до 6 LT, а на УАС с 18 до 9 LT.



Рисунок 4.12 – Распределение числа случаев появления (серые столбики) и исчезновения (черные столбики) расщепления (левая ордината) и кривая вероятности регистрации ИАР (правая ордината) в зависимости от местного времени на ССО (а) и УАС (б)



Рисунок 4.13 – (а) Среднемесячное число событий расщепления на УАС и ССО; (б) общее число событий расщепления регистрируемых на ССО и УАС (столбики, левая ордината) в зависимости от среднегодового числа Вольфа, W (линия, правая ордината)

Разные длительности периода наблюдаемости связаны с большей продолжительностью ночи на УАС.

Рисунок 4.13.а демонстрирует, что в обоих пунктах расщепление уверенно регистрируется только во время локальной зимы, а во все остальные сезоны года отсутствует. На рисунке 4.13.б показано распределение числа случаев расщепления в обоих пунктах для четырех лет наблюдений совместно со средним за год числом Вольфа W, которое характеризует солнечную активность в 11-ти летнем цикле.

Отчетливо видно, что число зарегистрированных событий находится в обратной зависимости от солнечной активности. Выполненный анализ суточные, показывает. сезонные И межгодовые ЧТО зависимости "наблюдаемости" расщепления полностью соответствуют аналогичным кривым вероятности регистрации ИАР, однако для расщепления они выражены более четко. Отметим, что вследствие сложности регистрации этого эффекта в освещенное время суток, когда отдельные моды ИАР практически сливаются, нельзя однозначно утверждать, что расщепление днем отсутствует. В то же время, отсутствие расщепления в другие сезоны года – весной, летом и осенью – является достоверным наблюдательным фактом, принципиальным для физической интерпретации такого поведения ИАР в глобальном масштабе.

В данном подразделе проанализирована также зависимость величины расщепления ΔF_{spl} и соотношения величин - $\Delta F_{spl}/dF$ от критической частоты ионосферы. С этой целью исследовано поведение усредненных зависимостей dF(t), $\Delta F_{spl}(t)$, $f_0F_2(t)$ (Рис. 4.25.а) и соотношение $\Delta F_{spl}(t)/dF(t)$ (Рис 4.25.б) для всех случаев, когда расщепление наблюдалось в течение 10 часов и более.

Как видно из рисунка 4.14.а формы кривых для средней разности частот между модами ИАР dF(t) и величины расщепления $\Delta F_{spl}(t)$ различаются. $\Delta F_{spl}(t)$ характеризуется меньшим вечерним возрастанием, наличием практически стационарного ночного участка и значительным уменьшением в утренние часы. Рисунок 4.14.6 демонстрирует, что величина



Рисунок 4.14 – (а) Сглаженные 3-х часовым окном и усредненные (по всем случаям расщепления длительностью 10 часов и более) зависимости для: dF(t), $\Delta F_{spl}(t)$, $f_0F_2(t)$; (б) сглаженная 3-х часовым окном зависимость $\Delta F_{spl}(t)/dF(t)$ – черная кривая. Серыми отрезками показаны аппроксимации относительной величины расщепления на участках развития – 1, стационарного расщепления – 2 и релаксации – 3

расщепления $\Delta F_{spl}(t)$, нормированная на межмодовый частотный сдвиг dF(t) состоит из трех характерные участков, которые хорошо аппроксимируются линейными функциями. Это: участок развития расщепления 1 (~16-20 LT, когда относительная величина расщепления линейно растет), стационарный участок 2 (~20-02 LT, когда относительная величина расщепления не меняется) и участок релаксации 3 (~02-05 LT, когда относительная величина расщепления линейно уменьшается). Отметим, что на стационарном участке $\Delta F_{spl}(t)/dF(t)$ с учетом доверительных интервалов не превышает значение 0.5 (не достигает половины межмодовой частотной разности, изображенной на рис. 4.14.6 пунктирной линией). Можно констатировать, что моды не "перепутываются" и не взаимодействуют между собой.

Можно предложить несколько гипотез о механизме возникновения эффекта. Первая из них – это предположение о том, что расщепление связано с появлением двух эффективных отражающих границ в нижней ионосферной или верхней магнитосферной частях резонатора. Другой возможностью является появление резонансных условий для магнитозвуковых колебаний, распространяющихся в той же полости с отличающимися волновыми нормалями. Можно также допустить, что расщепление может формироваться одновременно для двух граничных условий "электрической" и "магнитной" стенок, вблизи пучности и узла стоячей альфвеновской волны. Такой механизм объясняет стабильность величины расщепления относительно номера резонансной моды. Наконец, в качестве еще одной гипотезы следует возможность просачивания резонансных колебаний рассмотреть ИЗ магнитосопряженной области, обладающей другими условиями освещенности, отличающимися значениями критических частот и, как следствие, резонансными частотами.

4.3. Магнитосферный резонатор

В магнитосфере формируются различные резонансные системы, вызывающие квазипериодические МГД колебания с разными периодами, проявляющиеся на поверхности Земли как пульсации магнитного поля. Их появление, частотно-временные и пространственные характеристики зависят от состояния ионосферы, магнитосферы и солнечной активности. Именно поэтому они могут использоваться для диагностики состояния геокосмоса и выступать информативными индикаторами космической погоды.

4.3.1 Вероятности наблюдения пульсаций Рс1

В последнее время исследование процессов, происходящих в ближнем космосе, привлекает все большее внимание ученых. Это обусловлено в первую очередь бурным развитием космических технологий и все большей зависимостью земной цивилизации от них. Одним из параметров околоземного пространства, измеряемом на поверхности Земли, являются вариации магнитного поля, проявляющиеся, в частности, в виде геомагнитных микропульсаций.

В разделе исследованы наиболее высокочастотные данном микропульсации, класса Pc1, регистрируемые в диапазоне от 0,2 до 5 Гц. Радиоастрономическим институтом уже более 10 лет проводятся систематические магнитометрические измерения в этом диапазоне на Украинской антарктической станции «Академик Вернадский». Следует отметить, что антарктический регион является уникальным, поскольку здесь практически отсутствуют местные электромагнитные помехи, связанные с человеческой деятельности, а также помехи от ближних гроз.

Для поиска пульсаций класса Pc1, так называемых, жемчужин, был разработан и программно реализован алгоритм автоматического обнаружения. На рисунке 4.15 приведен пример суточной спектрограммы с отчетливо видимыми пульсациями. Шаг по времени составляет 10 минут, а по частоте – 0,1 Гц. Каждый спектр получен усреднением 60 мгновенных спектров.

Первым критерием поиска жемчужин было наличие локального максимума в спектре в диапазоне от 0,2 до 5 Гц. Вторым критерием являлось превышение этим максимумом в 50 раз (на 17 дБ) среднего уровня шума в течение как минимум двух последовательных спектральных отсчетов, то есть на протяжении 20 минут. Средний уровень шума вычислялся отдельно для каждых суток в диапазоне от 5 до 10 Гц. Затем, чтобы гарантировано исключить помехи, в рассмотрение были приняты только те пульсации, диапазон частот которых составлял менее 1 Гц.

В работе рассмотрена корреляция между длительностью наблюдения «жемчужин» и параметрами солнечной активности в течение полного цикла, с 2003 по 2013 год. В качестве последних рассматривались три величины: числа Вольфа, интенсивность рентгеновского излучения Солнца и интенсивность излучения Солнца на длине волны 10,7 сантиметров.



Рисунок 4.15 – Пример суточной спектрограммы за 9 августа 2010 года.

На рисунке 4.16 показана суммарная продолжительность пульсаций для каждого года (синяя кривая), а также среднегодовые значения чисел Вольфа (зеленая кривая). Число Вольфа – это числовой показатель являющийся количества солнечных пятен, одним ИЗ самых распространенных показателей солнечной активности. Коэффициент корреляции между кривыми составляет 0,73.

На рисунках 4.17 и 4.18 та же кривая, показывающая продолжительность пульсаций, приведена в сравнении с интенсивностью рентгеновского излучения (рисунок 4.17) и в сравнении с интенсивностью излучения на длине волны 10,7 сантиметров (рисунок 4.18).



Рисунок 4.16 – Вариации суммарной продолжительности пульсаций для каждого года в часах (синяя кривая), а также среднегодовых значений чисел Вольфа (зеленая кривая).



Рисунок 4.17 – Суммарная продолжительность пульсаций для каждого года в часах (синяя кривая), а также среднегодовые значения интенсивности солнечного рентгеновского излучения (зеленая кривая).



Рисунок 4.18 – Суммарная продолжительность пульсаций для каждого года в часах (синяя кривая), а также среднегодовые значения интенсивности излучения Солнца на длине волны 10,7 сантиметров (зеленая кривая).

В первом случае коэффициент корреляции составляет 0,75, а во втором – 0,7. Обращает на себя внимание тот факт, что из трех параметров солнечной активности только интенсивность рентгеновского излучения повторяет локальный максимум 2005 года в длительности наблюдения пульсаций. Это может свидетельствовать о том, что увеличение мощности рентгеновского излучения прямо влияет на создание более благоприятных условий для возникновения пульсаций.

Таким образом, была рассмотрена статистика наблюдений пульсаций класса Pc1, так называемых «жемчужин», по данным, полученным на VAC с 2003 по 2013 год. Обнаружена значительная межгодовая изменчивость частоты появления пульсаций, которая хорошо коррелирует с различными параметрами солнечной активности. В качестве последних были взяты наиболее распространенные параметры – числа Вольфа, интенсивность излучения Солнца на длине волны 10,7 сантиметров, а также интенсивность солнечного рентгеновского излучения. Коэффициенты корреляции лежат в сравнительно небольшом диапазоне, от 0,7 до 0,75.

4.3.2 Вероятности наблюдения пульсаций Рс3-Рс4 на УАС

Был разработан программно реализованный алгоритм, для определния вероятности (частоты) наблюдения пульсаций, которая определялась следующим образом. Обрабатывался каждый суточный файл с магнитными данными, полученный на обсерватории AIA флюксгейт магнитометром LEMI-008. Определялось количество корректных часовых интервалов (без провалов, сбоев и помех) в течение суток с данными (критерий – модуль производной по горизонтальным компонентам магнитного поля не должен превосходить 5 нT/с в течение часа). Производилась фильтрация фильтром верхних частот (Баттерворта, 3 порядка) с периодом обрезания 150 с (максимальный период пульсаций Рс4). Рассчитывались спектры мощности по горизонтальным компонентам и взаимные спектры между ними. Временное окно оценки мгновенных спектров выбиралось равным 600 с. время усреднения и шаг по времени – 1 час. Т.е., за час усреднялось по 6 мгновенных спектров. Рассчитывались 4 параметра Стокса для каждого часового интервала. Далее, считалось, что если какая-то из гармоник в диапазоне периодов 45-150 с превышала порог по уровню поляризованной мощности (пересчитанный в линейный масштаб) в 0.32 нТ, при этом степень поляризации данной гармоники превышала порог 0.5, то на данном часовом интервале наблюдается пульсация класса Рс4. Если какая-то из гармоник в диапазоне периодов 10-45 с превышала порог по уровню поляризованной мощности (пересчитанный в линейный масштаб) в 0.1 нТ, при этом степень поляризации данной гармоники превышала порог 0.5, то принималось решение, что на данном часовом интервале наблюдается пульсация Рс3. Вероятность (частота) наблюдения пульсаций заданного класса в течение суток определялась путем деления количества часовых интервалов, в пределах которых пульсация была зарегистрирована, на общее количество корректных часовых интервалов в сутках. Оценки вероятностей появления пульсаций на УАС за длительный срок наблюдений приведены на рисунке 4.19.



Рисунок 4.19 – Частота повторения пульсаций Pc3 (а) и Pc4 (а) при месячном усреднении по данным УАС

4.3.3 Поляризационные свойства пульсаций Рс3-Рс4 по данным УАС и НЧО

Приведенные выше результаты были получены с помощью алгоритма обнаружения, в котором решение о существовании пульсации принималось по характеристикам максимума в мгновенном спектре магнитных вариаций, построенном по 500...600-секундным интервалам. При таком подходе в каждом случае обрабатывалась лишь одна гармоника пульсаций, считавшаяся основной, что не давало возможности оценивать зависимости поляризации от частоты.

В рамках настоящей работы алгоритмы обнаружения пульсаций были несколько видоизменены. В предположении о стационарности пульсаций в пределах часового интервала времени каждые сутки в течение месяца были рассчитаны и усреднены параметры Стокса, на базе которых рассчитаны позиционный угол и коэффициент эллиптичности. Считалось, что пульсации на данной частоте регистрируются, если корень из усредненного значения первого параметра Стокса был не менее 0.055 нТл. Такой подход позволил обнаружить зависимость параметров поляризации регулярных пульсаций классов Pc3-Pc4 от частоты. Результаты, полученные для разных сезонов на УАС и НЧО приведены на рисунке 4.20. Зависимость позиционного угла от частоты наиболее ярко проявляется летом в утренние часы. В первом приближении можно утверждать, что «арка» обеспечивается более высокочастотными пульсациями, а «подсолнух» – низкочастотными. Обнаруженные зависимости в целом подтверждают сделанные выше выводы: суточная вариация позиционного угла типа «арки» обусловлена пульсациями, частота которых близка к магнитосферному альфвеновскому резонансу, а «подсолнух» – пульсациями, частота которых далека от альфвеновского резонанса.



