Владимирский государственный университет

Л. В. ГРУНСКАЯ

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ

Учебное пособие

Электронное издание

Владимир 2019

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Владимирский государственный университет

имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

Л. В. ГРУНСКАЯ

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ

Учебное пособие

Электронное издание



© Грунская Л. В., 2019 ISBN 978-5-9984-0958-5 Рецензенты: Доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ зав. кафедрой радиотехники и радиосистем Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых *О. Р. Никитин*

Доктор физико-математических наук, профессор профессор кафедры информационных технологий Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте Российской Федерации (Владимирский филиал) *В. Г. Рау*

Грунская, Л. В.

Электромагнетизм земной атмосферы : учеб. пособие / Л. В. Грунская ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2019. – 209 с. – ISBN 978-5-9984-0958-5. – Системные требования: Intel от 1,3 ГГц ; Windows XP/7/8/10 ; Adobe Acrobat Reader ; дисковод CD-ROM ; 5,08 Мб. – Загл. с титул. экрана.

Результаты, представленные в учебном пособии, посвящены решению одной из актуальных проблем физики Земли, связанной с исследованием взаимосвязи электрического и геомагнитного полей в приземном слое с геофизическими процессами, конкретизации физических механизмов, реализующих это взаимодействие и обоснованию перспективности использования современных методов обработки экспериментальной информации.

Предназначено для студентов-бакалавров дневной формы обучения Института прикладной математики, физики и информатики по направлениям подготовки 28.03.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника» и 12.03.05 «Лазерная техника и лазерные технологии».

Ил. 54. Табл. 9. Библиогр.: 432 назв.

УДК 550.371 ББК 26.233

ISBN 978-5-9984-0958-5

© Грунская Л. В., 2019

ВВЕДЕНИЕ	6
ГЛАВА 1. ВОЗДЕЙСТВИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ	
НА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРН	ы 10
1.1. Физические механизмы возбуждения вариаций электрически	X
полей в резонаторе Земля-ионосфера	10
1.1.1. Резонатор Земля – ионосфера. Основные характеристики	10
1.1.2. Условия приема в приземном слое атмосферы	13
1.2. Источники вариаций электрических полей в приземном слое	
атмосферы	17
1.2.1. Мировая грозовая активность	17
1.2.2. Сейсмогравитационные и собственные колебания Земли,	
космические источники	19
1.2.3. Лунно-солнечные приливы	
Заключение к главе	
Контрольные вопросы	34
ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ	
ПРОЦЕССОВ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ	
2.1. Влияние лунно-солнечных приливов на электрическое	
полеприземного слоя атмосферы (E _z)	
2.2. Электрическая структура приземного слоя атмосферы	
2.3. Решение задачи проникновения электрического поля,	
возникающего на уровне ионосферы под действием приливов,	
в приземный слой атмосферы с учетом конечной и бесконечной	
электрической проводимости земной коры	
Заключение к главе	59
Контрольные вопросы	60

оглавление

51
51
71
78
34
) 1
€7
) 9

Контрольные вопросы	
Глава 4. СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ	K
ПОЛЕЙ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ В СЕТИ	
РАЗНЕСЕННЫХ В ПРОСТРАНСТВЕ СТАНЦИЙ	113
4.1. Приемно-регистрирующий комплекс экспериментального	
полигона для исследования лунно-солнечных приливов	
4.2. Структура приемно-регистрирующих комплексов, разнесен	ных
в пространстве	117
4.3. Методика измерения и восстановления абсолютного	
значения E _z в приземном слое атмосферы	
4.4. Современная система мониторинга на физическом полигоне	i
ВлГУ	
Заключение к главе	
Контрольные вопросы	
1 1	

ГЛАВА 5. ГЕОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ И ЕГО ВЗАИМОСВЯЗЬ	
С ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ	145
5.1. Геомагнитное поле и его вариации	
5.2. Спектральный анализ результатов мониторинга геомагнитно	ого
поля по разнесенным в пространстве станциям с помощью	
корреляционного квадратурного приемника	161
5.3. Модель взаимосвязи геомагнитного поля с термическими	
и лунными приливами	187
Заключение к главе	
Контрольные вопросы	
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	
ПОСЛЕСЛОВИЕ	
РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИИЙ СПИСОК	

введение

Изучение курса Общей физики в университете по разделу «Электромагнетизм» включает в себя не только теоретические основы электромагнетизма, но и практические приложения. Например, исследования электрических и геомагнитных характеристик нижней части тропосферы (приземного слоя), где протекает большая часть деятельности человека, все больше привлекает к себе внимание. Изменения электрического поля приземного слоя атмосферы происходят под действием различных антропогенных и естественных процессов. Атмосферно-электрические характеристики вблизи поверхности земли тесно связаны с глобальной грозовой активностью, приливными эффектами, метеорологическими явлениями, сейсмической и солнечной активностью. Представляемые материалы базируются на результатах мониторинга электрического поля приземного слоя атмосферы. Основной экспериментальной базой проводимых исследований является физический экспериментальный полигон Владимирского государственного университета.

Одно из основных направлений исследований связано с изучением взаимосвязи электрических полей приземного слоя атмосферы с лунносолнечными приливами. Исследования влияния лунно-солнечных приливов на электрические характеристики приземного слоя важны с нескольких точек зрения. Это фундаментальные исследования в разделе геофизики, связанном с атмосферно-электрическими явлениями в приземном слое. Приливы играют важную роль в формировании геодинамического режима в сейсмоактивных регионах Земли. Приливные эффекты наблюдаются в гравиметрии, геомагнитном поле, записях атмосферного давления, электрическом поле ионосферы и приземного слоя атмосферы и являются предметом теоретических и экспериментальных исследований в течение последних двух столетий. Подобные исследования проводятся как в нашей стране, так и за рубежом. Воздействие солнечного и лунного приливов на электрическое поле ионосферы теоретически исследовано, тогда как задача оценки проникновения электрического поля, вызванного приливами и возникающего на уровне ионосферы, в приземный слой атмосферы была не решена.

Экспериментальные исследования воздействия приливных эффектов на электрическое поле приземного слоя атмосферы в частности связаны с необходимостью получения достоверных оценок амплитуды спектральных

компонент электрического поля на частотах приливов. В ходе исследований осуществлена оценка степени воздействия лунно-солнечных приливов на электрические характеристики приземного слоя. Подобная оценка обычно осуществлялась на основе результатов, полученных с помощью классических и параметрических методов спектрального оценивания. Методы спектральной оценки эффективно работают только на участках стационарности анализируемого процесса и не позволяют провести достоверную оценку амплитуды электрического поля на конкретной частоте, например, прилива.

Экспериментальные исследования таких процессов, как лунносолнечные приливы могут эффективно осуществляться путем анализа результатов регистраций электрического поля в сети разнесенных в пространстве на большие расстояния станций. Это связано с тем, что приливы являются динамическим процессом, зависящим от места расположения станции мониторинга. Организация подобных экспериментов является сложной, но реальной задачей.

В данном учебном пособии представлены: результаты анализа экспериментальных данных, полученных в результате проведения мониторинга атмосферного электрического поля в сети разнесенных в пространстве станций; решение задачи о распространении возмущений электрического поля, вызванных приливами и возникающих на уровне ионосферы, в приземный слой атмосферы; результаты анализа законов распределения экспериментальных данных по электрическому полю в приземном слое атмосферы; оценка амплитуды спектральных компонент электрического поля приземного слоя на частотах лунно-солнечных приливов; специализированная радиотехническая система мониторинга электромагнитных полей в приземном слое атмосферы в сети разнесенных в пространстве станций. Проанализировано воздействие геофизических факторов на электрическое поле в резонаторе Земля – ионосфера, описана природа флуктуаций электромагнитного поля. Проведен анализ источников электрических полей в приземном слое атмосферы. Рассмотрены реальные условия приема в приземном слое атмосферы в диапазоне лунно-солнечных приливов. Проанализированы модели механизмов генерации вариаций атмосферного электрического поля в резонаторе Земля-ионосфера под действием лунносолнечных приливов. На основании проведенного анализа и аналитического обзора публикаций сформулированы проблемы и задачи исследований. Представлено решение следующих задач:

- 1. Организация и проведение мониторинга электрического поля в сети разнесенных в пространстве специализированных станций.
- 2. Оценка амплитуды спектральных компонент электрического поля и отношения сигнал/шум на частотах лунно-солнечных приливов по экспериментальным данным станций ВлГУ (Владимирский государственный университет) и ГГО НИЦ ДЗА (Главная геофизическая обсерватория научно-исследовательский центр дистанционного зондирования атмосферы).
- 3. Разработка теоретической модели электрических процессов в приземном слое атмосферы. Решение задачи проникновения электрического поля, возникающего на уровне ионосферы под действием лунно-солнечных приливов, в приземный слой атмосферы с учетом конечной и бесконечной электрической проводимости земной коры.
- 4. Исследование статистических характеристик анализируемых сигналов.
- 5. Разработка каталога спектров электрических полей в приземном слое атмосферы в диапазоне лунно-солнечных приливов.

Работа основывается на результатах десятилетних экспедиционных и стационарных измерений электрического поля в приземном слое атмосферы, проводившихся на экспериментальном полигоне ВлГУ и на разнесенных в пространстве станциях. Разработка приемно-регистрирующего комплекса осуществлялась с помощью радиотехнических методов и средств. Статистическая обработка экспериментальных данных проводилась с применением корреляционного и спектрального анализов. Оценка уровней спектральных компонент на частотах лунно-солнечных приливов осуществлялась с помощью радиофизических методов. Установленные экспериментально закономерности сопоставлялись с результатами аналитического и численного моделирования, а также с комплексом наземных геофизических данных других станций.

Проанализированы модели механизмов генерации вариаций атмосферного электрического поля в ионосфере под действием лунносолнечных приливов. Решена задача распространения возмущений электрического поля, вызванных лунно-солнечными приливами, из ионосферы в нижнюю атмосферу с учетом конечной и бесконечной электрической проводимости земной коры. Получены численные оценки величины E_z вблизи земной поверхности. Осуществлена обработка экспериментальной информации в задаче оценки влияния лунно-солнечных приливов на электрическое поле приземного слоя атмосферы с помощью корреляционного

квадратурного приемника. Проведен анализ классических и параметрических методов спектрального оценивания. Сформулирована общая постановка задачи спектрального оценивания процесса, анализируемого в данной работе и состоящего из комплекса помех и частично детерминированного периодического процесса (лунно-солнечные приливы): необходимо по данным дискретных измерений Е _z приземного слоя атмосферы получить достоверную оценку амплитуды для спектральных компонент, соответствующих частотам лунно-солнечных приливов.

Проведено исследование статистических характеристик вариаций электрического поля приземного слоя атмосферы. Данные для статистического анализа получены по записям электрического поля приземного слоя атмосферы по трем станциям: полигон ВлГУ, станция ВлГУ, станция ГГО НИЦ ДЗА. Проанализирована структура корреляционного квадратурного приемника для решения поставленных задач. Осуществлен детальный анализ спектров электрического поля приземного слоя атмосферы, полученных с помощью корреляционного квадратурного приемника, в диапазоне лунно-солнечных приливов за период с 1997 по 2006 год. Установленные экспериментально закономерности сопоставлялись с результатами других экспериментов. Были проанализированы экспериментальные данные по электрической службы: Воейково(1966-1995гг.), Верхнее Дуброво(1974-1995гг.), Душети(1967-1980гг.).

Учебное пособие предназначено в помощь студентам дневной и дистанционной форм обучения при изучении раздела физики «Электромагнетизм»; на преддипломных практиках, для учебно-научных групп, проходящих практику на физическом экспериментальном полигоне ВлГУ, а также преподавателям для проведения спецкурсов, связанных с радиофизическими методами исследования характеристик приземного слоя атмосферы Земли.

Глава 1. ВОЗДЕЙСТВИЕ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

В настоящей главе проанализировано воздействие геофизических факторов на электрическое поле в резонаторе Земля – ионосфера, описана природа флуктуаций электромагнитного поля. Проведен анализ источников электрических полей в приземном слое атмосферы. Рассмотрены реальные условия приема в приземном слое атмосферы в диапазоне лунносолнечных приливов. Проанализированы модели механизмов генерации вариаций атмосферного электрического поля в резонаторе Земляионосфера под действием лунно-солнечных приливов. На основании проведенного анализа и аналитического обзора публикаций сформулированы проблемы и задачи исследований.

1.1. Физические механизмы возбуждения вариаций электрических полей в резонаторе Земля-ионосфера

1.1.1. Резонатор Земля – ионосфера. Основные характеристики

Во многих радиофизических задачах нижнюю атмосферу рассматривают как тонкий диэлектрический слой, ограниченный сверху (ионосфера) и снизу (земля) сравнительно хорошими проводниками. Электрическая проводимость воздуха на малых высотах мала и с удалением от Земли быстро растет и на высоте в несколько десятков километров, где начинается область ионосферы, увеличивается в миллионы раз [1]. В таком сферическом волноводе распространяются радиоволны различных диапазонов и верхняя граница частот волноводного канала определяется дисперсионными свойствами ионосферы, а нижняя граница частот не существует, т.е. в волноводе Земля-ионосфера могут распространяться радиоволны сколь угодно низкой частоты, вплоть до постоянного тока. Разность потенциалов в таком волноводе может достигать сотен тысяч вольт и проявляется в виде вертикального электростатического поля с напряженностью вблизи поверхности Земли порядка 100 В/м. Затухание в волноводном канале на низких частотах очень мало, например, для $f = 10 \ \Gamma \mu$ ($\lambda = 30 \ \text{тыс. км}$) оно составляет около 0.2 дБ/тыс.км [1]. Величина разности потенциалов между поверхностью земли и ионосферой испытывает суточные вариации, которые хорошо выделяются в большинстве измерений [7,16,17].

Кельвин первым высказал предположение о существовании проводящего слоя в верхней атмосфере и о подобии всей атмосферы гигантскому конденсатору, но эти идеи получили широкое применение в исследованиях атмосферного электричества значительно позднее. Первая «слоя Хевисайда» попытка связать существование с явлениями атмосферного электричества в этом столетии была сделана в работе Вильсона [18]. В книге Шонланда [16] постоянство электрического тока в изменением высоты объясняется атмосфере с именно наличием проводящего слоя в верхней атмосфере. Шонланд указал, что следует делать различие между этим проводящим слоем, проводимость которого обусловлена проникающим излучением (космическими лучами), и более высоким слоем Хевисайда, в котором проводимость связана с солнечным Это зафиксировано излучением. различие введением терминов "электросфера" и "ионосфера" [8].

Существование электрического поля в нижней атмосфере Земли и, в частности, вблизи ее поверхности установлено экспериментально еще в XVIII веке. В работах Я.И. Френкеля, П.Н. Тверского, И.М. Имянитова, Дж.А.Чалмерса и др. [2-10] описаны результаты многолетних экспериментальных и теоретических исследований атмосферного электричества.

При отсутствии грозовой и интенсивной кучевой облачности, осадков, метели, поземки и других атмосферных явлений, среднее значение напряженности атмосферного электрического поля E_z вблизи поверхности Земли имеет порядок 120 + 150 В/м над океанами и 75 + 125 В/м над материками и зависит от широты точки наблюдения. Наибольшие значения E_z наблюдаются на широтах авроральной зоны, а к полюсам и к экватору наблюдается убывание E_z [9,11,12]. С удалением от поверхности земли величина E_z быстро уменьшается, а на высотах 5 + 10 км не превышает единиц В/м [3,13,14].

Результаты измерения суточных вариаций градиента потенциала в хорошую погоду существенно отличаются друг от друга в разных частях земного шара, что указывает на вариации сопротивления самых нижних слоев атмосферы.

Многочисленные измерения E_z на большинстве равнинных среднеширотных станций обнаруживают значительное увеличение поля в ранние утренние (06 + 08 LT), а на ряде станций – и в вечерние (19 + 20 LT) часы местного времени. Обычно минимальные значения E_z наблюдаются в предвосходные часы [15]. На большинстве наземных станций время максимумов и минимумов градиента потенциала зависит от местного времени, что указывает на то, что влияние местных условий доминирует. Во многих случаях имеются двойные колебания градиента потенциала с минимумами в периоды от 4 ч. до 6 ч. и от полудня до 16 ч. и максимумами в периоды от 7 ч. до 10 ч. и от 19 ч. до 22 ч. Амплитуды суточных вариаций часто составляют более 50% среднего значения [8].

Никольс [23] первым заметил, что градиент потенциала увеличивается с восходом солнца. Это подтвердил Хольцер [24] и Каземир [25], а также Израэль [21]. Особенность явления заключается в том, что при этом одновременно увеличивается и ток проводимости воздух – земля при малом изменении проводимости. Данный эффект летом больше, чем зимой, и менее значителен на вершинах гор, чем на более низких уровнях.

Градиент потенциала на поверхности земли дается выражением $F=V/\lambda R$, где V—потенциал электросферы, λ —проводимость воздуха вблизи поверхности и R—сопротивление столба воздуха. Если λ и R не зависят от времени суток, то вариации E_z совпадают с вариациями V и максимум градиента потенциала указывает на максимум разницы потенциала между электросферой и землей [8]. Этот эффект связан с максимумом грозовой активности на земном шаре.

Браун [20] определял локальные эффекты изменения градиента потенциала, вычитая значение его вариаций, общих для всего земного шара, названных им «унитарными вариациями», из полных вариаций, которые фактически измеряются. Он обнаружил, что локальный эффект можно рассматривать как 24-часовую волну с максимумом в полдень совместно с «депрессией» в полдень. Он приписал наблюдаемые эффекты смещению объемного заряда из-за конвекции и нашел, что местные эффекты намного уменьшаются при продолжительном ветре, который мешает конвекции объемного заряда, и также нашел, что локальный эффект уменьшается при сплошной облачности без дождя, т.к. она уменьшает нагревание земной поверхности, что приводит к уменьшению конвекции. Израэль [21] также нашел, что относительная амплитуда суточных вариаций градиента потенциала рассмотренного типа меняется в зависимости от содержания водяного пара, и сделал вывод, что причина этого должна быть аналогична приведенной выше. Это можно объяснить появлением в атмосфере ядер аэрозолей, с одной стороны, и водяного пара их распространением в атмосфере за счет конвекции; с другой, рассмотренный процесс во многом подобен процессу, создающему связь

между содержанием тяжелых ионов и влажностью. Кавано [22] рассмотрел природу этого эффекта более подробно, принимая во внимание не только конвекцию, но также рекомбинацию и образование ионов, в частности, за счет радиоактивных веществ в атмосфере, распределение которых зависит от конвекции. Он также сумел детально рассчитать распределение проводимости с высотой и объяснить местные суточные вариации градиента потенциала.

1.1.2. Условия приема в приземном слое атмосферы

Уровень естественных помех ИЗЧ диапазона (ниже 10⁻³ Гц) сильно зависит от местных метеорологических условий. В ветреную погоду перемещение воздуха с меняющейся диэлектрической проницаемостью или содержащего области пространственного заряда вблизи приемной антенны вызывает помеху, существенно превосходящую полезный сигнал. Помехи от дождя и снега нарушают нормальную работу приемного устройства. Помехи подобного типа в несколько десятков раз превышают уровень естественного фона. Причиной такого изменения электрического поля является пространственное перемещение зарядов на частицах осадков и влияние остающегося в облаке объемного заряда. Напряженность поля у земной поверхности при перемещении больших масс сухого снега может достигать величины 100 В/см [1]. Линии электропередач, расположенные вблизи пункта приема сигналов, являются источниками помех на частоте 50 Гц и ее гармониках. Для ослабления этих помех приемные устройства размещают вдали от населенных пунктов и промышленных предприятий.

Уникальные возможности возникают при приеме на подземные, подводные антенны: на столь низких частотах сигнал может глубоко проникать в землю и воду; затухание сигнала с увеличением расстояния от передатчика изменяется очень мало. Характер помеховой обстановки под землей имеет ряд особенностей. Электромагнитное поле земной коры (электротеллургическое поле) является частью единого Земного электромагнитного поля. Наблюдаемое естественное электрическое поле под землей является суммой локального и регионального полей, причем локальное имеет ограниченное распространение от источника, а региональное одновременно захватывает огромные пространства [27]. Причины возникновения регионального поля под землей: ионосферно-электрические процессы (полярные сияния, магнитные бури), электромагнитные поля грозовых разрядов. Эти же причины порождают поля теллурических токов в земле [26,27]. К локальным полям относятся поля местных источников в земной коре и проявляются они на ограниченных участках земной коры, причины образования таких полей следующие: соприкосновение сред с различными агрегатными состояниями; с различной плотностью; с различными концентрациями веществ (диффузионно-адсорбционные поля); индуцирование полей (магнитогидродинамический эффект) в движущейся воде – фильтрация воды в грунт (фильтрационные поля). Электромагнитное поле земной коры характеризуется широким спектром и простирается от $2,5 \times 10^9$ до 1×10 Гц, т.е. вариации поля имеют периодичность от 10 лет до тысячных долей секунды. Интенсивность электрической составляющей в указанном диапазоне частот убывает с увеличением частоты и изменяется во времени, начиная от единиц до сотен микровольт на км. В среднем интенсивность составляет 30-50 мкВ/ км.

Важная особенность распространения на частотах ниже 10⁻³ Гц заключается в том, что имеется только одна распространяющаяся волна квази-ТЕМ. Все другие типы волн являются затухающими. В дальней зоне волна образуется вертикальным электрическим и горизонтальным магнитным полем, поперечным к направлению распространения. Утечка энергии из этой волны в землю или в воду создает плоскую волну, распространяющуюся вниз, и именно эта волна принимается подземными, подводными антеннами [28].

Распространение земных волн на трассе определяется в основном процессами на границе раздела двух сред. Одной из таких сред является воздух. Второй средой является почва. Процесс проникновения поля в почву связан с ее электрическими свойствами – величиной диэлектрической проницаемости ε и электропроводности σ. При больших расстояниях от источника поле убывает обратно пропорционально квадрату расстояния [29,30]:

$$E_{z} = \frac{3 \cdot 10^{-3} \sqrt{P(\kappa_{6}m)} \cdot \lambda^{2} [M] \cdot \sigma [10^{-3} / O_{M} \cdot M]}{R^{2} [\kappa_{M}]}.$$
(1.1)

Такой относительно медленный закон убывания поля с расстоянием при распространении радиоволн вдоль поверхности плоскости земли объясняется тем, что в верхнем полупространстве происходит перераспреде-

ление энергии, часть ее из более высоких слоев "перекачивается" вниз и отсасывается в почву. Это приводит к тому, что у поверхности земли фронт волны изгибается и ее нельзя считать плоской. Появляется горизонтальная составляющая поля, направление которой совпадает с направлением распространения. Величина этой составляющей E_x связана с вертикальной составляющей E_z соотношением:

$$E_{X} = \frac{E_{Z}}{\sqrt{\varepsilon^{1}}},$$
(1.2)

где $\varepsilon' = \varepsilon - i60\lambda\sigma$ - комплексная диэлектрическая проницаемости почвы, для ИЗЧ $\varepsilon' >> 1$. Наличие горизонтальной составляющей позволяет производить прием на земные антенны.

На границе двух сред тангенциальные составляющие электрического Е_т и магнитного Н_т полей электромагнитной волны связаны следующими соотношениями (граничные условия) [29]:

$$E_{1\tau} = E_{2\tau} E_{1\tau} = H_{2\tau}$$
 $z = 0,$ (1.3)

а нормальные составляющие (E_n и H_n) должны удовлетворять условиям:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{1} \dot{E}_{1n} &= \varepsilon_{2} \dot{E}_{1n} \\ \mu_{1} H_{1n} &= \mu_{2} H_{2n} \end{aligned} \right\} z = 0, \qquad (1.4)$$

где μ - относительная магнитная проницаемость среды, практически $\mu 1=\mu 2=1$; ϵ ' - относительная комплексная диэлектрическая проницаемость. Для воздуха $\epsilon'_1=1$: т.к. $\epsilon_1=1$ и $\sigma_1=0$, а для почв σ_2 обычно очень велика. Хотя сами диэлектрические проницаемости не велики ($\epsilon_2=3-5$ для сухих почв и $\epsilon_2=12$ -30 для влажных) проводимости σ_2 составляют 1-3 мсим/м для сухих почв и 10 - 30 мсим/м для влажных почв. Для исследуемого диапазона частот 60 $\lambda \sigma_2 >> \epsilon_2$, т.е. токи проводимости много больше токов смещения, и тогда:

$$\varepsilon_2 \approx -i60\lambda\sigma_2$$
, (1.5)

и, кроме того, $|\varepsilon'_2| >> 1$.

Поскольку скорость электромагнитных волн в среде зависит от ее электрических свойств, то длина волны λ в почве изменяется по отношению к ее значению для свободного пространства:

$$\lambda_2 = \frac{\lambda}{n_2},\tag{1.6}$$

где:

$$n_{2} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [\varepsilon_{2} + \sqrt{\varepsilon_{2}^{2} + (60\lambda\delta_{2})^{2}}}.$$
 (1.7)

С учетом (1.6):

$$n_2 \approx 5.5 \sqrt{\lambda \sigma_2}. \tag{1.8}$$

Из выражения (1.8) видно, что в почве длина волны значительно укорачивается. Именно этим объясняется ряд процессов, возникающих у границы раздела воздух-почва при проникновении полей из одной среды в другую.

Для исследуемого диапазона частот размер первой зоны Френеля много меньше длины волны в воздухе:

$$2b \ll \lambda,$$

$$b = \sqrt{h\lambda_2 + \left(\frac{\lambda_2}{2}\right)^2},$$

$$h \ll \lambda_2, b = \frac{\lambda_2}{2}.$$
(1.9)

Поэтому можно считать, что поле в точке приема создается синфазным участком, т.е. электромагнитная волна в почве является плоской и распространяется перпендикулярно границе раздела. Исходя из этого вывода по известным из теории электромагнитного поля соотношениям для случая плоской волны можно записать:

$$H_{2y} = -\frac{\sqrt{\varepsilon_2}}{120\pi} E_{2x} \quad . \tag{1.10}$$

Используя точное граничное условие (1.3), для горизонтальных составляющих поля в воздухе у границы раздела имеем:

$$H_{y'} = -\frac{\sqrt{\varepsilon_2}}{120\pi} E_{X1} \quad при \ z = 0.$$
 (1.11)

Сущность полученного соотношения заключается в следующем: соотношения между горизонтальными составляющими электрического и магнитного полей в районе плоскости раздела определяются свойствами среды, находящейся ниже плоскости раздела, т.е. свойствами почвы; волны, возникающие во второй среде, движутся перпендикулярно границе раздела и являются плоскими. Таким образом:

- проанализированы основные характеристики резонатора Земля-ионосфера;

- описаны результаты многолетних экспериментальных и теоретических исследований атмосферного электричества;

- показано, что существование электрического поля в нижней атмосфере Земли и, в частности, вблизи ее поверхности установлено экспериментально еще в XVIII веке;

- проанализирована природа локальных и унитарных вариаций электрического поля приземного слоя атмосферы;

- рассмотрены особенности распространения электромагнитных полей на частотах ниже 10⁻³ Гц;

- показано, что распространение земных волн определяется в основном процессами на границе раздела двух сред; рассмотрены условия и возможности приема в приземном слое атмосферы.

1.2. Источники вариаций электрических полей в приземном слое атмосферы

1.2.1. Мировая грозовая активность

Вариации электрического поля в промежутке Земля-ионосфера могут возбуждаться двумя типами естественных источников – земными и космическими. Главным источником электромагнитной энергии КНЧ и ИЗЧ диапазона являются грозовые разряды (разряды облако-земля и внутриоблачные разряды) [31]. Разность потенциалов между облаком и землей может изменяться в пределах 50 * 10⁶–I * I0⁹B. Разряд молнии сопровождается мощным электромагнитным излучением с широким спектром частот. Например, для среднего разряда, переносящего около 20 Кл с высоты 4 км, выделяемая энергия примерно равна 2 * I0⁹ Вт * с. Развиваемая при этом мощность составит около 7000 МВт при длительности разрядов 0,25 с. Мощность грозовых разрядов велика, однако, не вся она преобразуется в электромагнитное излучение. Значительная доля энергии молний идет на ионизацию и разогрев плазмы канала разряда. Определенная часть идет на омические потери в земле, на создание ударных звуковых волн и только остаток преобразуется в электромагнитное излучение от ИЗЧ до световых волн. Мощность

импульса излучения составляет около 10^6 Вт, т.е. десятую долю процента полной мощности грозового разряда. Электромагнитное излучение существует на значительных расстояниях от грозового очага и определяет, в основном, помехи от дальних гроз. Электромагнитное излучение от близких гроз (грозы на расстояниях до десятков километров) включает в себя электростатическое поле, поле индукции и поле излучения грозового разряда [32,33].

Принято считать, что существующее электростатическое поле Земли напряженностью 100 – 120 В/м создается глобальной грозовой активностью [1].В работах [1,34,35,36] показано, что средние за год вариации электростатического поля Земли связаны со средними за год суточными вариациями площади мировых грозовых очагов. Более обоснованной является связь с числом грозовых разрядов, а не с площадью гроз.

Разность потенциалов между Землей и верхней атмосферой обеспечивается динамическим равновесием между током утечки тропосферы (ток положительных зарядов на Землю) и током грозовых разрядов [35,37,38]. Плотность тока утечки мала, около 3 х 10⁻¹² А/м².

По климатологическим данным [35], на поверхности Земли одновременно действуют в среднем около 2000 грозовых очагов, площадь каждого из которых составляет примерно 1000 км².

Результаты оценок хорошо согласуются с экспериментальными данными [35,39,40,41], в соответствии с которыми время восстановления дипольного момента облака после грозового разряда равно 5-10с [42], а среднее число вертикальных разрядов составляет 30-100 разрядов в секунду [1].

Шумановский фон является откликом резонатора Земля-ионосфера на всю совокупность грозовых разрядов, возникающих на земном шаре. Вспышки порождены ближними (до 1000 км) грозовыми разрядами и на несколько порядков превосходят уровень шумановского фона. Вследствие малого расстояния от молнии до пункта наблюдения вспышка содержит радиационную компоненту, индукционное поле и статическое поле. Всплески являются откликом резонатора на одиночные мощные молниевые разряды, их амплитуда может превосходить уровень фона до 10 раз, а длительность обычно составляет около секунды [1]. На частотах 5-45 Гц спектральный состав и интенсивность шумов определяется резонансными свойствами волновода Земля – ионосфера. Значение резонансных частот и

затухание на частотах были предсказаны Шуманом. Возбуждение электромагнитных колебаний на резонансных частотах земного шара происходит за счет воздействия разрядов атмосферного электричества на резонатор Земля-ионосфера или за счет колебаний в магнитосфере Земли [44,45]. Ночью резонансные свойства земного шара слабее выражены, чем днем, так как в это время суток возрастает утечка энергии низкочастотных колебаний сквозь ионосферу [37]. Возбуждение колебаний на нижних резонансных частотах вызвано в основном медленными составляющими послеразрядного тока молний, а на верхних резонансных частотах – главными разрядами молний на землю. Вариации распределения энергии между этими частотами в течение суток обусловлены суточной периодичностью грозовой деятельности на низких и средних широтах.

1.2.2. Сейсмогравитационные и собственные колебания Земли, космические источники

В анализируемый диапазон частот попадают сейсмогравитационные и собственные колебания Земли. Теория сейсмоэлектродинамики (СЭД) описывает возбуждение электромагнитных сигналов, коррелирующих с землетрясениями. Поиск таких сигналов сопряжен с немалыми трудностями. По теоретическим оценкам [45-48] и по опыту наблюдений [49-51] это весьма слабый сигнал.

Необходимость таких исследований для волновых процессов в атмосфере следует из результатов анализа синхронных записей сейсмогравитационных колебаний Земли и приземного атмосферного давления [52]. В них обнаружено сходство спектрального состава, его статистическая устойчивость. В спектрах синхронных записей, охватывающих период времени в несколько месяцев, выделены неслучайные составляющие, существование которых невозможно объяснить метеофакторами. Высокие значения коэффициентов когерентности позволили поставить задачу о возможном возбуждении атмосферы процессами, происходящими в Земле [51].

Исследование этих колебаний, начатые в 70-е годы [53], к настоящему времени позволили установить структуру спектра и факт его статистической устойчивости во времени [54,55], планетарный характер регистрируемых колебаний и их воздействие на волновые процессы в атмосфере [56]. Выявлены сравнительные кратковременные феномены-предвестники землетрясений, длительность которых варьирует от 5-6 до 20 ч.

В работе [57] исследования базировались на экспериментальных данных пунктов наблюдения Санкт-Петербурга, Обнинска и Тбилиси [58]. Высокая степень согласия спектров волновых процессов в разных геофизических полях указывает на наличие корреляционных связей между ними. Большие значения коэффициентов когерентности в синхронных записях сейсмогравитационных колебаний земли и вариаций атмосферного давления подтверждают эту связь [58].

Инге Леман в 1936г. открыла существование внутреннего ядра Земли [60]. У Земли, как и у любого упругого тела, можно возбудить характерные для нее колебания. В Земле в результате сильного землетрясения возбуждаются естественные (собственные) колебания, которые могут продолжаться в течение многих часов или даже дней. Периоды собственных колебаний значительно различаются. Самые медленные колебания захватывают всю толщу Земли, неся информацию о составе не только коры и мантии, но и ядра, как внешнего, так и внутреннего. Регистрируются эти колебания с помощью сети длиннопериодных сейсмографов – акселерометров, гравиметров и наклономеров.

Впервые собственные колебания Земли (СКЗ) были обнаружены в 1954 г. Беньоффом [60] при анализе сейсмограмм Камчатского землетрясения 1952 г. Он отождествил основное сфероидальное колебание Земли с периодом 57 мин с соответствующим колебанием, выделенным при анализе сейсмограмм. Собственные колебания Земли можно характеризовать некоторой функцией и связанной с ней собственной частотой "w^m_i. Число обертонов n (по аналогии с квантовой механикой – главное квантовое число), угловое (орбитальное) число l и азимутальное число m являются целыми числами, которые используются для обозначения конкретной моды колебания (таблица 1; 2).

При анализе записей сейсмограмм катастрофического Чилийского землетрясения 22 мая 1960 г. впервые был обнаружен эффект расщепления (раздвоения) частот. Тогда же было высказано предположение, что это раздвоение вызвано вращением Земли. Основы теории этого явления применительно к расщеплению мод, связанных с ее вращением, были заложены Пекерисом, Альтерманом и Ярошем [59]. Впоследствии было показано, что вращение Земли – не единственная причина расщепления. Необходимо учитывать также эллиптичность Земли и ее ядра, в частности.

Таблица 1

Сфероилали		Тороидальные (крутильные) коле-			
Сфероидальн	ные колсоания	бания			
Тип	Период, мин	Тип	Период, мин		
$_0\mathbf{S}_0$	20,46				
$_0\mathbf{S}_2$	53,83	$_0T_2$	43,94		
${}_{0}S_{3}$	35,56	$_0T_3$	28,37		
$_0\mathbf{S}_4$	25,76	$_0T_4$	21,72		
$_{0}S_{10}$	9,67	$_{0}T_{10}$	10,31		
$_{0}S_{20}$	5,792	$_{0}T_{20}$	5,993		
$_{0}S_{40}$	3,538	$_{0}T_{40}$	3,333		

Типы собственных колебаний Земли

Таблица 2

Моды колебаний Земли

Тип	$_{0}S_{0}$	$_{0}S_{2}$	$_{0}S_{3}$	$_{0}S_{4}$	$_{0}S_{5}$	$_{0}S_{6}$	$_{0}S_{10}$	$_{0}S_{20}$	$_{0}S_{40}$
Период, с	1007	3233	2139	1546	1188	962,	579,	347,	212,
	1227					3	3	3	2
Глубина, км	6370	5850	5500	5270	5090	4630	3940	2600	1400

Одной из важнейших фундаментальных проблем геофизики является краткосрочный прогноз землетрясений. Разработки в этом направлении опираются на комплекс методов и средств наблюдений за физикохимическими процессами в различных оболочках Земли. В работе [60], используя непрерывные в течение полугода наблюдения, получены результаты их анализа для сейсмогравитационных колебаний, то есть колебаний поверхности Земли в диапазоне частот (0,05—0,5) мГц. По наблюдениям, выполненным в СпбГУ с помощью сейсмогравиметрического комплекса, в Боровом (BOR, Казахстан) с помощью гравиметра и на станциях сети Geoscope (SSB, Франция и SEY, Магадан) исследована динамика интенсивности колебаний Земли [60]. Выявленные пульсации интенсивности имеют длительность в среднем от суток до 2-3 суток, различные амплитуды на разных станциях и преимущественно предваряют сильные землетрясения. Изменение интенсивности вариаций атмосферного давления, синхронно наблюдаемого в СПб, дали аналогичные результаты. При этом пульсации интенсивности не всегда одновременны с сейсмическими, а при совпадении имеют в каждом процессе различные относительные амплитуды.