Рисунок 4.20 – Частотная зависимость параметров поляризации пульсаций Pc3...Pc4: суточные вариации угла места (а, в), суточные вариации коэффициента эллиптичности (б, г), на НЧО (а, б) в октябре 2016 г., и на УАС (в, г) в феврале 2015 г.

4.4 Глобальные резонаторы в 11-летнем цикле солнечной активности

Наиболее продолжительные непрерывные ряды наблюдений параметров резонаторов накоплены на УАС, где систематические измерения были начаты в 2002 году [170, 171]. Это позволило проанализировать поведение глобальных резонаторов в последнем 11-летнем цикле солнечной активности [172]. Украинская антарктическая станция находится В уникальном для геокосмических исследований регионе земного шара. Она расположена в высоких географических (65°15′ ЮШ, 64°16′ ЗД.), но в средних геомагнитных широтах (скорректированная геомагнитная широта $VAC \sim 50^{\circ}$). Экстремальное отличие географической и геомагнитной широты упрощает процессов В геокосмосе, стимулированных селекцию энерговыделениями в нейтральной атмосфере от возмущений радиационной и корпускулярной активности Солнца. Рекордно низкий уровень помех, обусловленный отсутствием промышленной деятельности в Антарктике, позволяет изучать очень слабые электромагнитные поля [173] и сигналы природного происхождения [174, 175]. В частности, Антарктика - идеальное место для дистанционного исследования глобальной грозовой активности, которая является индикатором климатических изменений. Еще одной особенностью расположения УАС является магнитное сопряжение с северовосточным побережьем США, где функционирует несколько ионосферномагнитосферных обсерваторий. Это позволяет контролировать поведение MP вдоль одной магнитной силовой линии.

Цель проводимых исследований состояла в установлении зависимость параметров трех глобальных электромагнитных резонаторов от корпускулярной и радиационной составляющих солнечной активности в полном 11-летнем цикле. Данные наземных наблюдений МР, ИАР и ШР сопоставлены с регистрациями солнечного ионизирующего излучения и авроральных активаций, полученными бортовыми сенсорами нескольких спутниковых миссий (NOAA POES, DMSP, GOES).

В качестве параметров ШР использовались частота и интенсивность первого спектрального максимума (ШР1), параметров ИАР - вероятность (частота) наблюдения эффекта и средний частотный разнос между его максимумами, параметров пульсаций Pc1, Pc3-3c4 – вероятность (частота) их наблюдения. Параметры резонаторов сравнивались с потоком рентгеновского излучения Солнца, авроральной мощностью, индексом F10.7, числом солнечных пятен, планетарными Кр и местными К-индексами.

Измерения потока рентгеновского излучения осуществляются на спутниках GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites) службы SWPC (Space Weather Prediction Center). Названия спутников и периоды их работы приведены в таблице 4.1.

Авроральная мощность (HP - «Hemispheric power») представляет собой оценку потока мощности (измеряемой в гигаваттах) энергетических

частиц (электронов и ионов), которые высыпаются в полярных областях Северного и Южного полушарий Земли.

Имя спутника	Время функционирования
SMS-1	1974-07 -1974-10
SMS-2	1975-02 - 1976-04
GOES-1	1976-01 - 1978-05
GOES-2	1977-08 - 1983-05
GOES-3	1978-07 - 1980-08
GOES-4	Нет данных
GOES-5	1983-01 - 1987-02
GOES-6	1983-05 - 1994-11
GOES-7	1987-03 - 1996-08
GOES-8	1995-01 - 2003-06
GOES-9	1996-04 - 1998-07
GOES-10	1998-07 - 2009-12
GOES-11	2000-07 - 2011-02
GOES-12	2003-01 - 2010-08
GOES-13	2010-04 – настоящее время
GOES-14	2009-12 – настоящее время
GOES-15	2010-09 – настоящее время

Таблица 4.1 – Спутники GOES и общее время их функционирования

Величина авроральной мощности вычисляется по данным измерений, проводимых на спутниках DMSP и NOAA POES, которые движутся по солнечно синхронным орбитам на высоте примерно 850 км (при прохождении спутников над полярными областями).

С помощью спектрометров частиц, установленных на спутниках, регистрируются ионы и электроны с энергиями, не превышающими 20 кэВ. Различают авроральную мощность электронов (НРе), ионов (НРі) и полную авроральную мощность HPt = HPi + HPe. Вклад в НРе электронов с энергиями 50 ÷ 300 эВ обычно менее одного процента и не имеет существенного влияния на конечную величину НР. Названия спутников и диапазон энергий частиц, которые регистрируются спектрометрами, приведены в таблице 4.2.

Спутник	Диапазон энергий
NOAA SEM-1	300 eB ÷ 20 кeB
NOAA SEM-2	50 eB ÷ 20 кeB
DMSP SSJ4/SSJ5	32 eB ÷ 30.18 кeB
(спектрометр SSJ/4 (спутники F06 – F15) и	
SSJ/5 (F16 и више))	

Таблица 4.2 – Параметры измерительной аппаратуры на спутниках DMSP и NOAA POES

Индекс F10.7 отражает интенсивность электромагнитного излучения Солнца на частоте 2800 МГц (длина волны 10,7 см). Радиоастрономическая обсерватория Пентиктон в Британской Колумбии, Канада, ежедневно публикует значение F10.7. Величина индекса приводится в единицах sfu («solar flux units»), и, как правило, варьирует от 50 до 300 и выше в течение одного солнечного цикла. F10.7 не имеет прямого воздействия на ионосферу, тем не менее, его интенсивность хорошо коррелирует с числом солнечных пятен, а также с данными измерений интенсивности солнечного излучения в ультрафиолетовой и рентгеновской областях, которые непосредственно влияют на степень ионизации и, следовательно, концентрацию электронов в области F2 ионосферы. Архив данных индексов F10.7, который был использован для анализа, находится на сайте SWPC. В базах данных того же центра были взяты планетарные Кр-индексы геомагнитной активности. Местные К-индексы геомагнитной активности на УАС рассчитывались по данным геомагнитной обсерватории AIA, расположенной на УАС, по методике, утвержденной IAGA. Использовалась также информация о количестве солнечных пятен Международного центра данных Королевской Обсерватории Бельгии.

На рисунке 4.21 изображены измеренные на УАС параметры глобальных резонаторов (левые панели) наряду С солнечными И планетарными индексами (правые панели) за 12-летний срок наблюдений 2002-2013 годов. Коэффициенты корреляции между параметрами, усредненными по годовым интервалам времени, собраны в таблице 4.3,

усредненными по месячным интервалам – в таблице 4.4. Остановимся подробнее на некоторых особенностях взаимосвязи рассматриваемых величин.

Как видно, интенсивность ШР находится в прямой зависимости от солнечной активности (рис. 4). Сравнивая интенсивности и пиковые частоты ШР1 (рис. 4 a, б) с потоком рентгеновского излучения 1-8 Å (рис. 4 з, логарифмический масштаб), можно заметить неплохое соответствие рядов даже в некоторых деталях (совпадение во времени локальных максимумов 2005 и 2011 годов; однако, абсолютные минимумы вариаций не совпадают: минимум потока наблюдается в 2008, а интенсивности ШР1 - в 2009 году). Это подтверждает гипотезу о важной роли рентгеновского излучения в ШР [176]. Так. формировании увеличение интенсивности потока рентгеновского излучения во время солнечного максимума уменьшает высоту и увеличивает проводимость "магнитного" характеристического слоя (~90 км). В результате пиковые частоты и интенсивности сигналов возрастают.

Коэффициент корреляции между среднегодовыми значениями интенсивности ШР1 и потоком рентгеновского излучения составляет 0,90. Для пиковых частот коэффициенты корреляции составляют 0,93 с каналом Север-Юг (СЮ) и 0,91 с каналом Запад-Восток (ЗВ). Следует отметить, что коэффициенты корреляции интенсивности с остальными параметрами также высоки - не менее 0,8, включая 0,88 для связи интенсивности с К-индексами (табл. 4.3). Для пиковых частот значение корреляции с К-индексами несколько меньше, чем с другими параметрами. Коэффициент корреляции с числами Вольфа составляет 0,89 (СЮ) и 0,85 (ЗВ), с F10.7 – 0,88 и 0,82, соответственно. Таким образом, изменения радиационной активности Солнца сильнее, чем корпускулярной, влияют на параметры ШР, что подтверждается большим величинами коэффициентов корреляции для первой группы индексов. Кроме того, корреляционная связь с солнечными индексами для пиковых частот канала СЮ выше, чем для канала ЗВ.



Рисунок 4.21 – Интенсивность первого шумановского максимума (а), частоты первого шумановского максимума в Н (синий) и D (зеленый) компонентах (б), вероятности регистрации ИАР (синие кривые) вместе с инвертированными критическими частотами ионосферы (зеленый) (в), вероятности регистрации Рс1, логарифмическая шкала (г), Рс3 (д) и Рс4 (е), поток рентгеновского излучения Солнца (з), поток F10.7 (и), число солнечных пятен (к), мощность потока частиц, высыпаются в авроральной

области южного полушария по данным спутника POES (л), планетарные Криндексы (м), местные К-индексы на УАС (н). Таблица 4.3 – Коэффициенты корреляции и временной сдвиг максимума взаимной корреляционной функции между среднегодовыми значениями параметров резонаторов и геофизическими и солнечными индексами

	f0f2	ssn	К	Кр	X-ray	F10,7	HP S
ISR	0,807	0,846	0,883	0,803	0,945	0,854	0,822
	0.870	0.89/	0.823	-2 0.813	0 03/	0.88/	0.802
NSSR	0,870	0,874	0,825	-2	0,954	0,884	-1
EWSR	0,843	0,854	0,787	0,721	0,9134	0,824	0,753
D.,2	0.554	0,600	0.831	0.691	0.603	0.668	0.802
PC3	+1	+1	0	-1	+1	+1	0
Pc4	0,635	0,652	0,727	0,769	0,674	0,665	0,889
1 64	+3	+3	0	-1	+3	+3	0
Alv	-0,811	-0,847	-0,871	-0,853	-0,896	-0,863	-0,874
	0	0 005	-1	-2	0 005	0	-1
f0F2		0,995	-1	-3	0,895	0,974	-1
dF	-0,96	-0,96	-0,75	-0,76	-0,91	-0,92	-0,719
	Ó	Ó	-1	-3	Ó	Ó	-1
HP S	0,3871	0,644	0,914	0,601	0,500	0,693	
	6	13	0	-17	0	14	

Таблица 4.4 – Коэффициенты корреляции и временной сдвиг максимума взаимной корреляционной функции между среднемесячными значениями параметров резонаторов и геофизическими и солнечными индексами

	f0f2	ssn	К	Кр	X-ray	F10,7	HP S
ISR	$\substack{0,630\\+7}$	0,670 + 1	0,642 -4	0,510 -24	0,536	0,640 +1	0,702 0
NSSR	0,822 +7	0,553	0,570 -6	0,393 -23	0,438 -2	0,502 -3	0,518 0
EWSR	0,620 -5	0,648 +1	0,595 -6	0,488 -24	0,506 -2	0,595 +1	0,566 0
Pc3	0,318 + 14	0,463 +16	0,800 0	0,509 -15	0,487 + 15	0,529 + 16	0,498 0
Pc4	-0,543 -30	0,377 +34	0,619 0	0,370 -17	0,402 + 15	0,423 +34	0,787 0
Alv	-0,813 0	-0,383	-0,485 -1	-0,322 -26	-0,324 +2	-0,429 0	-0,466 -5
f0F2	$1 \\ 0$	0,470 5	-0,405 53	0,274 -29	0,359 -9	0,534 0	0,387 -6
dF	-0,88 0	-0,41 4	0,40 54	0,27 37	0,36 56	-0,47 0	0,288 -5
HP S	0,743 1	0,834	0,982 0	0,796 -1	0,779 1	0,834	

Условные обозначения, введенные в таблицах 4.3 и 4.4:

- ISR интенсивность ШР1; NSSR, EWSR частоты ШР1 в каналах СЮ и ВС, соответственно;
- Alv вероятность регистрации ИАР; dF разница в частоте между максимумами ИАР;
- Рс1, Рс3, Рс4 вероятности наблюдения пульсаций Рс1, Рс3 и Рс4;
- foF2 критическая частота ионосферы;
- HP S мощность потока частиц, высыпаются в авроральной области Южного полушария;
- ssn число Вольфа (число солнечных пятен);
- К локальный К-индекс;
- Кр планетарный Кр-індекс;
- Х-гау поток рентгеновского излучения Солнца;
- F 10,7 поток F10.7.

Вероятности наблюдения ИАР совместно среднемесячными co критической частоты области F2 ионосферы (foF2)значениями С инвертированной шкалой за 12 лет наблюдений приведены на рисунке 4 в. В целом, частота наблюдения ИАР находится в обратной связи с солнечной активностью. Можно отметить высокую антикорреляцию среднемесячной наблюдения ИАР с foF2 (рис. 4.21 в). Летом вероятность частоты наблюдения ИАР падает практически до нуля. На коротких масштабах времени вероятность появления ИАР полностью контролируется параметром foF2 (рис. 4.21 в, табл. 4.4). По среднегодовым данным коэффициент корреляции с критической частотой составляет -0,81 (табл. 4.3). Следует отметить, что для усредненных за год данных становятся значимыми коэффициенты корреляции вероятности наблюдения ИАР и с другими параметрами, характеризующими солнечную активность (например, модуль коэффициента корреляции с потоком рентгеновского излучения равен 0.9, табл. 4.3).

Частота наблюдения пульсаций Pc3 в линейном масштабе приведена на рисунке 4.21 д. Как видно, в годы высокой солнечной активности имеет место существенная сезонная вариация частоты появления Pc3 с острым максимумом в летнее время. Количественно корреляция с местным К-

индексом достаточно высокая, коэффициент корреляции равен 0,83 для среднегодовых значений, и 0,8 - а для среднемесячных. С Кр-индексами коэффициент корреляции равен 0,69 и 0,51, соответственно. Из прочих параметров можно отметить связь с индексом F10.7, однако коэффициент корреляция с ним (0,68 для среднегодовых и 0,52 – для среднемесячных значений, табл. 4.3, 4.4) значительно меньше, чем с К-индексами. То есть, для Pc3 можно сделать те же выводы, что и для Pc1: основное влияние на частоту появления Pc3 имеет корпускулярная активность Солнца, которая приводит к авроральным активациям (рис. 4.21 л) и проявляется в локальных К-индексах (рис. 4.21 н).

Вероятность наблюдения пульсаций класса Pc4 приведена на рисунке 4.21 е. Сравнение частоты их наблюдения с планетарным Кр-индексом (рис. 4.21 м) и потоком рентгеновского излучения (рис. 4.21 с) показывает различный характер поведения их вариаций. Лучшая корреляция частоты появления Pc4 наблюдается с локальным К-индексом. По годовым данным корреляция с планетарным Кр выше, чем с локальным К-индексом (0,76 против 0,72). Коэффициенты корреляции с другими параметрами ниже (от 0,63 до 0,67). Значимый коэффициент корреляции по среднемесячным данным имеет место только с локальными К-индексами (табл. 4.4). Таким образом, для микропульсаций класса Pc4 справедливы те же выводы, что были сделаны для Pc1 и Pc3: основную роль в их генерации играет источник, инициированный корпускулярной активностью Солнца и авроральные активации (рис. 4.21 л).

Таким образом, основные результаты исследования трех глобальных резонаторов (ШР, ИАР и МР) в полном 11-летнем цикле солнечной активности состоят в следующем.

1. Продемонстрировано, что глобальные природные электромагнитные резонансные структуры могут быть использованы как индикаторы солнечноземного взаимодействия и состояния космической погоды.

2. Поведение характеристик ШР и ИАР отражает вариации радиационной

ионизирующей компоненты солнечного излучения и позволяет контролировать ионосферные характеристики.

3. Поведение магнитосферных резонансов классов Pc1, Pc3, Pc4 преимущественно контролируется корпускулярной солнечной активностью, которая приводит к авроральным активациям и возмущениям магнитного поля Земли.

4. Нахождение таких закономерностей на примере детерминированного во времени 11-летнего цикла позволяет моделировать и прогнозировать поведение геокосмоса при других спорадических солнечных возмущений.

5. Данные мониторинга глобальных резонаторов размещаются на сайте РИ НАНУ в реальном времени.

РАЗДЕЛ 5. ДИАГНОСТИКА ИОНОСФЕРЫ МЕТОДАМИ ДОПЛЕРОВСКОГО ВЧ ЗОНДИРОВАНИЯ И РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЯ СИГНАЛАМИ СПУТНИКОВ ГНСС

В рамках работ по Целевой комплексной программе НАН Украины по космическим исследованиям на 2012-2017 годы РИ НАН Украины развивает когерентных ВЧ измерительных комплексов на базе цифровых сеть приемников G313. Проводимое с помощью этих комплексов доплеровское зондирование ионосферы позволяет восстанавливать динамику ионосферных неоднородностей в областях отражения или рассеяния радиосигналов. Проведенная в рамках работы модернизация комплексов состояла в привязке аппаратного времени к мировому, что позволило их использовать для измерения времени распространения ВЧ сигналов станций службы точного времени и использовать их в режиме двухпозиционной локации ионосферы. Описание подхода и первые полученные с помощью проведенной модернизации результаты приведены в первом подразделе настоящего раздела.

Методы, основанные на многопозиционном радиопросвечивании с использованием глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) позволяют эффективно изучать и моделировать ионосферные процессы благодаря развитию сетей двухчастотных приемников, изначально предназначенных в первую очередь для решения геодезических задач. Такие исследования используют различные методы обработки первичных данных, В приемниках ГНСС на поверхности накапливаемых земли И на низкоорбитальных спутниках. В настоящее время широко используется представление результатов обработки информации о состоянии ионосферы в виде карт полного электронного содержания (ПЭС) в вертикальном столбе. В разных странах прилагаются усилия для построения региональных карт ПЭС, однако до настоящего времени удалось существенно улучшить только
временное разрешение – до нескольких минут, но пространственное разрешение реально остается на уровне глобальных карт [177].

Причина провала попыток построения региональных карт высокого разрешения состоит в том, что модель ионосферы в виде тонкого фазового экрана, прекрасно работающая в глобальном масштабе, не годится для карт с разрешением около 50км. Дело в том, что при изучении неоднородностей размера нельзя пренебрегать распределением такого электронной ионосферы, концентрации толщина которой по высоте оценивается величиной 200-300км. Высота локализации В неоднородностей не обязательно совпадает с принятой конвенционально высотой тонкого слоя ионосферы. Для глобальных карт неопределенность высоты не существенна, так как в этом случае практически не существует понятия «неоднородность». Целью исследования, проведенного в рамках настоящей работы, являлась разработка методики диагностики среднемасштабных ионосферных образований и волновых процессов по данным достаточно плотной региональной сети приемников ГНСС. Во втором подразделе представлены разработанные методики картографирования ионосферных возмущений с использованием данных региональных сетей ГНСС приемников.

5.1. Модернизация приемных когерентных ВЧ комплексов

Настоящий раздел посвящен «абсолютным» измерениям времени распространения или длины группового пути импульсных сигналов. С этой целью приемные пункты на Свабларде, в Тромсё и в Антарктике были модернизированы. Усовершенствование состояло в дополнении систем мультиплексорными схемами, «подмешивающими» в приемный тракт сигнал точной секунды, который формируется из PPS импульса сигнала спутников навигационной системы GPS. 5.1.1. Описание алгоритма синхронизации времени цифрового когерентного приемного комплекса на стадии обработки данных

Задача синхронизации времени возникла вследствие невозможности аналоговой синхронизации всех внутренних частот приемника G313 внешним стандартом частоты. Дело в том, что частота внутреннего АЦП задается кварцевым генератором, расположенным приемника внутри микросхемы и не поддающимся внешнему управлению. Его относительная частотная нестабильность не хуже чем, чем 10⁻⁸, что позволяет качественно проводить относительные доплеровские измерения. Однако, точность настройки частоты генератора АЦП не столь хороша. Оценки показывают, что она составляет величину порядка 10^{-5} , и это приводит к уходу времени в суточном файле данных. Как уже было отмечено выше, для коррекции времени в приемный тракт через мультиплексор подмешивается импульс точной секунды GPS, причем в это время на вход подается только сформированный сигнал точной секунды, а антенна отключается. Подобное переключение производится один раз в час, длительность подачи синхроимпульсов составляет одну секунду. То есть, в приемный тракт поступает всего один синхроимпульс за один час.

На стадии обработки данных задача состоит в надежном выделении синхроимпульсов и последующем их использовании в абсолютных измерениях времени распространения принятых сигналов. Для решения задачи был разработан и программно реализован (в среде Matlab) алгоритм выделения и обработки синхроимпульсов.

Методика выделения синхроимпульса.

Переключение мультиплексора на схему подачи синхроимпульса производится внешней программой управления работой комплекса с 58 по 59 секунды последней минуты каждого часа по часам компьютера.

Обработка организована таким образом, что на первом этапе на экран компьютера выводится оцифрованный сигнал во время подачи первого

синхроимпульса в конце того часа, когда стартовала запись, причем выводится интервал времени, перекрывающий время подачи синхроимпульса (рис. 5.1.а). В другом окне на экран выводится амплитуда сигнала за то же время (рис. 5.1.б). На записях по уменьшению уровня сигнала отчетливо виден интервал переключения записи в режим синхронизации.

Далее оператору предоставляется возможность «вручную», с помощью компьютерной мыши, найти синхроимпульс. Для этого оператор последовательно увеличивает в окне амплитуды интервал синхронизации (рис. 5.1, в, г). И далее с помощью мыши выделяет момент прихода



Рисунок 5.1 – Оцифрованный сигнал (а), и его амплитуда (б) в координатах «номер отсчета – уровень» на стадии определения положения синхроимпульса. Амплитуды сигнала в более крупном масштабе, «растянутом» оператором (в, г). На (в) синхроимпульс показан стрелкой. синхроимпульса. После этого программно определяется номер отсчета, соответствующего первому синхроимпульсу *N*₁ внутри файла с данными.

Далее обработка производится автоматически. На удалении порядка часа от первого ищется второй синхроимпульс в интервале отсчетов $\Delta N_2 = N_1 + f_s \times 3600 \pm \Delta n$. Здесь f_s - частота оцифровки, $f_s \times 3600$ - количество отсчетов сигнала за один час при точной настройке частоты АЦП, $\pm \Delta n$ -«ворота», в которых ищется синхроимпульс (как правило, порядка 50...200 отсчетов, что соответствует уходу времени 25...100 мс/час). Поиск ведется по критерию максимума амплитуды сигнала внутри интервала $\pm \Delta n$. В результате определяются номер второго синхроимпульса N_2 . Далее похожим образом определяются номера всех отсчетов N_i , которые соответствуют точной 59 секунде последней минуты каждого часа. Алгоритм поиска адаптивный в том смысле, что на третьем и последующих циклах синхроимпульсы ищутся, исходя из определенного на предыдущих шагах обработки среднего количества отсчетов, приходящихся на один час точного времени: $N_{i+1} = N_i + \frac{N_i - N_1}{i-1} \pm \Delta n$ (где N_{i+1} номер отсчета i+1 синхроимпульса, ближайшее целое число к полученному в результате вычисления).

В результате находятся среднее количество отсчетов на один час записи $K_n = \frac{N_{end} - N_1}{i_{end} - 1}$, где N_{end} - номер отсчета, соответствующего последнему синхроимпульсу в пределах файла с данными, а i_{end} - номер последнего синхроимпульса. Далее номер отсчета, соответствующий истинному времени начала интервала анализа данных T_{st} , определяется как

$$N_{st} = K_n (T_{st} - T_1) + N_1,$$

где *T_{st}* и *T*₁ - это время начала интервала анализа и время первого синхроимпульса в пределах файла, соответственно, определенное в часах.

5.1.2 Измерения на трассе РВМ-УАС

Для того, чтобы разобраться, какие пространственные моды нужно разделять, приведем усредненные суточные спектрограммы сигналов PBM на трассе PBM-УАС. Так в усредненных спектрограммах видно (Рис. 5.2), что в течение суток принимаются разные спектральные моды сигналов. Система синхронизации на УАС была установлена в начале апреля 2013 года. Введение системы синхронизации в эксплуатацию дала возможность измерить длину групповых путей и пространственно разделить разные спектральные моды сигнала.



Рисунок 5.2 – Усредненные спектрограммы сигналов PBM на частотах 9996 кГц (а-б), и 14996 кГц (в-г), принятых на УАС в марте (а, в) и апреле 2014 года (б, г)

Примеры спектрограмм сигналов, принятых 03.04.2013 на РАО в 00:00-13:30 UT, приведены на рис. 5.3 (после 13:30 03.04.2013 проводились эксперименты с различными антеннами, поэтому данные за это время отсутствуют). Как видно, на частоте 09996 кГц в 00-02 UT принимается достаточно узкополосный сигнал в окрестности



Рисунок 5.3 – Спектрограммы в 00:00 – 13:30 UT 03.04.2013 сигналов на трассе PBM-УАС на частоте 09996 кГц (а) и 14996 кГц (б)

нулевой доплеровской частоты. В 03-06 UT принимался широкополосный сигнал с ДСЧ от нуля до 5 Гц и более (рис. 5.3.а). Около 12 часов вновь появляется сравнительно узкополосный сигнал с ДСЧ около 0...1 Гц ДСЧ. На частоте 14996 кГц сигнал РВМ на УАС появляется только около 12 UT.

Результаты импульсных измерений с временной синхронизацией позволяют оценить длины групповых путей сигналов. На рисунке 5.4 приведены частотно-временные спектрограммы сигналов PBM на частоте 9996 кГц (по оси ОХ показаны длины групповых путей). Видно, что в 0:54 UT (Рис. 5.4.а) длина группового пути сигнала, определенная по времени прихода переднего фронта импульса, составляет величину порядка 16000 км, что соответствует длине прямой трассы. В 00:54 UT 04.04.2013 сигнал не регистрировался (рис. 5.4. г), вероятно, из-за худших условий распространения. В оба дня измерений в 3:24 UT регистрировались сигналы,



Рисунок 5.4 – Пример измерений длин групповых путей на трассе PBM-УАС. Частота 9996 кГц.

а)-в) 03.04.2013, г)-е) 04.04.2013. а), г) 0:54 – ~16000 км, прямая трасса,

б)-д) – ~21000 км, рассеяние от северного полярного овала,

в)-е) 12:54 - ~24000 км – обратная трасса.