В ряде случаев за несколько дней и часов до начала землетрясений наблюдалось возрастание электромагнитных шумов (ЭМШ), которые превосходили фоновые значения на порядок [61-63]. Предположение о причастности ЭМШ к землетрясению основано на том, что во время измерений в верхней атмосфере не наблюдалось каких-нибудь заметных возмущений. К таким событиям относятся землетрясения в Спитаке (Армения, 1988г., М = 6.9), Лома Приете (США, 1989, М = 7.1) Носридже (1994, М=6.7) и в ряде других мест. Указанный эффект удается наблюдать на расстояниях в десятки и первые сотни километров от эпицентра землетрясения.

Обнаружимость сейсмоэлектромагнитных сигналов безусловно доказана наблюдениями в Японии [51] и более ранними наблюдениями на Камчатке [50], также [64,65]. Вопрос о преобразовании механической энергии очага в энергию электромагнитного поля остается еще не вполне ясным. В работе [66] показано, что гипотеза о действии в земной коре инерционного механизма преобразования приводит к оценке амплитуды электромагнитного сигнала, находящегося в соответствии с результатом наблюдений.

Большое внимание уделяется исследованиям электромагнитных явлений, предшествующих и сопровождающих землетрясения [67,68]. Одним из элементов электромагнитного поля Земли является атмосферное электричество. Пионером исследований атмосферного электричества в связи с землетрясениями является А. Гумбольт, который наблюдал с помощью электроскопа вариации атмосферного электричества во время землетрясений. В дальнейшем ряд исследователей пытались связать аномалии напряженности электрического поля (НЭП) атмосферы с сейсмическими явлениями [69,70].

Особое внимание исследователей привлек к себе диапазон сверхнизких частот (0.001-10Гц). С.М.Крылов и В.Т. Левшенко [71] показали, что с помощью специальных методических приемов удается уверенно выделять в этом диапазоне сигналы литосферного происхождения на фоне

естественных геомагнитных пульсаций и грозовых разрядов. За 4ч. до Спитакского землетрясения на эпицентральных расстояниях 110-140 км. зарегистрировано интенсивное излучение в диапазоне частот 0.03-1Гц [72]. В течении нескольких дней после главного толчка также неодно-кратно отмечались аномальные сигналы, предваряющие сильные афтершоки. По мере спада афтершоковой активности амплитуды аномальных сигналов постепенно уменьшались до фонового уровня. Похожие аномалии в диапазоне частот 0.01-10 Гц зарегистрированы перед землетрясением 19.10.1989г. с М=7.1 в Лома Приета (Калифорния).

Исследованием сейсмоэлектромагнитных явлений в настоящее время активно занимаются в ИФЗ РАН, в ИКИР ДВО РАН, ИЗМИРАН [73-77, 95-98].

Источником электромагнитных колебаний в полости Земляионосфера могут быть также излучения, проникающие в резонатор через ионосферу из космоса. Космическая природа электромагнитных колебаний, наблюдаемых в приземном слое атмосферы установлена с высокой степенью достоверности [78-81]. Речь идет о регулярных и нерегулярных колебаниях геомагнитного поля (колебания Рс и Рі), наблюдаемых в диапазоне частот от нескольких миллигерц до нескольких герц [1].

Механизмами, связанными с возбуждение волн, являются различного типа неустойчивости, возникающие в замагниченной горячей плазме с пучками частиц. В магнитосфере возникают колебания, которые большей частью носят шумоподобный характер, хотя иногда регистрируются квазисинусоидальные волны. Из-за этого эффекта обнаружение колебаний полости Земля – ионосфера, возбуждаемых из космоса, осуществляется легче в низкочастотной части диапазона, в области первого резонансного максимума [82].

Измерения в магнитосфере Земли показали, что уровень спектральной плотности колебаний ИЗЧ диапазона почти на порядок превышает средний уровень спектральной плотности шумов, наблюдаемых в полости Земля-ионосфера на тех же частотах. Поэтому, если в резонатор Земляионосфера через всю толщу ионосферы из космоса в указанной области частот проникает всего лишь 10% энергии, то вклад космических источников в регистрируемый на поверхности Земли сигнал будет сравним с вкладом мировой грозовой активности в этот сигнал [1]. Волны сверхнизкого диапазона распространяются в плазме магнитосферы в виде быстрой магнитогидродинамической волны, бегущей вдоль силовой линии, и имеют правую круговую поляризацию [83,84].

1.2.3. Лунно-солнечные приливы

Установлено, что в структуре геофизических полей присутствуют квазирегулярные периодичности различной длительности [42, 95-100]. Они могут быть результатом воздействия на геофизическую среду таких внешних процессов, как лунно-солнечные приливы, неравномерность угловой скорости вращения Земли, вариации солнечной активности и т.д. [101]. Одна из причин появления периодичностей – результат воздействия на геофизическую среду лунно-солнечных приливов.

В литературе достаточно широко рассматриваются крупномасштабные колебания атмосферы, возникающие в результате а) действия сил притяжения Луны и Солнца и б) теплового воздействия Солнца. Приливом обычно называются колебания, возбуждающиеся в результате действия обоих этих факторов, а термическим приливом – колебания, возникающие в результате нагревания. Правильное объяснение возникновения приливов впервые появляется у Ньютона [86] в его «Началах». Приливы возникают под влиянием сил притяжения Луны и Солнца, действующих в соответствии с тремя законами механики, открытыми Ньютоном.

Работа Сиднея Чепмена [85] по обнаружению лунных приливов в земной атмосфере считается классической. Суточные изменения температуры воздуха и давления свидетельствует, что эти изменения сопровождаются суточными колебаниями распределения массы воздуха, а следовательно, и колебательными движениями воздуха (атмосферные приливы). С помощью процесса усреднения Лаплас впервые пытался обнаружить присутствие в атмосфере лунных приливов. Приливы термические и гравитационные в течение двух последних столетий усиленно обсуждались в периодической литературе.

Приливные колебания на больших высотах оказались наиболее заметной компонентой общего изменения давления и плотности, причем настолько значительной, что без их знания невозможен точный расчет движения искусственных тел в верхней атмосфере. Это обусловило большой интерес и непрерывно растущее число публикаций как по наблюдениям, так и по теории атмосферных приливов. Оценка степени воздействия атмосферных приливов на электромагнитные поля в резонаторе Земляионосфера при этом играет важную роль.

Из динамической теории следует, что амплитуда приливных колебаний в атмосфере возрастает с высотой, так что в ионосфере они уже значительны по сравнению с другими колебаниями.

В работе [85] Чепменом детально объясняется возникновение солнечного прилива. Солнце рассматривается как неподвижное тело массы S с центром О, вокруг которого на расстоянии r_s с угловой скоростью ω вращается Земля с центром С и массой Е. Полная центробежная сила Eω²r_s на Земле уравновешивается полным гравитационным притяжением GSE/ r²s, где G обозначает гравитационную постоянную, тогда $\omega^2 = GS/r^3s$. Такое распределение уровня называется солнечным равновесным приливом и оно пропорционально градиенту ускорения ω^2 r–GS/ r² в C, т.е. пропорциональна $\omega^2 + 2GS/r_{S}^3$, или 3GS/ r_{S}^3 (без учета вращения Земли). Приливная сила Луны также пропорциональна 3GM/ r³_M, где М – масса Луны, а r_M – ее расстояние от С. Отношение приливной силы Луны к приливной силе Солнца равно (M/ r_M^3)/(S/ r_S^3). Поскольку M= $\frac{4}{3}\pi\rho_M a_M^3$, a S= $\frac{4}{3}\pi\rho_S a_S^3$, где ρ_M , ρ_S обозначают средние плотности, а а_м, а_s - радиусы Луны и Солнца, это отношение записывается в виде $[(a_M/r_M)^3/(a_S/r_S)^3](\rho_M/\rho_S)$. Сомножитель в квадратных скобках близок к единице, поскольку Солнце и Луна с Земли имеют почти одинаковые угловые размеры. Поэтому отношение приливной силы Луны к приливной силе Солнца почти точно равно ρ_M/ρ_s , т.е. 3,34/1,41, или 2,37.

Равновесный прилив является чисто теоретическим понятием, как эталон для сравнения с реальными приливами. Из-за вращения Земли приливная сила в любой точке моря или атмосферы непрерывно изменяется; таким образом, прилив – явление динамическое.

Теоретические расчеты Лапласа указывали на существование «прямого» лунного прилива в атмосфере, благодаря которому изменение барометрического давления в тропиках может колебаться в пределах 0,5мм.рт.ст. Он считал, что это изменение, как оно ни мало, можно выделить из большого числа ежечасных показаний барометра. Лаплас знал о существовании систематического хода давления с периодом в солнечные сутки с ярко выраженной полусуточной гармоникой и о том, что амплитуда этих колебаний много больше, чем полученная им оценка лунного полусуточного воздушного прилива. Часть S_1 суточного хода S называется суточной компонентой, или вариацией. Суточная вариация, таким образом, означает гармоническое колебание с периодом в одни сутки. Аналогично члены S_2 , S_3 , S_4 называются соответственно полусуточными, третьсуточными и четвертьсуточными компонентами, или вариациями. Соответственно лунный суточный ход L и его гармонические составляющие L_1 , L_2 , L_3 , ..., которые называются соответственно лунными суточными, полусуточными и т.д. компонентами, или вариациями.

Полусуточная вариация S₂(p) – одно из самых регулярных метеорологических явлений. В тропиках барографы показывают очень четко выраженное полусуточное колебание с суточным диапазоном около 2 мм рт. ст. и с несколько большим недельным диапазоном, если не считать периодов, когда бывают ураганы.

Чепмен, Пекерис [59,85,94] и другие исследователи, рассматривая термическое возбуждение компоненты $S_2(p)$, учитывали только колебания температуры, возникающие в результате нагревания атмосферы поверхностью Земли за счет турбулентной теплопроводности. При этом предполагалось, что только поверхность Земли поглощает солнечную радиацию, не поглощенную и не отраженную в пространство облаками. Но на самом деле часть радиации не попадает на Землю; она поглощается по мере прохождения через атмосферу, и это оказывает влияние на всю толщу воздуха, а не только на приземный слой. Необходимость учета эффекта такого нагревания на всех уровнях отмечали Зиберт [88], а также Сен и Уайт [95]. Зиберт выдвинул предположение о том, что поглощение радиации водяным паром может служить объяснением по крайней мере части вариации $S_2(p)$.

Объяснив вариацию $S_2(p)$, мы оказались, как заметил Зиберт [89], перед проблемой, почему компонента $S_1(p)$ подавляется вблизи поверхности Земли. Батлер и Смолл предположили, что главная суточная мода имеет малую вертикальную длину волны, а нагревание озона происходит в слое атмосферы большой толщины.

Линдзен [90] детально рассчитал реакцию атмосферы на суточные колебания, вызванные нагреванием водяного пара и озона. Его расчеты объясняют примерно $^{2}/_{3}$ наблюдаемой на поверхности Земли компоненты S₁(p), а также проливают свет на многие особенности суточных колебаний ветра ниже 100 км. Линдзен нашел, что основную часть термической энергии получает главная удерживающая мода (т. е. мода с отрицательным значением h). Эта мода связана с заметной реакцией в области возбуждения;

однако она препятствует распространению возмущений от области возбуждения. Фактически вне области локального возбуждения термических приливов суточное приливное колебание происходит в основном благодаря главной распространяющейся моде, возбуждаемой нагреванием водяного пара в тропосфере.

Оказалось, что наиболее важным источником термического возбуждения является поглощение солнечной радиации озоном и водяным паром. Оценка нагревания за счет переноса колебаний температуры поверхности Земли в атмосферу путем турбулентности и излучения показала, что оно мало, особенно если рассматривать осредненную оценку нагревания над морем и сушей. Влияние суточного хода облачности и суточного хода выделения скрытой теплоты парообразования не оценивалось. Нагревание за счет колебаний температуры поверхности существенно различно над сушей и морем. Такое неравномерное нагревание должно вызывать термические приливы, которые не следуют за Солнцем.

Компонента L₂ была определена по данным атмосферного давления в тропических широтах [91,92] в 1847 году. Позднее Бергсма и Ван дер Сток [93] вычислили L₂ с помощью фотографических записей ежечасных барометрических показаний по результатам наблюдений за 40 лет.

Чепмен [94] определил L₂ по ежечасным данным за 64 года для Гринвича. Две трети имеющегося количества данных не были использованы; рассматривались данные только за те дни, когда диапазон изменений давления не превышал 2,5 мм рт. ст. Это был первый действительно обоснованный результат, полученный для области, находящейся вне тропиков.

Можно выделить основные лунно-солнечные приливы: суточный лунный O₁; суточный солнечный P₁; суточный лунно-солнечный K_{1m}+K_{1s}; большой лунный эллиптический полусуточный N₂; полусуточный лунный M₂; полусуточный солнечный S₂; полусуточный лунно-солнечный K_{2m}+K_{2s}.

Гравитационное возбуждение в общем гораздо слабее, чем термическое. Лунные приливы выделить можно, поскольку они имеют отличающийся период. Несмотря на то, что их амплитуда мала, они представляют большой интерес, поскольку механизм их возбуждения хорошо известен.

Для гравитационных приливов энергия возбуждения сосредоточена только на одном уровне – поверхности Земли. В отличие от солнечного полусуточного термического прилива, лунный полусуточный прилив в давлении у поверхности сильно зависит от распределения T₀. Объяснить это можно только тем, что способы возбуждения этих двух приливов различны: для лунного полусуточного прилива возбуждение является когерентным источником на определенном уровне, а для солнечного полусуточного прилива оно распределено в довольно широком слое атмосферы [103].

Гравитационное воздействие Луны большое влияние оказывает на Землю. Движение лунных узлов по эклиптике происходит с периодичностью 18,6 лет. Периодичность обращения Луны вокруг Земли вызывает в ряде земных процессов месячные и более короткие периоды. Так, движение центра тяжести Земли вызывает в ряде земных процессов месячные и более короткие периоды. Движение центра тяжести Земли относительно центра тяжести системы Земля-Луна (барицентра) происходит с периодом 27,32 суток. Помимо этого, среди периодов 1 месяц и менее отмечаются периоды 5-7 суток и 13 суток, обусловленные сменой знака радиальной компоненты межпланетного магнитного поля; 9,9 и 27-30 суток, связанные с вращением Солнца [102].

Первые попытки использовать измерения приливных деформаций Земли для получения дополнительной информации о ее внутреннем строении имеют уже почти столетнюю давность. Классические работы В. Томсона и Дж. Дарвина относятся к последней четверти прошлого века. Около 1890 г. Ребер-Пашвиц в Потсдаме, а затем его преемник Иван Егорьевич Кортации в Николаеве провели первые успешные измерения приливных изменений наклонов[103].

А.Я. Орлов, очень много сделавший для развития наблюдений приливных изменений наклонов, в 1926 г. Организовал в Полтаве специальную гравиметрическую обсерваторию. Основной задачей обсерватории было изучение движения полюса и приливных деформаций Земли. На этой обсерватории впервые в СССР были в 1948 г. измерены приливные изменения силы тяжести старым гравиметром Графа. Работы по измерению приливных изменений силы тяжести с помощью современных высокоточных гравиметров Аскания начаты широко в СССР только с Международного геофизического года Институтом физики Земли АН СССР. К этому же времени вступили в строй наклономеры с дистанционной регистрацией, разработанные в этом же институте А.Е.Островским.

Вклад русских и советских ученых в развитие теории приливных деформаций тела Земли и связи их с внутренним строением и вращением Земли также весьма существенен. Еще в 1895 г. Хаф в Англии и профессор Московского университета Ф.А. Слудский одновременно и независимо друг от друга показали, что наличие жидкого ядра Земли может вызвать появление свободной нутации земной оси с продолжительностью, близкой к суткам.

Сотрудники Института физики Земли АН СССР путем длительных наблюдений приливных измерений силы тяжести в Центральной Азии доказали влияние отмеченного выше резонанса на волну К₁, а Мельхиор путем анализа наклономерных наблюдений нашел аналогичный эффект [103].

Каждая точка земной поверхности подвержена воздействию двух сил: силы тяготения, обусловленной притяжением всей массы Земли, и центробежной силы, вызываемой вращательным движением Земли. Результирующая этих двух сил является вектором, направленным внутрь Земли. Его длина представляет собой напряженность силы тяжести в рассматриваемой точке. Величина и направление этого вектора не могут, строго говоря, рассматриваться как постоянные, поскольку и Солнце и Луна притягивают эту же точку. Притяжение изменяется во времени вмести с положением обоих небесных тел. Это явление служит причиной океанических приливов, возникающих вследствии того, что свободная поверхность моря постоянно следует за уровневой поверхностью, перпендикулярной к направлению возмущенной отвесной линии.

Около 1876 г. Кельвин обратил внимание на влияние деформаций самой Земли, показав, что Землю нельзя больше рассматривать как абсолютно твердое тело [103]. И с этого времени принимается, что тело Земли деформируется в результате приливов так же, как и океаны, только в меньшей степени.

Кельвин далее показал, что амплитуды каждого явления, обусловленные приливным потенциалом (океанические приливы, уклонение отвесной линии, вариации силы тяжести) и наблюдаемого на поверхности Земли, искажены деформацией земной поверхности, на которой проводятся все наши измерения.

В настоящее время приливной эффект исследуется в гравиметрии, в колебательной структуре реализаций геофизических полей, в записях компонент магнитного поля Земли, в электрическом поле ионосферы и приземного слоя.

Примерно сто лет назад в геомагнитном поле был обнаружен слабовыраженный лунный суточный ход. Этот суточный ход возникает в основном над поверхностью Земли, однако эти «первичные» поля внешнего происхождения индуцируют электрические токи в проводящем теле Земли, отчасти вблизи ее поверхности, где эти токи могут быть зафиксированы и измерены. Анализ записей этих земных токов обнаруживает солнечный и лунный суточные ходы [85]. Магнитные записи содержат также лунную полусуточную компоненту L₂, также и лунно-солнечные компоненты L_n [85].

Важный вклад в развитие теоретических представлений о моделях воздействия приливных сил на электрическое поле ионосферы внес Г.Волланд [104,105]. Термическое и гравитационное воздействие со стороны Луны и Солнца на Землю и ее атмосферу приводит к приливам, наблюдаемым как над океанами, так и в атмосфере.

Атмосферные приливы возникают вследствие изменения атмосферного давления. Исследовалось два типа приливов: солнечные приливы, обусловленные как неоднородным нагревом солнечным излучением, так и гравитационным взаимодействием с Землей; лунные приливы, обусловленные гравитационным взаимодействием Луны с земной атмосферой.

Приливы в земной атмосфере приводят вследствие изменения давления к формированию горизонтальных течений. Известно, что ионосферное динамо возникает вследствие движения нейтрального ветра, увлекающего за собой электроны и ионы через геомагнитное поле. Движение плазмы через магнитное поле создает силу Лоренца $(\vec{V} \times \vec{B}_0)$, где \vec{V} – объемная скорость движения плазмы, \vec{B}_0 - напряженность магнитного поля. Благодаря амбиполярной диффузии электронов и ионов возникает разделение зарядов, которое создает электрическое поле поляризации \vec{E}_s . Под влиянием этого поля и силы Лоренца согласно уравнениям магнитной гидродинамики в динамо области течет электрический ток, который приводит к вариациям магнитного поля, известным как S_q (солнечно-спокойные) и L (лунные) геомагнитные вариации. Кроме того, в динамо области вследствие конечной электрической проводимости возникает горизонтальная разность потенциалов, создающая горизонтальные электрические поля, которые могут проникать на тропосферные высоты.

В настоящее время в России проводятся исследования взаимосвязи приливных явлений с электрическими полями в приземном слое атмосферы в ряде научно-исследовательских институтов и высших учебных заведений: Объединенном институте физики Земли им.О.Ю.Шмидта РАН (ОИФЗ РАН), Институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн(ИЗМИРАН), Иркутском Институте солнечно-земной физики СО РАН (ИСЗФ СО РАН), Главной геофизической обсерватории, Санкт-Петербург(ГГО), Институте космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН(ИКИР ДВО РАН), Камчатском государственном педагогическом университете, Московском государственном университете, Казанском государственном университете, Владимирском государственном университете.

Одно из направлений исследования атмосферных приливов в настоящее время связано с важнейшей ролью приливов в формировании геодинамического режима во всех сейсмоактивных регионах Земли. В работах [106-119] сделан вывод, что энергия и информация из гелиосферного токового слоя передается в литосферу Земли через атмосферные приливы. Долгопериодные приливы наблюдались в спектрах выделившейся сейсмической энергии в районе Камчатского полигона, при этом выделены периоды : 13-14 суток, 2-3 суток [107-108]. В спектрах мощности вариаций геомагнитного поля выделены мощные спектральные максимумы 13-14 и 9 суток. В вариациях электрического поля приземного слоя атмосферы обнаруживается спектральный максимум с периодом 9 суток перед и во время землетрясений.

В работах [109-114] указывается, что естественные электромагнитные шумы атмосферы определяются рядом источников, в том числе и электрическими процессами в атмосфере и магнитосфере. В работе [109] измерения электромагнитных полей проводились с целью поиска в возмущениях атмосферного фона периодической составляющей, возникающей под действием приливных сил. В обзорной статье [112] даны результаты исследования распределения числа землетрясений по фазам вертикальной компоненты приливного воздействия на различных гармониках. Проведенное исследование подтвердило существенную роль неупругого деформационного процесса, развивающегося при продолжительном воздействии, под действием приливных волн 27,55 суток и 13,66 суток по сравнению с более мощными суточными и полусуточными волнами.

По данным наблюдений на Камчатке, где в течение последних лет ведутся регулярные наблюдения квазистатического электрического поля в приземном слое атмосферы, выделены четко гармоники с периодами 8,12,24 часа и 1-5 часа. Отмечено, что наблюдается усиление в вариациях сейсмогравитационных колебаний Земли и одновременно в вариациях давления перед сильными землетрясениями [115-117]. Исследуются приливные вариации в электротеллурическом поле [118]. Таким образом, существует как теоретическая информация о моделях возникновения приливного эффекта в электрическом поле ионосферы, так и экспериментальная информация о наличии значительного приливного эффекта на ионосферных высотах. Экспериментальный и теоретический анализ особенностей воздействия приливного эффекта на электрическое поле в приземном слое атмосферы требует своего развития.

На основании аналитического обзора публикаций можно сформулировать основные проблемы и задачи, возникающие при анализе воздействия приливов на электрическое поле приземного слоя атмосферы: решение задачи проникновения электрического поля, возникающего на уровне ионосферы под действием приливов, в приземный слой атмосферы с учетом бесконечной проводимости земной коры; анализ статистических характеристик вариаций электрического поля приземного слоя атмосферы на больших массивах данных; оценка амплитуд электрического поля на частотах лунно-солнечных приливов; разработка системы мониторинга электрического поля приземного слоя в сети разнесенных в пространстве станций; осуществление длительных регистраций электрического поля в приземном слое атмосферы в сети разнесенных в пространстве на десятки и тысячи километров станций, обеспеченных временной синхронизацией.

Таким образом, в первой главе проанализированы: физические механизмы возбуждения вариаций электрических полей в приземном слое атмосферы, источники вариаций электрических полей в приземном слое атмосферы, условия приема в приземном слое атмосферы; все известные типы приливов: атмосферные приливы, термогравитационные солнечные приливы, гравитационные лунные приливы. Существует как теоретическая информация о моделях возникновения приливного эффекта в электрическом поле ионосферы, так и экспериментальная информация о наличии значительного приливного эффекта на ионосферных высотах. Экспериментальный и теоретический анализ особенностей воздействия приливного эффекта на электрическое поле в приземном слое атмосферы требует своего развития. Есть необходимость в разработке модели проникновения электрического поля, связанного с приливными эффектами, в приземный слой атмосферы с учетом конечной и бесконечной проводимости земной коры и получении оценок амплитуды E_z на частотах приливов по данным такой модели.

Заключение к главе

Проведенная в настоящей главе систематизация механизмов генерации вариаций электрического поля в резонаторе Земля-ионосфера земными и космическими источниками, анализ известных результатов исследований приливов и реальных условий приема в приземном слое атмосферы, позволяет сделать следующие основные выводы и наметить основные задачи исследований:

1. Закономерности поведения атмосферного электричества, а также флуктуаций электромагнитного поля В природа приземном слое атмосферы достаточно хорошо изучены. Установлена взаимосвязь атмосферного электричества с мировой грозовой активностью, а также с сейсмогравитационными колебаниями Земли. Вариации электрического поля в промежутке Земля-ионосфера могут возбуждаться двумя типами Главным естественных источников земными И космическими. _ источником электромагнитной энергии в резонаторе являются грозовые разряды. Средние за год вариации электростатического поля Земли связаны со средними за год суточными вариациями площади мировых грозовых очагов.

2. В колебательной структуре реализаций геофизических полей присутствуют квазирегулярные периодичности различной длительности. Они могут быть поняты как результат воздействий на геофизическую среду таких внешних колебательных процессов, как лунно-солнечные приливы, неравномерность угловой скорости вращения земли, сейсмогравитационные и собственные колебания Земли, вариации солнечной активности и т.д. Одна из причин появления периодичностей – результат воздействия на геофизическую среду таких внешних колебательных процессов как лунносолнечные приливы.

3. В литературе достаточно широко рассматриваются крупномасштабные колебания атмосферы, возникающие в результате а) действия сил притяжения Луны и Солнца и б) теплового воздействия Солнца. Экспериментальные и теоретические закономерности воздействия лунно-солнечных приливных эффектов на ионосферу детально исследованы. Физические механизмы, объясняющие закономерности взаимосвязи электрического поля приземного слоя с приливами исследованы далеко не полно. Не решена задача о распространении возмущений электрического поля, возникающих под действием лунно-солнечных приливов, из ионосферы в нижнюю атмо-

сферу с учетом конечной и бесконечной электрической проводимости земной коры.

4. Экспериментальные исследования воздействия приливных эффектов на электромагнетизм приземного слоя атмосферы связаны с оценками амплитуды спектральных компонент на частотах приливов. Оценка степени воздействия лунно-солнечных приливов на электромагнитные поля в резонаторе Земля-ионосфера при этом играет важную роль. Необходимо провести исследование статистических характеристик анализируемых сигналов. Необходим метод, позволяющий проводить достоверную оценку амплитуды вертикальной составляющей электрического поля приземного слоя на каждой конкретной частоте прилива.

5. Для осуществления достоверной оценки амплитуды вертикальной составляющей электрического поля в приземном слое атмосферы необходима разработка и создание системы мониторинга электрического поля в сети разнесенных в пространстве станций и проведение длительных регистраций электрического поля в приземном слое атмосферы.

6. Сформулирована цель исследований: исследование радиофизическими методами вариаций амплитуды электрического поля приземного слоя атмосферы на частотах лунно-солнечных приливов на основе разработанной радиотехнической системы мониторинга в сети разнесенных в пространстве станций.

Контрольные вопросы

1.Перечислите основные характеристики резонатора Земля-ионосфера.

2.Записать формулу градиента потенциала электрического поля приземного слоя атмосферы и проанализировать связь с грозовой активностью на земном шаре.

3.Взаимосвязь атмосферного электричества с какими геофизическимипроцессами установлена на достоверно?

4.От чего зависит уровень естественных помех ИЗЧ диапазона?

5.Какие источники вариаций электрических полей в приземном слое атмосферы известны?

6.Перечислите известные механизмы возбуждения вариаций электрического поля в приземном слое атмосферы.

7. Какими причинами объясняется характер помеховой обстановки под поверхностью земли?

8.Записать закон изменения вертикальной составляющей напряженности электрического поля в приземном слое от расстояния в КНЧ диапазоне.

9.Что такое «шумановский фон»?

10. Объясните возникновение солнечного прилива в атмосфере Земли.

Библиографические ссылки

- 1. Блиох, П.В. Глобальные электромагнитные резонансы в полости Земля–ионосфера / П.В. Блиох, А.П. Николаенко, Ю.Ф. Филиппов // Наукова думка, Киев, 1977. 199 с.
- 2. Френкель, Я.И. Теория явлений атмосферного электричества / Я.И. Френкель // Л.:Гидрометеоиздат, 1949. – 155 с.
- 3. Тверской, П.Н. Атмосферное электричество / П.Н. Тверской, И.М. Тверской // Л.:Гидрометеоиздат, 1949. 252 с.
- 4. Имянитов, И.М. Электричество свободной атмосферы / И.М. Имянитов, Е.В. Чубарина // Л.:Гидрометеоиздат, 1965. 239 с.
- 5. Имянитов, И.М. Электричество облаков / И.М. Имянитов, Е.В. Чубарина, Я.М. Шварц // Л.:Гидрометеоиздат, 1971. 91 с.
- 6. Красногорская, Н.В. Электричество нижних слоев атмосферы и методы его измерения / Н.В. Красногорская // Л.: Гидрометеоиздат, 1972. –323с.
- Морозов, В.Н. Модели глобальной атмосферно–электрической цепи / В.Н. Морозов // Гидрометеоролгия. Сер. Метеорология. Обзорная информация Обнинск: ВНИГМИ МЦД, 1981, Вып. 8. – 57 с.
- 8. Чалмерс, Дж.А. Атмосферное электричество / Дж.А. Чалмерс // Л.:Гидрометеоиздат, 1974. 420 с.
- 9. Матвеев, Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы / Л.Т. Матвеев // Л.:Гидрометеоиздат, 1984. 751 с.
- 10. Israel N., Atmospheric Electricity V. 1. 2 // Jerusalem, Israel Program for Scientific Translations, 1973. 316 p.
- Лободин, Т.В. Результаты атмосферно–электрических измерений над океанами и в Антарктиде / Т.В. Лободин // Метеорологические исследования. Метеорология. – 1963. – № 5. – С. 89 – 99.
- Имянитов, И.М. Сравнительные атмосферно–электрические измерения в свободной атмосфере над Арктикой / И.М. Имянитов, Ю.Ф. Пономарева, Е.В. Чубарина // Труды ГГО, 1980. Вып. 401. С. 83 90.
- Кочев, А.А. Прямые одновременные измерения концентрации ионов, электрической проводимости и вертикальной составляющей напряженности электрического поля атмосферы на высотах 0–85 км / А.А. Кочев, Л.К. Смирных, А.А. Тютин // Космические исследования. – 1976 – Т. 14 – Вып.1. – С. 148 – 151.
- Maynard N.C., Grockey C.I., Mitchell J.D., Hale L.C., Measurement of voltmeter vertical electric fields in the middle atmosphere // Geophys. Res. Lett, 1981. - V.8. - P. 923 - 926.
- Парамонов, Н.А. О годовом ходе градиента атмосферного электрического потенциала / Н.А. Парамонов // ДАН СССР, 1950. Т. 71. № 1. С. 120 136.
- Schonland B.F.J., Atmospheric electricity // Methuen, London, 1932. P. 100.
- 17. Марксон, Р. Атмосферное электричество и проблема связи между солнечной активностью и погодой / Р. Марксон // Солнечно земные связи, погода и климат. М.: Мир, 1982. С. 242 264.
- 18. Wilson C.T.R., Investigations on lightning discharges and on the electric field of thunderstorms // Phil. Trans. A, 221. 1920. P.73 115.
- Парамонов, Н.А. Унитарная вариация градиента потенциала электрического поля атмосферы / Н.А. Парамонов // ДАН СССР, 1950. Т. 70, №1. – С. 37 – 38.
- 20. Brawn J.G., The local variation of the earth's electric field // Terr. Magn. Atmos. Elect. 41, 1935, P. 85 279.
- 21. Israel H., The atmospheric electric field and its meteorological causes // Thunderstorm Electricity, 1953. P. 4 23.
- 22. Kawano M., The influence of vertical distribution of the nuclei content on the vertical distribution of the air resistivity in exchange layer // J. Met. Soc., Japan 36, 1958. P. 67 72.
- 23. Nichols E.H., Investigation of atmospheric electrical variations at sunrise and sunset // Proc. Roy. Soc. A, 92. 1916. P. 8 401.
- 24. Holzer R.E., A program of simultaneous measurement of air earth current density // Wentworth Conf., 1995. P. 96 100.
- 25. Kasemir H.W., Zur Stromungstheorie des luftelekrishen Felds III // Der Austauschgenerotor, Arch. Met. Wien A, 9. 1956. P. 70 357.
- 26. Wait Y.R., Earth–ionosphere cavity resonances and the propagation of ELF radiowaves // Radio Sci., V. 69 D. 1965. P. 1057 1070.
- 27. Семенов, А.С. Электроразведка методом естественного электрического поля / А.С. Семенов // Л.: Недра, 1968. – 379 с.

- 28. Бернстайн, С. Дальная связь на крайненизких частотах / С. Бернстайн, М. Барроуз // ТИИЭР, 1974, Т. 62. С. 5 19.
- 29. Кашпровский, В.Е. Распространение средних радиоволн земным лучом / В.Е. Кашпровский, Ф.А. Кузубов // М.:Связь, 1971. 220с.
- 30. Краснушкин, П.Е. Теория распространения сверхдлинных волн / П.Е. Краснушкин, Н.А. Яблочкин // М.: АН СССР, 1963. 81 с.
- 31. Юман, М. Молния. / М. Юман // Пер. с англ., под ред. Н.В. Красногорской, М:Мир, 1972. – 327 с.
- 32. Wait A.D., VLE Radio Engineering // Pergaman Press, 1967. P. 701.
- 33. Александров, М.С. Флуктуации электромагнитного поля Земли в диапазоне СНЧ / М.С. Александров [и др.] // М: Наука, 1972. 195 с.
- 34. Колоколов, В.П. К происхождению электрического поля Земли / В.П. Колоколов // Труды главной геофизической обсерватории, 1974. –вып. 301. – С.10 – 17.
- 35. Парамонов, Н.А. Выделение глобального суточного хода градиента потенциала электрического поля в атмосфере / Н.А. Парамонов // Метеорология и Гидрология. 1971. №12. С. 89 91.
- 36. Колоколов, В.П. О характеристиках глобального распределения грозовой деятельности / В.П. Колоколов // Метеорология и Гидрология. – 1961. – №11. – С. 47 – 55.
- 37. Блиох, П.В. О снятии вырождения в сферическом резонаторе Земля–ионосфера / П.В. Блиох, В.Н. Бормотов // Препринт. ИРЭ АН УССР. Харьков, 1971. №10. 53 с.
- 38. Soderberg E.F., ELF noise in the sea at depths from 30 to 300 meters. // J.Geophus. Res., V. 74. – May 1. – 1969. – P. 2378 – 2387.
- 39. Степаненко, В.Д. Радиотехнические методы исследования гроз / В.Д. Степаненко, С.М. Гальперин // Л.:Гидрометеоиздат, 1983. 204с.
- 40. Лоч, Б.Р. Плотность молниевых разрядов в очагах атмосфериков / Б.Р. Лоч // Труды Главной геофизической обсерватории, 1972. вып. 277. С. 54 59.
- 41. Справочник по геофизике // М.: Наука, 1968. 463 с.
- 42. Morgan W.J., Stoner J.O., Dicke R.H., Periodicity of earthquakes and the invariance of the gravitational constant // J. Geophys. Res. 1961. V. 66. № 11. P. 73 125.
- 43. Rycroft M.Y. and Woumell T.W., The natural ELE electromagnetic noise in the band. 2–40 c/s; apparatus and some preliminary results // Propagation of Radio Waves Frequencies below 300 kc/s, Oxford–London–NY– Paris, 1964, P. 421 – 434.