рассеянные ионосферными неоднородностями северного полярного овала (рис. 5.4. б, д). Измеренный групповой путь в это время составляет величину порядка 21000 км. Как и в случае прямой трассы, уровень сигнала, рассеянного полярным овалом, 03.04 был выше, чем 04.04.2013. В оба дня в 12:54 UT групповой путь принятых сигналов составлял ~24000 км, что соответствует длине обратной трассы. Причем в отличие от прямой трассы и рассеяния от овала, интенсивность обратного сигнала в 12:54 UT 04.04.2014 была значительно выше, чем 03.04.2013.

На рис. 5.5 приведены частотно-временные спектрограммы сигналов, принятых на частоте 14996 кГц 03.04 и 04.04.2013 в 12:57 UT. Как показывают измерения, сигнал в это время распространялся обратной трассой, поскольку длина группового пути в обоих случаях составляла порядка 25000 км (Рис. 5.5). До 12 UT сигнал не регистрировался, что связано с условиями распространения на трассе PBM-УАС на частоте 14996 кГц в это время года (рис. 5.2).



Рисунок 5.5 – Частотно-временная диаграмма сигнала PBM, принятая на УАС в 12:57 UT 03.04.2013 (а) и 04.04.2013 (б). Сигнал приходит на УАС по обратной трассе, длина которой порядка 24000 км.

5.1.3 Измерения на трассе РВМ-Тромсё

Подобная описанной выше система мультиплексорной синхронизации времени была реализована и для двухканального приемного комплекса, установленного в Тромсё (Норвегия). Примеры импульсов РВМ на частоте 9996 кГц, принятых 31.03.2013, приведены на рисунке 5.6. Как видно, за полчаса спектральная морфология сигнала изменяется существенно, однако его групповой путь, порядка 2000 км, остается без изменений.



Рисунок 5.6 – Примеры частотно-временных спектрограмм с синхронизацией времени сигналов PBM, принятых в Тромсё, 31.03.2013 в 18:54 (а), и в 19:24 UT (б).

5.1.4 Измерения на трассе РВМ-Свалбард (Sousy).

Система синхронизация времени была реализована также ДЛЯ приемника, установленного на Свалбарде, на обсерватории Sousy. Ниже приведены характерные частотно-временные спектрограммы сигналов РВМ на частоте 9996 кГц, принятых на Свалбарде 8, 9 и 10 марта 2013 года (Рис. 5.7). Как видно, каждом случае можно разделить В две пространственные моды сигнала: первая, в спектре более узкополосная, приходит несколько раньше (длина группового пути порядка 3000 км), вторая, широкополосная мода, имеет примерно на 1000 км более длинный групповой путь, длина которого составляет порядка 4000 км. Этот сигнал, вероятно, рассеивается плазменными неоднородностями полярного овала.



Рисунок 5.7 – Сигналы станции PBM, принятые на Свалбарде: a) 09.032013 в 15:54, б) 08.03.2013 в 03:51, в) 10.03.2013 в 00:24 UT, г) 10.03.2013 в 03:21.

5.1.5 Выделения вариаций ДСЧ, связанных с распространением АГВ-ПИВ.

Целевой программе разработана методика, В рамках работ по алгоритмы и пакеты прикладных программ по доплероскопии ионосферных возмущений в ВЧ диапазоне. Обеспечено многопозиционный непрерывный мониторинг сигналов станций точного времени и частоты, а также специальных исследовательских передатчиков в Украине (НЧО РИ НАНУ), в Северной Скандинавии м. Тромсё и о. Свалбард (Норвегия), а также на Антарктическом полуострове на станциях «Академик Вернадский» (Украина) И «Палмер» (CIIIA). Продемонстрирована возможность идентификации эффектов возбуждения и распространения атмосферных гравитационных волн И вызванных ИМИ подвижных ионосферных возмущений, разработаны методики воспроизведение пространственновременных характеристик. На рис.1 приведен пример спектрограммы, которая демонстрирует проявление таких волновых неоднородностей в средних широтах на контрольной радиолинии РВМ (Москва) - НЧО (пос. Мартовая, Харьковской области).



Рисунок 5.8 – Спектрограмма сигнала на частоте 9996 кГц на трассе PBM-НЧО в 6: 00-7: 00 UT 09.11.2016 г.

5.2. Картографирование вариаций полного электронного содержания

Исследование неоднородностей ионосферы с использованием ГНСС имеет почти двадцатилетнюю историю. Усилиями отдельных исследователей и международных организаций созданы глобальные и региональные карты полного электронного содержания, доступные в сети Интернет [178]. Эти карты широко используются для исследования ионосферных процессов с периодами от суток до десятка лет. Однако изучение быстрых динамических процессов и плазменных неоднородностей среднего масштаба от десятков до сотен километров требует более детального пространственно-временного разрешения, чем в глобальных картах ПЭС. В ряде стран прилагаются усилия для создания методик построения карт ПЭС с разрешением около 50 километров, которые, однако, пока недостаточно эффективны [177, 179, 180].

пространственной Исследования структуры среднемасштабных неоднородностей ионосферы могут также быть проведены с помощью метода радиотомографии с характерным горизонтальным разрешением в несколько десятков километров [179, 181, 182]. Томография предоставляет большой объем информации, однако верификация полученных результатов проблематична в связи с фрагментарностью таких наблюдений, сложностью и неоднозначностью алгоритмов обработки. Попытки сравнить результаты томографии с распределением электронного содержания, рассчитанным, например, по яркости ночного свечения в ионосфере [182] нельзя считать убедительными. Сами авторы работы [182], и большинство других исследователей, обращаются для апробации томографического воспроизведения к глобальным карт ПЭС [177, 181, 183, 184].

В данном подразделе представлен оригинальный алгоритм диагностики неоднородностей ионосферы на основании карт полного электронного содержания по данным густой сети постоянно действующих приемников ГНСС [22]. При построении алгоритма, прежде всего, были определены требования к величине пространственного разрешения. С одной стороны, она

должна быть технически достижимая, а, с другой принципиально необходимая для диагностики среднемасштабных неоднородностей. ПЭС как интегральный параметр, который определяется вдоль лучевой траектории "спутник-приемник" не может существенно изменяться при смещении траектории на расстояние, значительно меньше, чем длина пути в ионосфере. Эквивалентная толщина ионосферы оценивается величиной порядка 200-300 километров [185], поэтому для двух траекторий, отстоящих друг от друга на расстоянии нескольких десятков километров, можно предположить близость ПЭС.

Приведенные выше качественные соображения были проверены с помощью данных национальных региональных (украинской и польской) сетей перманентных станций ГНСС. На рис. 5.9 показано расположение станций этих сетей. При выборе пары станций на различных расстояниях от единиц до сотен километров были вычислены корреляционные функции вариаций ПЭС для спутников с малыми зенитными углами. Расстояние между лучевыми траекториями в этом случае равно расстоянию между станциями. На рис. 5.10 показаны типичные графики пространственной корреляционной функции И спектры изотропных вариаций ПЭС, характерные ДЛЯ спокойных геофизических условий. Аргументом функции корреляционной является расстояние между лучевыми траекториями.

Из приведенных графиков видно, что разнос траекторий на сто километров уменьшает степень корреляции вариаций ПЭС в два раза, а на расстояниях меньших пятидесяти километров вариации ПЭС практически совпадают. Таким образом, целесообразно принять пятьдесят километров как необходимое пространственное разрешение региональных карт ПЭС.

Традиционно при построении карт ПЭС используется модель ионосферы в виде тонкого фазового экрана. Электронное содержание, вычисляется по данным приемников ГНСС, вдоль луча зрения "спутникприемник", характеризующегося отличными от нуля азимутом и зенитным углом. Для отображения ПЭС в виде географической карты текущие значения проецируются на сферическую поверхность моделирующую ионосферу в виде тонкого слоя [178, 180, 177, 183, 184]. Неоднозначность сферической оболочки выбора радиуса такой является источником координат подионосферных неопределенности точек, относительное положение которых для различных спутников и пунктов наблюдений, меняется в зависимости от выбранной высоты ионосферного слоя. Это приводит к тому, что вид локальной карты, построенной по нескольким спутникам, существенно зависит от выбора высоты слоя [186].



Рисунок 5.9 – Карта национальных сетей станций ГНСС, украинской и польской ASG-EUPOS, а также международных сетей IGS и EPN.



Рисунок 5.10 – Пространственная автокорреляционная функция (слева) и спектр (справа) вариаций ПЭС в региональном масштабе в спокойных геофизических условиях.

Совсем другая ситуация реализуется при использовании В традиционном методе восстановления ПЭС для всех пунктов наблюдения данных одного спутника. Такая методика была предложена исполнителями данного проекта [186]. Взаимное расположение подионосферных точек сохраняется при варьировании высоты слоя, однако изменяется положение центра картины и ее масштаб в зависимости от зенитного угла спутника. Пространственные структуры ионосферных неоднородностей, имеют практически одинаковый вид в диапазоне высот от 100 км до 450 км.

Искажение карт в модели тонкого слоя появляются не только из-за неоднозначности выбора высоты слоя, но и из-за использования упрощенной проектирующей функции – которая необходима для пересчета ПЭС вдоль луча зрения "спутник-приемник" в вертикальный ПЭС [187]. Для коррекции этих искажений алгоритм предполагает отказаться от модели тонкого слоя и оценивать ПЭС только в вертикальном направлении, используя данные со спутников, находящихся вблизи зенита [11]. В этом случае ПЭС измеряется непосредственно над приемниками, а пространственное разрешение определяется расстоянием между ними.

Построение карт происходит без усреднения во времени, поэтому временная разрешающая способность определяется исключительно

интервалом между данными, накапливаемыми в приемниках. В зависимости от сети он варьируется от одной до тридцати секунд. В качестве примера работы алгоритма далее рассмотрены несколько карт вариаций ПЭС, построенных по данным центральноевропейских перманентных станций ГНСС и польской сети ASG-EUPOS [188] (данные польской сети обработаны совместно с коллегами из Военно-Технической Академии, Варшава [189]). проведены для ряда суточных Расчеты были циклов наблюдения. выполненных при разных уровнях геомагнитной активности. На рис. 5.11.а показана карта вариаций ПЭС, полученная для 6:17 UT (здесь и далее используется время UT) в магнитоспокойный день 28 сентября 2015 (K_p = 0). На рис. 5.11.6 это же событие представлено в виде "водопада" (слева) и изображенной в условных цветах последовательности профилей вариаций ПЭС (справа) рассчитанных вдоль 53 параллели с 06:00 до 6:33 UT. Приведенные рисунки могут быть интерпретированы как распространение в ионосфере ПИВ со скоростью около 70 м/с в восточном направлении (вектор скорости изображен на рис. 5.11.а красной стрелкой) в течение более получаса со средним пространственным периодом около 200 км. Оцененные соответствуют теоретическим и экспериментальным параметры ПИВ результатам, доступным в литературе [190, 191].

Анализ карт ПЭС, подобных изображенным на рис. 6.16 позволяет высказать несколько гипотез 0 природе источника ионосферного возмущения. Первая – это генерация ПИВ солнечным терминатором. "терминаторной" генерации ПИВ Возможность широко освещена В литературе в ряде теоретических и экспериментальных работ [55, 190, 191]. В пользу данного предположения свидетельствует близость направления движения ПИВ по отношению к нормали для утреннего терминатора. Другая гипотеза связана с возможностью генерации ПИВ термосферными ветрами.



Рисунок 5.11 – (а) Карта вариаций ПЭС (STEC) над Польшей восстановленная для 28 сентября 2015 г., 06:17 UT. Стрелками изображены вектора скорости ПИВ и термосферного ветра на высоте максимума слоя F₂, оцененного в соответствии с моделью HWM-07; (б) профили вариаций ПЭС вдоль 53 параллели с 06:00 до 6:33 UT 28 сентября 2015 в форме "водопада" (слева) и в виде двумерного распределения в координатах "расстояниевремя" (справа). Жирной линией показан волновой фронт ПИВ

из рис 5.11.а ПИВ Как видно движется против направления термосферного ветра (направление которого на высоте слоя F2 оценивалось в соответствии с моделью HWM-07 [192]). Отметим, что движения волновых возмущений противоположном В направлении, по отношении к термосферному ветру, отмечалось в большом числе экспериментальных работ [193, 194, 195, 196]. Для определения какой из предложенных механизмов генерации ПИВ был преобладающим необходимо проведение дополнительных исследований и получение большего объема данных наблюдений.

На рис 5.12 представлены результаты картографирования ионосферных В неоднородностей, полученные условиях сильных геомагнитных возмущений (K_p = 8). Для этого были проанализированы ионосферные события во время бури в день "Св. Патрика" [197]. Возмущения во время главной фазы бури, с 16 до 18 часов 17 марта 2015 характеризовались значительными вариациями ПЭС, на два порядка большими, чем в спокойные дни. На рис 5.12 приведены профили вариаций ПЭС вдоль 53 параллели в форме "водопада" и в виде двумерного распределения в координатах "расстояние-время" для фрагмента с 16:34 до 16:50 UT. Этот интервал был выбран потому, что в его ходе сохранялась относительная стабильность вида карты. В другие моменты времени главной фазы бури форма вариаций существенно менялась каждые несколько минут.

Зарегистрировано возмущения перемещалось с кажущейся скоростью около 1 200 м/с, что значительно большей скорости звука на ионосферных высотах. Таким образом, эффект скорее всего связан с пространственновременными изменениями потока ионизирующего агента, который создавал избыточную по сравнению со спокойными условиями, концентрацию электронов.

Следует отметить, что рассмотренные выше примеры приведены для демонстрации работоспособности и возможностей применения новой методики ионосферной диагностики. Проведение систематического



Рисунок 5.12 – Профили вариаций ПЭС вдоль 53 параллели с 16:34 до 16:50 UT 17 марта 2015 в форме "водопада" (слева) и в виде двумерного распределения в координатах "расстояние-время" (справа). Скорость перемещения "квазиволновых" возмущений в юго-западном направлении составляла около 1200 м/с

ионосферного мониторинга с ее помощью станет возможной после автоматизации разработанных методик, которую исполнители проекта планирует реализовать в ближайшем будущем.

образом, разработана новая методика картографирования Таким полного электронного содержания ионосферы вариаций по данным региональных сетей ГНСС Ee рутинных измерений приемников. эффективность подтверждена примерами региональных пространственновременных распределений ПЭС, восстановленных для различных уровней геомагнитной возмущенности. Полученные результаты позволили определить динамику поведения, пространственные временные И характеристики волновых возмущений ионосферы, а также возможные источники возмущений.

выводы

При работах по проектам в рамках Целевой комплексной программы НАН Украины по космическим исследованиям на 2012-2017 годы были получены такие основные результаты.

Получил развитие оригинальной подход использования природных электромагнитных резонаторов Земли в роли "индикаторов" состояния космической погоды. В рамках этого подхода установлена реакция шумановского, ионосферного альфвеновского и магнитосферных резонаторов на регулярную и спорадическую активности в полном 11-летнем солнечном цикле. Разработаны простые физические модели, объясняющие механизмы взаимодействия радиационных и корпускулярных потоков солнечной энергии с околоземной плазмой.

Модернизирована глобальная сеть Интернет-управляемых приемных систем УНЧ, СНЧ и ВЧ диапазонов для дистанционной диагностики ионосферы и глобальной грозовой активности. Приемные комплексы, расположенные в Украине, Антарктиде, Арктике и Сибири и работают в непрерывном режиме. Дополнена уникальная многолетняя база данных многопозиционных наблюдений, которая используется для моделирования процессов в околоземном плазменном окружении Земли.

Модернизировано и дополнено аппаратно-программное обеспечение радиофизических сенсоров "Комплекса электромагнитного зондирования окружающего пространства" Низкочастотной обсерватории РИ НАНУ, который стал объектом национального достояния Украины в 2013 году. Обеспечено непрерывное многолетнее функционирование Комплекса в режиме Интернет-доступа, обработки и отображения данных в реальном времени на WEB – сайте отдела Радиофизики геокосмоса РИ НАНУ <<u>http://geospace.com.ua</u>>. НЧО является одним из основных пунктов сети подспутникового мониторинга ионосферы РИ НАНУ.

Обеспечено непрерывное функционирование и проведена существенная модернизация электромагнитной обсерватории на УАС «Академик Вернадский» как одного из пунктов системы подспутникового ионосферного мониторинга.

Разработана и реализована оригинальная методика построения региональных карт вариаций полного электронного содержания по данным "региональных" сетей ГНСС приемников. Использование методики позволило выявлять и наглядно отображать природные возмущения в ионосферных геокосмосе на высотах, такие как перемещающиеся ионосферные возмущения, и исследовать источники их возбуждения: солнечный терминатор, магнитные бури и сопровождающие их высыпания энергичных частиц, процессы в нижних слоях атмосферы.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

2. Колосков А.В., Бару Н.А., Буданов О.В., Безродный В.Г., Гаврилюк Б.Ю., Пазнухов А.В., Ямпольский Ю.М. Диагностика глобальной грозовой активности на основе многолетнего мониторинга сигналов шумановского резонанса на УАС Академик Вернадский / Украинский антарктический журнал. – 2013. - № 12. – С. 170-176.

3. Effects of Energetic Solar Emissions on the Earth–Ionosphere Cavity of Schumann Resonances /G. Satori, E. Williams, C. Price [et al.]// Surv Geophys, Published online: 28 March 2016. – P. 1-33 DOI 10.1007/s10712-016-9369-z.

4. Исследование взаимодействия электромагнитных волн КНЧ–СНЧ диапазона (0.1–200 Гц) с земной корой и ионосферой в поле промышленных линий электропередачи (эксперимент «FENICS») / А.А. Жамалетдинов, А.Н. Шевцов, Е.П. Велихов [и др.]// Геофизические процессы и биосфера. – 2015. – Т. 14, №2. – С. 5-49.

5. Бару Н.А. / Зависимость характеристик ионосферного альфвеновского резонанса от состояния геокосмоса по данным синхронных наблюдений в Антарктике и Евразии / Н.А. Бару, А.В. Колосков, Р.А. Рахматулин // Украинский Антарктический журнал. – 2013. – № 12. – С. 177 – 185.

6. Baru N.A. Observations and analysis of the Ionospheric Alfven resonance mode structure in a complete 11-year solar cycle / N.A. Baru, A.V. Koloskov, Y.M. Yampolsky [et al.] // Sun and Geosphere. – T.16, №1. – 2016, P. 49-54.

Бару Н.А. / Методика оценки критической частоты слоя F2 по разности собственных частот ионосферных альфвеновских резонансов. /
 А.В. Колосков, Ю.М. Ямпольский, А.Ю. Пашинин // Радиофизика и радиоастрономия. – 2014. – Т. 19, № 2, С. 151 – 159.

^{1. 11-}year solar cycle in Schumann resonance data as observed in Antarctica / A.P. Nickolaenko, A.V. Koloskov, M. Hayakawa [et al.] //Sun and Geosphere, – T.15, N_{21} , – 2015, – P. 39-49.

8. Наблюдаемость ионосферных альфвеновских резонансов в Антарктике в полном цикле солнечной активности и «эффект расщепления» / Н.А. Бару, А.В. Колосков, Ю.М. Ямпольский [и др.] // Украинский Антарктический журнал. – 2014. – №13. – С. 124–132.

9. Бару Н.А. / Эффект расщепления модовой структуры ионосферного альвеновского резонатора / Н.А. Бару, А.В. Колосков, Ю.М. Ямпольский // Космічна наука і технологія. – 2015. – Т. 21, № 1. – С. 58 –63.

Galushko V.G. Diurnal variations of the parameters of ionospheric disturbances as derived from TEC measurements over the Antarctic Peninsula/
 V.G. Galushko , A. A. Sopin, Yu. M. Yampolski // Telecommunications and Radio Engineering. – 2014. – V. 73. – P. 353-373, DOI: 10.1615/v73.i4.

 Многопозиционная диагностика среднеширотной ионосферы по данным региональной сети приемников ГНСС / Е.М. Занимонский, Л.Н. Литвиненко, Ю.М. Ямпольский [и др.] // Космічна наука і технологія. – 2015. –Т. 21, № 1. – С. 78-83.

Жалило А.А. Сезонно-суточная изменчивость ионосферных задержек сигналов ГНСС и эффективность их компенсации с использованием сетевого дифференциального метода / А.А. Жалило, Е.А. Бессонов, Е.М. Занимонский // Космічна наука і технологія – 2016 г. – Т.22, № 3. - С. 60–74.

13. Statistics of ionospheric disturbances over the Antarctic Peninsula as derived from TEC measurements / Galushko, V. G., V. V. Paznukhov, A. A. Sopin, and Y. M. Yampolski // Journal of Geophysical Research: Space Physics., Vol. 121, Issue 4, pp. 3395-3409, doi:10.1002/2015JA022302, 2016.

14. Кащеев С.Б. О возможности бистатического ВЧ зондирования ионосферы сигналами точного времени/ С.Б. Кащеев, А.В. Зализовский, А.А. Сопин, И.И. Пикулик // Радиофизика и радиоастрономия. – 2013. – Т.18, №1. – С. 34-42.

Мобильный комплекс для частотно-углового зондирования ионосферы /
 В.Г.Галушко, А.С.Кащеев, С.Б.Кащеев [и др.] // Радиофизика и радиоастрономия. – 2014. – Т. 19, № 2. – С. 142–150.

Сеть Интернет-управляемых ВЧ приемников для ионосферных исследований / А.В. Колосков, Ю.М. Ямпольский, А.В. Зализовский [и др.] // Радиофизика и радиоастрономия. – 2014. – Т. 19, № 4, С. 324 – 335.

Зализовский А.В. Исследования в Антарктике частотно-временных характеристик ВЧ сигналов на сверхдальних радиолиниях / А.В. Зализовский, А.В. Колосков, Ю.М. Ямпольский // Український антарктичний журнал. – 2015. - № 14 – С. 124-137.

Пеленгование ВЧ сигналов, рассеянных ионосферными неоднородностями, с помощью малоразмерных антенн. / В.Г. Галушко, А.В.
 Зализовский, С.Б. Кащеев, [и др.]. // Радиофизика и радиоастрономия. – 2016. – Т.21, №3 – с 231-241.

19. Studies of the ionospheric turbulence excited by the fourth gyroharmonic at HAARP. / A. Najmi, G. Milikh, Y.M. Yampolski [et al.] //J. Geophys. Res. Space Physics. – 2015. – V. 120, T. 8. – C. 6646–6660. doi:10.1002/2015JA021341.

20. Global Circuit Response to the 11-Year Solar Cycle: Changes in Source or in Medium? [Electronic resourse] / E. Williams, A. Guha, R. Boldi [et al.] // XV International Conference on Atmospheric Electricity, 15-20 June 2014; Norman, Oklahoma, U.S.A. -2014. -12 p.

21. Koloskov A.V. / Long-term monitoring of the Schumann resonance signals from Antarctica [Electronic resourse] / A.V. Koloskov, O.V. Budanov, Yu.M. Yampolski // XXXI General Assembly and Scientific Symposium of the International Union of Radio Science Union Radio Scientifique Internationale, August 17-23, 2014 Beijing, China, (CIE). – 4 p., 978-1-4673-5225-3/14/\$31.00 ©2014 IEEE.

22. Measurements of TIDs parameters based on dense national GNSS networks in Central Europe [Electronic resource] / G. Nykiel, M. Figurski, A.V. Koloskov [et

al.] // EUREF 2016 Symposium, Donostia San Sebastian May 25th – 27th. – 2016. – P. 1.

23. Creation of a multi-position system of HF diagnostics of dynamic processes in the polar ionosphere / A.V. Koloskov, Y.M. Yampolsky, C. La Hoz [et al.] // International School-Conference. Remote Radio Sounding Of The Ionosphere. Book of abstracts. Maly Mayak (Big Alushta), Crimea, Ukraine. September, 30 - October, 4. - 2013. - P. 32.

24. Бару Н.А. /. Зависимость характеристик ионосферного альфвеновского резонанса от состояния геокосмоса по данным синхронных наблюдений в Антарктике и Евразии / Н.А. Бару, А.В. Колосков, Р.А. Рахматулин // VI Міжнародна Антарктична Конференція., м. Київ, Україна. – 15-17 травня 2013. – Тези. – С. 238-241.

25. Investigetion of the ionospheric Alfven resonator characteristics using data of observation in Antarctica and Eurasia / N.A. Baru, A.V. Koloskov, Yu.M.Yampolskiy [et al.] // International School-Conference. Remote Radio Sounding Of The Ionosphere. Book of abstracts. Maly Mayak (Big Alushta), Crimea, Ukraine. September, 30 – October, 4, 2013. – P. 32.

26. Наблюдения Ионосферного Альфвеновского Резонанса (ИАР) сетью пространственно-разнесенных магнитометров. Глобальная электрическая цепь / Н.А.Бару, А.В.Колосков, Ю.М.Ямпольский [и др.] // Материалы Всероссийской Конференции. Борок. Россия. – 28 октября – 1 ноября 2013. – С. 118.

27. Многопозиционные исследования ионосферного альфвеновского резонатора / А.В.Колосков, Ю.М.Ямпольский, Р.А.Рахматулин, [и др.] //. XXIV Всероссийская научная конференция "Распространение радиоволн", Иркутск. – 29 июня – 5 июля 2014. – Труды конференции. – Т. II. – С. 255 – 258.

28. Диагностика полярных ионосферных неоднородностей на станции Академик Вернадский с использованием сверхдальних ВЧ радиолиний /

А.В. Зализовский, Ю.М. Ямпольский, С.Б. Кащеев [и др.] // Антарктичні дослідження: нові горизонти та пріоритети: VII Міжнародна антарктична конференція, 12-14 травня 2015 р.: Тези. – Київ. – 2015. – С 118–119. 29. Investigations of HAARP emission on super long radio paths (review) [Electronic resource] / Y. Yampolski, A. Zalizovski, A. Koloskov [et al.] // Bridging the gap between applications and research involving ionospheric and space weather disciplines: 14th International Ionospheric Effects Symposium IES-2015: 12-14 May 2015 CrownePlaza Hotel, Old Town, Alexandria, VA, USA. Proceedings.; review. – Alexandria., 2015. – 8 p.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

30. en.wiktionary.org [электронный pecypc] A multilingual free encyclopedia / Geospace. Режим доступа: <u>https://en.wiktionary.org/wiki/geospace</u> (дата обращения: 15.05.2016).

31. Сергеев В.А Магнитосфера Земли / В.А. Сергеев, Н.А. Цыганенко – М.: Наука, 1980. - 173 с.