- 44. Ogawa T., Tanaka Y., Miura T., Yausuhava M., Observations of Natural ELF and VLF Electromagnetic Noises by Using Ball Antennas // Y. Geomag., Geoelectr., 1966, 18, №4, P. 443 454.
- 45. Гульельми, А.В. К теории индукционного сейсмомагнитного эффекта / А.В. Гульельми, В.Ф. Рубан // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1990. № 5. С. 47 54.
- 46. Гульельми, А.В. Электромагнитный импульс из очага землетрясения
 / А.В. Гульельми, В.Т. Левшенко // Докл. РАН, 1996. Т. 349. № 5. С. 676 678.
- 47. Гульельми, А.В. Электромагнитный сигнал из очага землетрясения / А.В. Гульельми, В.Т. Левшенко // Физика Земли. 1997. № 9. С. 22 30.
- 48. Gulielmi A., Elastomagnetic waves in a porous medium // Physica Scripta, 1992. – V. 46.– P. 433 – 434.
- 49. Eleman F., The response of magnetic instruments to earth–quake waves // J. Geomag. Geoelectr., 1966. V. 16.– № 1. P. 43 72.
- Белов, С.В. Магнитный эффект сильных землетрясений на Камчатке
 / С.В. Белов, Н.И. Мигунов, Г.А. Соболев // Геомагнетизм и астрономия. 1974. Т. 14. №3. С. 380 382.
- 51. Lyemori T., Kamei T., Tanaka Y., Takeda M., Hashimoto T., Araki T., Okamoto T., Watanabe K., Sumitomo N., Oshiman N., Co-seismic geomagnetic variations observed at the 1995 Hyogoken–Nanbu earthquake // J. Geomag. Geoelectr., 1996. – V. 48. – P. 1059 – 1070.
- 52. Петрова, Л.Н. / Л.Н. Петрова // Биофизика, 1992.– Т.37. №3.– С. 508.
- 53. Линьков, Е.М. / Е.М. Линьков, С.Я. Типисев // Геофизическая аппаратура. Л.: Изд-во Ленинград. ун-та, 1980. Вып. 28. С. 229.
- 54. Петрова, Л.Н. Динамические особенности сейсмогравитационных колебаний Земли / Л.Н. Петрова, В.А. Волков // Доклады АН, Геофизика, 1996. Т.351. №5. С. 683 686.
- Линьков, Е.М. Исследование длиннопериодных сейсмических волн / Е.М. Линьков, Л.Н. Петрова // Минск: Наука и техника, 1976. – С. 51 – 57.
- 56. Петрова, Л.Н. / Л.Н. Петрова, Е.М. Линьков, Д.Д. Зурошвили // Вести ЛГУ. Сер. 4. 1988. В. 4. № 25. С. 21 26.
- 57. Линьков, Е.М. / Е.М. Линьков, Л.Н. Петрова, К.С. Осипов // ДАН, 1990. Т. 313. № 5. С. 1095 1098.

- 58. Петрова, Л.Н. Корреляции, спектральный составов и характер взаимодействия сейсмического и атмосферного геофизических полей в диапазоне периодов 1 – 4 часа / Л.Н. Петрова // Биофизика, 1955. – Т. 40. – Вып. 4. – С. 911 – 915.
- 59. Пекерис, Х.Л. Собственные колебания Земли / Х.Л. Пекерис, З. Альтерман, Х. Ярошин // Сборник под ред. В.Н. Хвиритова. М.: Мир, 1964. 280 с.
- Петрова, Л.Н. Сейсмогравитационные пульсации и их связь с сильными землетрясениями / Л.Н. Петрова [и др.] // Труды конференции «Фундаментальные проблемы физики». Саратов, 2000. С. 145 146.
- 61. Копытенко, Ю.А. Обнаружение ультранизкочастотных излучений, связанных со Спитакским землетрясением и его афтершоковой активностью, по данным наблюдений геомагнитных пульсаций на обсерваториях Душети и Вардзия / Ю.А. Копытенко, Т.Г. Матиашвили, П.М. Воронов // Препринт ИЗМИРАН, 1990. 25 с.
- 62. Hayakawa M., Kawate R., Molchanov O.A., Yumoto K., Results of ULF magnetic field measurements during the Guam earthquake of 8 August 1993 // Geophys. Res. Lett., 1996. V.23. № 3. P. 241 244.
- Dea J.Y., Boerner W.M., Observations of anomalous ULF signals preceding the Northidge earthquake of January 17, 1994 // Atmospheric and Ionosphere Phenomena Associated with Earthquakes / Ed. Hayakawa M. Tokyo: Terra Scientific Publishing Company (TERRAPUB), 1994. P. 1465 1468.
- 64. Сурков, В.В. О природе УНЧ электромагнитного шума, предваряющего некоторые землетрясения. / В.В. Сурков // Физика Земли. Наука. – 2000. – № 12. – С. 61 – 66.
- 65. Гульельми, А.В. Электромагнитные сигналы от землетрясений / А.В.
 Гульельми, В.Т. Левшенко // Физика Земли. 1994. № 5. С. 65 70.
- 66. Гульельми, А.В. О наблюдении сейсмоэлектромагнитных сигналов / А.В. Гульельми, В.Т. Левшенко, В.Ф. Рубан // Физика Земли. 1999. № 4. С. 91 93.
- 67. Церфас, К.А. Явления атмосферного электричества, предшествующие землетрясениям / К.А. Церфас // Ташкентское землетрясение 26.04.1966г., Ташкент: ФАН, 1971. С. 184 187.

- 68. Моргунов, В.А. К природе литосферно ионосферных связей / В.А. Моргунов // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1988. №5. С. 80 87.
- 69. Иманкулов, А.Ч. Измерение напряженности электрического поля атмосферы во время землетрясения 27.10.1984г. в Таджикской ССР / А.Ч. Иманкулов, В.И. Струменский, Н.А. Непеин // Атмосферное электричество: Тр.3 Всес.симп., Л.: Гидрометеоиздат, 1988. – С. 33 – 37.
- 70. Электромагнитные предвестники землетрясений / Отв.ред. М.А. Садовский // М.: Наука, 1982 – 88 с.
- 71. Крылов, С.М. О сверхнизкочастотном электромагнитном излучении литосферного происхождения / С.М. Крылов, В.Т. Левшенко // Докл. АН СССР, 1990. Т.311, № 3. С. 579 582.
- Гохберг, М.Б. Современное состояние исследований электромагнитных предвестников землетрясений / М.Б. Гохберг, И.Л. Гуфельд, В.А. Линеровский // Дискретные свойства геофизической среды. М.,1989. – С. 97 – 109.
- 73. Гохберг, М.Б. Поиск электромагнитных предвестников землетрясений / М.Б. Гохберг // М.: ИФЗ АН СССР, 1988.– 244с.
- 74. Гохберг, М.Б. Сейсмоэлектромагнитные явления / М.Б. Гохберг, В.А. Моргунов, О.А. Похотелов // М.: Наука, 1988. 174 с.
- 75. Левшенко, В.Т. Результаты и перспективы исследований сверхнизкочастотных литосферных электромагнитных сигналов / В.Т. Левшенко // Физика Земли. – 1998. – № 11. – С. 82 – 85.
- 76. Моргунов, В.А. Электрические и электромагнитные эффекты в эпицентральной зоне афтершоков Спитакского землетрясения / В.А. Моргунов, И.В. Матвеев // Изв.АН СССР. Физика Земли. 1991. № 11. С. 124 128.
- 77. Моргунов, В.А. Электромагнитное излучение на афтершоках Спитакского землетрясения / В.А. Моргунов, И.В. Матвеев // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1990. № 6. С. 14 19.
- Jones D.Li., Extremely Low Frequency (ELF) Ionospheric Radio Propagation Studies Using Natural Sources // IEEE Trans. 1974. Com 22. № 4. P. 447 483.
- 79. Гульельми, А.В. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы / А.В. Гульельми, В.А. Троицкая // Наука, 1973. – 540 с.
- 80. Троицкая, В.А. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы / В.А. Троицкая, А.В. Гульельми // УФН. 1969. 97. № 3. 453 с.

- 81. Николаенко, А.П. Об особенностях спектра СНЧ–шумов при возбуждении резонатора Земля–ионосфера из космоса / А.П. Николаенко // Геомагн. и аэрон., . –1972. – 12. – № 3. – С. 458 – 463.
- 82. Flemming R.A., Investigation into Origin of an ELF Descrete Signals // JATP, 1973. 35. P. 187 189.
- 83. Гульельми, А.В. Нелинейное взаимодействие гидромагнитных волн / А.В. Гульельми // Геомагн. и аэрон. . 1971. 11. № 3. С. 358 360.
- 84. Frandsen A.M.A., Holzer R.E., Smith E.J., OGO Search Coil Magnetometer Experiments // IEEE Trans., 1969. CE 7. № 2. P. 61 73.
- 85. Чепмен, С. Атмосферные приливы / С. Чепмен, Р. Линдзен // М.: «Мир», 1972. 285 с.
- 86. Ньютон, И. Математические начала натуральной философии / И. Ньютон // Пер. с лат. А.Н.Крылова, под ред. Л.С.Полака. М.: Наука, 1989. – 687 с.
- 87. Sen H. K., White M.L., Thermal and gravitational excitation of atmospheric oscillations // J. Geophys. Res.60, 1955. C. 483 495.
- Siebert M., Analyse des Jahresganges der 1/n tägigen Variationen des Luftdruckes und der Temperatur, Nachr. Akad. Wiss. // Göttingen Math. – phys. K1, 1956. – №6. – C. 127 – 144.
- 89. Siebert M., Atmospheric tides, in Advances in Geophysics, vol. 7 // Academic Press, New York, 1961. P. 105 182.
- Lindzen R. S., Thermally driven diurnal tide in the atmosphere // Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 1967. – 93. – C. 18 – 42.
- 91. Eisenlohr O., Untersuchungen über das Klima von Paris und über die vom Monde bewirkte atmosphärische Ebbe und Fluth, Pogg. Ann. Phys // Chemie, 1843. – 60. – C. 161 – 212.
- 92. Sabine E., On the lunar atmospheric tide at St. Helena // Phil. Trans. Roy. Soc. London, 1847. 137. C. 45 50.
- 93. Bergsma P.A., Lunar Atmospheric Tide // Obsns. Magn. Meteor. Obs. Batavia, 1871. – 1. – C. 19 – 25.
- 94. Chapman S., The lunar atmospheric tide at Greenwich // Quart. J. Roy. Meteorol, 1918. Soc. 44. P. 271 280.
- 95. Коропоткин, П.Н. Сезонная периодичность землетрясений и принцип Ньютона–Маха / П.Н. Коропоткин, А.Е. Люстих // Докл. АН СССР, 1974. – Т. 217. – № 5. – С. 1061 – 1064.
- 96. Гамбурцев, А.Г. Сейсмический мониторинг литосферы / А.Г. Гамбурцев // М.: Наука, 1992. –200 с.

- 97. Журавлев, В.И. Результаты спектрального анализа сейсмической активности Гармского района / В.И. Журавлев // Прогноз землетрясений. Душанбе: Дониш, 1982. – С. 409 – 423.
- 98. Лукк, А.А. Анализ временных рядов параметров реконструируемого напряженно–деформированного состояния земной коры Гармского района / А.А. Лукк // Комплексные исследования по прогнозу землетрясений. М.: Наука, 1991. – С. 51 – 69.
- 99. Нерсесов, И.Л. Закономерности временных изменений некоторых геофизических полей / И.Л. Нерсесов [и др.] // Докл. АН СССР, 1986. -Т. 286. – № 1. – С. 77 – 79.
- 100. Атлас временных вариаций природных процессов // Порядок и хаос в литосфере и других сферах // Отв. ред. А.В. Николаев, А.Г. Гамбурцев. ОИФЗ РАН, 1994. – 176 с.
- 101. Дещеревский, А.В. Скрытые периодичности и фликкер–шум в электротеллурическом поле / А.В. Дещеревский, А.Я. Сидорин // Объединенный институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта. РАН. Москва, 1997. – С. 56 – 67.
- 102. Темурянц, Н.А. Сверхнизкочастотные электромагнитные сигналы в биологическом мире / Н.А. Темурянц, Б.М. Владимирский, О.Г. Тишкин // Киев: Наукова Думка, 1992. – 188 с.
- 103. Мельхиор, П. Земные приливы / П. Мельхиор // М.: «Мир», 1968. 482 с.
- 104. Volland H., Atmospheric Electrodynamics // Berlin, 1984. 205 p.
- 105. Volland H., Global, Quasi-Static Electric Field in the Earth's Environment – in: Electrical Processes in Atmosphere // Steinkopff Darmstadt, 1977. – P. 509 – 528.
- 106. Бузевич, А.В. Связь вариаций геомагнитного и атмосферного электрического поля Земли с сейсмической активностью на фоне атмосферных процессов / А.В. Бузевич [и др.] // Труды Пятой Российской конференции по атмосферному электричеству. – Владимир, 2003 – С. 72 – 75.
- 107. Михайлов, Ю.М. Вариации различных атмосферно-ионосферных параметров в периоды подготовки землетрясений на Камчатке: предварительные результаты / Ю.М. Михайлов [и др.] // Геомагнетизм и аэрономия. – 2002. – Т.42. N.6. – С. 805 – 813.
- 108. Руленко, О.П. Оперативные предвестники землетрясений в электричестве приземной атмосферы / О.П. Руленко // Вулканология и сейсмология. – 2000. – №4. – С. 57 – 68.

- 109. Моргунов, В.А. Вариации интенсивности электромагнитных шумов атмосферы в цикле солнечной активности / В.А. Моргунов, М.В. Степанов // Труды Пятой Российской конференции по атмосферному электричеству. – Владимир, 2003. – С. 61 – 64.
- 110. Моргунов, В.А. Пространственные неоднородности электрического поля как фактор лито-ионосферных связей / В.А. Моргунов // «Электрическое взаимодействие геосферных оболочек». Сб. ст. ред. Моргунов В.А., Троицкая В.А., Анисимов С.В. Москва, ИФЗ РАН, 2000. – С. 106 – 113.
- Моргунов, В.А. Электрические явления, предшествующие Шикотанскому землетрясению и его афтершокам / В.А. Моргунов // ДАН, 1998, т. 359, № 1. – С. 102 – 105.
- 112. Моргунов, В.А. Землетрясения и фазы прилива / В.А. Моргунов, Э.А. Боярский, М.В. Степанов // Физика Земли. 2005. С. 74 88.
- 113. Авсюк, Ю.Н. Приливные силы и природные процессы / Ю.Н. Авсюк // М.: ОИФЗ РАН, 1966. 188 с.
- 114. Моргунов, В.А. Реальности прогноза землетрясений / В.А. Моргунов // Физика Земли. 1999. №1. С. 79 91.
- 115. Михайлов, Ю.М. Обнаружение атмосферных волн литосферной природы в спектрах мощности электрического поля приземной атмосферы / Ю.М. Михайлов, Г.А. Михайлова, А.В. Бузевич // Труды Пятой Российской конференции по атмосферному электричеству. – Владимир, 2003. – С. 77 – 79.
- 116. Михайлов, Ю.М. Вариации различных атмосферно-ионосферных параметров в периоды подготовки землетрясений на Камчатке: предварительные результаты / Ю.М. Михайлов [и др.] // Геомагнетизм и аэрономия. – 2002. – Т.42. N.6. – С. 805 – 813.
- 117. Смирнов, С.Э. Аномалии поведения напряженности электрического поля перед землетрясениями по наблюдениям магнитной обсерватории Паратунка за 1997–2000 годы / С.Э. Смирнов // Солнечно– земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений: Тез.докл. II междунар. совещ. в с.Паратунка Камчатской обл., 2001 / Ред. Ю.С.Шумилов, Г.И.Дружин.Петропавловск–Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2001,С.48-49.
 - 118. Кролевец, А.Н. Приливные составляющие в электротеллурическом поле / А.Н. Кролевец, Г.Н.Копылова // Физика Земли. – 2003. –№ 5.– С.75–84.

Глава 2. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

Проанализирована модель проникновения электрического поля, возникающего на уровне ионосферы под действием лунно-солнечных приливов, в приземный слой атмосферы с учетом конечной и бесконечной проводимости земной коры. Даны теоретические оценки воздействия приливных сил на вертикальную составляющую электрического поля приземного слоя атмосферы, подтвержденные в ходе экспериментальных исследований.

2.1. Влияние лунно-солнечных приливов на электрическое полеприземного слоя атмосферы (E_z)

Рассмотрим задачу о проникновении электрических ионосферных полей, обусловленных приливными процессами, в тропосферу [8].

Расчеты электрических полей, проникающих из ионосферы в тропосферу, основываются на следующих уравнениях:

$$d\,i\,v\bar{j}=0,\quad \vec{j}=\lambda\vec{E},\quad \vec{E}=-grad\,\,\varphi,$$
(2.1)

где j - плотность тока проводимости, λ - электрическая проводимость атмосферы, \vec{E} - напряженность электрического поля, ϕ - потенциал электрического поля.

Поскольку для солнечных и лунных приливов характерные частоты $\omega \sim 10^{-5}$ с⁻¹, то использование стационарных уравнений (2.1) для расчета электрических полей, проникающих из ионосферы в тропосферу, оправдано. Условие этого перехода имеет следующий вид:

$$\omega \ll c/L$$
, $\omega \ll c^2/4\pi\lambda L^2$, $\omega \ll 4\pi\lambda$, (2.2)

где: L – характерные размеры системы, с – скорость света. Первое условие означает пренебрежение запаздыванием в уравнениях электродинамики, второе условие- пренебрежение токами индукции и третье – пренебрежение токами смещения.

Рассмотрим переход от системы уравнений Максвелла к квазистационарному случаю.

$$rot\vec{H} = \frac{4\pi\vec{j}}{c} + \frac{1}{c}\frac{\partial\vec{E}}{\partial t}, \quad div\vec{E} = 4\pi\rho$$
(2.3)

$$di \nu \mu \vec{H} = 0, \quad rot \vec{E} = -\frac{1}{c} \mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t},$$
 (2.4)

где \vec{H}, \vec{E} - напряженность магнитного и электрического полей, ρ - плотность электрического заряда, μ, ε -магнитная диэлектрическая проницаемости атмосферы.

Далее полагаем $\mu = 1$, $\varepsilon = 1$. Из первого и второго уравнений получим:

$$\vec{H} = rot\vec{A}, \quad \vec{E} = -grad\varphi - \frac{1}{c}\frac{\partial\vec{A}}{\partial t},$$
(2.5)

где *A*-векторный потенциал магнитного поля, *φ*-потенциал электрического поля.

Далее полагаем $\vec{j} = \lambda(z)\vec{E}$, где \vec{j} -плотность электрического тока, $\lambda(z)$ электрическая проводимость атмосферы. Подставим (2.5) в уравнение для *rot* \vec{H} . В результате получим уравнение:

$$rotrot\vec{A} = -\frac{4\pi}{c}\lambda(z)(grad\varphi + \frac{1}{c}\frac{\partial\vec{A}}{\partial t}) - \frac{1}{c}\frac{\partial}{\partial t}(grad\varphi + \frac{1}{c}\frac{\partial\vec{A}}{\partial t})$$
(2.6)

Используя равенство:

$$rotrot\vec{A} = graddiv\vec{A} - \nabla^2 \vec{A}$$
,

где:
$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$
, получим вместо (2.6):
 $-\nabla^2 \vec{A} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} + grad(div\vec{A} + \frac{1}{c} \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{4\pi\lambda}{c} \varphi) - \frac{4\pi}{c} \varphi grad\lambda + \frac{4\pi\lambda}{c^2} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = 0$ (2.7)

Для второго уравнения (2.3): $div\vec{E} = 4\pi\rho$ имеем:

$$\nabla^2 \varphi + \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} di v \vec{A} = -4\pi\rho.$$
(2.8)

Пусть
$$\vec{A} = (A_x, A_y, A_z)$$
 и grad $\lambda = \frac{\partial \lambda}{\partial z} \vec{e}_z$, выпишем уравнение (2.7) для

компонентов векторного потенциала

$$-\nabla^{2}A_{x} + \frac{1}{c^{2}}\frac{\partial^{2}A_{x}}{\partial t^{2}} + \frac{\partial}{\partial x}(div\vec{A} + \frac{1}{c}\frac{\partial\varphi}{\partial t} + \frac{4\pi\lambda\varphi}{c}) + \frac{4\pi\lambda}{c^{2}}\frac{\partial A_{x}}{\partial t} = 0 ,$$

$$-\nabla^{2}A_{y} + \frac{1}{c^{2}}\frac{\partial^{2}A_{y}}{\partial t^{2}} + \frac{\partial}{\partial y}(div\vec{A} + \frac{1}{c}\frac{\partial\varphi}{\partial t} + \frac{4\pi\lambda\varphi}{c}) + \frac{4\pi\lambda}{c^{2}}\frac{\partial A_{y}}{\partial t} = 0 , \qquad (2.9)$$

$$-\nabla^2 A_z + \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 A_z}{\partial t^2} + \frac{\partial}{\partial z} (div\vec{A} + \frac{1}{c} \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \frac{4\pi\lambda\varphi}{c}) - \frac{4\pi}{c} \varphi \frac{\partial \lambda}{\partial z} + \frac{4\pi\lambda}{c^2} \frac{\partial A_z}{\partial t} = 0 .$$

Введем условие Лоренца:

$$div\vec{A} + \frac{1}{c}\frac{\partial\varphi}{\partial t} + \frac{4\pi\lambda\varphi}{c} = 0, \qquad (2.10)$$

тогда вместо (2.8) и (2.9) получим:

$$-\nabla^{2}A_{x} + \frac{1}{c^{2}}\frac{\partial^{2}A_{x}}{\partial t^{2}} + \frac{4\pi\lambda}{c^{2}}\frac{\partial A_{x}}{\partial t} = 0 ,$$

$$-\nabla^{2}A_{y} + \frac{1}{c^{2}}\frac{\partial^{2}A_{y}}{\partial t^{2}} + \frac{4\pi\lambda}{c^{2}}\frac{\partial A_{y}}{\partial t} = 0 ,$$

$$-\nabla^{2}A_{z} + \frac{1}{c^{2}}\frac{\partial^{2}A_{z}}{\partial t^{2}} + \frac{4\pi\lambda}{c^{2}}\frac{\partial A_{z}}{\partial t} - \frac{4\pi}{c}\varphi\frac{\partial\lambda}{\partial z} = 0 ,$$

$$\nabla^{2}\varphi - \frac{1}{c^{2}}\frac{\partial^{2}\varphi}{\partial t^{2}} - \frac{4\pi\lambda}{c^{2}}\frac{\partial\varphi}{\partial t} = 4\pi\rho .$$

(2.11)

Введем гармоническое изменение А и φ :

$$A \approx e^{i\omega t}$$
, $\varphi \approx e^{i\omega t}$, $i = \sqrt{-1}$. (2.12)

Тогда для (2.11) получим:

$$-\nabla^{2}\overline{A}_{x} - \frac{\omega^{2}}{c^{2}}\overline{A}_{x} + \frac{4\pi\lambda i\omega}{c^{2}}\overline{A}_{x} = 0 ,$$

$$-\nabla^{2}\overline{A}_{y} - \frac{\omega^{2}}{c^{2}}\overline{A}_{y} + \frac{4\pi\lambda i\omega}{c^{2}}\overline{A}_{y} = 0 ,$$

$$-\nabla^{2}\overline{A}_{z} - \frac{\omega^{2}}{c^{2}}\overline{A}_{z} + \frac{4\pi\lambda i\omega}{c^{2}}\overline{A}_{z} - \frac{4\pi}{c}\varphi\frac{\partial\lambda}{\partial z} = 0 ,$$

$$-\nabla^{2}\overline{\varphi} + \frac{\omega^{2}}{c^{2}}\overline{\varphi} - \frac{4\pi\lambda i\omega}{c^{2}}\varphi = 4\pi\rho .$$

$$(2.13)$$

Условие Лоренца преобразуем к виду:

$$div\overline{\vec{A}} + \frac{1}{c}i\omega\overline{\phi} + \frac{4\pi\lambda\overline{\phi}}{c} = 0.$$
 (2.14)

Из (2.14) выражение для ф, получим:

$$\varphi = \frac{c di v \vec{A}}{i \omega + 4\pi \lambda}.$$
(2.15)

Используя (2.15) преобразуем уравнение для А_z к следующему виду:

$$-\nabla^{2}\overline{A}_{z} - \frac{\omega^{2}}{c^{2}}\overline{A}_{z} + \frac{4\pi\lambda i\omega}{c^{2}}\overline{A}_{z} - \frac{4\pi div\overline{A}}{i\omega + 4\pi\lambda}\frac{\partial\lambda}{\partial z} = 0.$$
(2.16)

Сделаем порядковые оценки членов, входящих в уравнение для ϕ системы (2.13):

$$\nabla^2 \varphi \approx \frac{\varphi}{L^2} \,. \tag{2.17}$$

Этот член превосходит второй и третий члены при выполнении условий:

$$\frac{\varphi}{L^2} \gg \frac{\omega^2}{c^2} \varphi \quad , \quad \frac{\varphi}{L^2} \gg \frac{4\pi \overline{\lambda} \omega}{c^2} \varphi \quad , \tag{2.18}$$

откуда получим ограничение на частоту:

$$\omega \ll \frac{c}{L}$$
 , $\omega \ll \frac{c^2}{4\pi \overline{\lambda} L^2}$, (2.19)

где L – характерный размер системы, λ – характерное значение электрической проводимости (можно взять на уровне ионосферы, т.е. при z = 70-80 км). Первое условие (2.18) означает пренебрежение запаздывания в уравнениях Максвелла, а второе - пренебрежение индукционными токами.

Условия (2.19) означают, что для расчета электрических полей возможно в нашей задаче представление $E = -grad \varphi$, а поскольку величина ρ не задается, а является результатом решения самосогласованной токовой задачи, то для расчета нужно использовать уравнение, следующее из уравнения для rot \vec{H} , если взять от него div:

$$div(\lambda E + \frac{1}{4\pi} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}) = 0, \qquad (2.20)$$

если $E \approx e^{i\omega t}$, то из (2.20) следует:

$$div(\lambda E + \frac{i\omega}{4\pi}E) = 0.$$
(2.21)

Токами смещения можно пренебречь, если $\omega << 4\pi\lambda$ и из (2.21) получим

$$div(\lambda E) = 0, \quad E = -grad\varphi \quad .$$
 (2.22)

Уравнение (2.22) определяет распределение токов и полей при заданной λ в нашей квазистационарной задаче.

2.2. Электрическая структура приземного слоя атмосферы

При исследовании взаимодействия лунно-солнечных приливов с электромагнитным полем в земной атмосфере важное значение имеют задачи об ионном составе атмосферы и задача об электрической структуре приземного слоя атмосферы. Эти две задачи определяют распределение электрической проводимости и напряженности электрического поля в атмосфере с высотой.

Ионный состав нижней атмосферы довольно сложен. Легкие ионы, имеющие подвижность: $b_+ = 1,36 \ cm^2 / B \cdot c$, $|b_-| = 1,56 \ cm^2 / B \cdot c$ [1,2] представляют собой заряженные молекулярные кластеры, существенное влияние на образование которых оказывает водяной пар, содержащийся в атмосфере.

Примерами легких ионов являются следующие: $H_3O^+(H_2O)_n$, $H^+(H_2O)_n$, $O^-(H_2O)_n$, $CO_4^-(H_2O)_n$, где n=4–8. Для сравнения подвижность электронов равна $|b_e| = 7 \cdot 10^2 c M^2 / B \cdot c$, т.е. почти в 500 раз больше подвижности легких ионов. Подвижность легких ионов зависит от давления P(z) и температуры атмосферы T(z) и определяется выражением [4]:

$$b_{\pm} = b_{\pm}^{0} \cdot \frac{P(0)}{P(z)} \cdot \frac{T(z)}{T_{0}}, \qquad (2.23)$$

где P(0) = 1013 мбар, $T_0 = 273^{\circ} K$.

Схема образования легких ионов следующая: галактические космические лучи ионизируют молекулы кислорода и азота. Возникающие электроны присоединяются за время $10^{-7} c$ к нейтральным молекулам и создают отрицательные ионы. Затем отрицательные и положительные ионы, взаимодействуя с молекулами H₂O образуют молекулярные кластеры – легкие ионы за несколько микросекунд.

Легкие ионы рекомбинируют друг с другом и присоединяются к аэрозольным частицам, образуя долгоживущие малоподвижные большие ионы (аэрозольные ионы). В стационарных условиях и при равных концентрациях положительных и отрицательных ионов, концентрация находится из уравнения баланса:

$$\frac{dn_{+}}{dt} = 0 = q - \alpha n_{+}^{2} - \beta n_{+} Z, \qquad (2.24)$$

где q – интенсивность ионообразования, α – коэффициент рекомбинации, β – коэффициент присоединения легких ионов к аэрозольным частицам, Z – концентрация аэрозольных частиц.

Наряду с ионизацией галактическими и космическими лучами, которые дают $q = 10^6 \, m^{-3} \cdot c^{-1}$ на уровне моря и $q = (4-5) \cdot 10^7 \, m^{-3} \cdot c^{-1}$ в умеренных широтах на высоте 15 км, важную роль могут играть радиоактивные газы, выделяющиеся из земной коры. В частности, газ радон может давать вблизи земной поверхности $q = 10^7 \, m^{-3} c^{-1}$. Его действие может простираться до высоты ~100м.

Таблицы 3 и 4 составлены по данным, взятым из статьи Брикара [2], показывают сложность определения ионного состава атмосферы.

В работе [1] вводятся также конденсационные ионы, которые возникают при конденсации различных микропримесей воздуха на отрицательные и положительные ионы. Их подвижности находятся в интервале $0,3-0,5 \ cm^2 / B \cdot c$.

Электрическая проводимость в атмосфере определяется выражением:

$$\lambda = \lambda_{+} + \lambda_{-} = en_{+}b_{+} + e|b_{-}|n_{-}.$$
(2.25)

Для высот, лежащих выше приземного слоя, часто используется следующее представление для λ [4]:

$$\lambda = \lambda_0 e^{\alpha Z}, \qquad (2.26)$$

где $\alpha = (0, 2 - 0, 3) \kappa M^{-1}$.

Таблица 3

1		
Ионы	Подвижность	Размеры [<i>см</i>], R
	$[cM^2 / B \cdot c]$	
Легкие	$1,0 > b_{+} > 0,01$	$6,6 \cdot 10^{-8} < R < 7,8 \cdot 10^{-8}$
Средние	$0,01 > b_{+} > 0,001$	$7,8 \cdot 10^{-8} < R < 250 \cdot 10^{-8}$
Ланжевена	$0,001 > b_{\pm} > 0,00025$	$250 \cdot 10^{-8} < R < 570 \cdot 10^{-8}$
Ультратяжелые	b ₊ < 0,00025	$R > 570 \cdot 10^{-8}$

Подвижности и радиусы ионов

Таблица 4

Подвижности и радиусы ионов

Ионы	Подвижность [<i>см²</i> / <i>B</i> · <i>c</i>]	Размеры [<i>см</i>], R
Легкие	<i>b</i> ₊ >1,0	$R < 6, 6 \cdot 10^{-8}$
Легкие промежу-	$1.0 > b_{\perp} > 0.01$	$66.10^{-8} < R < 80.10^{-8}$
точные ионы		0,0.10 < K < 00.10
Тяжелые (большие)		
промежуточные ио-	$0,01 > b_{\pm} > 0,001$	$80 \cdot 10^{-8} < R < 250 \cdot 10^{-8}$
ны		
Ланжевена	$0,001 > b_{\pm} > 0,00025$	$250 \cdot 10^{-8} < R < 570 \cdot 10^{-8}$
Ультратяжелые	<i>b</i> ₊ < 0,00025	$R > 570 \cdot 10^{-8}$

В то же время часто используется представление в виде нескольких экспоненциальных функций [4]:

$$\lambda = \begin{cases} \lambda_0 e^{Z/0.82} , \ 0 < Z < 3.6 \ \kappa m, \\ \lambda_1 e^{Z/4,1} , \ 3.6 < Z < 17.7 \ \kappa m, \\ \lambda_2 e^{Z/7} , \ 17.7 < Z < 40 \ \kappa m, \end{cases}$$
(2.27)

где $\lambda_1 = \lambda_0(3,6), \ \lambda_2 = \lambda_1(17,7).$

Легкие ионы в основном и определяют электродинамику нижней атмосферы, т.е. распределение полей и токов.

Используя значение плотности электрического тока в атмосфере:

$$j_0 = \lambda E, \qquad (2.28)$$

равное $2 \cdot 10^{-12} A / m^2$, можно оценить потенциал ионосферы, используя выражение:

$$\varphi_{\infty} = j_0 R_c, R_c = \int_0^\infty \frac{dz}{\lambda(z)}, \qquad (2.29)$$

где R – столбовое сопротивление, равное $1,3 \cdot 10^{17} O_M \cdot M^2$. Значение φ_{∞} при этом равно 278 кВ. Согласно оценкам R_c приходится на слой до 2 км высоты.

В приземном слое в предположении горизонтальной однородности для описания электрических процессов рассматривается следующая одномерная, нестационарная система уравнений [3]:

$$\frac{\partial n_{+}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(v_{z}n_{+}) + \frac{\partial}{\partial z}(b_{+}n_{+}E_{z}) - \frac{\partial}{\partial z}[D_{T}(z_{1}t)\frac{\partial n_{+}}{\partial z}] = q(z) - \alpha n_{+}n_{-} - k_{+},$$

$$\frac{\partial n_{-}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z}(v_{z}n_{-}) - \frac{\partial}{\partial z}(|b_{-}|n_{-}E_{z}) - \frac{\partial}{\partial z}[D_{T}(z_{1}t)\frac{\partial n_{-}}{\partial z}] = q(z) - \alpha n_{+}n_{-} - k_{-},$$

$$\frac{\partial E_{z}}{\partial z} = 4\pi e(n_{+} - n_{-}), \quad E = -grad\varphi,$$
(2.30)

где $n_{\pm}^{}$ - концентрации легких ионов, E_z – вертикальная составляющая напряженности электрического поля, φ - потенциал электрического поля, k_{\pm} , k_{-} - члены, описывающие взаимодействие легких ионов с аэрозольными частицами, $D_T(z,t)$ – коэффициент турбулентного обмена, v_z – вертикальная составляющая конвективных движений воздуха.

Система уравнений (2.30) записана для средних величин, характеризующих электрическое состояние приземного слоя [3]. Турбулентные процессы входят в коэффициент турбулентного обмена D_T(z,t), который определяется равенством:

$$\left\langle n_{\pm}^{'}v_{z}^{'}\right\rangle = -D_{T}(z,t)\frac{\partial\left\langle n_{\pm}^{+}\right\rangle}{\partial z}, \quad D_{T}(z,t) = \frac{1}{3}\left\langle v^{'2}\right\rangle \tau_{k},$$
 (2.31)

где $\langle v^2 \rangle$ - средний квадрат турбулентной скорости, τ_k - время корреляций (или время жизни вихря).

В метрологии приземного слоя для $D_T(z,t)$ используется представление [5]: $D_T(z,t) = D_m z^m$, (2.32)

где m=0 соответствует устойчивой стратификации приземного слоя, m=1 – нейтральной стратификации, m=4/3 – термической неустойчивой стратификации.

Умножая первые два уравнения системы (2.30) на элементарный заряд электрона е и вычитая из первого уравнения второе, получим уравнение для плотности электрического заряда $\rho = e(n_+ - n_-)$:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (\lambda E_z) + \frac{\partial}{\partial z} (v_z \rho) - \frac{\partial}{\partial z} [D_T(z_1 t) \frac{\partial \rho}{\partial z}] = 0,$$

$$\frac{dE_z}{dz} = 4\pi\rho, \ \lambda = e(b_+ n_+ + |b_-|n_-), \qquad (2.33)$$

где λ - электрическая проводимость приземного слоя.

В общем случае системы уравнений (2.30) и (2.33) применимы для описания электрических процессов в нижней атмосфере, но специфика приземного слоя определяется наличием процессов турбулентного обмена, характеризуемых коэффициентами турбулентного обмена $D_T(z,t)$. Вертикальная составляющая скорости v_z может появляться вследствие многих причин, одной из которых может явиться приливное воздействие со стороны Луны и Солнца.

Как показывается в [3] существует два предельных случая в описании электрического состояния приземного слоя, определяемого параметрами:

$$\xi_{\pm} = \frac{\left| b_{\pm} \right| E_{\infty\tau}}{l_m}, \quad l_m = (D_m \tau)^{1/(2-m)}, \quad \tau = (q\alpha)^{-1/2}, \quad (2.34)$$

где τ - время жизни иона, E_{∞} - напряженность электрического поля за пределами приземного слоя. Первый случай $\xi_{\pm} >> 1$ соответствует приближению сильного поля или классическому электродному эффекту. Второй случай $\xi_{\pm} << 1$ соответствует приближению сильного турбулентно-го перемешивания или турбулентному электродному слою.

Классический электродный эффект был предметом многочисленных исследований [3,4]. Как следует из теории этого эффекта, характерная толщина электродного приземного слоя равна:

$$l = b_0 E_{\infty} \tau, \quad b_0 = \max\{b_+, |b_-|\}, \tag{2.35}$$

при $E_{\infty} = 100 \ B/M$, $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-12} M^3/c$, $b_0 = 1,5 \ cM^2/B \cdot c$, $l = 3,8 \ M$. Критерием для классического электродного эффекта в приземном слое является выполнение неравенства:

$$l_0 E_{\infty} \tau >> l_m. \tag{2.36}$$

Во втором случае, используя разложение решения системы (2.30) по малому параметру ξ_{\pm} , получим, что система уравнений (2.30) в стационарном случае сводится к системе уравнений:

$$-\frac{d}{dz}(D_{m}z^{m} \ \frac{dn_{\pm}^{0}}{dz}) = q - \alpha n_{\pm}^{02} - k_{\pm},$$

$$-D_{m}z^{m} \ \frac{d^{2}E_{z}}{dz} + \lambda(z)E_{z}4\pi = 4\pi j_{0}, \ \lambda = e(b_{\pm}n_{\pm}^{0} + |b_{\pm}|n_{\pm}^{0})$$
(2.37)

с граничными условиями:

$$n_{\pm}^{0}\Big|_{z=z_{0}} = 0, \qquad n_{\pm}^{0}\Big|_{z\to\infty} = \sqrt{\frac{q}{\alpha}},$$

$$\frac{dE_{z}}{dz}\Big|_{z=z_{0}} = 0, \qquad E_{z}\Big|_{z\to\infty} = \frac{j_{0}}{\lambda_{\infty}}, \qquad (2.38)$$

где j₀ – плотность электрического тока.

Характерными масштабами задачи в этом случае являются масштаб турбулентного переноса ионов $l_m = (D_m \tau)^{1/(2-m)}$ и масштаб изменения напряженности электрического поля $L_m = (D_m / 4\pi \lambda_{\infty})^{1/(2-m)}$.

Физический смысл полученного приближения состоит в том, что основную роль в формировании высотного профиля электрической проводимости λ играет турбулентный обмен и рекомбинация ионов, а высотный профиль напряженности электрического поля определяется турбулентным обменом и градиентом электрической проводимости.

Критерием реализации случая сильного турбулентного перемешивания в приземном слое является выполнение неравенства:

$$l_m >> b_0 E_{\infty} \tau \,. \tag{2.39}$$

В случае нейтральной стратификации приземного слоя $D_T = D_1 z$ имеем:

$$D_1 >> 1.5 \cdot 10^{-4} E_{\infty} M/c$$
, (2.40)

где E_{∞} измеряется в В/м.

Результаты расчетов профилей n_{\pm} , λ , E_z приведены в [121]. Напряженность электрического поля убывает с высотой до значения $E_{\infty} = j_0 / \lambda_{\infty}$. В отсутствии аэрозольных частиц в приземном слое $E_{\infty} = 100 \ B/m$, $L_1 = 15 \ m$, $l_1 = 50 \ m$, при $D_1 = 0.2 \ m/c$.

Из этих расчетов можно сделать вывод, что для исключения электродного эффекта необходимо проводить измерения напряженности электрического поля за пределами электродного слоя: z > l, $z > L_m$. При этом необходимо контролировать метеорологические параметры (скорость ветра, температуру, давление).

В связи с проведением исследований термогравитационных солнечных приливов в приземном слое атмосферы необходимо рассмотреть задачу об эффекте, связанном с восходом Солнца [7].

Рассмотрим уравнение (2.33) при $D_T = const$, $\lambda = const$. При этих предположениях получим уравнение для ρ :

$$-D_T \frac{d^2 \rho}{dz} + 4\pi \lambda \rho = 0. \qquad (2.41)$$

Решение уравнения (2.41) при граничном условии:

$$\left. \rho \right|_{z=0} = \rho_0 \tag{2.42}$$

записывается в следующем виде:

$$\rho = \rho_0 e^{-z/L}, \quad L = \sqrt{\frac{D_T}{4\pi\lambda}}. \tag{2.43}$$

Используя второе уравнение системы (2.33) получим для Е.:

$$E_{z} = \frac{j_{0}}{\lambda} - 4\pi\rho_{0}\sqrt{\frac{D}{4\pi\lambda}}e^{-z/L}, \quad j_{0} < 0.$$
 (2.44)

Плотность электрического заряда ρ_0 определяется электродным эффектом и оценивается как $\rho_0 = 200 \ e/cm^3$ и $\rho_0 > 0$. Из выражения (2.44) следует, что $j_0 < 0$, абсолютная величина $|E_z|$ или градиент потенциала при z=0 растет с ростом D. В этом состоит эффект восхода Солнца . Этот эффект связан с нагревом земной поверхности солнечным излучением, приводящим к появлению вертикальных турбулентных движений, т.е. к появлению турбулентного обмена. Плотность тока проводимости также увеличивается с ростом D, т.к.:

$$j|_{z=0} = -(|j_0| + 4\pi\rho_0\lambda L), \qquad (2.45)$$

при $\lambda = 1,3 \cdot 10^{-4} c^{-1}$ ($\tau_{\lambda} = 612 c$), $D = 0,2 \ M^2 / c$, $L = (D/4\pi\lambda)^{1/2} = 11 \ M$. В отсутствии аэрозольных частиц, меняющих электрическую проводимость приземного слоя $\tau_{\lambda} = 75 c$ при $q = 10^7 \ M^{-3} c^{-1}$, $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-12} \ M \ c^{-1}$, $L = 3,9 \ M$.

Более строгое решение самосогласованной задачи [3] дает аналогичный результат, т.е. с ростом турбулентного обмена происходит рост напряженности электрического поля.

Таким образом:

- при исследовании взаимодействия лунно-солнечных приливов с электромагнитным полем в земной атмосфере важное значение имеют задачи об ионном составе атмосферы и задача об электрической структуре приземного слоя атмосферы; легкие ионы в основном определяют электродинамику нижней атмосферы, т.е. распределение полей и токов;

- проанализирована система уравнений, применимых для описания электрических процессов в нижней атмосфере, с учетом специфики приземного слоя, определяемой наличием процессов турбулентного обмена;

- в связи с проведением исследований термогравитационных солнечных приливов в приземном слое атмосферы рассмотрена задача об эффекте, связанном с восходом Солнца;

- при постановке экспериментальных работ, предполагающих размещение датчиков напряженности электрического поля вблизи поверхности земли, следует учитывать градиент напряженности поля, обусловленный турбулентным обменом.

2.3. Решение задачи проникновения электрического поля, возникающего на уровне ионосферы под действием приливов, в приземный слой атмосферы с учетом конечной и бесконечной электрической проводимости земной коры

В настоящем разделе предполагается рассмотрение этой задачи для двухслойной среды, состоящей из земной атмосферы с проводимостью $\lambda = \lambda_0 e^{\alpha z}$, $\alpha = (0, 2 - 0, 3) \kappa M^{-1}$ и земной коры с проводимостью λ_1 (рис.2.1).



Рис.2.1.

Будем предполагать, что задача о распространении возмущений электрического поля из ионосферы с высотой z=H, в нижнюю атмосферу и земную кору описывается уравнениями:

$$div(grad\varphi) = 0, \quad E = -grad\varphi. \tag{2.46}$$

На нижней границе ионосферы при z=H потенциал электрического поля φ зададим в следующем виде:

$$\varphi(z = H, x) = \varphi_0 e^{ikx}, \ i = \sqrt{-1},$$
 (2.47)

где $k = \frac{2\pi}{L}$ - волновое число, описывающее распределение электрического потенциала вдоль горизонтальной оси х, L – характерный масштаб длины для возмущения потенциала φ_0 .

Тогда в двумерном случае (x,z) получим для уравнения (2.46):

$$\frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial z^2} + \alpha \frac{\partial \varphi_1}{\partial z} + \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial x^2} = 0, \ 0 < z < H ,$$
$$\frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial x^2} = 0, \ -h < z < 0 ,$$
$$E_{x,1,2} = -\frac{\partial \varphi_{1,2}}{\partial x}, \ E_{z,1,2} = -\frac{\partial \varphi_{1,2}}{\partial z} .$$
(2.48)

Граничные условия для решения уравнений (2.48) имеют вид:

$$E_{x1} = E_{x2} \quad \text{при } z=0, \ \lambda_0 \frac{\partial \varphi_1}{\partial z} = \lambda_1 \frac{\partial \varphi_2}{\partial z} \quad \text{при } z=0$$
$$\varphi_2(-h, x) = 0, \quad \varphi_1(z = H, x) = \overline{\varphi_0} e^{ikx}. \tag{2.49}$$

Решение системы уравнений (2.48) будем искать в следующем виде:

$$\varphi_1 = \overline{\varphi_1}(z)e^{ikx}, \quad \varphi_2 = \overline{\varphi_2}(z)e^{ikx}.$$
 (2.50)

Тогда решение для $\overline{\varphi_1}(z)$ и $\overline{\varphi_2}(z)$ при граничных условиях

$$\overline{\varphi_1}(0) = \overline{\varphi_2}(0), \quad \lambda_0 \frac{\partial \varphi_1}{\partial z}\Big|_{z=0} = \lambda_1 \frac{\partial \varphi_2}{\partial z}\Big|_{z=0},$$

$$\overline{\varphi_2}(-h) = 0, \quad \overline{\varphi_1}(H) = \overline{\varphi_0}$$
 (2.51)

записывают в виде:

$$\overline{\varphi_{1}} = e^{-\frac{\alpha}{2}z} \left[c_{1}e^{\frac{1}{2}\sqrt{\alpha^{2}+4k^{2}z}} + c_{2}e^{-\frac{1}{2}\sqrt{\alpha^{2}+4k^{2}z}} \right],$$

$$\overline{\varphi_{2}} = \overline{c_{1}}e^{kz} + \overline{c_{2}}e^{-kz}, \qquad (2.52)$$

где $c_1, c_2, \overline{c_1}, \overline{c_2}$ - постоянные.

Постоянные c_1 , c_2 , $\overline{c_1}$, $\overline{c_2}$ находятся из решения системы алгебраических уравнений, составленных с использованием условий (2.51) и представляются в виде выражений:

$$\tilde{n}_{1} = \frac{\overline{\varphi_{0}}e^{\frac{\alpha}{2}H} - (\overline{c_{1}} + \overline{c_{2}})e^{-\frac{1}{2}\sqrt{\alpha^{2} + 4k^{2}H}}}{2Sh\frac{1}{2}\sqrt{\alpha^{2} + 4k^{2}H}},$$

$$\tilde{n}_{2} = -\frac{\overline{\varphi_{0}}e^{\frac{\alpha}{2}H} + (\overline{c_{2}} + \overline{c_{1}})e^{-\frac{1}{2}\sqrt{\alpha^{2} + 4k^{2}H}}}{2Sh\frac{1}{2}\sqrt{\alpha^{2} + 4k^{2}}H}, \overline{c_{2}} = -\overline{c_{1}}e^{-2kh},$$

$$(2.53)$$

$$\overline{\tilde{n}_{1}} = \frac{\overline{\varphi_{0}}e^{-\frac{\alpha}{2}H}\sqrt{\alpha^{2} + 4k^{2}}H}}{(1 - e^{-2kh})\sqrt{\alpha^{2} + 4k^{2}}} + 2Sh\frac{1}{2}\sqrt{\alpha^{2} + 4k^{2}}H} + 2Sh$$

$$(1 - e^{-2kh}) \left[\sqrt{\alpha^2 + 4k^2} ch \frac{1}{2} \sqrt{\alpha^2 + 4k^2} H + 2Sh \frac{1}{2} \sqrt{\alpha^2 + 4k^2} H \right] + 2 \frac{\lambda_1}{\lambda_0} \frac{k(1 + e^{-2kh})}{Sh^{-1} \frac{1}{2} \sqrt{\alpha^2 + 4k^2} H}$$

В условиях земных твердых пород отношение электрической проводимости λ_1 к электрической проводимости атмосферы вблизи земной поверхности λ_0 : $\lambda_1/\lambda_0 >> 1$ [6]. Поэтому при $\lambda_1/\lambda_0 >> 1$ получим для $\overline{c_1}$ и $\overline{c_2}$:

$$\overline{\tilde{n}_{1}} = \frac{\overline{\varphi_{0}}e^{-\frac{\alpha}{2}H}\sqrt{\alpha^{2}+4k^{2}}}{2\frac{\lambda_{1}}{\lambda_{2}}k(1+e^{-2kh})Sh\frac{1}{2}\sqrt{\alpha^{2}+4k^{2}}H},$$

$$\overline{\tilde{n}_{2}} = -\frac{\overline{\varphi_{0}}e^{-\frac{\alpha}{2}H}\sqrt{\alpha^{2}+4k^{2}}e^{-2kh}}{2\frac{\lambda_{1}}{\lambda_{2}}k(1+e^{-2kh})Sh\frac{1}{2}\sqrt{\alpha^{2}+4k^{2}}H},$$

$$\overline{\tilde{n}_{1}} + \overline{c_{2}} = \frac{\overline{\varphi_{0}}e^{\frac{\alpha}{2}H}\sqrt{\alpha^{2}+4k^{2}}Shkh}{2\frac{\lambda_{1}}{\lambda_{0}}kchkhSh\frac{1}{2}\sqrt{\alpha^{2}+4k^{2}}H}.$$
(2.54)

Подставляя (2.54) в (2.52), используя (2.53), получим, учитывая малость параметра λ_0 / λ_1 :

$$\varphi_{1} = \frac{\overline{\varphi_{0}}e^{-\frac{\alpha}{2}(z-H)}e^{ikx}}{2Sh\frac{1}{2}\sqrt{\alpha^{2}+4k^{2}}H} \left[Sh\frac{1}{2}\sqrt{\alpha^{2}+4k^{2}}z - \frac{\sqrt{\alpha^{2}+4k^{2}}Shkhsh\frac{1}{2}\sqrt{\alpha^{2}+4k^{2}}(z-H)}{2\frac{\lambda_{1}}{\lambda_{0}}kchkhSh\frac{1}{2}\sqrt{\alpha^{2}+4k^{2}}H}\right],$$

$$\varphi_{2} = \frac{\overline{\varphi_{0}}e^{\frac{\alpha}{2}H}\sqrt{\alpha^{2}+4k^{2}}Shk(z+h)}{2\frac{\lambda_{1}}{\lambda_{0}}kchkhSh\frac{1}{2}\sqrt{\alpha^{2}+4k^{2}}H}.$$
(2.55)

В виду большого отношения λ_1 / λ_0 из (2.55) следует, что

$$\varphi_{1} = \frac{\overline{\varphi_{0}}e^{-\frac{\alpha}{2}(z-H)}e^{ikx}Sh\frac{1}{2}\sqrt{\alpha^{2}+4k^{2}}z}{2Sh\frac{1}{2}\sqrt{\alpha^{2}+4k^{2}}H},$$

$$\varphi_{2} = 0, \ E_{2x} = 0 \ \Pi PH 0 > z > -h, \ E_{1x}|_{z=0} = 0.$$
(2.56)

Рассмотрим некоторые предельные случаи выражения для φ_1 . Пусть выполнено условие $\alpha^2 >> 4k^2$, означающее, что характерный масштаб длины для распределения электрической проводимости с высотой $\alpha^{-1} = (3,3-5)\kappa M$ меньше характерного масштаба распределения вариаций потенциала ионосферы L(L~100 км). Тогда из (2.56) получим:

$$\varphi_1 = \frac{\overline{\varphi_0} e^{ikx} \left(1 - e^{-\alpha z}\right)}{1 - e^{-\alpha H}} \,. \tag{2.57}$$

Составляющие напряженности электрического поля E_x и E_z будут равны:

$$E_{x1} = -\frac{\partial \varphi_1}{\partial x} = -\frac{\overline{\varphi_0} i k e^{ikx} (1 - e^{-\alpha z})}{1 - e^{-\alpha H}},$$

$$E_{z1} = --\frac{\partial \varphi_1}{\partial z} = -\frac{\overline{\varphi_0} \alpha e^{ikx} e^{-\alpha z}}{1 - e^{-\alpha H}}.$$
(2.58)

Из (2.58) видно, что горизонтальная составляющая E_x вблизи земной поверхности много меньше E_z. Проведенное рассмотрение подтверждает результаты оценок влияния лунно-солнечных приливов на электрическое поле атмосферы, полученные в разделе 2.4. данной главы [8].

В случае высокой проводимости земной коры такой, что $\lambda_1 / \lambda_0 >> 1$ ее можно считать проводящей средой, а земную поверхность эквипотенциальной поверхностью с $\varphi_1 = 0$. Для электрической проводимости λ в нижней атмосфере используется представление [8]:

$$\lambda = \lambda_0 e^{\alpha z}, \quad \alpha = (0, 2 - 0, 3) \ \hat{e} i^{-1},$$
 (2.59)

где λ₀ – электрическая проводимость атмосферы вблизи земной поверхности.

Из системы уравнений (2.1) следует уравнение для потенциала электрического поля:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + \alpha \frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0, \qquad (2.60)$$

решение которого при граничных условиях:

$$\varphi|_{z=0} = 0, \quad \varphi|_{z=H} = \varphi_0(x, y)$$
 (2.61)

и выполнении условий L_x, L_y >> α⁻¹, где L_x, L_y – характерные размеры в горизонтальной плоскости области динамо, имеет следующий вид:

$$\varphi(x, y, z) = \varphi_0(x, y) \frac{1 - e^{-\alpha z}}{1 - e^{-\alpha H}},$$
 (2.62)

где x, y – горизонтальные декартовы координаты, z – вертикальная координата, H – высота ионосферы (H = 80 км), $\phi_0(x,y)$ – распределение электрического потенциала, создаваемого приливами на ионосферных высотах.

Используя (2.61), получим для компонент напряженности электрического поля выражения:

$$E_{z} = -\frac{\partial \varphi}{\partial z} = -\varphi_{0}(x, y) \frac{\alpha e^{-\alpha z}}{1 - e^{-\alpha H}},$$

$$E_{x} = -\frac{\partial \varphi}{\partial x} = -\frac{\partial \varphi_{0}(x, y)}{\partial x} \frac{1 - e^{-\alpha z}}{1 - e^{-\alpha H}},$$

$$E_{y} = -\frac{\partial \varphi}{\partial y} = -\frac{\partial \varphi_{0}(x, y)}{\partial y} \frac{1 - e^{-\alpha z}}{1 - e^{-\alpha H}}.$$
(2.63)

Дадим некоторые численные оценки величины E_z вблизи земной поверхности. Различные модели дают L_x , $L_y \sim 100$ - 1000 км. Принимая для солнечных приливов $\varphi_0(x,y) \cong 25$ кВ, получим, что при z = 0 $E_z \cong (10 - 15)$ В/м с учетом электродного приземного слоя. Лунные приливы создают 3% величины E_z для солнечных приливов, поэтому в этом случае $E_z \cong (0,3 - 0,5)$ В/м.

Нужно отметить, что в рассматриваемой модели воздействия приливов на ионосферу важную роль играют электрические токи, приводящие к вариациям геомагнитного поля. Формулы (2.62,2.63) с учетом суточного вращения Земли должны быть домножены на величину е^{iωt}, где t − время, ω – угловая частота вращения Земли.

Таким образом, решена задача проникновения электрических ионосферных полей, обусловленных приливными процессами, в тропосферу. Задача решена с учетом конечной и бесконечной проводимости земной коры. Полученные теоретические оценки амплитуд спектральных компонент на частотах приливов позволяют сравнить их с экспериментальными данными.

Заключение к главе

1. При исследовании воздействия лунно-солнечных приливных явлений на электромагнитные процессы важное значение имеют задачи об ионном составе атмосферы и задача об электрической структуре приземного слоя атмосферы. Эти две задачи определяют распределение электрической проводимости и напряженности электрического поля в атмосфере с высотой и проанализированы в данном разделе. В основном электродинамику нижней атмосферы определяют легкие ионы, т.е. распределение полей и токов.

2. Решена задача проникновения электрических ионосферных полей, обусловленных приливными процессами, в тропосферу. Задача решена с учетом конечной и бесконечной проводимости земной коры. Из модельных расчетов получено, что для солнечных приливов $\phi_0(x,y) \cong 25$ кВ и при z = 0 $E_z \cong (10 - 15)$ В/м с учетом электродного приземного слоя. Лунные приливы создают 3% величины E_z для солнечных приливов: $E_z \cong (0,3 - 0,5)$ В/м. Полученные теоретические оценки амплитуды спектральных компонент на частотах приливов позволяют сравнить их с экспериментальными оценками.

3. С целью выяснения взаимосвязи электрического поля приземного слоя с лунно-солнечными приливами рассмотрена задача об эффекте, связанном с восходом Солнца. Решение самосогласованной задачи позволяет сделать вывод о том, что с ростом турбулентного обмена происходит рост напряженности электрического поля в приземном слое.

4. Из результатов теоретического моделирования электрических процессов в приземном слое атмосферы можно сделать вывод, что для исключения электродного эффекта необходимо проводить измерения напряженности электрического поля вблизи поверхности земли за пределами электродного слоя. При этом необходимо контролировать метеорологические параметры (скорость ветра, температуру, давление). При постановке экспериментальных работ, предполагающих размещение датчиков напряженности электрического поля, следует учитывать градиент напряженности поля, обусловленный турбулентным обменом.

Контрольные вопросы

1.Записать уравнения электродинамики, на которых основываются расчеты полей, проникающих их ионосферы в тропосферу.

2. Каков ионный состав нижней атмосферы?

3.Запишите компоненты напряженности электрического поля приземного слоя атмосферы и дайте их численные оценки.

4.Записать выражение для изменения электрической проводимости в атмосфере Земли с высотой.

5.Что такое «электродный слой» и почему измерения электрического поля должны осуществляться за его пределами?

Библиографические ссылки

- Таммет, Х.Ф. Спектр подвижностей аэроионов в приземном воздухе. Атмосферное электричество / Х.Ф. Таммет [и др.] // Труды III Всесоюзного симпозиума. Тарту, 1986. – Л.: Гидрометеоиздат, 1988. – С. 46 – 50.
- 2. Брикар, Дж. Влияние радиоактивности и загрязнения на элементы атмосферного электричества. Проблемы электричества атмосферы. / Дж. Брикар // Труды III международной конференции по электричеству атмосферы и космического пространства. Монтре, Швейцария, 1969. Л.: Гидрометеоиздат, 1969. С. 68 105.
- 3. Куповых, Г.В. Теория электродного эффекта в атмосфере / Г.В. Куповых, В.Н. Морозов, Я.М. Шварц // Таганрог: ТРТУ, 1998. – С. 122.
- 4. Атмосфера. Справочник (Справочные данные, модели) // Л.:Гидрометеоиздат, 1991. С. 509.
- 5. Лайтхман, Д.Л. Теория пограничного слоя атмосферы / Д.Л. Лайтхман // Л.: Гидрометеоиздат, 1970. – 341 с.
- 6. Акасофу, С.И. Солнечно-земная физика ч.1. / С.И. Акасофу, С. Чепмен // М.:Мир, 1974. 382 с.
- H.W. Kasemir., Zür Strömungs theorie des luftelektrischen Feldes III Der Austauschgenerator // Archiv für Meteorologie Geophysik und Bioklimatologie ser A., B.9. – 3 – 4 Heft. – 1956. – P. 356 – 370.
- 8. Морозов, В.Н. Лунно-солнечные приливы в электрическом поле Земли / В.Н. Морозов, Л.В. Грунская // Пятая Российская конференция по атмосферному электричеству. Сборник Трудов. Владимир, 2003. Т2. С. 38 40.

Глава 3. ВОЗДЕЙСТВИЕ ЛУННО-СОЛНЕЧНЫХ ПРИЛИВОВ НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

3.1. Классификация методов спектрального оценивания

В последние десятилетия наблюдается взаимосвязь между техническим прогрессом в радиотехнике и радиоэлектронике и развитием теории случайных процессов и теории решений. Успешное решение ряда трудных технических задач обусловлено эффективным использованием статистических методов. В данной работе удалось эффективно применить методы статистической теории для решения ряда геофизических задач.

Математические основы современных методов спектрального оценивания берут свое начало в XVII веке в работах Исаака Ньютона, который в результате наблюдений установил, что солнечный свет, прошедший через стеклянную призму, разлагается на многоцветную полосу, что каждому цвету соответствует своя длина волны и что белый солнечный свет содержит все длины волн. Именно Ньютон был первым, кто применил в 1671 г. слово spectrum («спектр») в качестве научного термина, для описания полосы цветов солнечного света.

В 1927 г. английским статистиком Дж. Юлом был предложен существенно отличный метод анализа. Для отыскания одной-двух периодичностей в исследуемых данных Юл прибег к моделированию временного ряда, основанному на линейном регрессионном анализе [1]. Юл заложил основу именно того, что впоследствии стало называться параметрическим подходом к спектральному анализу: иными словами, подходом, при котором данные измерений рассматриваются как выход некоторой модели временного ряда.

Методы, использованные Юлом, напоминают одну гораздо более старую процедуру подгонки данных, применявшуюся в конце XVIII века бароном де Прони. Прони исследовал метод аппроксимации с помощью экспоненциальной модели некоторой совокупности данных, характеризующих соотношение между давлением и объемом газов, причем в его процедуре использовалась точная регрессионная подгонка данных, лучшая чем в методе наименьших квадратов. Коэффициенты регрессии использовались в качестве коэффициентов некоторого полинома, корни которого являлись мо-

61

дельными экспонентами. Амплитуда каждой экспоненциальной компоненты отыскивалась в результате повторного прохода по данным.

1930 год явился поворотным для спектрального анализа: в этом году Н. Винер опубликовал свою классическую статью «Обобщенный гармонический анализ» [3], в которой спектральный анализ трактовался на основе теории случайных процессов и был заложен твердый статистический фундамент. В этой статье изложен ряд важных результатов, к которым относятся точные статистические определения автокорреляции и спектральной плотности мощности (СПМ) для стационарных случайных процессов. Показано, что эти две функции, характеризующие случайный процесс, связаны непрерывным преобразованием Фурье; это соотношение базируется на широко известной сейчас теореме Винера — Хинчина, названной так в честь Н. Винера и А. Я. Хинчина, советского математика, независимо получившего этот результат.

Использование преобразования Фурье, а не ряда Фурье, применяемого в традиционном гармоническом анализе, позволило Винеру определить спектры в виде некоторого континуума частот, а не в виде набора частот дискретных гармоник. Белый шум, как было показано Винером, имеет равномерную спектральную плотность, т. е. содержит равновеликие компоненты на всех частотах. К этому результату он пришел на основе исследования броуновского движения и шустеровских оптических аналогов.

К другим ранним статистическим подходам к спектральному анализу относятся работы Бартлетта [4] и Кендалла [5].

В рамках вероятностного подхода, разработанного Хинчиным и Слуцким, шведский математик Х. Вольд предложил унифицированную модель на основе стохастического линейного разностного уравнения для дискретно-временных рядов. Х. Вольд ввел в употребление термины «скользящее среднее» для моделей временного ряда, первоначально описанных Слуцким (который использовал термин «скользящее суммирование»), и «линейная авторегрессия» для моделей временного ряда, первоначально описанных Юлом. Он также первым назвал соотношение между авторегрессионными параметрами и автокорреляционной последовательностью «уравнением Юла-Уолкера».

В своей монографии, вышедшей в 1938г., Вольд приводит также очень важную теорему разложения для стационарного временного ряда, согласно которой любой стационарный случайный процесс можно записать в виде суммы детерминированной компоненты и одностороннего процесса скользящего среднего, порождаемого белым шумом. Эта теорема позволила советскому математику А. Н. Колмогорову [6] сформулировать и решить задачу линейного предсказания.

Вычислять спектр по коэффициентам авторегрессии было в 1948 г. предложено Бартлеттом [4], который использовал спектральную плотность мощности авторегрессии второго порядка. Уравнения, возникающие в задаче линейного предсказания, и уравнения Юла-Уолкера имеют специальную структуру, которую первым изучал немецкий математик О. Теплиц. Эта структура исследовалась Н. Левинсоном, коллегой Н. Винера, который разработал весьма эффективную вычислительную процедуру решения уравнения Юла-Уолкера [7].

Развитие концепции линейного предсказания применительно к цифровым сейсмическим данным было предложено группой геофизического анализа (GAG) Массачусетского технологического института (MIT) в 1950-х гг. Эта работа и в особенности то, что было сделано Эндерсом Робинсоном [8], оказали глубокое воздействие на развитие современных цифровых методов спектрального анализа и обработки сигналов. Норберта Винера можно считать пионером современного теоретического спектрального анализа, а Джона Тьюки пионером современного экспериментального спектрального анализа. В статье, написанной в 1949 г. в Вудс-Холе, шт. Массачусетс, Тьюки использовал оценки корреляции, получаемые по конечным временным последовательностям, заложив тем самым экспериментальные основы спектрального анализа.

Последующий существенный вклад в развитие цифровых методов спектрального анализа представлял собой алгоритмы, предназначенные для вычисления дискретного преобразования Фурье, являющегося версией преобразования Фурье, применимого при цифровой обработке данных [9].

Статья Джима Кули и Джона Тьюки [10], была посвящена практике эффективного вычисления преобразования Фурье. Именно БПФ более чем какие-либо другие методы существенно расширило область применения методов спектрального анализа как средства обработки сигналов.

Главный интерес к методам спектрального оценивания, обеспечивающим высокое разрешение при использовании временных или пространственных последовательностей ограниченной длины, можно связать с работами Джона Берга. Полученная им спектральная оценка высокого разрешения, описанная в контексте формального математического аппарата

метода максимальной энтропии, стали тем инструментом, который был положен в основу разработки параметрических, или модельных, подходов к спектральному оцениванию с высоким разрешением.

Метод максимальной энтропии тесно связан с авторегрессионным спектральным анализом. Использовать авторегрессионные методы спектрального оценивания независимо предлагали еще Бартлет [4] и Парзен [11], но лишь после публикации работы Берга был проявлен заметный интерес к этому методу спектрального оценивания [12].

Развитие теории спектрального оценивания можно отсчитывать от трудов Ньютона, в которых впервые стали возникать понятия, которые со временем превратились в понятия спектральной теории. Данная теория в дальнейшем создавалась усилием многих математиков и физиков, которые развивали некоторые частные и общие вопросы этой теории в связи с текущими задачами развития различных разделов естествознания и экономики.

Достаточно полный обзор развития теории спектрального оценивания приведен в обзорной статье [13], где можно подробно ознакомится со всей историей развития спектрального оценивания. Этап, о котором идет речь, относится к более позднему этапу развития этой теории, который связан с обработкой экспериментальных данных на основе идей спектрального оценивания. Этот этап можно отсчитывать с работы А. Шустера [14], появившейся в печати в 1898 году.

Прежде, чем излагать эволюцию методов спектрального оценивания необходимо дать в современном изложении основные определения и идеи, лежащие в основе методов спектрального оценивания стационарных в широком смысле случайных процессов и процессов такого типа, но содержащих детерминированные гармонические сигналы.

Общая задача оценивания спектральной плотности случайного процесса имеет несколько основных постановок. Приведем некоторую классификацию таких задач и формулировок их постановки. В первую очередь следует указать на то, что понятие спектральной плотности тесно связано с понятием о процессах стационарных в широком смысле [15-21]. Случайный процесс считается стационарным в узком смысле, если его функция распределения (плотность распределения) не зависят от времени. Для процесса стационарного в узком смысле от времени не зависят и все моменты и другие параметры распределения. Математическое ожидание процесса стационарного в широком смысле и его дисперсия не зависят от момента времени, в который они вычисляются, а ковариация зависит лишь от интервала между моментами времени и не зависит от момента времени, в который вычисляется.

Стационарный в широком смысле процесс $\xi(t)$ обладает спектральным разложением:

$$\xi(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i\nu t} \Phi(d\nu), \qquad (3.1)$$

где $\Phi(v)$ - спектральная функция процесса, т.е. для любого стационарного в широком смысле процесса существует функция $\Phi(v)$ такая, что выполняется равенство (3.1). Если исключить некоторые допустимые структурные элементы в спектральной плотности случайных в широком смысле процессов, то соотношение (3.1) можно переписать в более простой форме:

$$\xi(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{i\nu t} a(\nu) d\nu, \qquad (3.2)$$

где a(v) - комплексная функция, называемая Фурье-компонентой процесса на частоте $v: a(v) = a^*(-v)$. Для стационарных в широком смысле процессов выполняется следующее соотношение:

$$M[a(v)a^{*}(v')] = S(v)\delta(v-v'), \qquad (3.3)$$
$$Ma(v) = 0.$$

Функция S(v) - называется спектральной плотностью стационарного в широком смысле процесса. Используя (3.2) легко получить формулу Винера-Хинчина, которая связывает спектральную плотность с автоковариационной функцией процесса. Именно:

$$S(\nu) = \int_{-\infty}^{\infty} C(\tau) e^{i\nu\tau} d\tau.$$
(3.4)

Физический смысл спектральной плотности состоит в том, что величина $S(v)\Delta v$ есть величина энергии колебательного процесса в данном диапазоне частот. Таким образом, задача распределения энергии по частотам (по спектру частот) сводится к оцениванию функции S(v). Из этих соотношений следует так же, что оценивание спектральной плотности и автоковариационной функции стационарных в широком смысле процессов тесно связано.

В реальности требование стационарности в широком смысле (не говоря уже о стационарности в узком смысле) является жестким. Чаще всего приходится иметь дело с процессами, у которых среднее значение, ковариационная функция и спектральная плотность меняются в той или иной степени со временем. Если такие изменения происходят не слишком быстро так, что на некоторых сравнительно больших интервалах времени можно считать спектральную плотность неизменной, то задача ее оценивания не будет слишком сильно отличаться от этой же задачи для процесса стационарного в широком смысле. Однако при этом интервал, на котором необходимо получить оценку спектральной плотности, уже ограничен периодом относительной стационарности процесса. Это усложняет задачу оценивания, поставленную, в частности, в данной работе, так как необходимое разрешение по частоте требует временных рядов большой длительности.

Еще одним важным фактором, влияющим на получение оценок спектральной плотности в рамках определений стационарности в широком смысле, является присутствие детерминированных составляющих в процессе. Такими детерминированными составляющими могут быть: а) различные достаточно регулярные и относительно медленно меняющиеся составляющие, которые принято называть трендами; б) быстрые скачкообразные изменения составляющих процесса (средних, дисперсий, ковариаций и т.п.); в) конечное число гармонических сигналов.

Наличие детерминированных составляющих нарушает условие стационарности процесса в широком смысле, поскольку приводит к изменению средних значений и ковариаций, а, следовательно, и спектральной плотности, со временем. Однако детерминированность составляющих часто позволяет разложить процесс на аддитивные составляющие, часть из которых детерминирована, а оставшаяся представляет собой стационарный в широком смысле процесс. Такая аддитивная модель является наиболее часто используемой в задачах спектрального оценивания.

Задачи выделения гармонических составляющих в случайном процессе являются одними из наиболее важных вариантов задач, которые решаются с помощью спектрального оценивания. Многие специальные методы спектрального оценивания нацелены непосредственно на задачу выделения именно детерминированных составляющих процесса и оценивания их характеристик в зависимости от размерности протекающего процесса. Например, задача может ставиться как задача оценивания частоты, амплитуды и фазы колебательного процесса, а может ставится и как задача определения частоты, амплитуды, волнового числа и направления прихода гармонического сигнала в многомерном оценивании. Если первый тип задач характерен в основном для анализа сосредоточенных систем, то

66

задачи второго сорта относятся к задачам исследования волновых процессов в различных средах, к задачам локации. Рассмотрим некоторые специальные свойства процессов, состоящих из аддитивных компонент: детерминированной в форме гармоник и случайной в форме стационарного в широком смысле процесса.

Рассмотрим процесс, имеющий следующий вид:

$$x(t) = \sum_{a=1}^{M} A_a \cos(\Omega_a t + \Phi_a) + \xi(t) = \sum_{k=1}^{M} A_a \cos(\Omega_a t + \Phi_a) + \int_{-\infty}^{\infty} a(v) e^{ivt} dv, \qquad (3.5)$$

где $\xi(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{ivt} a(v) dv$ - стационарный в широком смысле процесс, а величины A_a, Φ_a, Ω_a - детерминированные параметры гармонических детерминированных составляющих исследуемого процесса, соответственно – амплитуда, начальная фаза, частота k-той составляющей. Не трудно видеть, что:

$$M[x(t)x(t+\tau)] = M[\xi(t)\xi(t+\tau)] + \sum_{a=1}^{M} A_a \cos(\Omega_a t + \Phi_a) \sum_{b=1}^{M} A_b \cos(\Omega_b (t+\tau) + \Phi_b) =$$

= $C(\tau) + \sum_{a=1}^{M} \sum_{b=1}^{M} A_a A_b \cos(\Omega_a t + \Phi_a) \cos(\Omega_b (t+\tau) + \Phi_b),$ (3.6)

т.е. автоковариационная функция такого процесса зависит от t и τ , и, следовательно, такой процесс не является стационарным в широком смысле. Отсюда следует, что если бы реальная процедура оценивания строилась на статистическом осреднении (осреднению по ансамблю), то возникла бы необходимость исследовать процессы нестационарные в широком смысле. Однако реальная процедура оценивания требует изменения взгляда на природу изучаемых процессов с помощью введения в рассмотрение осреднения не по ансамблю, а по времени. Такая процедура лежит в основе практически всех современных статистических методов в физике, начиная с термодинамики и статистической физики в целом.