32. Казимировский Э.Л. Движения в ионосфере / Э.Л. Казимировский, В.Д. Кокоуров // Новосибирск: Наука, 1979. – 334 с.

33. Связь атмосферной и космической погодных систем / Ю.М. Ямпольский,
А.В. Зализовский, Е.М. Занимонский, [и др.] // Космічна наука і технологія –
2008. – Т. 14, № 5. – С. 6-36.

34. Черногор Л. Ф. Физика и экология катастроф [Монография] / Л.Ф.

Черногор. – Х.: ХНУ имени В.Н. Каразина. - 2012. – 556 с.

35. Харгривс Дж.К. Верхняя атмосфера и солнечно-земные связи (Введение в физику околоземной космической среды) / Дж. К. Харгривс – Ленинград: Гидрометеоиздат. – 1982. – 290 с. 36. Черногор Л. Ф. Физика геокосмических бурь [Монография] / Черногор Л.Ф., Домнин И.Ф. – Х.: ХНУ им. В.Н. Каразина, Институт ионосферы НАН и МОН Украины. – 2014. – 408 с.

37. Kivelson M.G. Coupling of global magnetospheric MHD eigenmodes to field line resonances / M.G. Kivelson, D.J. Southwood // J.Geophys.Res. – 1986. – Vol. 91, P. 4345.

З8. Гульельми А.В. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы /
 А.В. Гульельми, В.А. Троицкая – М.: «Наука». – 1973. – 208 с.

Heikkila W. Earth's Magnetosphere / Heikkila W. – Elsevier Science. –2011. –
 536 p.

40. Cárdenasa F.M. / The grand aurorae borealis seen in Colombia in 1859 / F.M. Cárdenasa, S.C. Sáncheza, S.V. Domínguez // Advances in Space Research 57 (1). – 2016. – P. 257–267. doi:10.1016/j.asr.2015.08.026.

41. Брюнелли Б. Е. Физика ионосферы / Б.Е. Брюнелли, А. А. Намгаладзе – М.: Наука. – 1988. – 528 с.

42. Davies K. Ionospheric Radio / K. Davies – Peter Peregrinus Ltd., London, UK, 1990. – 580 p.

43. Silberstein R. The Current Nomenclature of the Ionospheric Layers /
R. Silberstein – J. Atmos. Terr. Phys. – 1959. – Vol. 13. – P. 382.

44. Gardner F.F. / Study of the ionospheric D-region using partial reflections / F.F. Gardner, J.L. Pawsey // J. Atmos. Terr. Phys. – 1953. – Vol. 3, № 8. – P. 321-324.

45. Little C.G. / The Riometer A Device for the Continuous Measurements of Ionospheric Absorption / C.G. Little, H. Leinbach // Proc. IRE. – 1959. – № 47. – P. 315.

46. Беликович В.В. / Исследование нижней части D области ионосферы с помощью искусственных периодических неоднородностей/ В.В. Беликович, Е.А. Бенедиктов // Изв. вузов. Радиофизика. – 1986. – Т. 29, № 11. – С. 1283 – 1296.

47. Kennelly A.E. On Elevation of Electrically Conducting Strata of the Earth's Atmosphere / A.E. Kennelly // Electr. World and Eng. – 1902. – № 15, – P. 473.
48. Heaviside O. / Telegrahpy / O. Heaviside // Enciclopedia Britannica, 10th ed. – 1902. – № 33 – P. 215.

49. Акасофу С.И. Солнечно-земная физика / С.И. Акасофу, С. Чепмен – Ч.1. –
М.: Мир. – 1974. – 382 с.

50. Акасофу С.И. Солнечно-земная физика / С.И. Акасофу, С. Чепмен – Ч.2. – М.: Мир. – 1975. – 504 с.

51. Гершман Б.Н. Динамика ионосферной плазмы / Б.Н. Гершман – М.: Наука. – 1974. – 256 с.

52. Кореньков Ю.Н. Влияние движений в нейтральной атмосфере на сезонносуточное поведение слоя E_s ./ Ю.Н. Кореньков // Геомагнетизм и Аэрономия. – 1979. – Т. 19, № 1. – С. 27 – 33.

53. Зализовский А.В. Роль тропосферных процессов в формировании спорадических слоев Е-области ионосферы над Антарктическим полуостровом / А.В. Зализовский // Радиофизика и радиоастрономия. – 2008. – Т. 13, № 1. – С. 26-39.

54. Kohl H. Atmospheric winds between 100 and 700 km and their effects on the ionosphere / H. Kohl, J.W. King // J. Atmos. Terr. Phys. – 1967. – V.29. – P. 1045 – 1062.

55. Сомсиков В.М. Солнечный терминатор и динамика атмосферы. /
В.М. Сомсиков // Алма-Ата: Наука Каз. ССР. – 1983. – 192 с.

56. Holton J.R. An Introduction to Dynamic Meteorology. 5th edition, Elsevier / J.R. Holton, G.J. Hakim. – 2013. – 532 p.

57. Francis S.H. / Global propagation of atmospheric gravity waves: a review / S.H. Francis // Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. – 1975. – Vol. 37. – P. 1011-1054.

58. Beley V.S. / Traveling ionospheric disturbance diagnostics using HF signal trajectory parameter variations / V.S. Beley, V.G. Galushko, Y.M. Yampolski // Radio Sci. – 1995. – Vol.30, №6. – P.1739-1752.

59. Гуревич А.В. Нелинейная теория распространения радиоволн в ионосфере / А.В. Гуревич, Б.А. Шварцбург // Москва: Наука. – 1973. – 272 с.

60. Bauer P. / Theory of waves incoherently scattered / P. Bauer // Phil. Trans. Roy. Soc. London. F. – 1975. – Vol. 280. – P. 167–191.

61. Studies of the ionosphere and neutral atmosphere using artificial periodic inhomogeneities in the ionospheric plasma / N.V. Bakhmet'eva, V.V. Belikovich, E.A. Benediktov [et al.] // Radio Sci. – 1998. – Vol. 33. № 3. – P. 583–595.

62. Атмосфера. Справочник (справочные данные, модели) / [Ред. коллегия:
Ю.С. Седунов, С.И. Авдюшин, Е.П. Борисенков [и др.] – Ленинград:
Гидрометеоиздат. – 1991. – 509 с.

63. Блиох П.В. Глобальные электромагнитные резонансы в полости Земля – ионосфера / П.В. Блиох, А.П. Николаенко, Ю.Ф. Филиппов // Киев: Наукова Думка. – 1977. – 199 с.

64. Nickolaenko A.P. Resonances in the Earth-ionosphere Cavity / Nickolaenko A.P., M. Hayakawa // Kluwer Academic Publishers, Dordrecht – 2002.

65. Nickolaenko A.P. / Schumann resonance for tyros: Essentials of global electromagnetic resonance in the Earth–ionosphere cavity / A.P. Nickolaenko, M. Hayakawa // Springer Geophysics Series XI. – 2014. – P. 348.

66. Belyaev P.P. / First evidence at high latitude for the ionospheric Alfven resonator / P.P. Belyaev, T. Bosinger, S.V. Isaev, J. Kangas // J.Geophys.Res. – 1999. – Vol. 104, P. 4305.

67. Surkov V. Ultra and Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields / V.Surkov, Hayakawa M. // Springer Geophysics. – 2014. – 486 p. doi:10.1007/978-4-431-54367-1.

68. Pfaff R.F. Measurement Techniques in Space Plasmas / R.F. Pfaff,
J.E. Borovsky, D.T. Young // AGU. – 1998. – P. 355.

69. The Large Angle Spectroscopic Coronagraph (LASCO). / G.E. Brueckner,
R.A. Howard, M.J. Koomen // Solar Physicas. – 1995. – V. 162, n. 1. – P 357-402.
70. The NOAA Goes-12 Solar X-Ray Imager (SXI) 1. Instrument, Operations, and
Data. / S.M. Hill, V.J. Pizzo, C.C. Balch [et. al] //. Solar Physicas. – 1995. –
V. 226, n. 2. – P 255-281.

71. The future of NPOESS: results of the NUNN–MCCURDY review of NOAA's weather satellite program / Committee on Science House of Representatives, one hundred ninth congress. Second session. – June 8, 2006. – Serial . № 109–53, 86 p. 72. National Environmental Satellite Data and Information Service News Release, "The National Polar-orbiting Operational Satellite System (NPOESS)," Public Affairs, 6 January 1999, p. 1

73. The Optical Transient Detector (OTD) / H.J. Christian, K.T. Driscoll,
S.J. Goodman [et. al] // Proceedings of the 10th International Conference on
Atmospheric Electricity. Osaka, Japan, June 10-14. 1996; Osaka. – 1996. – P. 368371.

74. The Lightning Imaging Sensor / H.J. Christian, R.J. Blakeslee, S.J. Goodman [et. al] // Proceedings of the 11th International Conference on Atmospheric Electricity. Guntersville, Alabama. June 7 – 11, 1999; Alabama. – 1999. – P. 746–749.

75. Love J.J / An International Network of Magnetic Observatories/ J.J. Love,
A. Chulliat // Eos Trans. AGU. – 2013. – V. 94, № 42. – P. 373-384.

76. Bibl K. / The Universal Digital Ionosonde / K. Bibl , B.W. Reinisch // Radio Science. – 1978. – Vol. 13, № 3. – P. 519 – 530.

77. Reinisch B.W. / Global Ionospheric Radio Observatory (GIRO) /
B.W. Reinisch, I.A. Galkin // Earth Planets Space. – 2011, Vol. 63. – P. 377–381.

78. Эванс Дж.В. / Теоретические и практические вопросы исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн / Дж.В. Эванс // ТИИЭР. – 1969. – Т.57, №4. – С. 139-175.

79. Farley D.T. / Incogerent Scatter Radar Probing. p. 415-439// in book. H. Kohl,
R. Ruster, K. Schlegel // Modern Ionospheric Science. – 1996. European Geophysical Society, Katlenburg-Lindau, FRG. – P. 551 – 568.
80. Дзюбанов Д. А./ Исследование и моделирование вариаций параметров ионосферной плазмы в период минимума 23-го цикла солнечной активности / Д.А. Дзюбанов, М.В. Ляшенко, Л.Ф. Черногор // Космічна наука і технологія.

- 2008. - T. 14, № 1. - C. 44 - 56.

81. A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content

measurements / A.J. Mannucci, B.D. Wilson, D.N. Yuan [et. al] // Radio Sci. – 1998. –Vol.33. – P. 565 – 582.

82. Monitoring ionospheric space weather with the Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN) / J.B.H. Baker, J.M. Ruohoniemi, A.J. Ribeiro [et. al] // Proceedings of the 2010 IEEE Radar Conference. – 2010. – P. 1414 – 1417 ISBN 978-1-4244-5811-0, ISSN 1097-5659.

83. Электромагнитное окружение Земли в СНЧ-диапазоне / В.Г. Безродный,
О.В. Буданов, Колосков А.В. [и др.] // Космічна наука та технологія. – 2003. –
Т. 9, № 5/6. – С. 117-123.

84. Calibration errors on experimental slant total electron content determined with GPS / L. Ciraolo, F. Azpilicueta, C. Brunini [et. al] // Journal of Geodesy. – 2007.
– Vol. 81. – P. 111-120. doi: 10.1007/s00190-006-0093-1.

85. Вариации СДВ радиосигналов при восходе солнца в Антарктиде /
Р.С. Шубова, В.Г. Безродный, А.В. Колосков [и др.] // Радиофизика и
Радиоастрономия. – 2000. – Т. 5, № 4. – С. 337-347.

86. Двухпозиционное КВ рассеяние взволнованной морской поверхностью. Часть 2, эксперимент / А.С. Кащеев, С.Б. Кащеев, А.В. Колосков [и др.] // Радиофизика и Радиоастрономия. – 2003. – Т. 8, № 3. – С. 242-252.

87. Радиозондирование морской поверхности в ходе 7-ой украинской антарктической экспедиции / А.С. Кащеев, С.Б. Кащеев, А.В. Колосков [и др.] // Украинский Антарктический журнал. – 2003. – № 1. – С. 37-46.

88. Bistatic HF diagnostics of TIDs over the Antarctic Peninsula / V.G. Galushko, A.S. Kashcheyev, S.B. Kashcheyev [et al.] // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. $-2007. - N_{\odot} 69. - P. 403-410.$

89. Приемно-измерительный комплекс СНЧ диапазона с УКВ ретранслятором / В.Е. Пазнухов, О.В. Буданов, А.Г. Рохман // Радиофизика и радиоастрономия. – 2010. – Т. 15, № 1. – С. 31 – 41.

90. Study of Interaction of ELF–ULF Range (0.1–200 Hz) Electromagnetic Waves with the Earth's Crust and the Ionosphere in the Field of Industrial Power Transmission Lines (FENICS Experiment) / A.A. Zhamaletdinov, A.N. Shevtsov, E.P. Velikhov [et al.] // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. – 2015. – Vol. 51, No. 8, P. 826–857. – ISSN 0001-4338.

91. Bennett J.A. / Doppler shift formulas for waves in the ionosphere / J.A. Bennett // Radio Science. – 1976. – Vol. 11, № 7. - P. 621-627.

92. Афраймович Э.Л. Интерференционные методы радиозондирования ионосферы / Э.Л. Афраймович // М.: Наука. – 1982. – 198 с.

93. Экспериментальные исследования спектральных характеристик КВ сигналов на дальних и сверхдальних трассах / С.Б. Кащеев, А.В. Колосков, А.В. Зализовский [и др.] // Радиофизика и Радиоастрономия. – 2009. – Т. 14, № 1. – С. 12-25.

94. Beley V.S. / Traveling ionospheric disturbances diagnostics using HF signal trajectory parameter variations / V.S. Beley, V.G. Galushko, Yu.M. Yampolski // Radio Science. – 1995. - V. 30, № 6. - P. 1739-1752.

95. Доплеровская селекция КВ-радиосигналов на сверхдальних трассах. / А.В. Зализовский, В.Г. Галушко, А.С. Кащеев [и др.] // Геомагнетизм и аэрономия. – 2007. – Т. 47, № 5. – С. 674-684.

96. Вариации частоты КВ сигналов на протяженных трассах во время солнечного затмения / А.В. Зализовский, А.В. Колосков, В.Г. Галушко [и др.] // Радиофизика и радиоастрономия. – 2009. – Т. 14, № 4. – С. 353-366.

97. Non-linear interaction between Schumann resonances and HF Signals / Y.M. Yampolski, P.V. Bliokh, V.S. Beley [et. al] // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 1997. - V. 59, №. 3. - P. 335-342.

98. Bistatic HF radar diagnostics induced field-aligned irregularities /
Yu.M. Yampolski, V.S. Beley, A.V. Koloskov [et. al] // Journal of Geophysical Research. – 1997. - V. 102, № A4. - P. 7461-7467.

99. HF radar observations of decaying artificial field-aligned irregularities / D.L. Hysell, M.C. Kelley, Y.M. Yampolski [et. al] // Journal of Geophysical Research. – 1996. - V. 101, № A12. - P. 26981-26993.

100. Self-scattering of a powerful HF radio wave on stimulated ionospheric turbulence / A.V. Zalizovski, S.B. Kashcheyev, Y.M. Yampolski, [et al.] // Radio Science. – 2009. – Vol. 44, RS3010, doi:10.1029/2008RS00411.

101. Спектральные особенности КВ сигнала нагревного стенда EISCAT в Европе и Антарктике / А.В. Зализовский, В.Г. Галушко, С.Б. Кащеев [и др.] // Радиофизика и радио-астрономия. – 2004. - Т. 9, № 3. – С. 261-273.

102. Галушко В.Г. / Измерительный комплекс для исследования флуктуаций КВ радиосигналов. Препр./ В.Г.Галушко, Л.М.Рабинович, Ю.М.Ямпольский / ИРЭ АН УССР. – 1981. № 182. – Харьков. – 16 с.

103. Дистанционное КВ рассеяние взволнованной морской поверхностью Часть 2, эксперимент / А.С. Кащеев, С.Б. Кащеев, А.В. Колосков [и др.] // Радиофизика и Радиоастрономия. – 2003. - Т. 8, № 3. - С. 242-252.

104. Приемный комплекс для частотно-углового зондирования ионосферных возмущений в Антарктиде/ И.И. Пикулик, С.Б. Кащеев, В.Г. Галушко // Украинский Антарктический журнал. – 2003. № 1. - С. 61-69.

105. Bible K. / Universal digital ionosonde / K. Bible , B.W. Reinisch // Radio Science. – 1978. V. 13, № 3. - P. 519-530.

106. Колосков А.В., Синицын В.Г., Герасимова Н.Н., Ямпольский Ю.М. Околоземные резонаторы СНЧ-волн как индикаторы космической погоды. / Космічна наука і технологія. - 2008. - Т. 14, №5, - С. 49-64.

107. Sinitsin V.G., Yampolski Yu.M., Zalizovski A.V., Grovs K., Moldwin M.
Spatial field structure and polarization of geomagnetic pulsations in conjugate areas / Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. - 2003. – V. 65, N.
10. – P. 1161-1167.

108. FitzGerald G. F. / On the period of vibration of electrical disturbances upon the Earth / G.F. FitzGerald // Br. Assoc. Adv. Sci. – 1893. – Rep. 63. – 682 p.

109. Tesla N. / The transmission of electrical energy without wires as a means of furthering world peace. / N. Tesla // Electrical World and Engineer, January 7. – 1905. – P. 21–24.

110. Tesla N. / U.S. Patent No. 787, 412 (April 18, 1905).

111. Jackson J. D. / Examples of the zeroth theorem of the history of science /
J.D. Jackson // American Journal of Physics. – 2008. –V. 76, N. 8. – P. 704 – 719.
112. Schumann W.O. / Über die strahlungslosen Eigenschwingungen einer

leitenden Kugel, die von einer Luftschicht und einer Ionosphärenhülle umgeben ist / W.O. Schumann // Zeitschrift und Naturfirschung 7a. – 1952. – P. 149 – 154.

113. Balser M. / Measurement of the spectrum of radio noise from 50 to 100 c/s. /
M. Balser, C. Wagner // Journal of Research of the National Bureau of Standards
64D. – 1960. – P. 415–418 doi:10.6028/jres.064d.050.

114. Jones D.L. / Sending signals to submarines / D.L. Jones // New Scientist.
1985. - V. 26. - P. 37-41.

115. Fraser-Smith A.C./ Reception of ELF signals at antipodal distances/ A.C. Fraser-Smith // Radio Science. -1998. - V. 33, No 1. - P. 83 - 88.

116. Greifinger C. / Approximate method for determining ELF eigen-values in the Earth-ionosphere waveguide/ C. Greifinger , P. Greifinger // Radio Sci. 1978. – Vol. 13. – P. 831–837.

117. Christian H.J./ (2003), Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector/ H.J. Christian // J. Geophys. Res. –2003. – 108(D1), P.4005. doi:10.1029/2002JD002347.

118. О возможности выбора модели мировой грозовой активности по наблюдениям шумановского резонанса / В.Н. Бормотов, Б.В. Лазебный, А.П. Николаенко [и др.] // Геомагнетизм и аэрономия. – 1972. – Т. 12, № 1. – С. 135–136.

119. Parameters of global thunderstorm activity deduced from the long-term Schumann resonance records / A.P. Nickolaenko , G. Sátori, V. Ziegler [et al.] // J. Atmos. Solar-Terr. Phys.. –1998. – Vol. 60(3). – P. 387-399.

120. Sátori G./ On the dynamics of the North – South seasonal migration of global lightning / G. Sátori, E.R. Williams, D.J. Boccippio // AGU Fall Meeting, San Francisco, December 8-12, abstract no.: AE32A-0167. – 2003.

121. The effect of a gamma ray flare on Schumann resonances / A.P. Nickolaenko,
I.G. Kudintseva, O. Pechony [et. al] // Ann. Geophys.. – 2012. – Vol. 30. –
P.1321-1329 doi:10.5194/angeo-30-1321-2012.

122. Nickolaenko A.P./ Model variations of Schumann resonance based on Optical Transient Detector maps of global lightning activity / A.P. Nickolaenko,
O. Pechony, C. Price // J. Geophys. Res.. – 2006. –Vol. 111. –D23102. doi:10.1029/2005JD006844.

123. Pechony O./ Modeling and simulations of Schumann resonance parameters observed at the Mitzpe Ramon field station (Study of the day-night asymmetry influence on Schumann resonance amplitude records)/ O. Pechony // Ph.D. thesis, Tel-Aviv University, Israel. –2007. – P. 92.

124. Sentman D.D. / Simultaneous observation of Schumann resonances in California and Australia: evidence for intensity modulation by local height of D region/ D.D. Sentman, B.J. Fraser // J. Geophys. Res.. – 1991. – Vol. 96(9). – P. 15973 – 15984.

125. Pechony O./ Relative importance of the day-night asymmetry in Schumann resonance amplitude records/ O. Pechony, C. Price, A.P. Nickolaenko // Radio Sci.. – 2007. – Vol. 42. – RS2S06. doi:10.10212/2006RS003456.

126. Bezrodny V.G./ Magnetic polarization of the Schumann resonances: An asymptotic theory / V.G. Bezrodny // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2007. – Vol. 69, № 9. – P. 995-1008. doi: 10.1016/j.jastp.2007.03.007.

127. Williams E.R. / Distinguishing ionospheric models using Schumann resonance spectra / E.R. Williams, V.C. Mushtak, A.P. Nickolaenko // Journal of Geophysical Research. – 2006. – Vol. 111. – D16107. doi:10.1029/2005JD006944.
128. Universal and local time variations deduced from simultaneous Schumann

resonance records at three widely separated observatories / A.P. Nickolaenko, E.I, Yatsevich, A.V. Shvets [et. al] // Radio Sci.. – 2011. – Vol. 46. – Williams E.R., Mushtak V.C., Nickolaenko A.P.: RS5003. doi:10.1029/2011RS004663.

129. Shvets A.V. / Global lightning activity on the basis of inversions of natural ELF electromagnetic data observed at multiple stations around the world / A.V. Shvets, M. Hayakawa // Survey Geophys.. – 2011. –Vol. 32(6). – P. 705-732. doi:10.1007/s10712-011-9135-1.

130. Schlegel K. /Schumann resonance parameter changes during high-energy particle precipitation / K. Schlegel, M. Füllekrug // J. Geophys. Res.. –1999. – Vol. 104. – P. 10111-10118.

131. Nickolaenko A.P. / Polar non-uniformity of ionosphere related to solar proton events/ A.P. Nickolaenko, L.M. Rabinowicz, A.V. Shvets // Telecommun Radio Eng.. – 2008. – Vol. 67(5). P. 413–435.
132. Schumann resonance frequency increase during solar X-ray bursts. /
V.C. Roldugin, Y.P. Maltsev, A.N. Vasiljev [et. al] // J. Geophys. Res.. –2004.
Vol. 109. – A01216. doi: 743 10.1029/2003JA010019.

133. Sátori G. / Response of the Earth – ionosphere cavity resonator to the 11-year solar cycle in X-radiation/ G. Sátori, E.R. Williams, V. Mushtak // J. Atmos. Solar-Terr. Phys.. –2005. – Vol. 67. – P. 553-561. doi:10.1016/j.jastp.2004.12.006.

134. Williams E.R. / The Schumann resonance: A global tropical thermometer /
E.R. Williams // Science. – 1992. – Vol. 256. –P. 1184-1187.

135. Climate sensitivity: Analysis of feedback mechanisms/ J. Hansen, A. Lacis,
D. Rind [et. al] // In J. E. Hansen and T. Takahashi, eds. Climate Processes and
Climate Sensitivity. – 1984. – AGU Geophysical Monograph Series 29. – P. 130–
163. doi:10.1029/gm029p0130.

136. Price C. / Evidence for a link between global lightning activity and upper tropospheric water vapor / C. Price // Nature. – 2000. – Vol. 406 (6793). – P. 290–293. doi:10.1038/35018543.

137. Ogawa T. / Observations of natural ELF and VLF electromagnetic noises by using ball antennas / T. Ogawa, Y. Tanaka, T. Miura [et al.] // J Geomagn Geoelectr. – 1966. – Vol. 18. – P. 443–454.

138. Füllecrug M. / Global triangulation of intense lightning discharges /
M. Füllecrug, S. Constable //Geophys. Res. Lett. – 2000. – Vol. 27. – P. 333-336.

139. Validation of sprite-inducing cloud-to-ground lightning based on ELF observations at Syowa station in Antarctica/ M. Sato, H. Fukunishi, M. Kikuchi [et. al] // Atmos. Solar-Terr. Phys. – 2003. – Vol. – 65. – P. 607-614.

140. Global distribution of intense lightning discharges and their seasonal variations / M. Sato, Y. Takahashi, A. Yoshida [et al.] // J. Phys. D: Appl. Phys. 41. – 2008. –Vol. 234011. – P.10. doi:10.1088/0022-3727/41/23/234011.

141. Безродный В.Г./ Асимптотическая теория полей шумановских резонансов в гиротропной полости Земля-ионосфера/ В.Г. Безродный // Радиофизика и Радиоастрономия. – 2004. – Вып. 9, № 4. – С. 375 – 390.

142. The ionospheric Alfvén resonator / P.P. Belyaev, S.V. Polyakov,
V.O. Rapoport [et al.] // J Atmos Terr Phys. – 1990. – Vol. 52. – P. 781–787.

143. Поляков С.В. / О свойствах ионосферного альвеновского резонатора. —
/ С.В. Поляков // Симпозиум КАПГ по солнечно-земной физике.: Тезисы докладов. Часть III. — М.: Наука. – 1976. – С. 72-73.

144. Поляков С.В. / Ионосферный альвеновский резонатор / С.В. Поляков,
В.О. Рапопорт // Геомагнетизм и аэрономия. – 1981. – Т. 21. № 5. – С. 816 – 822.

145. Lysak R.L. / Feedback instability of the ionospheric resonator cavity / R.L. Lysak // J Geophys Res. –1991. –Vol. 96. –P. 1553–1568.

146. Trakhtengertz V.Y. / Turbulent Alfvén boundary layer in the polar ionosphere, 1, excitation conditions and energetic/ V.Y. Trakhtengertz, A.Y. Feldstein // J Geophys Res. – 1991. – Vol. 96. – P. 19,363–19,374.

147. Hickey K. / Ground-based observations of ionospheric Alfvén resonator bands / K. Hickey, D.D. Sentman, M.J. Heavner // EOS Trans AGU 77(46, Fall Meeting Supplementary). – 1996. – F 92.