Общие принципы оценивания спектральной плотности стационарных процессов по экспериментальным данным сводятся к следующим. Обычно процедура получения информации о процессе состоит в измерении значений исследуемой величины в некоторые дискретные моменты времени $t_1, t_2, ..., t_n$. В результате непрерывный во времени процесс $\xi(t)$ заменяется дискретным процессом $\xi_1 = \xi(t_1), \xi_2 = \xi(t_2), ..., \xi_n = \xi(t_n)$. Для того, чтобы не вносить в дискретный ряд изменчивости, не свойственной самому процессу, за счет неравномерности распределения моментов времени $t_1, t_2, ..., t_n$ обычно (если это возможно) измерения проводят в моменты времени через одинаковые интервалы времени $\Delta t = t_{i+1} - t_i$, для любого значения *i*.

Переход от непрерывного процесса к дискретному во времени процессу сопровождается частичной потерей информации. Это связано с исчезновением информации об изменениях исследуемой величины, имеюцих период, меньший Δt . Кроме этого при анализе свойств дискретного процесса во многих задачах приходится иметь дело не с самим случайным процессом, а лишь с одной его конкретной реализацией $x_1, x_2, ..., x_n$. Второй фактор частичной потери информации это конечность конкретной реализации во времени. Это означает, что теряется информация об изменениях исследуемой величины с периодами большими длины реализации. Но теряется информация и другого рода, связанная со статистическими свойствами самого процесса из-за единственности реализации. В этой ситуации приходится рассчитывать на то, что сама эта реализация содержит достаточно информации о статистических свойствах процесса, которая позволяет оценить их. Это требование обычно связывают со свойством эргодичности процесса.

Случайный процесс является эргодическим, если за достаточно большое время система подходит сколь угодно близко к любому из своих возможных состояний. Это свойство обеспечивает возможность замены осреднения по ансамблю (по всем возможным реализациям процесса) осреднением по времени, т.е.:

$$Mf(\xi) = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_{0}^{T} f(\xi(t)) dt .$$
 (3.7)

Как хорошо известно, условие эргодичности практически никогда не выполняется. Однако для нас важным является не сама эргодичность, а возможность заменять осреднение по ансамблю осреднением по времени для тех величин, для которых строятся оценки. Такое условие является гораздо более слабым и, по всей видимости, очень часто реализуется на практике. Свидетельством этого являются успехи статистического подхода к различным физическим задачам. Мы так же будем предполагать, что это условие выполнено.

В этом случае для стационарного в широком смысле процесса имеет место соотношение:

$$C(\tau) = M[\xi(t)\xi(t+\tau)] = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_{0}^{T} \xi(t)\xi(t+\tau)dt.$$
 (3.8)

Важным свойством осреднения по времени, а не по ансамблю, является то, что процессы, имеющие вид процесса стационарного в широком смысле с детерминированными гармоническими составляющими, оказываются эквивалентными стационарному процессу в широком смысле. Действительно:

$$\lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_{0}^{T} x(t) x(t+\tau) dt = C_{0}(\tau) =$$

$$= \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_{0}^{T} \xi(t) \xi(t+\tau) dt + \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_{0}^{T} \sum_{a=1}^{M} A_{a} A_{b} \cos(\Omega_{a} t + \Phi_{a}) \cos(\Omega_{b}(t+\tau) + \Phi_{b}) = (3.9)$$

$$= C(\tau) + \frac{1}{2} \sum_{a=1}^{M} A_{a}^{2} \cos(\Omega_{a} \tau).$$

Для удобства в дальнейшем будем обозначать:

$$\lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_{0}^{T} x(t) x(t+\tau) dt = \langle x(t) x(t+\tau) \rangle_{t}.$$
(3.10)

Таким образом, автоковариационная функция процесса x(t) зависит только от τ . Это позволяет применять к таким процессам общие процедуры оценивания, как и для процессов стационарных в широком смысле. Заметим одно важное отличие ковариационной функции $C_0(\tau)$ от функции $C(\tau)$. В силу того, что для стационарного в широком смысле процесса выполняется формула Винера-Хинтчина, функция $C(\tau)$ должна достаточно быстро убывать при $\tau \to \infty$. В то же время функция $C_0(\tau)$ не убывает при $\tau \to \infty$. Формула же Винера-Хинтчина (3.4) дает для спектральной плотности процесса x(t) следующую формулу:

$$S_0(\nu) = S(\nu) + \frac{1}{4} \sum_{a=1}^{M} A_a^2 [\delta(\nu - \Omega_a) + \delta(\nu + \Omega_a)].$$
(3.11)

Таким образом, спектральная плотность процесса x(t) содержит δ функции Дирака на частотах детерминированных компонент. Именно это резкое повышение спектральной плотности в окрестности частоты детерминированного сигнала позволяет выделять их на фоне случайного процесса $\xi(t)$.

Необходимо проанализировать эффекты дискретизации и конечности выборки исследуемого процесса. Рассмотрим основные особенности построения оценок для дискретного случая. Как уже говорилось выше замена непрерывного процесса на дискретный влечет за собой потерю информации о высокочастотных спектральных составляющих процесса. Это иллюстрируется простыми соображениями, которые обычно связывают с теоремой Котельникова.

Для дискретного стационарного в широком смысле процесса автоковариационная функция будет представлять собой функцию, заданную лишь на дискретном числе сдвигов:

$$C_{k} = M[\xi_{i}\xi_{i+k}] = \langle \xi_{i}\xi_{i+k} \rangle_{t}; \quad C_{0k} = \langle \xi_{i}\xi_{i+k} \rangle_{t} + \frac{1}{2}\sum_{a=1}^{M}A_{a}^{2}\cos(\Omega_{a}k\Delta t), \quad (3.12)$$

где:

$$\langle \xi_i \xi_{i+k} \rangle_t = \lim_{n \to \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \xi_i \xi_{i+k}$$

В этом случае приходится заменять формулу Винера-Хинчина (3.4) ее дискретным аналогом. Именно:

$$S_0(\nu) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_{0k} e^{i\nu k\Delta t} .$$
(3.13)

Однако, последняя формула представляет собой дискретный ряд Фурье, который в общем случае является периодической функцией частоты v с периодом T = 1/v. Если учесть, что спектральная плотность является четной вещественной функцией частоты, т.е. S(v) = S(-v), то отсюда следует, что вся доступная для исследования информация, полученная при построении спектральной плотности по дискретному бесконечному ряду содержится на спектральном интервале $[0, v_N]$, где частота $v_N = \frac{1}{2\Delta t}$ называется частотой Найквиста. В силу обратной теоремы Фурье для дискретного ряда Фурье имеем:

$$C_{0k} = \frac{1}{4\pi v_N} \int_{-v_N}^{v_N} S_0(v) \exp\{-iv \, k\Delta t\} dv \,. \tag{3.14}$$

Чтобы формулы дискретного преобразования Фурье не содержали в явном виде шаг дискретизации Δt , обычно вводят нормированную частоту $f = v\Delta t/2\pi$. В этом случае нормированная частота Найквиста равна $f_N = \frac{1}{2}$. Последний интеграл принимает в этом случае вид:

$$C_{0k} = \int_{-1/2}^{1/2} S_0(f) \exp\{-i2\pi fk\} df.$$
(3.15)

Полученные формулы дают представление о характере потери информации при дискретизации непрерывного процесса. Обратим внимание также на еще один эффект, связанный с дискретизацией. Предположим, что исследуемый процесс представляет собой гармонический процесс с некоторой фиксированной частотой Ω. Соответствующий период гармонического процесса равен $T = 2\pi/\Omega$. Пусть период дискретизации немного больше периода гармонического процесса. Тогда измеренные значения процесса вместо исходной гармоники с периодом Т определяют гармонику значительно большего периода с практически той же амплитудой. Этот эффект называют элайзингом. Фактически любая высокочастотная гармоника из области периодов меньших шага дискретизации за счет эффекта элайзинга превращается в низкочастотную по правилу зеркального отражения относительно частоты Найквиста. Эффект элайзинга требует перед процедурой дискретизации сигнала обязательно проводить высокочастотное сглаживание во избежание ложной интерпретации высокочастотных составляющих процесса как низкочастотных. Эффекты конечности ряда в основном состоят в том, что низкочастотные составляющие процесса с периодом большим, чем длина выборки (временного ряда) не могут быть надежно оценены и воспринимаются как тренды, подлежащие исключению из исследуемого ряда с помощью предварительной фильтрации.

Теперь можно сформулировать общую постановку задачи спектрального оценивания процесса, анализируемого в данной работе и состоящего из процесса помехового фона и частично детерминированного гармонического процесса (лунно-солнечные приливные эффекты): необходимо по данным дискретных измерений вертикальной составляющей напряженности электрического поля приземного слоя на конечном интервале времени получить достоверную оценку амплитуды спектральных компонент на известных частотах лунно-солнечных приливов, оценить отношение сигнал/шум и вероятности ошибок для приливных компонент.

Было осуществлено исследование методов спектрального оценивания с точки зрения решаемой задачи.

3.2. Анализ законов распределения экспериментальных временных рядов E_z в приземном слое атмосферы

В условиях, характеризуемых разнообразием помеховой обстановки, разработка достаточно совершенных методов оценки параметров сигналов возможна на базе современных методов оптимальной обработки принимаемой информации.

71
В настоящее время в технике наблюдения сигналов и оценки их параметров достигнуты значительные успехи. Направление развития радиотехники, связанное с методами оптимального обнаружения и различения сигналов на фоне помех, методами оценки неизвестных параметров сигнала получило название «оптимальный прием сигналов». Научноприкладные работы, связанные с применением методов математической статистики в радиотехнике, существенно расширили радиотехническую проблематику.

Впервые на возможность использования статистических методов в радиотехнике непосредственно указали работы А. Н. Колмогорова [6] и Н. Винера [3], В. А. Котельникова [2]. Теория оптимального обнаружения, различения и оценки параметров сигналов различной природы была развита в работах [18,34,36,37-43].

В соответствии с целевым назначением разных радиотехнических систем и применяемыми математическими методами в теории оптимального приема сигналов условно можно выделить несколько направлений: оптимальное обнаружение и различение сигналов на фоне помех, оценка неизвестных параметров сигнала и помех, разрешение нескольких сигналов и оптимальная фильтрация сообщений, содержащихся в принимаемых сигналах [36]. При оптимальном приеме сигналов в условиях априорно известных некоторых характеристик полезного сигнала, нужно получить оптимальное приемное или решающее устройство, которое бы наилучшим образом воспроизводило или принимало решение с наименьшими ошибками. При синтезе оптимальных приемных устройств важным является выбор критерия оптимальности в соответствии с содержанием решаемой практической задачи и четкая математическая формулировка задачи, учитывающая все априорные сведения. В результате синтеза (оптимизации) должен быть получен оптимальный алгоритм обработки принятого сигнала, который реализуется в виде соответствующих структурных или функциональных схем.

Для того чтобы задача поиска оптимальных правил различения сигналов обрела математическую содержательность, прежде всего, задаются некоторым формальным показателем (критерием) качества различения. В тех задачах, которые удается свести к проверке простых гипотез, продуктивным оказывается критерий минимума среднего риска, называемый также критерием Байеса [36], при котором средний риск равен:

$$\Pi = \sum_{i,k} \prod_{i,k} p_i p_{i,k}, \qquad (3.15)$$

где: $\Pi_{i,k}$ - риск от перепутывания i-го с k-м сигналом; $p_{i,k}$ - условная вероятность перепутывания i-го с k-м сигналом; p_i - вероятность присутствия сигнала в данной реализации.

Критерий Байеса, или минимального среднего риска, требует добиваться минимума (3.15). При отсутствии данных для рисков можно добиться того, чтобы различитель как можно реже ошибался, т. е. чтобы полная вероятность ошибки:

$$P_{i\phi} = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{k=0, k\neq i}^{M-1} p_i p_{i,k}$$
(3.16)

была минимальной. Такой критерий качества называется критерием идеального наблюдателя или критерием Котельникова.

При отсутствии возможности задания не только рисков, но и априорных вероятностей определить полную вероятность ошибки нельзя, но можно предложить вполне удовлетворительный критерий качества — критерий минимума суммы условных вероятностей ошибок:

$$P_{outycn} = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{k=0, k\neq i}^{M-1} p_{i,k} .$$
(3.17)

При обнаружении часто применяют критерий Неймана — Пирсона, предписывающий добиваться минимума вероятности пропуска $p_{\pi c}$ при ограничении сверху на вероятность ложной тревоги $p_{\pi T} \leq p_{\pi T0}$. Стратегия различителя, минимизирующего (3.17), сводится к использованию правила максимума правдоподобия (МП), т. е. к подстановке принятой реализации у (t) в выражение для ФП, известное в силу детерминированности сигналов и статистической определенности помех, и подбору i, максимизирующего ФП. В случае обнаружения детерминированного сигнала (M=2, s₀(t) = 0):

$$P_{0}\prod_{01}W(y(t)|H_{0}<>_{H_{2}}^{H_{1}}(1-p_{0})\prod_{10}W(y(t)|H_{1}), \qquad (3.18)$$

где : P_0 – априорная вероятность отсутствия $S_1(t)$ в y(t); \prod_{01} – риск, связанный с ложной тревогой; \prod_{10} – риск, связанный с пропуском цели; $W(y(t)|H_0$ – условная плотность вероятности при условии, что вероятность гипотезы H_0 (отсутствия сигнала $S_1(t)$ в y(t)); $W(y(t)|H_1$ – условная плотность вероятность вероятности при условии, что вероятность вероятности при условии, что вероятность вероятности при условная плотность вероятность вероятности при условия плотность вероятности на $S_1(t)$ в y(t)); $W(y(t)|H_1$ – условная плотность вероятности при условии, что верна гипотеза $H_1(S_1(t)$ содержится в y(t)).

Правило (3.18) представляют в виде:

$$l = \frac{W(y(t) | H1}{W(y(t) | H0} \Leftrightarrow_{H2}^{H1} l_{\Pi} = \frac{p_0 \prod_{01}}{(1 - p_0) \prod_{10}}, \qquad (3.19)$$

называя отношение 1 двух значений ФП отношением (коэффициентом) правдоподобия (ОП). Байесовский обнаружитель детерминированного сигнала должен для полученной реализации y(t) вычислить ОП 1 и сравнить его с порогом $l_{n,}$, зависящим от рисков и априорных вероятностей отсутствия и наличия сигнала.

Обнаружители, оптимальные по любому из рассмотренных критериев, должны выполнять одни и те же действия: вычислять ОП и сравнивать его с порогом. От конкретного критерия зависит лишь значение порога и поэтому обнаружитель, наилучший по одному критерию, трансформируется в оптимальный по другому простым изменением порога l_п.

Для дальнейшего использования ФП удобно представить в форме:

$$W(y(t) | H_i) = c_y \exp(\frac{2z_i - E_i}{N_0}), \qquad (3.20)$$

где $E_i = \int s_i^2(t) dt$ -энергия i-го сигнала; $z_i = \int_0^T y(t) s_i(t) dt$ корреляционный интеграл(или просто корреляция) принятой реализации i-го сигнала; $c_y = c \exp \left[-\frac{1}{N_0} \int_0^T y^2(t) dt \right]$ коэффициент, зависящий от y(t), но не от 1, и по-

тому не влияющий на решения, принимаемые по результатам сравнения значений соответствующих функций l (условного среднего риска, апостериорной вероятности, ФП), вычисленных для конкретной наблюдаемой реализации y(t).

Исходя из сформулированной в работе задачи: необходимо по данным дискретных измерений на конечном интервале времени анализируемого сигнала, состоящего из процесса помехового фона и частично детерминированного периодического процесса (лунно-солнечные приливные эффекты) получить несмещенную оценку амплитуды спектральных компонент на известных частотах лунно-солнечных приливов, оценить отношение сигнал/шум и вероятности ошибок для приливных компонент. Оценка параметров сигналов есть разновидность оптимальных правил различения сигналов, поэтому алгоритм ОМП (оценка по максимуму правдоподобия) - это разновидность полученного для задачи различения сигналов. В практических задачах оценки параметров должны выполняться с высокой точностью, для достижения которых обеспечивается достаточно длительное время наблюдения и правило оценки должно гарантировать ее несмещенность при неограниченном увеличении интервала анализа или уровня сигнала. Именно такими оптимальными свойствами обладает оценка по максимуму правдоподобия. ОМП в условиях надежных измерений обладает практически наилучшими характеристиками, в том числе и в байесовском смысле.

Данная работа связана с оценкой амплитуды спектральных компонент электрического поля приземного слоя атмосферы на частотах лунносолнечных приливов, значения которых известны, а фаза считается неизвестным параметром. Рассмотрим сигнал, который не может считаться детерминированным, так как содержит случайный параметр — фазу φ : $s(t; \vartheta) = s(t; \varphi)$. В общем виде модель такого сигнала можно записать как:

$$s(t;\varphi) = S(t)\cos[2\pi f_0 + \gamma(t) + \varphi] = \operatorname{Re}\{S'(t)\exp[j(2\pi f_0 t + \varphi)]\}, \quad (3.21)$$

где S(t) и γ (t) – известные законы амплитудной и угловой модуляции; f₀ известная центральная частота; φ – случайная начальная фаза с априорной ПВ W₀(φ); $S'(t) = S(t)e^{j\gamma(t)}$ -комплексная огибающая сигнала s(t), являющегося реализацией s(t; φ) при φ =0: s(t)=s(t;0). Оптимальный приемник должен формировать усредненное ОП (3.22) и сравнивать его с порогом. Поскольку начальная фаза φ сигнала является неэнергетическим параметром, т.е $E(\varphi)=E=(1/2)\int_{0}^{T}S^{2}(t)dt$, выражение (3.22) примет вид:

$$l = \int_{-\pi}^{\pi} \exp\left[\frac{2z(\varphi) - E}{N_0}\right] W_0(\varphi) d\varphi, \qquad (3.22)$$

где $z(\varphi) = \int_{0}^{T} y(t)s(t;\varphi)dt$. Пользуясь тем, что для любых функций u(t), v(t) $\int_{-\infty}^{\infty} u(t)v(t)dt = \int_{-\infty}^{\infty} u_{\perp}(t)v_{\perp}(t)dt$, выражение для $z(\varphi)$ можно представить в виде:

$$z(\varphi) = \operatorname{Re}\left[\frac{1}{2}\int_{0}^{T} y'(t)s'^{*}(t;\varphi)dt\right],$$
(3.23)

где y'(t) и s'(t; ϕ) – аналитические сигналы, соответствующие y(t) и s(t; ϕ): * –знак комплексного сопряжения.

Так как
$$y'(t) = Y'(t) \exp(j2\pi f_0 t)$$
, $s'(t; \varphi) = S'(t) \exp(j2\pi f_0 t + \varphi)$,
где Y'(t) – комплексная огибающая входной реализации y(t), то:

$$z(\varphi) = \operatorname{Re}[z'\exp(-j\varphi)] = Z\cos(\varphi - \arg z'). \qquad (3.24)$$

В последнем равенстве:

$$z' = \frac{1}{2} \int_{0}^{T} Y'(t) S'^{*}(t) dt; Z = |z'|.$$
(3.25)

Во многих задачах начальную фазу сигнала φ можно считать равномерно распределенной на интервале $[-\pi;\pi]$: $W_0(\varphi) = 1/(2\pi)$, $|\varphi| \le \pi$. При этом интеграл (3.24) с учётом (3.25) имеет вид:

$$l = \exp\left(-\frac{E}{N_0}\right) \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \exp\left[\frac{2Z}{N_0}\cos(\varphi - \arg z')\right] d\varphi.$$
(3.26)

Воспользовавшись интегральным представлением модифицированной функции Бесселя нулевого порядка:

$$I_{0}(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \exp[x \cos(\varphi - \theta)] d\varphi, \qquad (3.27)$$

имеем:

$$l = \exp\left(-\frac{E}{N_0}\right) I_0\left(\frac{2Z}{N_0}\right). \tag{3.28}$$



Рис. 3.1. Структурная схема обнаружения сигнала известной частоты со случайной фазой

соотношение (3.55) позволяет решающее правило $l = {}_{>}^{<H_1} l_n$ записать так:

$$Z_{H_{2}}^{H_{1}} Z_{n} = \frac{N_{0}}{2} I_{0}^{-1} \left[\exp\left(E / N_{0}\right) l_{n} \right].$$
(3.29)

Выражение для Z можно записать следующим образом: $Z = \sqrt{(z_1^2 + z_2^2)}$, где:

$$\frac{z_1}{z_2} = \frac{\text{Re}}{\text{Im}} \left[\frac{1}{2} \int_0^T Y'(t) S'^*(t) dt \right] = \int_0^T y(t) S(t) \frac{\cos}{\sin} [2\pi f_0(t) + \gamma(t)] dt, \qquad (3.30)$$

Оптимальный обнаружитель сигнала со случайной начальной фазой должен вычислять длину Z вектора с декартовыми составляющими z₁ и z₂. Как следует из (3.26), Z является абсолютным значением корреляции z' комплексных огибающих принятого колебания Y'(t) и сигнала S'(t). При этом, согласно (3.30), z1 и z2 есть корреляции принятой реализации y(t) с $s(t) = S(t) \cos[2\pi f_0 t + \gamma(t)]$ сигнала квадратурными составляющими И $s_{\perp}(t) = S(t) \sin[2\pi f_0 t + \gamma(t)]$ – детерминированными колебаниями, несущие которых сдвинуты по фазе на угол $\pi/2$. Структура такого преобразователя показана на рисунке 3.1. Инвариантность Z к начальной фазе сигнала s(t; ф) объясняется тем, что значение ф влияет только на аргумент корреляции (3.26) комплексных огибающих Y'(t) и S'(t) тогда как Z есть модульL [36]. Структура, приведенная на рис. 3.1., сохраняет оптимальность и в том случае, когда у сигнала случайна не только фаза, но и амплитуда, причем конкретный вид ПВ W₀(A) может влиять только на пороговые значения Z_n. [36]. Проанализированная структура была взята за основу при построении корреляционного приемника для решения поставленной в данной работе задачи достоверной оценки амплитуды Е z приземного слоя атмосферы на частотах лунно-солнечных приливов.

Для каждой гистограммы была построена аппроксимирующая кривая на основании наиболее близкого закона распределения. При сравнении формы гистограмм было выявлено, что при увеличении длины временного отрезка форма гистограммы стремится к форме гистограммы данных по всему периоду регистрации. Это отчетливо проявляется уже на 10 сутках. Значительная часть гистограмм не являются одномодальными, они представляют собой линейную комбинацию различных законов. Наиболее часто встречающимися являются нормальный закон распределения, закон распределения Коши, а также закон распределения Лапласа. Нестационарный характер регистрируемых сигналов потребовал привлечение нетрадиционных для геофизики методов оценки параметров сигналов, в частности теории оптимального приема.

3.3. Использование корреляционного квадратурного приемника для оценки амплитуды спектральных компонент Е _z приземного слоя атмосферы на частотах лунно-солнечных приливов

Для решения поставленных задач был использован вариант корреляционного квадратурного приемника с включением в его структуру как фильтра низких частот так и косинусоидального окна с целью наиболее достоверной оценки амплитуды спектральных компонент вертикальной составляющей напряженности электрического поля приземного слоя атмосферы на частотах, соответствующих лунносолнечным приливам.

В соответствии с [36] оптимальная оценка уровня сигнала известной частоты со случайной начальной фазой осуществляется по формуле:

$$Z_{1} = \operatorname{Re}_{\mathrm{Im}} \left[\frac{1}{2} \int_{0}^{T} Y(t) \times \tilde{S}(t) dt \right] = \int_{0}^{T} Y(t) \times S(t) \operatorname{sin}_{\mathrm{sin}}^{\mathrm{cos}} [2\pi f_{0}t + \varphi_{o}] dt , \qquad (3.31)$$
$$Z = \sqrt{Z_{1}^{2} + Z_{2}^{2}} , \qquad (3.32)$$

где Y(t) - входная реализация обрабатываемого сигнала, S(t) - опорный (обнаруживаемый) сигнал в виде гармонического колебания на частоте f_o с постоянной амплитудой и начальной фазой ϕ_o , Z - является абсолютным значением корреляции комплексных принятого сигнала и выделяемого (рис. 3.6.).

Были проведены исследования [54-55], которые показали, что такой приёмник имеет частотную характеристику типа $\sin(x)/x$ (рис.3.7.). Эта функция имеет главный максимум (главный лепесток) на частоте f_0 . Ширина главного лепестка: 2/N, где N – число входных отсчётов. Уровень первого бокового лепестка функции $\sin(x)/x$ равен 23% от уровня главного и не зависит ни от диапазона частот, ни от числа входных отсчётов. За разрешающую способность такого устройства можно принять ширину главного лепестка. Для устройства, осуществляющего достоверную оценку амплитуд спектральных компонент напряженности электрического поля приземного слоя, желательно иметь ширину главного лепестка как можно меньше при малом уровне боковых лепестков.

На выходе перемножителя сигнал имеет две составляющие: на суммарных (f+f₀) и разностных(f-f₀)частотах. Интегратор подавляет суммарные частоты и подчеркивает разностные. Его реализация в дискретном виде есть в первом приближении сумматор. Однако, для подчеркивания разностных частот лучше использовать фильтр низких частот (ФНЧ) чем сумматор. При этом, наблюдается улучшение частотных характеристик приемника. Ширина полосы пропускания такого ФНЧ должна быть не менее 1/N Δ T.



Рис. 3.2. Структура корреляционного квадратурного приёмника. n – номер отсчёта; N – общее количество отсчётов; ΔT – время дискретизации входного сигнала; f₀ – опорная частота

Существующие дискретные ФНЧ позволяют добиться сколь угодно узкой полосы пропускания, если число входных отсчетов сигнала больше длительности его переходной характеристики.

Отсюда следует ограничение на длительность переходной характеристики фильтра: L<N Δ T, что не позволяет получить сколь угодно малую его полосу пропускания. Естественно, чем выше ослабление ФНЧ вне полосы пропускания, тем лучше будут подавляться боковые лепестки в частотной характеристике корреляционного квадратурного приемника (ККП).



Рис. 3.3. Частотная характеристика ККП

Если использовать ФНЧ вместо интегратора в ККП, то можно улучшить его характеристики. Структурная схема такого приемника приведена на рис. 3.4.



Рис. 3.4. Структурная схема ККП с фильтром низких частот

Для подбора оптимальных параметров ФНЧ использовался инструмент Filter Design & Analysis Tool (FDATool) из пакета MATLAB 6.5. Исследования показали, что при заданных условиях подходящим является ФНЧ квадратов конечной импульсной наименьших с характеристикой (КИХ). Этот фильтр имеет нерекурсивную структуру, с длиной переходного процесса L=N_τ, где N – порядок ФНЧ, τ - длина линии задержки. При увеличении длины линии задержки, пропорционально уменьшается полоса пропускания. Это позволяет «масштабировать» фильтр к данной разностной частоте. Фильтр имеет почти плоскую характеристику в полосе пропускания и быстро падающую – со скоростью 2,3 дБ/мГц характеристику в переходной полосе.

Первый боковой лепесток находится на уровне 22 дБ. Частотная характеристика фильтра приведена на рис. 3.5.

Применение в ККП фильтра низких частот вместо интегратора позволило улучшить его частотную характеристику при незначительном расширении главного лепестка. Если уровень сигнала в полосе подавления ФНЧ будет не менее 20дБ, то уровень боковых лепестков снизится в 2 раза. Это обстоятельство позволяет повысить достоверность результатов оценки амплитуды при спектральном анализе входных временных рядов. Однако, такое решение не вполне удобно: при обработке на каждой опорной частоте, соответствующей частоте конкретного прилива, необходимо изменять порядок применяемого фильтра.



Рис. 3.5. Частотная характеристика ККП с использованием ФНЧ

Более того, на инфранизких частотах требуется использование фильтров высокого порядка, что увеличивает объём памяти и время обработки.

Альтернативным вариантом решения этой задачи является взвешивание исходных данных окном вида (3.33), где Т - длина входной реализации. Выбор формы окна обусловлен линейностью его фазочастотной характеристики:

$$g(t) = \frac{1 - \cos(\frac{2\pi}{T} \cdot t)}{2}.$$
 (3.33)

При обработке входных данных взвешивающим окном уровень боковых лепестков в частотной характеристике ККП был снижен до 7% от высо- ты главного при его незначительном расширении. Вид АЧХ приведён на рис.3.8. Данная структура была применена для решения задачи оценки уровня спектральных компонент, соответствующих частотам лунно-солнечных приливов в спектрах экспериментальных регистрациях электрического поля приземного слоя атмосферы (рис.3.9.) [47-49,54-56].



Рис. 3.6. Частотные характеристики: а) с взвешиванием исходных данных; б) без взвешивания исходных данных



Рис. 3.7. Корреляционный квадратурный приемник с взвешивающим окном

Оценка амплитуды сигнала, отношения сигнал/шум и вероятности ошибки при анализе лунно-солнечных приливов в электрическом поле приземного слоя осуществлялась следующим образом.

Для сигнала вида: s (t; A) = A s₀(t), где A – амплитуда, подлежащая измерению и являющаяся неизвестным параметром сигнала s(t; A); s₀(t) -

сомножитель, задающий форму сигнала и имеющий единичную энергию $(E_0) = \int s_0^2(t) dt = 1)$. Для структуры, реализующей ОМП для соответствующего параметра (в данном случае А) рассчитывают потенциальную точность измерения. Поскольку А – энергетический параметр, для решения первой из поставленных задач используют правило ОМП, в котором:

$$E(\lambda) = E(A) = \int s^{2}(t; A)dt = A^{2}E_{0} = A^{2}, \ z(\lambda) = z(A) = Az,$$
(3.34)
где $z = \int_{0}^{T} y(t)s_{0}(t)dt$.

Тогда оценкой максимума правдоподобия \hat{A} будет точка максимума по A функции $A_z - A^2/2$. Единственный максимум этого квадратного двучлена соответствует значению A=z, так что $\hat{A} = z$.

Таким образом, ОМП амплитуды сигнала, не содержащего мешающих параметров, можно получить как отсчет на выходе коррелятора с опорой $s_0(t)$ или фильтра, согласованного с $s_0(t)$ при подаче на входы названных устройств реализации у(t).

Расчет потенциальной точности при измерении амплитуды возможен, так как равенство $\hat{A} = z$ означает, что дисперсия ОМП D{ $\hat{A} | A$ } совпадает с дисперсией корреляции z и вычислять дисперсию ОМП по общей методике не нужно. Из D{z}=N₀E₀/2 следует, что D{ $\hat{A} | A$ }=N₀/2 [36]. Данное равенство точное и не связано с асимптотическими свойствами ОМП. Кроме того, измерение амплитуды является редким примером существования строго эффективной оценки, которой и служит ОМП. После учета (3.34) в (3.20):

$$\frac{d\ln W(y(t)|A)}{dA} = \frac{2}{N_0}(z-A) = \frac{2}{N_0}(\widehat{A}-A)$$
(3.35)

- свидетельствует о выполнении необходимого и достаточного условия существования строго эффективной оценки.

Более информативным показателем точности ОМП амплитуды, чем $D\{\hat{A}|A\}$, служит дисперсия относительной ошибки $(\hat{A}-A)/A$, равная $D\{\hat{A}|A\}/A^2 = N_0/(2A^2) = N_0/[2E(A)] = 1/[q^2(A)]$, где $q^2(A) = 2E(A)/N_0$ [36].

Таким образом, модифицированный вариант корреляционного квадратурного приемника с взвешиванием исходных данных косинусоидальным окном позволяет получить оценку средней амплитуды на частотах анализируемых сигналов, а так как ККП является узкополосным фильтром, то оценка на выходе ККП получается на фоне гауссовых помех (выбеливание входного сигнала), а следовательно, она соответствует правилам оптимальной оценки. Программа, реализующая такой приемник, была применена для решения задачи оптимальной оценки амплитуды спектральных компонент, соответствующих частотам лунно-солнечных приливов в спектрах экспериментальных регистраций электрического поля приземного слоя атмосферы. Оценка средней амплитуды вертикальной составляющей напряженности электрического поля в приземном слое атмосферы, а также расчеты дисперсии относительной ошибки оценки были осуществлены по данным станций ВлГУ и ГГО, а также по данным станций Гидрометеорологической службы.

3.4. Оценка степени воздействия лунно-солнечных приливов на электрическое поле приземого слоя атмосферы

Электрические поля, не смотря на сложность систем и условий их регистрации, рассматриваются в геофизике в качестве одного из основных физических факторов взаимодействия процессов, протекающих, в том числе, и в приземном слое. Известно, что вариации электрического поля приземного слоя, вызванные геофизическими процессами, в отличие, в частности, от магнитных, могут испытывать изменения, до порядков величин превышающие фоновые [1]. Основная задача данных исследований связана с оценкой среднего значения амплитуды напряженности вертикальной составляющей электрического поля приземного слоя атмосферы на известных частотах приливов. Такая задача решается с помощью методов спектрального оценивания с использованием больших временных рядов (годы непрерывных регистраций), так как мы имеем дело с частотным диапазоном $10^{-5} - 10^{-7}$ Гц и необходимой разрешающей способностью 10^{-7} -

Результаты анализа законов распределения амплитуды вертикальной составляющей напряженности электрического поля приземного слоя атмосферы показали, что сигнал носит нестационарный характер. Использование классических и параметрических методов спектрального оценивания на таких временных интервалах неприемлемо в силу требования стационарности анализируемого процесса. В этом случае задачу оценки амплитуды электрического поля на частотах приливов удалось решить путем использования нетрадиционного для геофизических задач радиотехнического метода корреляционного квадратурного приемника (ККП) [5-9].

Достоверность результатов оценки амплитуды E_z на частотах приливов подтверждается результатами обработки экспериментальной информации по данным трех разнесенных в пространстве станций, обеспеченных разработанной во Владимирском государственном университете (ВлГУ) аппаратурой, за 1997-2005 годы [2,5-10,12], а также по результатам экспериментальных данных трех станций Гидрометеослужбы, опубликованных, в основном, в ежемесячных сборниках [11]: Воейково – 1966-1995; Верхнее Дуброво – 1974-1995; Душети – 1967-1980. Разработанная в ходе исследований модель проникновения электрических полей в приземном слое под действием приливов [10,12], позволяет осуществить сравнение теоретических и экспериментальных оценок амплитуды электрического поля на частотах приливов. Сопоставимость результатов оценок модели столь сложного многофакторного физического процесса как электрическое поле приземного слоя с оценками по экспериментальным данным подтверждает состоятельность полученных оценок.

На первых этапах исследований был проведен статистический анализ полученных регистраций вариаций напряженности электрического поля приземного слоя атмосферы по разнесенным в пространстве станциям с целью идентификации закона распределения вариаций амплитуды электрического поля. Статистическому анализу подвергались регистрации вариаций напряженности электрического поля в приземном слое атмосферы, полученные на экспериментальном полигоне ВлГУ, станции в радиофизическом корпусе ВлГУ, станции в Главной геофизической обсерватории научно-исследовательском центре дистанционного зондирования атмосферы (ГГО НИЦ ДЗА). Для проверки законов распределения использовалась программа, которая идентифицирует закон распределения реализации в классе 45 различных функций распределения [3,14]. В качестве оптимального закона распределения выбиралось такое распределение, которое находится на минимальном расстоянии от теоретического закона распределения, где мерой расстояния может быть статистика Пирсона, Колмогорова и др. Проанализированы гистограммы распределения амплитуды вертикальной составляющей напряженности электрического поля приземного слоя по данным экспериментального полигона за 2004 год. Для каждой гистограммы была построена аппроксимирующая кривая на основании наиболее близкого закона распределения. Значительная часть гистограмм не являются одномодальными, они представляют собой линейную комбинацию различных законов. Наиболее часто встречающимися оказались нормальный закон распределения и закон распределения Коши. Диапазон изменения средней амплитуды электрического поля на частотах термогравитационных солнечных приливов по станциям ВлГУ и ГГО НИЦ ДЗА составил 16 В/м (S1); 8 В/м (S2); 3 В/м (S3). Отношения сигнал/шум на частотах термогравитационных солнечных приливов составили: на S1 с/ш 7,5÷3; S2 с/ш 5.2÷3; S3 с/ш 3÷2 [10]. Для физической интерпретации результатов использовался широкий комплекс наземных геофизических данных других станций. Были проанализированы экспериментальные данные по электрическому полю приземного слоя атмосферы по станциям Гидрометеорологической службы: Воейково – 1966-1995; Верхнее Дуброво – 1974-1995; Душети – 1967-1980. На рис.3.8. представлены спектры электрического поля вблизи частот основных термических приливов по станции Душети. Среднее значение амплитуды электрического поля и отношение сигнал/шум на частотах приливов S1, S2, S3 по указанным станциям составили соответственно: S1(15В/м, с/ш- 6,4; 10В/м, с/ш- 3,9; 12,4В/м, с/ш- 4,2); S2 (10 В/м,с/ш- 5,2; 7 В/м, с/ш- 4,9; 10В/м, с/ш-5,4); S3(3В/м, с/ш- 5,3; 4В/м, с/ш- 4,9; 6В/м, с/ш- 3,5). В таблице даны результаты оценки средней амплитуды электрического поля приземного слоя атмосферы на частотах термогравитационных приливов, отношения сигнал/шум и дисперсия относительной ошибки оценки.

Сравнение полученных оценок амплитуды электрического поля на частотах солнечных приливов по данным станций на полигоне ВлГУ, в

ГГО НИЦ ДЗА, а также станций Гидрометеорологической службы показывает их сопоставимость и одинаковый порядок результатов с полученными теоретическими оценками [10,12].



Рис.3.8. Термогравитационные солнечные приливы, данные E_z, Душети 1967 – 1980 гг.

Большой массив данных (29 лет, 21 год, 14 лет) позволил получить необходимую разрешающую способность (10⁻⁹ Гц) для разделения близких по частоте приливов P1 и S1 (рис.3.9).

Таблица 5

Солнечные приливы	В	электрическом	поле	Земли
-------------------	---	---------------	------	-------

Назва	ча-	Bepxi	нее Ду	брово	Душети			Воейково			
ние ис-	стота	1974-1995			1	967-19	980	1966-1995			
точ	10-5	А,	- /	D{z}/	А,	с/ш	D{z}/	А,	с/ш	D{z}/	
ник	ΓЦ	В/м	С/Ш	A^2	В/м		A^2	В/м		A^2	
Прилив	1,157	10.4	2.04	0,064	12,4	4,2	0,057	15,5	6,4	0,024	
\mathbf{S}_1	407	10,4	3,94								
Прилив	2,314	71	4,9	0,042	10,4	5,4	0,034	10,2	5,2	0,037	
S_2	814	/,1									
Прилив	3,472	4.4	4,9	0,042	6,2	3,5	0,082	3,3	5,3	0.026	
S ₃	222	4,4								0,036	
Прилив	4,629	1.05	2.2	0.002	2.1	22	0.180	~ ~	4.1	0.050	
S 4	629	1,93	5,5	0,092	$\angle, 1$	2,3	0,189	۷,۷	4,1	0,059	

В спектрах электрического поля просматривается годичная модуляция на основных термогравитационных приливах S1, S2, S3, которая диктуется

периодическим изменением взаимного расположения магнитных силовых линий Земли в точке наблюдения и направления на источник термогравитационных приливов - Солнце.

Известно, что гравитационное возбуждение в общем гораздо слабее, чем термическое. Лунные приливы выделить можно, поскольку они имеют отличающийся период.

Несмотря на то, что их амплитуда мала, они представляют большой интерес, поскольку механизм их возбуждения хорошо известен.

На рис.3 приведен спектр электрического поля приземного слоя вблизи лунного прилива М1 по экспериментальным регистрациям Душети 1967-1980гг.



Рис. 3.9. Лунно-солнечные приливы по экспериментальным регистрациям Душети 1967-1980гг

Осуществлена оценка амплитуды E_z на частотах лунных гравитационных приливов по данным полигона ВлГУ и станциям Гидрометеорологической службы: на частотах лунных гравитационных приливов амплитуда составила от десятых долей В/м до единиц В/м, что соответствует теоретическим оценкам для E_z на частотах лунных приливов согласно разработанной модели [10,12]. Отношение сигнал/ шум на частотах ряда лунных приливов в спектрах электрического поля приземного слоя находится в пределах: с/ш на частоте прилива М1: 1.8 - 3.1; с/ш на частоте прилива M2: 1.3 – 2.3; с/ш на частоте прилива N2: 9 – 1.6. Как видно из результатов анализа E_z на частотах лунных приливов отношения сигнал/шум невелики и не позволяют на сегодня сделать вывод о достоверном выделении лунных гравитационных приливов. На рис. 3.10 приведены спектры электрического поля пограничного слоя атмосферы вблизи частот лунных приливов M1, N2, M2, O1. Отношение сигнал/ шум (q) на частотах лунных при-

ливов находится в пределах: на частоте прилива M1: 1.8 - 3.1, на частоте прилива M2: 1.3 - 2.3, на частоте прилива N2: 0.9 - 1.6, на частоте прилива O1: 2-1.5, на частоте прилива L2: 4.2-1.1(таблица 6). Отношение сигнал шум на частотах лунных приливов изменяется в пределах 4.2-1.1.Среднее значение амплитуды электрического поля на частотах лунных приливов составило 12.2-1.7 В/м (таблица 6), что соответствует теоретическим оценкам для E_z на частотах лунных приливов согласно разработанной модели. В таблице 6 приведены результаты оценки амплитуды E_z с помощью метода корреляционного квадратурного приемника на частотах лунных приливов, отношение сигнал/шум и дисперсия относительной ошибки оценки по данным полигона ВлГУ и станциям Гидрометеорологической службы.



Рис. 3.10. Лунные приливы, данные ВлГУ и Гидрометеорологической службы

Сравнение полученных оценок амплитуд электрического поля на частотах приливов по станциям ВлГУ, ГГО и Гидрометеорологической службы показывает их хорошую сопоставимость и одинаковый порядок результатов с полученными теоретическими оценками. Исследования влияния на E_z в приземном слое атмосферы лунносолнечных приливов интересны с точки зрения изучения взаимосвязи полей различной природы, связанных с геофизическими процессами.

При исследовании таких долгопериодических процессов как лунносолнечные приливы анализ спектрального состава, в частности электрического поля, должен быть осуществлен на основе временных рядов, имеющих длительность от года до десятков лет. Подтвержден нестационарный характер E_z на таких временных интервалах. Этот факт потребовал для осуществления оценки среднего значения амплитуды E_z на частоте каждого прилива привлечения специального радиотехнического метода спектральной оценки, решающего задачу спектрального оценивания при больших объемах временных рядов и нестационарном характере помехового фона.

Таблица б

		Полигон ВлГУ 2004-		Bepx	нее					
	Частота, 10 ⁻			Дуброво 1974-		Душети 1967-1980		Воейково 1966-1995		
При-	⁵ Гц									
ЛИВ		2006		1995						
		А,	~	А,	a	А,	a	А,		
		В/м	q	В/м	q	В/м	q	В/м	q	
M_{f}	0,0890285	12,2	1,5	6,8	2,5	5,8	1,7	2,1	1,1	
Q_1	1,0801489	4,6	1,2	2,2	1,2	4,3	1,2	4,3	1,48	
N ₂	2,1958717	2,7	1,2	1,8	2,25	1,9	1,6	1,2	0,9	
<i>M</i> ₂	2,2371364	3,7	3,1	1,59	2,3	2,03	2,4	1,5	1,8	
O ₁	1,0759210	1,5	2	3,25	1,99	2,71	1,5	1,16	1,7	
M ₁	1,1168081	4,8	2,1	2,59	1,9	2,8	1,8	3,01	3,1	
J ₁	1,2043449	4,7	1,2	2,7	2,1	3,25	2,2	1,5	0,3	
001	1,4628061	4,1	2,4	2,13	1,99	2,17	1,8	2,7	1,5	
2N ₂	1,9389513	4,1	2,3	2,06	1,98	1,9	1,6	3,7	2,1	
L ₂	2,2770266	2,1	4,2	1,6	2,3	1,8	1,2	1,2	1,1	

Лунные приливы в электрическом поле Земли

Полученные оценки средней амплитуды напряженности вертикальной составляющей напряженности электрического поля приземного слоя атмосферы на конкретных частотах приливов позволяют проводить исследование динамики E_z при исходных временных рядах любой длительности, диктуемой необходимой разрешающей способностью.

Оценка среднего значения амплитуды E_z на частотах лунных приливов особенно важна и интересна, так как исследование взаимосвязи лунных гравитационных приливов с E_z в приземном слое атмосферы в отличие от термогравитационных приливов находятся в начальной стадии. На сегодня достигнута необходимая разрешающая способность по частоте для анализа воздействия приливов на электрическое поле приземного слоя атмосферы и стоит задача повышения отношения сигнал/шум. Один из путей повышения отношения сигнал/шум – корреляционная обработка экспериментальных данных по разнесенным в пространстве станциям. Для проведения этих исследований создана необходимая экспериментальная база – на сегодня приемно-регистрирующие комплексы изучения электрического поля в приземном слое атмосферы установлены на четырех станциях: на экспериментальном полигоне ВлГУ, в радиофизическом корпусе ВлГУ, в ГГО НИЦ ДЗА, на оз. Байкал (п.Листвянка) [13].

3.5. Спектральный анализ данных геомагнитных станций в диапазоне термических и лунных приливов

В спектрах электрического [1-5] и магнитного полей приземного слоя атмосферы, полученных с помощью корреляционного квадратурного приемника по большим массивам экспериментальных данных японских геомагнитных станций Какиока (1913-2006гг.) и Мемамбецу(1950-1999гг), благодаря достигнутой высокой разрешающей способности по частоте удалось разделить близкие по частоте приливы P1 и S1, выявлена годичная модуляция на термических солнечных приливах S1, S2, S3, S4, которая диктуется периодическим изменением взаимного расположения магнитных силовых линий Земли в точке наблюдения и направлением на источник термических приливов – Солнце. На рис. 1, 2 приведены примеры результатов корреляционно-спектрального анализа данных геомагнитных станций вблизи частот солнечных приливов (компонента D, H, Z). В таблице 1 дана оценка средних амплитуд и отношения сигнал/шум на частотах термических приливов. Достоверно выделяются четыре термогравитационных солнечных прилива: S1 (сигнал/шум:8-5), S2 (сигнал/шум:8-4), S3(сигнал/шум:5-4), S4 (сигнал/шум: 6-2), K2 (сигнал/шум: 5,2).

На рисунках, приведенных ниже, даны спектры геомагнитного поля японских геомагнитных станций вблизи ряда лунных приливов: М1, М2, N2, O1. Достоверно выделяется лунный прилив М2 (сигнал/шум:5-6).На приливе: N2 – отношение сигнал/шум составляет 2-2,5, O1 (сигнал/шум:3,5) (таблица 7).

Сравнение полученных оценок амплитуд геомагнитного поля (D, H, Z - компоненты) на частотах лунно-солнечных приливов показывает одинаковый порядок результатов с полученными теоретическими оценками (таблица 7).

Таблица 7

Ng	Название источника	Частота, 10 ⁻⁵ Гц	Период, ч	Полигон ВлГУ 2004-2006		Kakioka, D 01.08.1913- 31.07.2007		Memambet- su, D 01.01.1950- 31.12.1999		Memambet- su, H 01.01.1950- 31.12.1999	
				нТл	с/ш	нТл	с/ш	нТл	с/ш	нТл	с/ш
1	Прилив N ₂	2,195871	12,6500	0,3	1,5	0,1	2,5	0,01	2,1	0,04	0,7
2	Прилив М2	2,237136	12,4666	0,3	1,1	0,1	5,1	0,1	6,2	0,1	6,1
3	Прилив О ₁	1,075921	25,8176	0,0 3	0,8	0,05	2,1	0,4	2,4	0,4	3,5
4	Прилив М ₁	1,116808	24,8724	0,0 4	0,7	0,02	2,0	0,04	1,9	0,3	0,7
5	Прилив L ₂	2,277026	12,1991	0,0 1	0,8	0,004	0,3	0,02	1,5	0,1	1,2
6	Прилив S ₁	1,157407	24	1,8	5,1	1,38	7,8	1,1	4,5	6,8	5,2
7	Прилив S ₂	2,314814	12	1,1	4,2	1,1	8,2	0,7	3,5	6,7	6,1
8	Прилив S ₃	3,472222	8	1,1	2,1	0,7	5,5	0,4	3,3	4,5	7,5
9	Прилив S4	4,629629	6	0,9	2,2	0,2	6,1	0,1	1,5	4,2	8,6

Оценка средних амплитуд и отношения сигнал/шум на частотах приливов, избранные данные геомагнитного поля

На рис. 3.11, а-г, приведенных ниже, показаны примеры спектров геомагнитного поля на частотах лунно-солнечных приливов.



Рис. 3.11,а. Лунно-солнечные приливы в Какиока





Рис. 3.11,б. Лунно-солнечные приливы в

ГМ по данным станции Мемамбецу







геомагнитном поле по данным станции

Лунно-солнечные приливы в

Мемамбецу

Рис. 3.11, в.



Рис. 3.11,г. Лунно-солнечные приливы в Мемамбецу и Какиока

геомагнитном поле по данным станции

Заключение к главе

1. Анализ существующих методов классического спектрального оценивания с точки зрения использования их для получения несмещенной оценки амплитуды спектральных компонент на частотах лунно-солнечных приливов позволяет сделать следующий вывод. Проанализированные методы спектрального оценивания: периодограмма Шустера, модели авторегрессии, корреляционные методы, метод максимальной энтропии не смотря на достижение высокого разрешения (ММЭ) не позволяют получить оценку амплитуды на каждой конкретной частоте, соответствующей лунно-солнечным приливам. Указанные выше методы спектральной оценки применимы только на участках стационарности сигнала, не эффективны при наличии высокого уровня помехового фона и не могут быть использованы для анализа нестационарных сигналов.

2.Сформулирована общая постановка задачи: необходимо по данным дискретных измерений нестационарного сигнала на конечном интервале времени получить оценку амплитуды спектральных компонент на заранее известных частотах анализируемых источников.

3.Проанализированы законы распределения амплитуды электрического поля приземного слоя атмосферы. Наиболее часто встречающимися являются нормальный закон распределения, закон распределения Коши, а также закон распределения Лапласа. Подтвержден нестационарный характер анализируемых сигналов.

4.Разработан модифицированный вариант корреляционного квадратурного приемника с включением в его структуру фильтра низких частот или с взвешиванием исходных данных косинусоидальным окном, что позволило повысить достоверность результатов оценки амплитуды на частотах лунно-солнечных приливов. При обработке входных данных взвешивающим окном уровень боковых лепестков в частотной характеристике ККП снижен до 7% от высоты главного при его незначительном расширении. Разработанный метод позволяет получать несмещенную оценку уровня каждой спектральной компоненты анализируемого временного ряда по критерию максимального правдоподобия.

5. Полученные каталоги спектров по результатам экспериментальных исследований 1997-2004 годов позволили проанализировать воздействие

лунно-солнечных приливных эффектов на электрическое поле приземного слоя.

6. Достоверно выделены эффекты воздействия солнечных термогравитационных приливов на электрическое поле приземного слоя атмосферы и получены оценки амплитуд, отношения сигнал/шум и вероятностей ошибок на частотах термогравитационных солнечных приливов по результатам анализа электрического поля приземного слоя атмосферы с помощью радиотехнического метода корреляционного приемника. Диапазон изменения средней амплитуды на частотах термогравитационных приливов составил: 16 В/м (S1), 8 В/м (S2), 3 В/м (S3) по экспериментальным данным станций ВлГУ и ГГО. Отношения сигнал/шум и вероятность ошибки на частотах термогравитационных приливов составили: отношение сигнал/шум на S1 –с/ш 7.5÷3; на S2 с/ш $5.2\div3$; на S3 с/ш $3\div2$; на S4 с/ш $2.5\div2$.

7. Для физической интерпретации результатов использовался широкий комплекс наземных геофизических данных. Были проанализированы экспериментальные данные по электрическому полю приземного слоя атмосферы по станциям Гидрометеослужбы: Воейково – 1966-1995; Верхнее Дуброво – 1974-1995; Душети – 1967-1980. Среднее значение амплитуды электрического поля на частотах приливов S1, S2, S3 по указанным станциям составила соответственно: S1(15В/м, 10В/м, 12В/м); S2 (10 В/м, 7В/м, 10В/м); S3 (3В/м, 4В/м, 6В/м). Большой массив данных (29 лет, 21 год, 14 лет) позволил получить необходимую разрешающую способность для разделения близких по частоте приливов P1 и S1 (10⁻⁹ Гц). В спектрах электрического поля выявлена годичная модуляция на основных термогравитационных приливах: S1, S2, S3. Годичная модуляция диктуется периодическим изменением взаимного расположения магнитных силовых линий Земли в точке наблюдения и направления на источник термогравитационных приливов - Солнце.

8. Сравнение полученных оценок амплитуды электрического поля на частотах солнечных приливов по станциям полигона ВлГУ, станции в ВлГУ, станции в Воейково (ГГО НИЦ ДЗА), станции Верхнее Дуброво и станции Душети показывает их сопоставимость и одинаковый порядок результатов с полученными теоретическими оценками.

9. Оценки амплитуды спектральных компонент на частотах термогравитационных приливов по результатам экспериментальных данных оказались того же порядка, что и теоретические оценки, полученные в результате разработки модели электрических процессов в приземном слое атмосферы. Результат сравнения теоретических и экспериментальных оценок абсолютных значений электрического поля в приземном слое на частотах термогравитационных приливов позволяет сделать вывод об адекватности разработанной модели реальным условиям.

10. Спектральный анализ геомагнитного поля в диапазоне лунносолнечных приливов, который удалось осуществить с возможной на сегодня разрешающей способностью (10^{-9} Гц) показывает, что достоверно выделяются в основном термогравитационные солнечные приливы. По результатам спектральной обработки данных по магнитному полю были получены каталоги спектров термогравитационных лунно-солнечных приливов. Диапазон отношения сигнал/шум по солнечным приливам составляет 2 – 8, по лунным приливам – 2 – 4.

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные методы спектрального оценивания.

2. В каких работах берут свое начало математические основы современных методов спектрального оценивания?

3.В чем основное отличие авторегрессионных методов спектрального оценивания от дискретного преобразования Фурье?

4. В чем заключается условие стационарности процесса в широком смысле?

5.Перечислите три основных направления теории оптимального обнаружения.

6.Какими критериями оптимальности оперирует теория оптимального приема?

7. Запишите уравнение, в соответствии с которым осуществляется оптимальная оценка уровня сигнала известной частоты со случайной начальной фазой.

8. Для чего необходима идентификация закона распределения экспериментальных вариаций анализируемых процессов в теории оптимального приема?

9. Какую задачу решает корреляционный квадратурный приемник?

Библиографические ссылки

- Yule G.U., On a Method of Investigation Periodicities in Disturbed Series, with Spesial Reference to Wolfer's Sunspot Numbers // Phylos. Trans. R. Soc. London, ser. A, vol. 226. – 1927. – P. 267 – 298.
- Котельников, В.А. Теория потенциальной помехоустойчивости / В.А. Котельников // М.: Госэнергоиздат, 1956. – 152 с.
- Wiener N. Generalized Harmonic Analysis. // Acta Math.,vol. 55,1930, P.117-258.
- 4. Bartlett M. S., Periodogram Analysis and Continuous Spectra // Biometrika, vol. 37. – June 1950. – P. 1 – 16.
- 5. Kendall M. G., On the Analysis of Oscillatory Time Series. // J. R. Stat. Soc., vol. 108. 1945. p. 93.
- 6. Колмогоров, А.Н. Интерполирование и экстраполирование стационарных последовательностей / А.Н. Колмогоров // Изв. АН СССР. Сер. Матем. – 1941. – №5. – С. 3 – 14.
- 7. Levinson N., The Wiener (Root Mean Square) Error Criterion in Filter Design and Prediction. // J. Math. Phys., vol. 25. 1947. P. 261 278.
- 8. Robinson E.A., Predictive Decomposition of Time Series with Applications to Seismic Exploration. // MIT Geophysical Analysis Group (GAG), Cambridge, Mass., 1954; Geophysics, vol. 32. – 1967. – P. 418 – 484.
- Heideman M.T., Johnson D.H., Burrus C.S. Gauss and the History of the Fast Fourier Transform. // IEEE Acoust. Speech, and Signal Process. Magazine, vol. 1, October 1984. – P. 14 – 21.
- Cooley J.W., Tukey J.W. An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series. // Math. Comput, vol. 19. – April 1965. – P. 297 –301.
- 11. Parzen E., On Consistent Estimates of the Spectrum of a Stationary Time Series. // Ann. Math. Stat, vol. 28. 1957. P. 329 348.
- 12. Марпл, С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / С.Л. Марпл // М.: Мир, 1990. 584 с.
- Робинсон, Э.А. История развития теории спектрального оценивания /
 Э.А. Робинсон // ТИИЭР, 1982. т.70. N 9. 1982.- С.6-33.

- Schuster A., On the investigation of hidden periodicities with application to a supposed 26–day period of meteorological phenomena. // Terr. Magnet. 1898. – Vol. 3. – P. 13 – 41.
- 15. Розанов, Ю.А. Введение в теорию случайных процессов / Ю.А. Розанов // М.: Наука, 1982. 128 с.
- Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Гмурман // М.: Высшая школа, 2004. – 479 с.
- 17. Тутубалин, В.Н. Теория вероятностей и случайных процессов. / В.Н. Тутубалин // М.: Изд. МГУ, 1992. 170 с.
- Ван Трис, Г. Теория обнаружения, оценок и модуляции / Г. Ван Трис // Пер. с англ., под ред. В.Т. Горяинова, Т.3. – М.: Советское радио, 1977. – 662 с.
- 19. J.P.Burg Maximum entropy spectral analysis // presented at the 37th Int. Meet. Soc. Explor. Geophys. 1968.
- 20. Кендалл, М.Дж. Статистические выводы и связи / М.Дж. Кендалл, А. Стюарт // М.: Наука, 1973. 899 с.
- Кендал, М.Дж. Теория распределений / М.Дж. Кендалл, А. Стюарт // Пер. с англ. В.В. Сазонова, под ред. Колмогорова А.Н. М.: Наука, 1966. – 587 с.
- 22. Дженкинс, Г. Спектральный анализ и его приложения / Г. Дженкинс, Д. Ваттс // М.: Мир, 1972. т.2. 283 с.
- 23. Бокс, Дж. Анализ временных рядов. Прогноз и управление / Дж. Бокс, Г. Дженкинс // М.: Мир, 1974. 197 с.
- 24. Слуцкий, Е.Е. Избранные труды / Е.Е. Слуцкий // М.: Изд. АН СССР, 1960. 457с.
- 25. Журавлев, В.М. Оценивание взаимных спектральных матриц методом максимальной энтропии / В.М. Журавлев, А.В. Прусов; МГИ АН УССР. – Севастополь, Деп. ВИНИТИ, 1986. – N 1604 – 86. – 11 с.
- 26. Журавлев, В.М. Метод максимальной энтропии в многомерном спектральном анализе / Диссертация на соиск. степени к.ф.м.н.,Севастополь, МГИ АН УССР. - 1987.- 320с.
- 27. Стратанович, Р.А. Теория информации / Р.А. Стратанович // М.: Советское радио, 1975. 424 с.
- 28. Фриден, Б.Р. Оценки, энтропия, правдоподобие / Б.Р. Фриден // ТИИЭР, 1985. Т.73. N 12. С. 78 86.

- 29. Кейпон, Н. Пространственно-временной спектральный анализ с высоким разрешением / Н. Кейпон // ТИИЭР, 1969. Т.51. N12. С.78 86.
- Журавлев, В.М. Многомерный метод максимальной энтропии в одномерном спектральном анализе / В.М. Журавлев, Р.А. Валентюк; Деп. ВИНИТИ. – 1987. – N 1804. – 87. – 10 с.
- 31. Тематический выпуск. Спектральное оценивание // ТИИЭР, Пер. под общ.ред. Э.Л.Наппельбаума, 1982. Т.70. № 9. С. 3 298.
- Королюк, В.С. Справочник по теории вероятностей и математической статистике / В.С. Королюк, Н.И. Портенко, А.В. Скороход // М: Наука, 1987. – 640 с.
- 33. Дворянинов, Г.С. Метод максимальной энтропии в многомерном спектральном анализе / Г.С. Дворянинов, В.М. Журавлев, А.В. Прусов // Преп. МГИ АН УССР, 1986, часть 1 – 45с. и часть 2 – 23с.
- 34. Серебренников, М.Г. Выявление скрытых периодичностей / М.Г. Серебренников, А.А. Первозванский // М.: Наука, 1965. 244 с.
- 35. Akaike H., A new looks at the statistical model identification. // JEEE Trans. Automat. Control., 1974. AC 19. P. 227 236.
- 36. Гришин, Ю.П. Радиотехнические системы / Ю.П. Гришин, В.П. Ипатов, Ю.М. Казаринов // Под ред. Ю.М.Казаринова. М.: Высшая школа, 1990. 496 с.
- 37. Тихонов, В.И. Оптимальный прием сигналов / В.И. Тихонов // М.: Радио и связь, 1983. 319 с.
- 38. Тихонов, В.И. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем / В.И. Тихонов, В.Н. Харисов // М.: Радио и связь, 1991. – 608 с.
- Левин, Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники / Б.Р. Левин // М.: Советсткое радио, 1976. 284 с.
- Макс, Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерения / Ж. Макс // Под ред. Н.Г.Волкова. Пер. А.Ф.Горюнова, в 2-х томах. – М.: Мир, 1983. – 567 с.
- Стратонович, Р.Л. Оптимальный прием сигналов в негауссовом шуме / Р.Л. Стратонович, Ю.Г. Сосулин // Радиотехника и электроника. 1966, т.11. №4. С. 497 507.
- 42. Куликов, Е.И. Оценка параметров сигналов на фоне промех / Е.И. Куликов, А.П. Трифонов // М.:Советское радио, 1978. 291 с.

- 43. Трифонов, А.П. Совместное различение и оценка параметров сигналов на фоне помех / А.П. Трифонов, Ю.С. Шинаков // М.: Радио и связь, 1986. 260 с.
- 44. Грунская, Л.В. Лунно-солнечные приливы в электрическом поле атмосферы Земли / Л.В. Грунская, В.Н. Морозов // Известия вузов. Физика. 2003. № 12. С. 71 77.
- 45. Грунская, Л.В. Экспериментальные и теоретические исследования вариаций напряженности электрического поля, обусловленных солнечными и лунными приливами в приземном слое атмосферы / Л.В. Грунская, В.Н. Морозов // Известия вузов. Физика. 2005. №8. С. 33 39.
- 46. Грунская, Л.В. Повышение достоверности спектральной оценки, получаемой с помощью корреляционного квадратурного приёмника / Л.В. Грунская [и др.] // Проектирование и технология электронных средств. – 2004. – Спец. вып. – С. 66 – 71.
- 47. Грунская, Л.В. Оптимальная обработка информации в системе многоканального синхронного мониторинга электромагнитного поля приземного слоя атмосферы / Л.В. Грунская // Тр. VI Междунар. науч.-техн. конф. «Перспективные технологии в средствах передачи информации». – Владимир, 2005. – С. 228 – 230.
- 48. Грунская, Л.В. Оптимальная обработка информации при анализе характеристик электрического поля приземного слоя атмосферы на частотах геофизических источников / Л.В. Грунская [и др.] // Тез. докл. 12-й Рос. гравитационной конф. «Международная конференция по гравитации, космологии и астрофизике». – Казань, 2005. – С. 162.
- 49. Грунская, Л.В. Оптимальная обработка информации в системе многоканального мониторинга электромагнитного поля приземного слоя атмосферы / Л.В. Грунская, В.В. Исакевич // Тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции «Информационно-телекоммуникационные технологии». – Сочи, 2004. – С. 203 – 204.
- 50. Грунская, Л.В. Экспериментально-методический комплекс для изучения изменчивости электромагнитного поля Земли в крайненизкочастотном диапазоне, связанной с глобальными геофизическими явлениями / Л.В. Грунская, В.Н. Журавлев, И.Н. Гаврилов // Ученые записки Ульяновского государственного университета. Серия: Физи-

ческая. – 2002. – № 1(12). – С. 29 – 37.

- 51. Гаврилов, И.Н. Статистический и спектральный анализ экспериментальных вариаций электрического поля приземного слоя в КНЧ диапазоне / И.Н. Гаврилов, Л.В. Грунская, В.В. Исакевич // Проектирование и технология электронных средств. – 2003. – № 2. – С. 53 – 58.
- Grunskaya L.V., Efimov V.A., Gavrilov I.N. Intercommunication of electromagnetism of the surface lower layer geophysical and astrophysical processes // Spacetime and Substance. 2002. N1(12). P. 69 75.
- 53. Грунская, Л.В. Поиск корреляций между электромагнитным полем Земли КНЧ диапазона и гравитационными полями / Л.В. Грунская [и др.] // Тр. Пятой Рос. конф. по атмосферному электричеству. – Владимир, 2003. – С. 35 – 36.
- 54. Грунская, Л.В. Оптимальный приемник в системе мониторинга электрического поля приземного слоя атмосферы / Л.В. Грунская [и др.] // Проектирование и технология электронных средств. – 2005. – № 3. – С. 56 – 60.
- 55. Грунская, Л.В. Модифицированный вариант корреляционного квадратурного приемника / Л.В. Грунская, В.А. Мишин // Тез. 10-й Междунар. науч.-техн. конф. «Радиофизика». – Москва, 2004. – С. 527.
- 56. Грунская, Л.В. Методика обработки регистраций электромагнитного поля Земли КНЧ диапазона / Л.В. Грунская // Материалы Шестой Всерос. науч. – техн. конф. «Методы и средства измерений физических величин». – Нижний Новгород, 2002. – С. 5.
- 57. Грунская, Л.В. Электромагнетизм приземного слоя и его взаимосвязь с геофизическими и астрофизическими процессами : монография / Л. В. Грунская. – Владимир: Посад, 2003. – 103 с.
- 58. Грунская, Л.В. Поиск корреляций между электромагнитным полем Земли КНЧ диапазона и периодическими гравитационными полями / Л.В. Грунская, В.В. Исакевич, Д.В. Виноградов // Известия вузов. Физика. – 2000. – №6. – С. 36 – 42.

- 59. Грунская, Л.В. Взаимосвязь электромагнетизма приземного слоя с геофизическими и астрофизическими процессами / Л.В. Грунская // Материалы науч.-техн. конф. ВлГУ «Математические методы, информационные технологии и физический эксперимент в науке и производстве». – Владимир, 2003. – С. 26 – 27.
- 60. Грунская, Л.В. Экспериментальные исследования реакции атмосферного электричества на лунно-солнечные приливы / Л.В. Грунская [и др.] // Тр. Пятой Рос. конф. по атмосферному электричеству. – Владимир, 2003. – С. 40 – 42.
- 61. Грунская, Л.В. Электромагнетизм приземного слоя и его взаимосвязь с геофизическими и астрофизическими процессами / Л.В. Грунская // Тр. Пятой Рос. конф. по атмосферному электричеству. – Владимир, 2003. – С. 17 – 20.
- 62. Грунская, Л.В. Экспериментальные исследования электрического и магнитного поля Земли крайненизкочастотного диапазона / Л.В. Грунская [и др.] // Тр. IV Междунар. науч.-техн. конф. «Перспективные технологии в средствах передачи информации». Владимир, 2001. С. 42 46.
- 63. Грунская, Л.В. Интерпретация квазирегулярных периодичностей в электромагнитном поле Земли в приземном слое / Л.В. Грунская, В.В. Исакевич, И.Н. Гаврилов // Геофизика и математика: тр. Второй Всерос. конф. Пермь, 2001. С. 327 335.
- 64. Grunskaya L.V., Fedotov M.Yu., The continuous synchronic recording of the geophysical fields ELF variations by the multiplex receiving system // Abstract 5-th international conference "Problems of geocosmos". Sankt-Peterburg. may 24 28, 2004. P. 252 253.
- 65. Грунская, Л.В. Экспериментальные и теоретические исследования взаимосвязи электромагнитного поля земли ультранизкочастотного диапазона с гравитационными полями геофизического и астрофизического происхождения / Л.В. Грунская [и др.] // Международная конференция по гравитации, космологии и астрофизике: тез. докл. на 12-й Рос. гравитационной конф. Казань, 2005. С. 161.
- 66. Грунская, Л.В. Взаимосвязь электромагнитных полей крайненизкочастотного диапазона с глобальными геофизическими процессами / Л.В. Грунская [и др.] // Вопросы теории и практики комплексной геологической интерпретации гравитационных, магнитных и элек-

трических полей: тез. докл. Междунар. шк.-семинара. – Апатиты, 2002. – С. 29 – 31.

- 67. Грунская, Л.В. Геодинамические процессы и вариации электрической составляющей электромагнитного поля Земли КНЧ диапазона / Л.В. Грунская, Д.В. Виноградов // Тез. докл. Х Рос. гравитационной конф. – Владимир, 1999. – С. 265.
- 68. Грунская, Л.В. Эксперимент лета 1998 года по регистрациям электрической составляющей электромагнитного поля Земли КНЧ диапазона / Л.В. Грунская [и др.] // Тез. докл. Х Рос. Гравитационной конф. – Владимир, 1999. – С. 271.
- 69. Grunskaya L.V., Efimov V.A., Gavrilov I.N., Experimental investigations of the interaction between the ELF Earth electromagnetic field and the gravitational fields of geophysical origin // Abstracts of International Summer school–seminar on recent problems in theoretical and mathematical physics. The 14 Petrov school–2002. Kazan. – June22 –July3. – 2002. – P. 22.
- 70. Grunskaya L.V., Isakevich V.V., Investigation of the ELF Variations // Abstracts of 20th Texas Symposium on relativistic Astrophysics, December 10 – 15. Texas. – 2000. – P. 71.
- 71. Grunskaya L.V., Isakevich V.V., Efimov V.A., Gavrilov I.N., Gerasimov M.S., Intercommunication of electromagnetism of the surface lover layer with geophysical and astrophysical processis. // Book of abstracts 4-th International Conference "Problems of geocosmos". Saint-Peterburg. 03 08 June 2002. P. 88 89.
- 72. Грунская, Л.В. Исследование корреляционных связей между электрическим и магнитным полем Земли и глобальными геофизическими процессами / Л.В. Грунская [и др.] // Тез. докл. конф. «Актуальные проблемы современной науки». Самара, 2002. С. 41 42.
- 73. Грунская, Л.В. Поиск корреляций между электромагнитным полем Земли крайненизкочастотного диапазона и периодическими гравитационными полями астрофизического происхождения / Л.В. Грунская, В.В. Исакевич, В.А. Ефимов // Материалы XXXIV Тектонического совещания (30 января – 3 февраля). – Москва : ГЕОС, 2001. – С. 188.
- 74. Грунская, Л.В. Экспериментальные исследования КНЧ электромагнитного поля Земли / Л. В. Грунская [и др.] // Тез. докл. Второй

науч. конф. «Фундаментальные проблемы физики». – Саратов, 2000. – С. 67.