148. Spectral properties of the ionospheric Alfvén resonator observed at a lowlatitude station (L D 1:3) / T. Bösinger, C. Haldoupis, P.P. Belyaev [et. al] // J Geophys Res. – 2002. – Vol. 107. – P. 1281. doi:10.1029/2001JA005076.

149. Ionospheric Alfvén resonance at middle latitudes: results of observations at Kamchatka / O.A. Molchanov, A.Y. Schekotov, E.N. Fedorov [et al.] // Phys Chem Earth Parts A/B/C. – 2004. – Vol. 29. – P. 649–655.

150. Hebden S.R. / Quantitative analysis of the diurnal evolution of ionospheric Alfvén resonator magnetic resonance features and calculation of changing IAR parameters./ S.R. Hebden, T.R. Robinson, D.M. Wright [et. al] // Ann Geophys. – Vol. 23. – P. 1711–172.

151. Morphology of the spectral resonance structure of the electromagnetic background noise in the range of 0:1 4 Hz at L D 5:2 / A.G.Yahnin,

N.V.Semenova, A.A. Ostapenko [et. al] // Ann Geophys. – 2003. – Vol. 21. –779– 786.

152. Semenova N.V. / Diurnal behavior of the ionospheric Alfvén resonator signatures as observed at high latitude observatory Barentsburg / N.V. Semenova, A.G. Yahnin // Ann Geophys. – 2008. – Vol. 26. – P. 2245–2251.

153. Grzesiak M. / Ionospheric Alfvén resonator as seen by Freja satellite / M. Grzesiak // Geophys Res Lett. –2000. – Vol. 27. – P. 923–926.

154. Fast observations of the inertial Alfvén waves in the dayside aurora / C.C. Chaston, C.W. Carlson, W.J. Peria [et. al] // Geophys Res Lett. – 1999. – Vol. 26. – P. 647–650.

155. Properties of small-scale Alfvén waves and accelerated electrons from FAST / C.C. Chaston, J.W. Bonnell, C.W. Carlson [et. al] // J Geophys Res. –2003. – Vol. 108. –P.8003. doi:10.1029/2002JA009420.

156. Electric field signatures of the IAR and Schumann resonance in the upper ionosphere detected by Chibis-M microsatellite / D. Dudkin, V. Pilipenko, V. Korepanov [et. al] // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2014. – Vol 117. – P. 81–87

157. Excitation of the ionospheric resonance cavity by neutral winds at middle latitudes / V.V. Surkov, O.A. Pokhotelov, M. Parrot [et. al] // Ann Geophysicae. – 2004. – Vol. 22. – P. 2877–2889.

158. Sukhorukov A.I./ Excitation of the ionospheric Alfven resonator by strong lightning discharges/ A.I. Sukhorukov, P. Stubbe // Geophys Res Lett. – 1997. – Vol. 24. – P. 829–832.

159. Demekhov A.G. / Pc 1 waves and ionospheric Alfven resonator: generation or filtration? / A.G. Demekhov, V.Y. Trakhtengertz, T. Bösinger // Geophys Res Lett. –2000. – Vol. 27(23). – P. 3805–3808.

160. An energy source for the mid-latitude IAR: world thunderstorm centers, nearby discharges or neutral wind fluctuations? / E. Fedorov, A.Yu. Schekotov, O.A. Molchanov [et. al] // Phys Chem Earth. – 2006. – Vol. 31. – P. 462–468.

161. Ionospheric Alfvén resonator excitation due to nearby thunderstorms /
V.V. Surkov, M. Hayakawa, A.Y. Schekotov [et. al] // J Geophys Res. – 2006. –
Vol. 111. – A01303. doi:10.1029/2005JA011320.

162. Demekhov A.G./ Coupling at the atmosphere–ionosphere–magnetosphere interface and resonant phenomena in the ULF range / A.G. Demekhov // Space Sci. –2000. Rev. doi:10.1007/s11214-011-9832-6.

163. ULF impulsive magnetic response at mid-latitudes to lightning activity / A.Yu. Schekotov, V. Pilipenko, K. Shiokawa [et al.] // Earth Planets Space. –
2011. – Vol. 63. – P.1–10.

164. Поляризационные характеристики низкочастотных резонансов в полости Земля–ионосфера / А.П. Николаенко, Л.М. Рабинович, А.В. Швец [и др.] // Изв. Вузов, Радиофизика. – 2004. – XLVII. – 4. – С. 267-291.

165. Экспериментальные исследования резонансной структуры спектра атмосферного электромагнитного шумового фона в диапазоне короткопериодных геомагнитных пульсаций / П.П. Беляев, С.В. Поляков, В.О. Рапопорт [и др.] // Известия высших учебных заведений. – 1989. – Т. 32, №6. - С. 663 –672.

166. Леонович А.С. / Динамика мелкомасштабных альфвеновских волн в магнитосферном резонаторе / А.С. Леонович, В.А. Мазур // Физика плазмы. – 1987. – Т.13, Вып.7. – Р. 800 – 810.

167. Исследования МГД-колебаний внутренней магнитосферы Земли в космическом проекте РЕЗОНАНС / О.К. Черемных, Ю.М. Ямпольский, А.В. Агапитов [и др.] // Космічна наука і технологія. – 2013. – Т. 19, № 2. – С. 5–42.

168. Modelling the diurnal evolution of the resonance spectral structure of the atmospheric noise background in the Pc 1 frequency range / A.G. Demekhov, P.P. Belyaev, S.V. Isaev [et. al] // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2000. – Vol. 62. – P. 257-265.

169. Jayachandran B. /Climatology of ionospheric slab thickness /
B. Jayachandran, T.N. Krishnankutty, T.L. Gulyaeva // Annales Geophysicae. –
2004. – Vol. 22. – P. 25 – 33.

170. Безродный В.Г., Буданов О.В., Колосков А.В., Ямпольский Ю.М. Электромагнитное окружение Земли в СНЧ-диапазоне / Космічна наука та технологія. - 2003. Т. 9, № 5/6. С. 117-123.

171. Колосков А.В., Безродный В.Г., Буданов О.В., Пазнухов В.Е.,

Ямпольский Ю.М. Поляризационный мониторинг шумановских резонансов в Антарктике и восстановление характеристик мировой грозовой активности / Радиофизика и радиоастрономия. - 2005. Т. 10, № 1. С.11–29.

172. Nickolaenko A.P., Koloskov A.V., Hayakawa M., Yampolski Yu.M.,

Budanov O.V., Korepanov V.E. 11-year solar cycle in Schumann resonance data as observed in Antarctica / Sun and Geosphere, - 2015, V.15, N 1, - 2015, p.39-49.

173. Колосков А.В., Ямпольский Ю.М. Наблюдения излучения энергосистем Североамериканского континента в Антарктике / Радиофизика и

радиоастрономия. - 2009. Т. 14, № 4. – С. 367-376.

174. Колосков А.В., Буданов О.В., Безродный В.Г., Ямпольский Ю.М.

Определение местоположений сверхмощных молниевых разрядов на основе поляризационных магнитных измерений в диапазоне шумановских

резонансов / Радиофизика и Радиоастрономия. - 2004. Т. 10, № 4. С. 391-403.

175. Bezrodny V., Budanov O., Koloskov A., Hayakawa M., Sinitsin V.,

Yampolski Y., Korepanov V. The ELF Band as a Possible Spectral Window for Seismo-Ionospheric Diagnostics / Sun and Geosphere. - 2007. V. 2, N 2. P. 34-39.

176. Williams E., Guha A., Boldi R., Satori G., Markson R., Koloskov A., Yampolski Y. Global Circuit Response to the 11-Year Solar Cycle: Changes in Source or in Medium? / XV International Conference on Atmospheric Electricity, Norman, Oklahoma, U.S.A, 15-20 June 2014, 12 p. 177. Validation of approximation techniques for local TEC mapping / A. Krypiak,
P. Gregorzcyk, D. Wielgosz, [et. al] // Acta Geodyn. Geomater. – 2013. – Vol. 10,
№. 3 (171). – P. 275-283.

178. The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998
/ M. Hernández-Pajares, J.M. Juan, J. Sanz [et. al] // Journal of Geodesy. – 2009. –
Vol. 83. –P. 263-275. doi: 10.1007/s00190-008-0266-1.

179. A GPS based three-dimensional ionospheric imaging tool: Process and assessment / C. Stoll, S. Schluter, S. Heise [et. al] // Adv. Space Res. – 2006. – Vol. 38, Is. 11. – P.2313-2317.

180. Жалило А.А./ Повышение точности дифференциального одночастотного ГНСС позиционирования путём сетевой коррекции ионосферных погрешностей / А.А. Жалило, Е.А. Бессонов // Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник «Радиотехника». – 2012. – №169. – С. 302-314.

181. Спутниковое радиозондирование и радиотомография ионосферы /
В.Е. Куницын, Е.Д. Терещенко, Е.С. Андреева [и др.] // УФН. – 2010 – Vol.
180, Is. 5. – С. 548-553.

182. Исследование высокоширотной ионосферы по данным УФспектрометрии, глобальным ионосферным картам GIM и высокоорбитальной радиотомографии / Е.С. Андреева, С.А. Калашникова, В.Е. Куницын [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2013. – Т. 10, № 1. – С. 103-111.

183. Near real-time ionospheric monitoring over Europe at the Royal Observatory of Belgium using GNSS data / N. Bergeot, J-M. Chevalier, C. Bruyninx [et al.] // J. Space Weather Space Clim. –2014. –Vol. 4. – A31. http://dx.doi.org/10.1051/swsc/2014028.

184. Regional Ionosphere Modeling Using Smoothed Pseudoranges / P. Wielgosz,I. Kashani, D. Grejner-Brzezinska [et. al] // 5th International Antarctic Geodesy

Symposium (AGS'03), Lviv, Ukraine, 15-17 Sept. 2003: SCAR Report– Cambridge, UK. – 2005. – № 23. – P. 37 - 41.

185. Fox M.W. / Ionospheric equivalent slab thickness and its modeling applications / M.W. Fox, M. Mendillo, J.A. Klobuchar // Radio Sci. – 1991. – Vol. 26. –P. 429 – 438.

186. Возможности и проблемы использования локальных ионосферных карт по данным ГНСС / Е.М. Занимонский, А.И. Горб, В.Н. Лисаченко [et. al] // 5-й Международный радиоэлектронный форум МРФ-2014. Сборник научных трудов: материалы форума в 4-х томах. – 2014. Т. 1. – Харьков: АНПРЭ, ХНУРЭ. – С. 199-201.

187. A comprehensive evaluation of the errors inherent in the use of a two-dimensional shell for modeling the ionosphere / D.A. Smith, E.A. Araujo-Pradere, C. Minter [et. al] // Radio Sci. –2008. –Vol. 43, RS6008. doi:10.1029/2007RS003769.

188. ASG-EUPOS densification of EUREF permanent network on the territory of Polan / J. Bosy, A. Oruba, W. Graszka [et. al] // Reports on Geodesy. – 2008. – Vol. 2, №. 85. – P. 105 – 112.

189. Zanimonskiy Y.M. / Modeling of TEC Variations Based on Signals from Near Zenith GNSS Satellite Observed by Dense Regional Network / Y.M. Zanimonskiy, G. Nykiel, A.V. Paznukhov [et. al] // ION International Technical Meeting. January 25–28, 2016, Monterey, California. Abstract submitted and accepted.

190. Сомсиков В.М. / Волны в атмосфере, обусловленные солнечным терминатором / В.М. Сомсиков // Геомагнетизм и аэрономия –1991. –Vol. 31, № 1. –Р. 1-12.

191. Перемещающиеся волновые пакеты, генерируемые солнечным терминатором в верхней атмосфере / Э.Л. Афраймович, И.К. Едемский, С.В. Воейков, [и др.] // Оптика атмосферы и океана. – 2009. –Т. 22, №8. –С. 753-759.

192. Drob D.P./ An update to the Horizontal Wind Model (HWM): The quiet time thermosphere / D.P. Drob // Earth and Space Science. –2015. – Vol. 2. – P. 301–319. doi: 10.1002/2014EA000089.

193. Федоренко А.К. / Влияние ветра на свойства акустико-гравитационных волн в полярной ионосфере / А.К. Федоренко, Е.И. Крючков // Радиофизика и радиоастрономия. – 2011. – Т. 16, №2. – С. 154-163.

194. Waldock J.A. / HF Doppler observations of medium-scale travelling ionospheric disturbances observed at midlatitudes / J.A. Waldock, T.B. Jones // J. Atmos. Terr. Phys. – 1986. – Vol 48. – P. 245-260.

195. A dominant acoustic-gravity mode in the polar thermosphere / A.K. Fedorenko, A.V. Bespalova, O.K. Cheremnykh [et. al] // Ann. Geophys. – 2015. – Vol. 33. – P. 101–108. doi:10.5194/angeo-33-101-2015.

196. Statistical characteristics of medium-scale traveling ionospheric disturbances revealed from the Hokkaido East and Ekaterinburg HF radar data. Earth / A.V. Oinats, N. Nishitani, P. Ponomarenko [et. al] // Planets and Space. – 2016. – Vol. 68. – P. 8 DOI 10.1186/s40623-016-0390-8.

197. Cherniak I. Dependence of the high-latitude plasma irregularities on the auroral activity indices: a case study of 17 March 2015 geomagnetic storm / I. Cherniak, I. Zakharenkova // Earth, Planets and Space. – 2015. –Vol. 67. – 151. doi: 10.1186/s40623-015-0316-x.