- Грунская, Л.В. Экспериментальные исследования крайненизкочастот-ных вариаций электромагнитного поля Земли / Л.В. Грунская, В.В. Исакевич, Д.В. Виноградов // Тез. докл. VI Регион. конф. «Распространение радиоволн». – Санкт-Петербург, 2000. – С. 17.
- 76. Теория передачи дискретных сообщений // М.: Советское радио, 1970. 728 с.
- 77. Калашников, Б.А. Исследование атмосферных помех радиоприему
 / Б.А. Калашников, Ю.К. Попов // В межвуз. сб. науч. трудов:
 Радиопомехи КНЧ диапазона и их природа. Рязань, 1976. С. 3 10.
- 78. Ионов, В.В. Оптимальное совместное обнаружение двух коррелированных помех / В.В. Ионов, В.Н. Кунин, А.Н. Лапин // В межвуз. сб. научных трудов: Повышение эффективности и надежности радиоэлектронных систем. Ленинград, 1976. – С. 117 – 120.
- 79. Бару, Н.В. Радиопеленгаторы дальномеры ближних гроз / Н.В. Бару, И.И. Кононов, М.Е. Соломник // Л.: Гидрометеоиздат, 1976. 142 с.
- 80. Бормотов, В.Н. Экспериментальное наблюдение расщепления первого мода шумановского резонанса / В.Н. Бормотов, Б.В. Лазебный, В.Ф. Шульга // Геомагнетизм и аэрономия. 1973. 13. № 2. С. 297 301.
- Fellman E., Analyse des Resonances de Schumann Energistree Simultanement en Deux Station Tres Eloignees. Ph. D. Dissertation. on. Saarbucken, 1973. – 35. – P. 187 – 189.
- 82. Ogawa T., Tanaka Y., Miura T., Yasuhara M., Observations of Natural ELF and VLF Electromagnetic Noises by Using Ball Antennas // J.Geomag, Geoelectr., 1966. 18. № 4. P. 443 454.
- Ogawa T., Tanaka Y., Fraser–Smith A.C. Gendrin R., Worldwide Simultaneity of a Q–Type ELF Bust in the Schumann Resonance Frequency Range // J. Geomag, Geoelectr., 1967. 19. №4. P. 377 384.
- 84. Грунская, Л.В. Эффекты, возникающие при приеме электромагнитного поля вблизи мощной тепловой струи / Л.В. Грунская, В.Н. Кунин, М.С. Александров // Геомагнетизм и аэрономия. 1986. Т.2. С. 359 361.
- 85. Грунская, Л.В. Об измерении разности потенциалов в проводящих средах / Л.В. Грунская, В.П. Терещенков // Межвуз. сб. научных трудов «Вопросы низкотемпературной плазмы». Рязань, 1978. С. 52 54.
- 86. Грунская, Л.В. Исследование помеховой обстановки под землей и под водой / Л.В. Грунская, В.Н. Кунин // Межвузовский сборник научных трудов «Радиопомехи КНЧ диапазона и их природа». – Рязань, 1976. – С. 53 – 62.
- 87. Грунская, Л.В. Анализ спектров электрического поля Земли при работе тепловой установки / Л.В. Грунская; ВПИ. Владимир, 1984. 8 с. Деп. в ВИНИТИ 24.01.84, № 827-85.
- 88. Грунская, Л.В. Обострение диаграммы направленности приемной антенны с помощью кепстрального анализа / Л.В. Грунская, В.Н. Кунин, В.В. Ионов; ВПИ. Владимир, 1986. 6 с. Деп. в ВИНИТИ 6.02.86, № 862-В86.
- 89. Грунская, Л.В. Методика обработки результатов синхронной регистрации поля КНЧ диапазона наземными и подземными каналами / Л.В. Грунская; ВПИ. Владимир, 1991. 5 с. Деп. в ВИНИТИ, № 2052-В91.
- 90. Грунская, Л.В. Селективные свойства подземного приемного канала при регистрации грозовых разрядов / Л.В. Грунская; ВПИ. Владимир, 1991. 6 с. Деп. в ВИНИТИ, №2051-В91.
- 91. Грунская Л.В. О слабой корреляции естественных флуктуаций КНЧ поля над и под границей раздела воздух-земля / Л.В. Грунская; ВПИ. – Владимир, 1992. – 6 с. – Деп. в ВИНИТИ, № 3323-В92.
- 92. Грунская, Л.В. Регистрация электрической составляющей поля Земли КНЧ диапазона с помощью подземных антенн / Л.В. Грунская, В.Н. Кунин // Тез. докл. на Межведомств. Сем. «Распространение радиоволн». – Красноярск, 1986. – С. 90 – 91.
- 93. Грунская, Л.В. Анализ характеристик антенн КНЧ, помещенных в проводящую среду / Л.В. Грунская, В.Н. Кунин, В.В. Ионов // Тез. докл. всесоюзн. конф. «Прием и анализ СНЧ колебаний». – Воронеж, 1987. – С. 102.
- 94. Грунская, Л.В. Об измерении электрического поля Земли КНЧ диапазона / Л.В. Грунская // Тез. докл. Всесоюз. конф. «Прием и анализ СНЧ колебаний». – Владимир, 1980. – С. 14 – 15.

- 95. Пат. 2078400 Российская Федерация, кл. 6 Н 04 В1/10. Способ устранения местных помех при регистрации сверхнизкочастотных сигналов / Грунская Л.В.; заявитель и патентообладатель Грунская Л.В. – № 93030230/09; заявл. 25.05.93; опубл. 27.04.97, Бюл. № 12. – 3 с.: ил.
- 96. А.с. 1385111 СССР, кл. 4 G 01 S 11/00, G 01 W 1/16. Устройство для измерения дальности до молниевых разрядов / Л.В. Грунская (СССР). 3986513/24-09 ; заявл. 02.12.85 ; опубл. 30.03.88, Бюл. № 12. 3 с. : ил.
- 97. Зимин, Е.Ф. Измерение параметров электрических и магнитных полей в проводящих средах / Е.Ф. Зимин, Э.С. Кочанов // Энергоиздат, 1985. 92 с.
- 98. Лавров, Г.А. Приземные и подземные антенны / Г.А. Лавров, А.С. Князев // Советское радио, 1965. 472 с.
- 99. Ogawa T., Tanaka Y., Yasuhava M., Schumann Resonances and World wide T. A. // Y. Geomag, Ceocieetr., 1969. № 1. P. 447 452.
- 100. Карнишин, В.В. Антенны в проводящих средах / В.В. Карнишин,
 В.В. Акиндинов // Радиотехника и электроника. 1982. Т.27. № 11. С. 2065 2071.
- Soderberg E.F., ELF noise in the sea at dephts from 30 to 300 meters,
 J.Geophus. Res., V. 74. May 1. 1969. P. 2378 2387.
- 102. Дроздов, К.И. Подземная антенны средство избавиться от помех / К.И. Дроздов // Техника связи. 1934. № 2. С. 51 52.
- 103. Уилер, Длинноволновые антены на подводных лодках / Уилер // В кн.: Распространение длинных и сверхдлинных радиоволн. Сб. статей. Под ред. В.В.Пестрякова. Изд–во иностр. лит–ры, 1960. – С. 256 – 260.
- 104. Щукин, А.Н. Распространение радиоволн / А.Н. Щукин // Связь, 1949. 370 с.
- 105. Имянитов, И.М. Приборы и методы для излучения электричества атмосферы / И.М. Имянитов // Гостехиздат, 1957. 483 с.
- 106. Имянитов, И.М. Приборы для длительных измерений напряженности электрического поля атмосферы в сложных метеорологических условиях / И.М. Имянитов [и др.] // Известия АН СССР: Сер. геофиз.. – 1956. – № 9. – С. 1121 – 1127.

- 107. Михайловская, В.В. Приборы для измерения напряженности электрического поля / В.В. Михайловская, О.М. Назаренко // Труды ГГО, 1977. – Вып. 442. – С. 96 – 102.
- 108. Гордюк, В.П. Исследование принципов построения приборов для измерения напряженности электрического поля в приземном слое атмосфер / В.П. Гордюк // Труды ГГО. Ленинград, 1981. Вып. 442. – С. 96 – 102.
- 109. Harnwell G.P., van Voorhis S.N., Electrostatic generating voltmeter. // Rev. Sci. Instrum. 4. 1933. C. 54.
- 110. Lueder H., Elektrishe Registrirung von heranziehenden Gewittern und die Feinstruktur des Iuftelekrischen Gewitterfeldes. // Met.Z. 60. 1943.
 340 51.
- 111. Trump J.G., Safford E.J., van de Graaff R.J., Generating voltmeter for pressure. // insulated H.V. sources, Rev. Sci. Instrum. 11. 1940. 54 6.
- 112. Waddel R.C., An electric field meter for use on aeroplanes. // Rev. Sci. Instrum. 19. 1948. 31 5.
- 113. Шварц, Я.М. Возможности и опыт создания электрического флюксметра вибрационного типа / Я.М. Шварц, С.И. Андреева, В.Г. Бородулина // Труды ГГО. Ленинград, 1967. – Вып. 204. – С. 18 – 27.
- 114. Гапонов, М.Л. Регистрация быстрых вариаций вертикальной компоненты электрического поля у поверхности Земли / М.Л. Гапонов, В.Г. Кобзев // Атмосферное электричество и магнитосферные возмущения. М.: ИЗМИРАН, 1983. – С. 142 – 145.
- 115. Авторское свидетельство № 623163 // СССР Б.И. № 33, 1978.
- 116. Авторское свидетельство № 873162 // СССР Б.И. № 38, 1981.
- 117. Анисимов, С.В. Измеритель напряженности электрического поля / С.В. Анисимов, Н.Н. Русаков // Атмосферное электричество и магнитосферные возмущения. – ИЗМИРАН, 1983. – С. 9 – 10.
- 118. Ярошенко, А.Н. К вопросу об измерениях вертикальной составляющей геоэлектрического поля / А.Н. Ярошенко // Атмосферное электричество и магнитосферные возмущения. ИЗМИРАН, 1983. С. 127 130.
- 119. А.С. 830256 СССР. Датчик электрического поля / В.И. Струминский (СССР). – 1981.Бюл. № 18. – 210 с.

- 120. Струминский, В.И. Струнный электростатический флюксметр / В.И. Струминский, С.П. Татаринов // Атмосферное электричество: Труды II Всесоюзного симпозиума. М.: Гидрометеоиздат, 1984. С. 72 74.
- 121. Франк-Каменецкий, А.В. Некоторые характеристики вариаций вертикальной компоненты атмосферного электрического поля по данным ст. Восток / А.В. Франк-Каменецкий // Атмосферное электричество и магнитосферные возмущения. – ИЗМИРАН, 1983. – С. 91–97.
- 122. Грунская, Л.В. Приемно-регистрирующая аппаратура для исследования взаимосвязи электрического поля приземного слоя атмосферы с геофизическими процессами / Л.В. Грунская, В.А. Ефимов // Проектирование и технология электронных средств. – 2006. – № 1. – С. 69 – 74.
- 123. Грунская, Л.В. Мобильный приемно-регистрирующий комплекс для мониторинга электромагнитного поля приземного слоя атмосферы / Л.В. Грунская [и др.] // Проектирование и технология электронных средств. – 2005. – № 2. – С. 69 – 74.
- 124. Грунская, Л.В. Система многоканального синхронного мониторинга электромагнитных полей КНЧ диапазона приземного слоя / Л.В. Грунская [и др.] // Проектирование и технология электронных средств. – 2004. – Спец. вып. – С. 38 – 45.
- 125. Грунская, Л.В. Приемно-регистрирующий комплекс для изучения атмосферного электрического поля / Л.В. Грунская [и др.] // Проектирование и технология электронных средств. – 2002. – №1. – С. 44 – 48.
- 126. Грунская, Л.В. Мониторинг электромагнитного поля приземного слоя в УНЧ диапазоне / Л.В. Грунская, В.А. Ефимов // Тр. 6-й Междунар. науч.-техн. конф. «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии». – Владимир, 2004. – С. 219 – 222.
- 127. Грунская, Л.В. Приемно-регистрирующая система КНЧ диапазона / Л.В. Грунская [и др.] // Тр. V Междунар. науч.-техн. конф. «Перспективные технологии в средствах передачи информации» ПТСПИ-2003. – Владимир, 2003. – С. 196 – 199.
- 128. Федотов, М.Ю. Разработка цифровой метеостанции для регистрации атмосферных параметров / М.Ю. Федотов, Л.В. Грунская // Тр.

Пятой Рос. конф. по атмосферному электричеству. – Владимир, 2003. – С. 156 – 159.

- 129. Грунская, Л.В. Система многоканального синхронного мониторинга электромагитных полей КНЧ диапазона приземного слоя / Л.В. Грунская [и др.] // Тр. Пятой Рос. конф. по атмосферому электричеству. – Владимир, 2003. – С. 119 – 121.
- 130. Грунская, Л.В. Приемно-регистрирующий комплекс для изучения атмосферного электрического поля / Л.В. Грунская [и др.] // Сб. материалов Четвертой Междунар. науч.-техн. конф. «Чкаловские чтения». – Егорьевск, 2002. – С. 220 – 221.
- 131. Грунская, Л.В. Приемно-регистрирующая система КНЧ диапазона / Л.В. Грунская // Тр. Междунар. конф. «Перспективы технологии в средствах передачи информации ПТСПИ». – Владимир, 2003. – С. 196 – 199.
- 132. Грунская, Л.В. Система аналого-цифрового преобразования многоканального приемного комплекса / Л.В. Грунская, Ю.А. Апполонов // Тез. 10-й Междунар. науч.-техн. конф. «Радиоэлектроника». – Москва, 2004. – С. 109.
- 133. Грунская, Л.В. Система многоканального синхронного мониторинга электромагнитных полей / Л.В. Грунская, С.В. Елисеева // Тез. 10й Междунар. науч.-техн. конф. «Радиофизика». –Москва, 2004.–С. 528.
- 134. Фрадин, А.З. Измерение параметров антенно-фидерных устройств
 / А.З. Фрадин, Е.В. Рыжков // М.: Связь, 1972. 352 с.
- 135. Валитов, Р.А. Радиотехнические измерения / Р.А. Валитов // М.: Сов. радио, 1963. 632 с.
- 136. Роткевич, В. Техника измерений при радиоприеме / В. Роткевич, П. Роткевич // М.: Связь, 1969. – 496 с.
- 137. Кондаков, В.П. Методика градуировки приемников КНЧ диапазона
 / В.П. Кондаков, Л.В. Грунская // Межвуз. сб. науч. тр. «Радиопомехи КНЧ диапазона и их природа». – Рязань. – 1976. – С. 24 – 26.
- 138. Wipple E.J.W., On the association of the diurnal variation of electric potential gradient in fine weather with the distribution of thunderstorms over the globe // Quart. J. R. Met. Soc. 55, 1929. P. 1 17.

Глава 4. СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ В СЕТИ РАЗНЕСЕННЫХ В ПРОСТРАНСТВЕ СТАНЦИЙ

В данной главе описана структура приемно-измерительного комплекса на экспериментальном полигоне ВлГУ, на станции в ВлГУ и на станции в ГГО НИЦ ДЗА. Приведены основные параметры аппаратуры, использованной для экспедиционных и стационарных исследований напряженности атмосферного электрического поля. Проанализирована методика измерения и восстановления абсолютных значений вертикальной составляющей напряженности электрического поля приземного слоя атмосферы.

4.1. Приемно-регистрирующий комплекс экспериментального полигона для исследования лунно-солнечных приливов

Для осуществления данного метода был обеспечен режим синхронных регистраций на трех станциях: станция полигона ВлГУ, станция в радиофизическом корпусе ВлГУ и станция в ГГО НИЦ ДЗА.

При непосредственном участии автора на экспериментальном полигоне кафедры физики ВлГУ были созданы установки с наземными, подземными и подводной антеннами [1-7,8-10].

На втором этапе исследований для решения задачи мониторинга вертикальной составляющей напряженности электрического поля приземного слоя атмосферы в приемный комплекс были включены электростатические флюксметры – приборы для измерения напряженности атмосфернного электрического поля. Градуировка подобных малогабаритных приборов не представляет больших проблем и получаемые с их помощью оценки амплитуды спектральных компонент электрического поля в приземном слое атмосферы могут осуществляться в абсолютных единицах.

В основе построения электростатических флюксметров использован метод, разработанный на принципе электростатического генератора. Действие электростатического генератора основывается на том, что при внесении в переменное электрическое поле проводящего тела, в последнем возникает движение индуцированных зарядов, причем величина тока, создаваемого перемещающимися зарядами, пропорциональна вызывающему его изменению поля [11]. Любая конструкция генератора должна преобразовывать измеряемое постоянное электрическое поле в переменное, воздействующее на измерительный электрод, то есть должен существовать элемент, за счет периодического перемещения которого меняется величина электрического поля на электроде, воспринимающем поле. Электростатический генератор состоит из: а) неподвижной измерительной пластины, изолированной от корпуса и всех остальных частей датчика; б) вращающейся экранирующей пластины, соединенной с корпусом щетками; в) нагрузки, через которую измерительная пластина соединяется с усилителем. Форма напряжения при чисто омической нагрузке имеет вид прямоугольников, а при чисто емкостной – треугольников. При нагрузке, состоящей из R и C, форма напряжения близка к синусоидальной [12]. Нагрузки электростатических генераторов выбирают по возможности минимальными, так как именно они определяют те требования, которые предъявляются к сопротивлению изоляции измерительных пластин. Однако, чем меньше сопротивление нагрузки, тем меньшее напряжение будет на нем создаваться и, следовательно, потребуется большее усиление, а значит помехоустойчивость схемы снижается [13,14]. Предел увеличения чувствительности определяется величиной контактной разности потенциалов, существующей между измерительной пластиной и вращающимся экраном [14]. Эта контактная разность, точнее ее изменение во времени, приводит к неустойчивости нулевого положения индикатора отчетного прибора. Особенно сильно ее влияние проявляется, когда на приборе осаждается влага. Для уменьшения влияния контактной разности потенциалов измерительную пластину и экран делают из одинаковых материалов и покрывают неокисляющимися покрытиями (никелируют).

Первым прибором этого типа был прибор Харнуэлла и Ван-Воориса [15]. Это был один из вариантов существовавших тогда электростатических флюксметров, однако он не нуждался в применении коммутатора. Разработкой различных вариантов флюксметра занимались также: Людер [16], Трамп, Сэффорд и Ван де Грааф [17], Ваддель [18] и другие.

В настоящее время для изучения атмосферного электрического поля вблизи поверхности Земли различными группами исследователей

разработаны измерители: вибрационного типа [19-22], электростатические флюксметры [23,24], струнный вибрационный измеритель [25,26], балансированная дипольная антенна [27].

На принципе электростатического генератора в ГГО им. Воейкова разработаны ротационные электростатические многолопастные флюксметры [12-14]. Основными достоинствами прибора являются: 1) прибор не требователен к качеству изоляции; 2) приспособлен для круглосуточной непрерывной работы в течение нескольких лет; 3) можно производить измерения во время дождя и снега; 4) благодаря тому, что блок с измерительной пластиной можно отнести на значительное расстояние от пульта управления, удается проводить измерения в мало нарушенном поле; 5) малая инерционность, позволяющая наблюдать быстропротекающие грозовые процессы; 6) возможность измерения знака поля.

Электростатические флюксметры используются на экспериментальном полигоне с 1998 года. На основе анализа многолетнего опыта работы с электростатическими флюксметрами на кафедре физики ВлГУ разработана новая конструкция прибора. В нем использован в качестве привода двигатель от накопителя на жестких магнитных дисках персональной ЭВМ (винчестера). Механическая часть винчестера изготавливается с особой точностью. Это обусловлено самим назначением устройства. В нем применяются бесконтактные шаговые двигатели, скорость вращения которых стабилизирована системой автоподстройки, времязадающим элементом в которой является кварц. Двигатель хорошо сбалансирован и рассчитан на длительную работу в непрерывном режиме. Следует отметить также, что он достаточно компактен, что позволяет сделать флюксметр на его основе максимально плоским. В разработанной конструкции используется винчестер с дисками диаметром 130 мм и скоростью вращения 3600 об/мин. При шести лопастной вращающейся экранирующей пластине частота сигнала, снимаемого с измерительного электрода, равна 360 Гц. Это значительно выше, чем у известных устройств, и позволяет более эффективно подавлять помехи на частоте сети. Измерительный электрод такой же конфигурации, как и экранирующая пластина, изолирован от земли и нагружен на сопротивление 10 Мом. При этом требования к качеству изоляции могут быть снижены и прибор будет работоспособен и при высокой влажности. Сигнал с нагрузки снимается повторителем напряжения на ОУ 140УД8А с входным сопротивлением порядка 50 Мом и подается на полосовой усилитель. Центральная частота настройки усилителя равна 360 Гц при полосе

10 Гц на уровне 3дБ. Усилитель обеспечивает подавление частотных компонент входного сигнала на частотах 360-10 Гц не менее 20 дБ. Он выполнен на операционном усилителе 140УД8Б, который охвачен обратной связью в виде двойного Т-моста. При этом возможна подстройка центральной частоты и коэффициента усиления усилителя. Сигнал с выхода полосового усилителя подается на синхронный детектор, опорный сигнал на второй вход которого формируется специальной схемой. Она включает в себя фотодатчик, который с точностью до фазы отслеживает частоту снимаемого с измерительной пластины сигнала, и фазосдвигающую схему, аналогичную схеме полосового усилителя. В синхронном детекторе, выполненном на аналоговом перемножителе 525ПС2А, сигналы перемножаются. При этом выделяется огибающая информационной составляющей, которая фильтруется в НЧ-фильтре с частотой среза 5Гц. Такая обработка позволяет не только наилучшем способом подавить помехи, но определить знак сигнала (направление поля). Затем через буферный усилитель на ОУ 157УД1 сигнал выводится к устройству регистрации (компьютер).

В процессе данных исследований созданы, проградуированы и прошли испытания на экспериментальном полигоне флюксметры с незагерметизированной (рис. 4.1,б.) и с загерметизированной (рис. 4.1,а.) электронной частью. Разработанная конструкция всепогодного флюксметра внедрена В практику мониторинга вертикальной составляющей электрического поля приземного слоя атмосферы в сети разнесенных в пространстве станций (полигон ВлГУ, станция в ВлГУ, станция в ГГО НИЦ ДЗА, станция на оз. Байкал). Основные чувствительность - 0,2 В/м/мВ; реальная характеристики приборов: рабочая полоса частот устройства - 4,5 Гц; неравномерность коэффициента передачи в полосе частот - 0,5 дБ; подавление сетевой помехи на частоте 50 Гц - не менее 40 дБ.

Описанные приемные каналы экспериментального полигона служат основной экспериментальной базой проводимых исследований взаимосвязи электрических полей приземного слоя атмосферы с приливными эффектами.

116

4.2. Структура приемно-регистрирующих комплексов, разнесенных в пространстве

Экспериментальные работы осуществляются на уникальном загородном полигоне ВлГУ, расположенном в 50 км от г. Владимира на территории 4 га и служащего для непрерывных синхронных регистраций электрического и магнитного полей в диапазоне (0.00001-100 Гц). Комплекс приемных антенн включает в себя антенны наземного типа, подземного и подводного типа, магнитные антенны (феррозондовые магнитометры), флюксметры для измерения электростатического поля в приземном слое, систему графитовых электродов, метеокомплекс (рис.4.1) [28-39].

Для проведения исследований электрического поля в приземном слое атмосферы в 1997 году на экспериментальном полигоне ВлГУ была создана станция многоканальной синхронной регистрации, отслеживания, хранения и обработки информации по электромагнитному полю приземного слоя атмосферы с тестированием и калибровкой аппаратуры с помощью ЭВМ. Система предназначена для автоматического сбора информации с датчиков и их калибровки. Система обеспечивает синхронное преобразование входного сигнала, цифровую фильтрацию помех, аналогоцифровое преобразование сигналов с приемных каналов, помехозащищенную посылку данных в центральный пульт сбора, управляемую программно (в цифровом коде) генерацию стабильного низкочастотного сигнала для калибровки датчиков, а также отсчетов точного времени при помощи термостатированного генератора и синхронизацию моментов измерений с текущим временем. Система рассчитана на передачу данных в ЭВМ через стандартный последовательный порт (на рис. 6.2. фото оконечного пункта системы регистрации). На рис. 6.3. приведена структурная схема приемно-регистрирующего комплекса.





Рис. 4.1,а. Электростатический флюксметр с загерметизированной электронной частью



Рис. 4.1, б. Электростатический





Рис. 4.1, в. Феррозондовый магнитометр



Рис. 4.1, г. Цифровая метеостанция



Рис. 4.1,д. Датчик радиационного фона

Отличительными особенностями системы является аналогоцифровое преобразование сигналов непосредственно в месте их получения и использование для связи надежной помехозащищенной цифровой сети наоснове промышленного интерфейса RS-485. Высокая надежность и помехозащищенность линии связи обеспечивается дифференциальной передачей сигналов и применением для проверки достоверности информации контрольной суммы CRC-16. Информация со всех источников поступает в центральный контроллер. Основными функциями, выполняемыми контроллером, являются поддержание точного счета реального времени, синхронизация выборок АЦП, упаковка и пересылка накапливаемой информации в компьютер для архивирования и в блок индикации для отображения. Разработан и включен в приемную систему опорный генератор для синхронизации работы приемного комплекса со стабильностью 10⁻⁸с. Для контроля информации разработан цифровой блок индикации.

Созданы, протестированы и включены в работу приемного комплекса электрометрические усилители на базе твердотельного буфер-усилителя AD549JH (рис. 4.2.).

В 2003г впервые была осуществлена точная привязка результатов измерений к всемирному времени (UTC) при помощи системы GPS. Система GPS предназначена для точного определения координат на местности.

Выполнение этой задачи требует точной временной синхронизации приемников GPS-сигнала. Система GPS состоит из 24 спутников, каждый из которых имеет на борту высокостабильные атомные (рубидиевые) часы. Спутниковые часы синхронизируются на каждом витке с цезиевым стандартом времени Agilent 5071A, установленным в Морской обсерватории США и являющимся также одним их хранителей единого времени (UTC).

Приемник GPS, получая сигнал одновременно с 5-6 спутников, определяет свое местонахождение, а также непрерывно синхронизирует свои внутренние часы с единым временем. В настоящее время система GPS рассматривается как основа для всемирного распространения единого времени. Теоретическая максимальная точность привязки к единому времени с использованием GPS составляет 40 нс. Однако, такая точность требует применения дорогого прецизионного оборудования, содержащего собственный атомный стандарт частоты. Дешевые приемники с термостатированным кварцевым стандартном частоты позволяют получить привязку с точностью не хуже 500 нс, что является достаточным в нашем случае. Для использования в системе сбора данных приобретен GPS приемник eTrex фирмы Garmin, имеющий цифровой интерфейс и сообщающий время (при условии видимости не менее 4 спутников) с точностью не менее 0,5 мкс и дискретностью 0,01 сек., который используется в качестве основного датчика точного времени (рис. 6.2).

Система регистрации экспериментального полигона





Зимний вариант системы регистрации





Система регистрации

в радиофизическом корпусе ВлГУ





Элементы системы регистрации: 1 – синхронизирующий генератор; 2 - контроллер; 3 - приемник GPS; 4 – метеостанция на твердотельных датчиках; 5 – блок АЦП

Приемно-регистрирующий комплекс на оз. Байкал, п. Листвянка



Рис. 4.2. Система мониторинга электрического поля приземного слоя атмосферы в сети разнесенных в пространстве станций



Экспериментальный полигон

Рис. 4.3. Функциональная схема системы регистрации

Разработана программа автоматического сбора данных, приема предназначенная для информации из специализированного контроллера через последовательный порт типа RS-232 и сохранения ее на диск. Программа автоматического сбора данных предназначена для приема информации от регистрирующих датчиков и сохранения ее на диск. Информация поступает ИЗ специализированного контроллера, ΑЦΠ опрашивающего датчиков подключенного ЭВМ через И К последовательный порт типа RS-232.

Для повышения надежности работы запись производится не постоянно, а квантовано, через равные промежутки времени (интервал составляет 2 минуты). Кроме того, предусмотрено восстановление целостности информации после сбоя (например, из-за пропадания питания): промежуток, в течение которого не производилась запись, заполняется средним значением сигнала. В процессе работы на экране отображаются графики каналов, количество и параметры которых задаются пользователем. Возможны 3 вида каналов: базовые, ассоциированные с одним из физических каналов измерения по формуле y = kx+b; суммирующие, рассчитываемые на основании базовых по формуле линейной комбинации $y_c = k_0 + k_1 y_1 + ... k_n y_n$; перемножающие, также рассчитываемые на основании базовых - уп = $y_1 y_2$...у_п. Всего можно создать до 256 каналов. Для каждого канала задаются: уникальный идентификатор файла, имя канала, единицы измерения, коэффициенты формулы (если есть) и признаки сохранения на диск и отображения на экране. Создавать, удалять каналы, а также изменять их настройки можно в процессе регистрации, не останавливая работу. Перед началом регистрации требуется ввести специальную информацию о логическом подключении АЦП к контроллеру, которая передается при инициализации системы, а также директорий, куда будет производиться сохранение данных. Раз в 1 секунду из контроллера поступает посылка данных, содержащая точное время и результаты измерения. Программа помнит последнее время каждой посылки и в случае, если какая-либо посылка не принята (разрыв между посылками составляет более 1 секунды) формирует разрыв данных. Такая ситуация возможна при помехах в линии связи с ЭВМ или сбоях питания контроллера. В последнем случае первый опрос GPSприемника производится не раньше, чем через 2 секунды.

Данные сохраняются на диск файлами раздельно по каналам: каждый канал записывается в свой файл, начинающийся уникальным идентификатором. Кроме того, ведется разделение записи по суткам: каждые сутки формируется свой набор файлов каналов. Внутри файла данные идут непрерывно через 1 секунду. Изменение параметров каналов, а также возможные временные разрывы реализуются в программе при помощи редакций каналов: при очередном изменении или разрыве текущий файл закрывается и создается новый с новыми параметрами (или новым временем начала при разрыве). Под номер редакции отведены 3 цифры в конце имени файла - таким образом, возможна 1000 редакций.

Такой подход оправдывает себя при малом числе изменений параметров каналов (система настраивается в начале, потом лишь вносятся некоторые коррективы) и нечастых сбоях передачи данных. Программа позволяет просматривать результаты измерений по дням. Пользователь выбирает желаемую дату, программа сканирует директории данных и находит все каналы, записанные в этот день, выводя их перечень пользователю. Оператор, выбирая тот или иной канал, может просматривать ход записи в процессе регистраций. Для уменьшения вероятности сбоя регистрации по вине оператора (при неверных введенных значениях) было решено реализовать простую защиту паролем, которая блокирует изменение ряда важных параметров каналов, если пароль не введен. Также для повышения надежности работы прием данных из контроллера, интерфейс и сохранение данных, а также восстановление данных после сбоя реализованы в виде 3-х программных потоков, из которых поток интерфейса и сохранения родительский, а остальные дочерние. Для мониторинга состояния программы и системы в целом в процессе работы ведется лог-файл, куда записываются все, требующие внимания, события (сбои питания, переход на таймер ЭВМ и обратно на GPS, возможные сбои и внутренние ошибки программы и др.).

Запущена метеостанция с цифровым каналом передачи информации, обеспечивающая полную интеграцию с приемно-регистрирующим комплексом. В качестве первичных преобразователей применены датчики: температуры: LM335 фирмы National Semiconductor (погрешность +0,5 °C); давления: MPX4115AP фирмы Motorola (погрешность +0,75%); влажности: HIH3610-004 фирмы Honeywell (погрешность +2%) (рис.3.1,г.).

Многоканальный мониторинг осуществляется с 1997 года на экспериментальном полигоне и с 2003 года параллельно на созданной станции в ВлГУ и станции в ГГО НИЦ ДЗА, оснащенными аппаратурой, созданной в ходе данных исследований.

На созданной в 2003 году станции в радиофизическом корпусе ВлГУ непрерывные регистрации осуществляются следующими каналами: канал 1 - электростатический флюксметр; канал 2 - феррозондовый магнитометр, Н - компонента; канал 3 - датчик температуры; канал 4 - датчик давления; канал 5 - датчик влажности (рис. 4.2.).

Приемно-регистрирующий комплекс 2004 -2006 года на экспериментальном полигоне включает следующие приемные каналы:

канал 1 - наземная 10-метровая антенна, усилитель AD549JH;

канал 2 - наземная 40-метровая антенна, усилитель AD549JH;

канал 3 - подземная 10-метровая антенна, усилитель AD549JH;

канал 4 - электростатический флюксметр;

канал 5 - электростатический флюксметр;

канал 6 - феррозондовый магнитометр, D - компонента;

канал 7 - графитовые электроды с базой 150 метров, В7-26;

канал 8 - датчик температуры;

канал 9 - датчик давления;

канал 10 - датчик влажности;

канал 11 - датчик скорости ветра;

канал 12 - датчик радиационного фона ДРГЗ-02.

канал 14 - приземная 10-метровая антенна, усилитель AD549JH.

канал 15 - вертикальная штыревая антенна;

В 2004 году запущен новый приемно-регистрирующий комплекс на базе ГГО НИЦ ДЗА (г. Санкт-Петербург), оснащенный приемнорегистрирующей аппаратурой, созданной в ходе выполнения данного проекта: электростатический флюксметр, 16-битный аналого-цифровой преобразователь, специализированный контроллер. С 2004 года комплекс в ГГО НИЦ ДЗА работает в непрерывном режиме, синхронно с комплексами ВлГУ и экспериментального полигона (рис. 4.2.). Приемнорегистрирующий комплекс 2004 года в радиофизическом корпусе ВлГУ (на расстоянии 50 км от полигона) (рис. 4.2.):

канал 1 - электростатический флюксметр;

канал 2 - феррозондовый магнитометр, Н - компонента;

канал 3 - датчик температуры;

канал 4 - датчик давления;

канал 5 - датчик влажности.

Система регистрации станции ВлГУ включает в себя электростатический флюксметр, феррозондовую магнитную антенну, 2 16-битных аналогоцифровых преобразователя и цифровую метеостанцию, идентичную применяющейся на полигоне и содержащей датчики температуры, давления и влажности. Сигнал с усилителей, а также с прочих первичных преобразователей (магнитные антенны, измеритель радиационного фона и т.п.) поступает на аналого-цифровой преобразователь, работающий по принципу уравновешивания заряда и обеспечивающий 100 преобразований в секунду с точностью 0,05% и разрешающей способностью 16 бит. Перед каждым измерением производится автоматическая калибровка преобразователя. Операции измерения, калибровки и пересылки данных выполняются под управлением встроенного в каждый блок АЦП микроконтроллера. Пересылка данных производится через цифровой интерфейс RS-485, позволяющий пересылать пакеты цифровой информации в полудуплексном режиме на расстояние до 1200 м со скоростью до 250 кБод. Каждая линия интерфейса гальванически развязана как со стороны передатчика, так и со стороны приемника при помощи быстродействующих оптронов, что исключает влияние электромагнитных помех в длинной линии связи на входные аналоговые цепи и защищает дорогостоящую аппаратуру от выхода из строя при попадании на линию связи значительных электрических потенциалов. Информация со всех источников поступает в центральный контроллер. С 2003 года на станциях осуществлена точная привязка результатов измерений приемных каналов к всемирному времени (UTC) при помощи спутникового приемника GPS.

125

4.3. Методика измерения и восстановления абсолютного значения E_z в приземном слое атмосферы

Надежное функционирование измерительного комплекса и достоверность полученных результатов могут быть обеспечены лишь при периодическом контроле работоспособности и калибровке по электрическому полю.

Методы измерения напряженности электрического поля в широком частотном диапазоне разработаны достаточно хорошо [40,41,25,26]. В связи с постоянно развивающимися потребностями в исследовании электрических полей приземного слоя атмосферы возникает необходимость проведения количественных оценок их уровней.

На рис. 6.4 представлен конденсатор, созданный для предварительной градуировки электростатического флюксметра. На пластины подается напряжение от источника постоянного напряжения, которое изменяется в пределах от 0 до ±200 В. При этом в конденсаторе создается электрическое поле, напряженность которого изменяется от 0 до 800 В/м. При изменении напряжения фиксировались показания флюксметра с помощью вольтметра. Полученная амплитудная (градуировочная) характеристика прибора приведена на рис. 4.4. Выходное напряжение флюксметра линейно зависит от напряженности электрического поля. Для удобства измерений реальных физических величин характеристика путем регулировок смещена по оси абсцисс на 1,5В. Чувствительность устройства равна 0,2 В/м/мВ. Для снятия частотной характеристики на пластины конденсатора подавалось 100 В постоянного напряжения плюс переменное напряжение с амплитудой 30 В, изменявшееся по частоте от 0 до 100 Гц. С изменением частоты фиксировались показания флюксметра. Полученная нормированная частотная характеристика прибора приведена на рис. 4.4. Реальная рабочая полоса частот устройства равна 4,5 Гц. Неравномерность коэффициента передачи в полосе частот – 0,5 дБ, подавление сетевой помехи на частоте 50 Гц – не менее 40 дБ. С 2004 года калибровка электростатических флюксметров осуществляется в электростатической камере сертифицированного калибратора КНЭП-1, разработанного в ГГО НИЦ ДЗА (рис.6.4).





Наладка и предварительная градуировка электростатического флюксметра





Градуировка флюксметра электростатической камере калибратора КНЭП-1, ГГО НИЦ ДЗА

Экспериментальная частотная характеристика флюксметра

100000

Рис. 4.4. Градуировка электростатических флюксметров

4.4. Современная система мониторинга на физическом полигоне ВлГУ

На физическом экспериментальном полигоне ВлГУ создана система многоканального синхронного мониторинга электрического и геомагнитного поля с метеопараметрами. Разработка приемно-регистрирующего комплекса началась с 1972 года. Основной экспериментальной базой проводимых исследований является физический экспериментальный полигон ВлГУ, расположенный в 40 км от г. Владимира на территории 4 га и служащий для непрерывных синхронных регистраций электрического и геомагнитного полей в инфранизкочастотном (ИНЧ) диапазоне. Комплекс приемных антенн включает в себя антенны наземного типа, подземного и подводного типа, магнитные антенны (феррозондовые магнитометры), флюксметры для измерения электростатического поля в приземном слое, систему графитовых электродов, метеокомплекс [4-6].

Непрерывный мониторинг электрического и геомагнитного поля приземного слоя атмосферы в инфранизкочастотном диапазоне осуществляется с целью: фундаментальные исследования электромагнитного поля приземного слоя атмосферы; изучение атмосферного электричества; обнаружение электромагнитных предвестников землетрясений; оценка гравитационного воздействия Лунных приливов на ЭМПЗ; оценка гравитационно-волнового воздействия астрофизической природы; био-физическое влияние ИНЧ ЭМПЗ на показатели здоровья человека [1-3,7-10].

Созданный комплекс выполняет задачи: регистрация электрического поля, геомагнитного поля, метеоданных; сбор, обработка и хранение результатов мониторинга; удаленный анализ баз экспериментальных данных [1-154].

За 2010-2017 годы осуществлена модернизация приемно-регистрирующей системы мониторинга на физическом экспериментальном полигоне на базе программно-аппаратного комплекса «Мегаполис-TM». Модернизация приемно-регистрирующего комплекса физического полигона возникла в связи с необходимостью обеспечения удаленного доступа к информации, получаемой по датчикам полигона, а также в связи с необходимостью обеспечения системы сбора данных отказоустойчивым промышленным компьютером и системой АЦП повышенной надежности.

На рисунке 1 показана общая структура разрабатываемой системы мониторинга, находящейся на полигоне ВлГУ. В системе применяются

промышленный компьютер, программируемый логический контроллер (ПЛК), встроенные и внешние АЦП компании Advantech, метеостанция, все элементы монтируются в герметичный шкаф, который имеет термостатирование. Таким образом, надежность системы существенно увеличилась, и появилась возможность применять систему при отрицательных температурах в режиме 24/7.



Рис. 4.5. Структура разработанного переносного комплекса регистрации данных мониторинга с промышленной надежностью

Для промышленного контроллера разработано программное обеспечение (ПО) на языке Си под систему ROM-DOS. Основные выполняемые задачи разработанной программы: опрос всех подключенных датчиков системы, первичная обработка, фильтрация и передача данных на персональный компьютер (ПК). Универсальность системы заключается в том, что ПО ПЛК имеет встроенный модуль конфигурации, который с ПК может быть настроен под любые типы датчиков: аналоговые, подключенные через удаленные АЦП серии ADAM40XX и встроенные АЦП серии ADAM50XX и цифровых по интерфейсу RS485.

Разработанный комплекс имеет выход в глобальную сеть Интернет и доступ к удаленному рабочему столу, по которому осуществляется про-

смотр текущих, архивных данных и настройка системы. В отличие от имеющихся систем мониторинга разработанная система является переносной, мобильной.

На рисунке 2 приведен алгоритм работы встроенного программного обеспечения программируемого логического контроллера.

На рисунке 3 показан внешний вид разработанной системы сбора данных. Система сбора данных включает: промышленный компьютер, промышленный контроллер, роутер, термостат, обогреватель, сетевой коммутатор, источник бесперебойного питания.

Для промышленного компьютера было также разработано программное обеспечение на языке C++ под операционную систему Windows в котором осуществляется запись баз данных, просмотр архивных записей и обработка данных. Так же в этой программе можно настраивать промышленный контроллер и другое оборудование системы. На рисунке 4 представлен графический интерфейс разработанного ПО для ПК.

На сегодняшний день система мониторинга полностью готова и запущена в работу на экспериментальном полигоне ВлГУ. Также разработан и изготовлен датчик регистрации электростатического поля – флюксметр.

На рисунке 4.9 показан внешний вид разработанного и изготовленного флюксметра. Основные характеристики разработанного флюксметра: диапазон измерения ± 10000 В/м; точность измерения 2 В/м; чувствительность устройства равна 0,2 В/м/мВ; реальная рабочая полоса частот устройства равна 4,5 Гц; неравномерность коэффициента передачи в полосе частот – 0,5 дБ, подавление сетевой помехи на частоте 50 Гц – не менее 40 дБ. На цилиндрическом корпусе установлен герметизированный четырех-контактный разъем, через который на прибор заводится питание от сетевого импульсного источника питания на 12В и подсоединяется двухпроводная линия. В корпус прибора встроен грозозащитный АЦП фирмы Advantech, выход RS485 с которого подключается к ПЛК разработанной системы.



Рис.4.6. Алгоритм работы встроенного программного обеспечения программируемого логического контроллера



Рис.4.7. Система сбора данных мониторинга электрического поля приземного слоя атмосферы, геомагнитного поля, метеоданных



Рис. 4.8. Внешний вид операторского пункта с запущенной программой регистрации



Рис. 4.9. Внешний вид электростатического флюксметра

На рисунке 4.10 приведены примера записей электрического поля приземного слоя атмосферы, осуществленного с помощью разработанной системы мониторинга.

В настоящее время разрабатывается более компактный вариант переносной системы мониторинга, помещающийся в блоке размером (0,3м х 0,3м х 0,3м). Разрабатывается новый датчик электрического поля флюксметр: АЦП флюксметра, кроме преобразования измеренных данных со своих пластин, имеет дополнительные 7 входов, для подключения различных аналоговых датчиков, таких как магнитометр, метеостанция, дозиметр и др. Таким образом к флюксметру на небольшом удалении возможно подключить любые необходимые сенсоры, для осуществления тех или иных измерений, в зависимости от поставленной цели мониторинга. А разъемный вариант соединения обеспечит быструю замену того или иного датчика, что является несомненным преимуществом при работе в удаленных полевых условиях. Система питается от источника напряжением 12В, благодаря этому есть возможность использовать автомобильный аккумулятор в качестве питания, при рабочем токе 1,5А система может работать без подзарядки в среднем около двух суток. При необходимости система может работать и от сети переменного тока с использованием AC/DC преобразователя. Получаемые данные мониторинга с помощью комплекса используются для изучения взаимосвязи электромагнитных полей пограничного слоя атмосферы Земли с геофизическими и астрофизическими процессами и для исследования рисков возникновения заболеваний, связанных с характеристиками природной среды в промышленно развитом регионе.



Рис.4.10 Примеры записи Ez за период 08.11.2017 – 10.11.2017

Заключение к главе

1. Использование широких возможностей экспериментального полигона ВлГУ, представляющего собой многоканальный приемный комплекс надземного и подземного типов антенн, разнесенного в пространстве на десятки и сотни метров и служащего для регистрации электромагнитных полей приземного слоя атмосферы, является важным в решении основных задач данной работы. 2. Для обеспечения проводимых исследований электрического поля приземного слоя атмосферы была разработана и создана система трех приемно-регистрирующих комплексов E_z. Создана система многоканального мониторинга, отслеживания, хранения и обработки информации по электрическому полю с метеоданными в приземном слое атмосферы в сети разнесенных в пространстве станций: станция на экспериментальном полигоне ВлГУ; станция в радиофизическом корпусе ВлГУ; станция в ГГО НИЦ ДЗА. При разнесенном приеме удается накопить полезный сигнал и ослабить действие местных помех после корреляционной обработки результатов регистраций по отдельным каналам.

3. Ha экспериментальном полигоне ВлГУ создана станция многоканальной синхронной регистрации, отслеживания, хранения и обработки информации по электромагнитному полю приземного слоя атмосферы с тестированием и калибровкой аппаратуры с помощью ЭВМ. автоматического сбора информации с Система предназначена для датчиков и их калибровки. Система обеспечивает синхронное преобразование входного сигнала, цифровую фильтрацию помех, аналогоцифровое преобразование сигналов с приемных каналов, помехозащищенную посылку данных В центральный пульт сбора, управляемую программно (в цифровом коде) генерацию стабильного низкочастотного сигнала для калибровки датчиков, а также отсчетов при помощи термостатированного генератора и точного времени синхронизацию моментов измерений с текущим временем. Система передачу данных в ЭВМ через стандартный рассчитана на последовательный порт.

4. Разработан электростатический флюксметр, отличающийся простотой и надежностью работы, с эксплутационными характеристиками, позволяющими использовать его как в экспедиционных, так и в стационарных условиях. Изготовлена серия таких приборов. В процессе данных исследований созданы, проградуированы и прошли испытания на флюксметры экспериментальном полигоне с загерметизированной электронной Основные характеристики приборов: частью. чувствительность - 0,2 В/м/мВ; реальная рабочая полоса частот устройства - 4,5 Гц; неравномерность коэффициента передачи в полосе частот - 0,5 дБ; подавление сетевой помехи на частоте 50 Гц - не менее 40 дБ.

135

5. Разработана система тестирования и калибровки измерительного комплекса, позволяющая оперативно в процессе регистраций осуществлять контроль работоспособности приемной аппаратуры и каналов связи.

6.Разработанная современная система мониторинга позволяет осуществлять сбор данных, их хранение, дистанционный просмотр данных, обработку экспериментальных данных. В отличие от имеющихся систем мониторинга наша система является переносной, мобильной. Разработка системы осуществлялась на базе имевшегося комплекса, который как и большинство систем мониторинга являлся стационарным. Удаленный доступ к базам данных позволяет анализировать результаты мониторинга удаленно и корректировать характеристики системы.

7.Разрабатываемая система мониторинга может быть использована на геофизических базах ВлГУ, Камчатки, Обнинска, Воейково, на оз.Байкал. Получаемые данные мониторинга с помощью комплекса используются для изучения взаимосвязи электромагнитных полей пограничного слоя атмосферы Земли с геофизическими и астрофизическими процессами и для исследования рисков возникновения заболеваний, связанных с характеристиками природной среды в промышленно развитом регионе. Разработанная система мониторинга характеристик природной среды может быть использована как на стационарных научно-исследовательских базах мониторинга, так и на передвижных. Актуальность создания мобильного, переносного приемно-регистрирующего комплекса заключается в возможности осуществления мониторинга характеристик природной среды, влияющих на здоровье человека по территории Владимирской области.

8. Разработан электростатический флюксметр, отличающийся простотой и надежностью работы, с эксплутационными характеристиками, позволяющими использовать его как в экспедиционных, так и в стационарных условиях. Изготовлена серия таких приборов. В процессе данных исследований созданы, проградуированы и прошли испытания на флюксметры экспериментальном полигоне с загерметизированной электронной Основные характеристики приборов: частью. чувствительность - 0,2 В/м/мВ; реальная рабочая полоса частот устройства - 4,5 Гц; неравномерность коэффициента передачи в полосе частот - 0,5 дБ; подавление сетевой помехи на частоте 50 Гц - не менее 40 дБ.

136

9. Разработана система тестирования и калибровки измерительного комплекса, позволяющая оперативно в процессе регистраций осуществлять контроль работоспособности приемной аппаратуры и каналов связи.

Контрольные вопросы

1. Какие задачи решает постановка регулярных измерений атмосферно-электрических параметров в сети разнесенных в пространстве станций?

2. Опишите структурную схему системы мониторинга атмосферных электрических полей физического экспериментального полигона ВлГУ.

3. Каков принцип работы электростатических флюксметров?

4. Для чего необходима система тестирования и калибровки приемно-регистрирующей аппаратуры?

5. В чем заключаются особенности системы калибровки электростатических флюксметров?

6. Каковы преимущества разнесенного в пространстве приема электрических полей?

7. С какой целью в систему мониторинга включен GPS- приемник?

8. Какие задачи решает программное обеспечение процесса мониторинга?

Библиографические ссылки

- 91. Грунская, Л.В. Об измерении разности потенциалов в проводящих средах / Л.В. Грунская, В.П. Терещенков // Межвуз. сб. научных трудов «Вопросы низкотемпературной плазмы». – Рязань, 1978. – С. 52 – 54.
- 92. Грунская, Л.В. Исследование помеховой обстановки под землей и под водой / Л.В. Грунская, В.Н. Кунин // Межвузовский сборник научных трудов «Радиопомехи КНЧ диапазона и их природа». – Рязань, 1976. – С. 53 – 62.
- 93. Грунская, Л.В. Анализ спектров электрического поля Земли при работе те тепловой установки / Л.В. Грунская; ВПИ. Владимир, 1984. 8 с. Деп. в ВИНИТИ 24.01.84, № 827-85.

- 94. Грунская, Л.В. Обострение диаграммы направленности приемной антенны с помощью кепстрального анализа / Л.В. Грунская, В.Н. Кунин, В.В. Ионов; ВПИ. Владимир, 1986. 6 с. Деп. в ВИНИТИ 6.02.86, № 862-В86.
- 95. Грунская, Л.В. Методика обработки результатов синхронной регистрации поля КНЧ диапазона наземными и подземными каналами / Л.В. Грунская; ВПИ. Владимир, 1991. 5 с. Деп. в ВИНИТИ, № 2052-В91.
- 96. Грунская, Л.В. Селективные свойства подземного приемного канала при регистрации грозовых разрядов / Л.В. Грунская; ВПИ. – Владимир, 1991. – 6 с. – Деп. в ВИНИТИ, №2051-В91.
- 97. Грунская Л.В. О слабой корреляции естественных флуктуаций КНЧ поля над и под границей раздела воздух-земля / Л.В. Грунская; ВПИ. Владимир, 1992. 6 с. Деп. в ВИНИТИ, № 3323-В92.
- 98. Грунская, Л.В. Об измерении электрического поля Земли КНЧ диапазона / Л.В. Грунская // Тез. докл. Всесоюз. конф. «Прием и анализ СНЧ колебаний». – Владимир, 1980. – С. 14 – 15.
- 99. Пат. 2078400 Российская Федерация, кл. 6 Н 04 В1/10. Способ устранения местных помех при регистрации сверхнизкочастотных сигналов / Грунская Л.В.; заявитель и патентообладатель Грунская Л.В. № 93030230/09; заявл. 25.05.93; опубл. 27.04.97, Бюл. № 12. 3 с.: ил.
- 100. А.с. 1385111 СССР, кл. 4 G 01 S 11/00, G 01 W 1/16. Устройство для измерения дальности до молниевых разрядов / Л.В. Грунская (СССР). 3986513/24-09 ; заявл. 02.12.85 ; опубл. 30.03.88, Бюл. № 12. 3 с. : ил.
- 101. Имянитов, И.М. Приборы и методы для излучения электричества атмосферы / И.М. Имянитов // Гостехиздат, 1957. – 483 с.
- 102. Имянитов, И.М. Приборы для длительных измерений напряженности электрического поля атмосферы в сложных метеорологических условиях / И.М. Имянитов [и др.] // Известия АН СССР: Сер. геофиз.. – 1956. – № 9. – С. 1121 – 1127.
- 103. Михайловская, В.В. Приборы для измерения напряженности электрического поля / В.В. Михайловская, О.М. Назаренко // Труды ГГО, 1977. – Вып. 442. – С. 96 – 102.
- 104. Гордюк, В.П. Исследование принципов построения приборов для измерения напряженности электрического поля в приземном слое атмо-

сфер / В.П. Гордюк // Труды ГГО. Ленинград, 1981. Вып. 442. – С. 96 – 102.

- 105. Harnwwell G.P., van Voorhis S.N., Electrostatic generating voltmeter. // Rev. Sci. Instrum. 4. 1933. C. 54.
- 106. Lueder H., Elektrishe Registrirung von heranziehenden Gewittern und die Feinstruktur des Iuftelekrischen Gewitterfeldes. // Met.Z. 60. – 1943. – 340 – 51.
- 107. Trump J.G., Safford E.J., van de Graaff R.J., Generating voltmeter for pressure. // insulated H.V. sources, Rev. Sci. Instrum. 11. 1940. 54 6.
- 108. Waddel R.C., An electric field meter for use on aeroplanes. // Rev. Sci. Instrum. 19. – 1948. – 31 – 5.
- 109. Шварц, Я.М. Возможности и опыт создания электрического флюксметра вибрационного типа / Я.М. Шварц, С.И. Андреева, В.Г. Бородулина // Труды ГГО. Ленинград, 1967. – Вып. 204. – С. 18 – 27.
- 110. Гапонов, М.Л. Регистрация быстрых вариаций вертикальной компоненты электрического поля у поверхности Земли / М.Л. Гапонов, В.Г. Кобзев // Атмосферное электричество и магнитосферные возмущения. М.: ИЗМИРАН, 1983. – С. 142 – 145.
- 111 Авторское свидетельство № 623163 // СССР Б.И. № 33, 1978.
- 112. Авторское свидетельство № 873162 // СССР Б.И. № 38, 1981.
- 113. Анисимов, С.В. Измеритель напряженности электрического поля / С.В. Анисимов, Н.Н. Русаков // Атмосферное электричество и магнитосферные возмущения. – ИЗМИРАН, 1983. – С. 9 – 10.
- 114. Ярошенко, А.Н. К вопросу об измерениях вертикальной составляющей геоэлектрического поля / А.Н. Ярошенко // Атмосферное электричество и магнитосферные возмущения. – ИЗМИРАН, 1983. – С. 127–130.
- 115. Роткевич, В. Техника измерений при радиоприеме / В. Роткевич, П. Роткевич // М.: Связь, 1969. 496 с.
- 116. Кондаков, В.П. Методика градуировки приемников КНЧ диапазона / В.П. Кондаков, Л.В. Грунская // Межвуз. сб. науч. тр. «Радиопомехи КНЧ диапазона и их природа». – Рязань. – 1976. – С. 24 – 26.
- 117. Франк-Каменецкий, А.В. Некоторые характеристики вариаций вертикальной компоненты атмосферного электрического поля по данным

ст. Восток / А.В. Франк–Каменецкий // Атмосферное электричество и магнитосферные возмущения. – ИЗМИРАН, 1983. – С. 91 – 97.

- 118. Грунская, Л.В. Приемно-регистрирующая аппаратура для исследования взаимосвязи электрического поля приземного слоя атмосферы с геофизическими процессами / Л.В. Грунская, В.А. Ефимов // Проектирование и технология электронных средств. – 2006. – № 1. – С. 69 – 74.
- 119. Грунская, Л.В. Мобильный приемно-регистрирующий комплекс для мониторинга электромагнитного поля приземного слоя атмосферы / Л.В. Грунская [и др.] // Проектирование и технология электронных средств. – 2005. – № 2. – С. 69 – 74.
- 120. Грунская, Л.В. Система многоканального синхронного мониторинга электромагнитных полей КНЧ диапазона приземного слоя / Л.В. Грунская [и др.] // Проектирование и технология электронных средств. – 2004. – Спец. вып. – С. 38 – 45.
- 121. Грунская, Л.В. Приемно-регистрирующий комплекс для изучения атмосферного электрического поля / Л.В. Грунская [и др.] // Проектирование и технология электронных средств. – 2002. – №1. – С. 44 – 48.
- 122. Грунская, Л.В. Мониторинг электромагнитного поля приземного слоя в УНЧ диапазоне / Л.В. Грунская, В.А. Ефимов // Тр. 6-й Междунар. науч.-техн. конф. «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии». – Владимир, 2004. – С. 219 – 222.
- 123. Грунская, Л.В. Приемно-регистрирующая система КНЧ диапазона / Л.В. Грунская [и др.] // Тр. V Междунар. науч.-техн. конф. «Перспективные технологии в средствах передачи информации» ПТСПИ-2003. – Владимир, 2003. – С. 196 – 199.
- 124. Федотов, М.Ю. Разработка цифровой метеостанции для регистрации атмосферных параметров / М.Ю. Федотов, Л.В. Грунская // Тр. Пятой Рос. конф. по атмосферному электричеству. – Владимир, 2003. – С. 156 – 159.
- 125. Грунская, Л.В. Система многоканального синхронного мониторинга электромагитных полей КНЧ диапазона приземного слоя / Л.В. Грунская [и др.] // Тр. Пятой Рос. конф. по атмосферому электричеству. – Владимир, 2003. – С. 119 – 121.

- 126. Грунская, Л.В. Приемно-регистрирующий комплекс для изучения атмосферного электрического поля / Л.В. Грунская [и др.] // Сб. материалов Четвертой Междунар. науч.-техн. конф. «Чкаловские чтения». – Егорьевск, 2002. – С. 220 – 221.
- 127. Грунская, Л.В. Приемно-регистрирующая система КНЧ диапазона / Л.В. Грунская // Тр. Междунар. конф. «Перспективы технологии в средствах передачи информации ПТСПИ». – Владимир, 2003. – С. 196 – 199.
- 128. Грунская, Л.В. Система аналого-цифрового преобразования многоканального приемного комплекса / Л.В. Грунская, Ю.А. Апполонов // Тез. 10-й Междунар. науч.-техн. конф. «Радиоэлектроника». – Москва, 2004. – С. 109.
- 129. Грунская, Л.В. Система многоканального синхронного мониторинга электромагнитных полей / Л.В. Грунская, С.В. Елисеева // Тез. 10-й Междунар. науч.-техн. конф. «Радиофизика». – Москва, 2004. – С. 528.
- 130. Фрадин, А.З. Измерение параметров антенно-фидерных устройств / А.З. Фрадин, Е.В. Рыжков // М.: Связь, 1972. 352 с.
- 131. Валитов, Р.А. Радиотехнические измерения / Р.А. Валитов // М.: Сов. радио, 1963. 632 с.
- 132. Грунская Л.В., Исакевич В.В., Исакевич Д.В., Лукьянов В.Е. Айгеноскопия временных рядов вертикальной составляющей электрического поля пограничного слоя атмосферы земли на комбинационных частотах лунных приливов // Динамика сложных систем XXI век. Москва: Издательство «Радиотехника» ISSN 1999-7493.- № 1.-2016г.-с. 74-78.
- 133. Грунская Л.В., Исакевич В.В., Исакевич Д.В., Рубай Д.В. Айгеноскопия временных рядов вертикальной составляющей электрического поля пограничного слоя атмосферы Земли на частотах лунных приливов // Динамика сложных систем.—XXI век. Москва:Издательство «Радиотехника».- №5.-2014г.- с.31-35.
- 134. Грунская Л. В., Морозов В.В. Экспериментальные и теоретические исследования вариаций напряженности электрического поля, обусловленных солнечными и лунными приливами в приземном слое атмосферы /Известия вузов. Физика. – 2005. – № 8. – С. 33 – 39.

- 135. Грунская Л.В., Ефимов В.А. Приемно-регистрирующая аппаратура для исследования взаимосвязи электрического поля приземного слоя атмосферы с геофизическими процессами // Проектирование и технология электронных средств. – 2006. – № 1. – С. 69 – 74.
- 136. Грунская Л.В. Мобильный приемно-регистрирующий комплекс для мониторинга электромагнитного поля приземного слоя атмосферы // Проектирование и технология электронных средств. – 2005. – № 2. – С. 69 – 74.
- 137. Грунская Л.В. Система многоканального синхронного мониторинга электромагнитных полей КНЧ диапазона приземного слоя // Проектирование и технология электронных средств. – 2004. – Спец. вып. – С. 38 – 45.
- 138. Грунская Л.В.Оценка параметров электрического поля приземного слоя атмосферы на основе метода корреляционного прием.-Монография, Владимир: Владимирский государственный университет.- 2010. - 123 с.
- 139. Грунская Л.В., Исакевич В.В., Ефимов В.А., Сушкова Л.Т. Решение задачи обнаружения лунных приливов в электрическом поле пограничного слоя атмосферы // Электромагнитные волны. Изд. Радиотехника.-2012.-№3.- С. 45-50.
- 140. Грунская Л.В.,.Исакевич В.В, Исакевич Д.В., Рубай Д.В., Золотов А.Н. /Исследование воздействия лунных приливов на электромагнитное поле пограничного слоя атмосферы с помощью метода собственных векторов// Известия высших учебных заведений. Физика. -2013.-Т. 56. -№ 4.- С. 65-70.
- 141. Грунская Л.В., Морозов В. Н., Ефимов В. А., Золотов А.Н., Рубай Д. В., Закиров А. А. Мониторинг электромагнитных полей пограничного слоя атмосферы Земли // Монография Издатель: Germany, LAP LAMBERT AcademicPublishing. –2013 г.- 192 с.
- 142. Грунская Л.В., Журавлев В.М., Ефимов В.А., Закиров А.А. Методы спектрального оценивания в задаче исследования степени воздействия геофизических процессов на электрическое поле приземного слоя атмосферы // Известия вузов. Поволжский регион. Серия физическая. - № 4. - 2009. - с105-119.
- 143. Грунская Л.В., Ефимов В.А., Морозов В.Н., Исакевич В.В., Закиров А.А. Оценка степени воздействия лунно-солнечных приливов на

электрическое поле приземного слоя атмосферы // Известия вузов. Физика. 2007, т. 50, № 8, с. 69-73.

- 144. Грунская Л.В., Ефимов В.А., Золотов А.Н. Термогравитационные солнечные приливы в электрическом поле атмосферы Земли // Труды Международного Форума по проблемам науки, техники и образования, г.Москва,4-6 декабря 2006г., С.119-121.
- 145. Грунская Л.В., Ефимов В.А. Приемно-регистрирующий комплекс мониторинга электрического поля приземного слоя атмосферы на сети станций // Труды VI Российской конференции по атмосферному электричеству, Нижний Новгород, 1-7 октября, 2007г., с.25-27.
- 146. Грунской Л.В., Исакевича В.В., Ефимова В.А. Разработка программно-аппаратного комплекса для исследования воздействия геофизических и техногенных факторов на электрическое поле приземного слоя атмосферы // Биомедицинская радиоэлектроника, 2008, №6, стр. 87-93
- 147. Грунская Л.В., Ефимов В.А., Исакевич В.В., Закиров А.А., Золотов А.Н. Исследование проявлений геофизических процессов в электрическом поле пограничного слоя атмосферы // Труды VIII Международный научно-технической конференции «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии», г.Суздаль, ФРЭМЭ – 2008, 21-23 мая 2008 с. 208-212.
- 148. L.V. Grunskaya, V.A. Efimov Estimation of the action of lunisolar tides on the electric field in the atmospheric surface layer// Издательство: Springer Science, 2007, Russian Physical Journal, Vol.50, №8, p.821-825.
- 149. Грунская Л.В., Ефимов В.А., Исакевич В.В. Исследования взаимосвязи гравитационных явлений в природе с электромагнитными полями в пограничном слое атмосферы // XX Международная конференция по теоретической и математической физике «Волга – 2008», Тезисы конференции, с. 56.
- 150. Грунская Л.В., Ефимов В.А., Исакевич В.В., Хромова Н.И., Золотов А.Н. Исследование проявлений астрофизических и геофизических процессов в электрическом поле пограничного слоя атмосферы // XIII Международная Гравитационная конференция по гравитации, космологии и астрофизике, Тезисы конференции, 23-28 июня 2008, г.Москва, с.108.
- 151. Закиров А.А., Золотов А. Н., Петров А. Е., Рубай Д. В., Левин А.В. / Мониторинг электрического и геомагнитного полей инфранизко-
частотного диапазона // Тез. докл. 15 Всероссийская научная конференция студентов физиков и молодых ученых. ВНКСФ-15. 26 марта – 2 апреля 2009 г. Томск.- С. 537-538.

- 152. Грунская Л.В., Морозов В.Н., Исакевич В.В., Закиров А.А./ Лунные приливы в электрическом поле пограничного слоя атмосферы // Конференция по проблемам теоретической и математической физики. 2 июня -3 июля 2009 года, г. Казань, С. 64-66.
- 153. Закиров А.А., Золотов А. Н., Рубай Д.В., Левин А.В., Додонов А.Е. /Статистический анализ экспериментальных регистраций вариации напряженности электрического поля приземного слоя атмосферы.// Тез. докл. Конференция молодых ученых. МАПАТЭ. 19-23 мая 2009 года. – Звенигород.- С. 31-32.
- 154. Грунская Л.В., Исакевич В.В, Ефимов В.А., Закиров А.А. /Программно-аппаратный комплекс для исследования структуры сигналов, соответствующих приливным процессам в электрическом поле приземного слоя атмосферы // Тезисы и материалы докладов Международной научно-методической конференции по физике –X Столетовские чтения, - г.Владимир, 25-28 мая 2009г. - С.27-28.

Глава 5. ГЕОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ И ЕГО ВЗАИМОСВЯЗЬ С ГЕОФИЗИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

5.1. Геомагнитное поле и его вариации

Геомагнитное поле (ГМП) Земли слагается из двух частей различной природы: очень медленно меняющейся, почти постоянной, источники которой расположены собственно внутри Земли, и переменной, генерируемой электрическими токами, текущими в ионосфере и магнитосфере [6]. Напряженность переменной части поля составляет не более 2% от части внутреннего происхождения.

ГМП в грубом приближении подобно полю однородно намагниченного шара с магнитным моментом $M = 2,7-10^{12}$ А/м²и осью, наклоненной к оси вращения Земли на угол ~ 11,5°. Геомагнитные полюсы расположены в точках с координатами 11,5°с.ш., 290°в.д., и 11,5°ю.ш., 110° в.д.

Распределение ГМП в пространстве обычно характеризуют тремя магнитными элементами: горизонтальной составляющей $H_r = \sqrt{H_x^2 + H_H^2}$ наклонением J (углом между направлением вектора поля $H = \sqrt{H_x^2 + H_H^2}$ и горизонтальной плоскостью) и склонением D (углом между направлениями на геомагнитный и географический полюсы) или тремя прямоугольными составляющими: H_x = H_r cosD (направлена на географический север), H_y = H_r sinD (на восток) и $H_z = H_r$ tgJ (вертикально вниз). Соотношения между магнитными элементами и прямоугольными составляющими даны на рис.5.1.

Величины магнитных элементов на поверхности Земли изменяются от J= 90°, $H_r=0$, $H_z=0,065$ мТл на северном геомагнитном полюсе до J= – 90°, $H_r=0$, $H_z=-0,065$ мТл на южном; в районе геомагнитного экватора 7 проходит через нуль, а H_r достигает наибольшей величины 0,032 мТл. Склонение D, обусловленное несовпадением геомагнитных и географических полюсов, в средних и низких широтах невелико (несколько градусов), а в высоких – может достигать любых величин, вплоть до 180⁰. При удалении от поверхности Земли ГМП уменьшается примерно обратно пропорционально r³, где r – геоцентрическое расстояние данной точки.

Действительное пространственное распределение ГМП много сложнее: в северном и южном полушариях геомагнитное поле не вполне тождественно, существуют области о повышенные или пониженные значения магнитных элементов – магнитные аномалии. Магнитные аномалии очень разнообразны по размерам, интенсивности и конфигурации. Наиболее крупные из них соизмеримы с материками (материковые), наиболее мелкие имеют протяжённость от единиц до сотен километров (локальные и региональные). На рис.5.2. представлена схема распределения ГМП, заимствованная из [1]. В связи С малым масштабом карты распределение на ней ГМП настолько сглажено, что проявляются лишь материковые аномалии.

Региональные и локальные аномалии вызываются намагничиванием неравномерно распределенных в земной коре горных пород, обладающих ферромагнитными свойствами. В целом, они ответственны лишь за очень малую ГМП (~1%) среднеквадратичная величина поля мелкомасштабных аномалий, осредненная по всей поверхности Земли, составляет ~ 200 нТл. Тем не менее поле отдельных аномалий, в особенности связанных с близким к поверхности залеганием больших рудных масс, может быть достаточно велико (превышать 0,11 мТл). Примером интенсивных локальных аномалий является широко известная Курская аномалия.



Рис. 5.1. Элементы земного магнетизма



Рис. 5.2. Изодинамы модуля полного вектора Н для эпохи 1975 г.[1] Цифры у кривых – значения **Й** в 10³нТл.

Основная крупномасштабная часть ГМП (поле однородного намагничения и материковых аномалий), называемая "главным" полем, создается электрическими токами, текущими во внешней жидкой части земного ядра, состоящего из расплавленных железоникелевых масс. Электрические токи индуцируются в результате конвективных движений высокопроводящих масс в первичном очень слабом поле, природа которого к настоящему времени не ясна. Этот механизм генерации ГМП подобен механизму создания поля в обычной динамо-машине. Существенным доводом в пользу динамо-теории ГМП является обнаружение магнитных полей у других планет, имеющих жидкие ядра (Юпитер, Меркурий, Венера). Измерения, космических аппаратах, обнаружили сходство полей выполненные на этих планет с земным полем: поля Юпитера и Меркурия в грубом приближении также являются полями однородного намагничения с осями, близкими к осям вращения этих планет. МП Луны мало по величине и определяется магнетизмом слагающих лунную кору пород.

Главное ГМП Земли меняется со временем как по величине, так и по конфигурации. Изменения ГМП (вековые вариации) включают в себя колебания с разными характерными временами: от немногих десятков лет (известны, например, 20–летние вариации) до десятков тысяч лег. Изучение ГМП за прошедшие годы и в прошлые геологические эпохи осуществляется архео– и палеомагнитными методами, суть которых заключается в следующем: изверженная горная порода, содержащая ферромагнитные компоненты, намагничивается, остывая в земном ГМП, и как бы "запоминает" его. Поэтому, измеряя магнитные свойства образцов горных пород, можно определить величину и направление ГМП в период их образования. Также намагничиваются во время обжига кирпичи или глиняная посуда, что позволяет изучать ГМП в разные исторические эпохи.

Первые инструментальные измерения склонения, начатые с развитием мореплавания в XV в., и измерения наклонения (с XVII в.) вместе с археомагнитными исследованиями надежно обнаружили вариации ГМП с периодами порядка 60 лет и циклические изменения с характерными временами в несколько сот лет (преимущественно 600 лет). Выявлены также и более длительные циклы, например, колебания ГМП продолжительностью порядка 8–10 тыс. лет. Описанные вековые вариация ГМП находят объяснение в рамках динамо-теории главного поля как результат изменений токовой системы земного ядра и, в частности, наличия в нем крупномасштабных волновых процессов – МАК–волн, т.е. волн, образующихся в результате непрерывного взаимодействия максвелловских, архимедовых и кориолисовых сил.

Палеомагнитные исследования позволили обнаружить исключительно интересное свойство ГМП – обращения полярности (инверсии) главного поля, которые многократно имели место в течение геологической истории Земли. Последняя изученная инверсия была в середине четвертичного периода (0,8 млн. лет назад).



Рис. 5.3. Лунносуточные вариации магнитных элементов (L_H,L_D,L), вычисленные по трем обсерваториям [2]: 1 – Тбилиси, 2 – Москва, 3 – Южно–Сахалинск

Теория динамо-механизма ГМП допускает возможность инверсий (существование двух равноправных решений уравнений, определяющих генерацию поля). Однако, появление инверсий отнюдь не закономерно и рассматривался как стохастический процесс. Продолжительность периода инверсии (~10⁴ лет) обычно короче периода стабильного намагничения. Большинство исследователей считает, что во время инверсии поле не исчезает полностью, а сильно уменьшается по величине и теряет свой регулярный характер.

Механизм инверсий окончательно еще не установлен. Во время некоторых инверсий можно проследить путь перемещения геомагнитного полюса из одного полушария через экватор в другое. Но каким бы ни был процесс обращения поля, он, вероятно, влияет на другие геофизические свойства и биосферу. В периоды обращения изменяются экранирующие свойства ГМП и проникновение к Земле заряженных частиц солнечного ветра, играющих большую роль в тепловом балансе земной атмосферы. Изучение длиннопериодных колебаний ГМП (включая инверсии) и их связь с изменением климата, вращением Земли и солнечной активностью привлекает в настоящее время внимание геофизиков.

Магнитные вариации внешнего происхождения состоят из нескольких типов полей, различающихся между собой спектральными, энергетическими и другими характеристиками. Условно эти вариации можно разделить на следующие группы: медленные (циклические), периодические, возмущенные короткопериодные. Детальная классификация вариаций ГМП с указанием основных характеристик (продолжительности колебаний и амплитудных границ) дана в табл. 8.

Таблица 8

Тип вариаций	Обозначение	Период колебаний	Амплитуда
			В, нТл
Медленные вариации			
Вековые	V	Десятки и сотни лет	10–150
Циклические	С	11 лет	1–20
Периодические (спокойные) вариации			
Годовые	У	1 год	5-30
Лунносуточные	L	24 ч 50 мин	1–7
Солнечносуточные	Sq	24 ч	10–70
Возмущенные вариации			
Апериодические	D _{st}	10–200 ч	10–400
главная фаза		3-10 ч	10-400
начало фазы		6—12 ч	10–400
восстановления			
фаза восстанов-		1-7 суток	100–10
ления			
Солнечносуточные	S _d	24 ч	10-400
Бухтообразные	В	0,5–3 ч	30–1000
Иррегулярные	Ι	5-60 мин	10-3000
Короткопериодные вариации			
Устойчивые	Pc 1	0,2–5 c	0,01–1
	Pc 2	5–10 c	0,1–10
	Pc 3	10–45 c	0,4–20
	Pc 4	45–150 c	0,5–25
	Pc 5	150–600 c	0,5–40
	Pc 6	> 600 c	1-100
Иррегулярные	Pi 1	1–40 c	0.03–2
	Pi 2	40–150 c	1–20
	Pi 3	150–400 c	5-100
	Pi 4	400–600	10–300

Геомагнитные вариации на поверхности Земли

Солнечносуточные S_q и лунносуточные L – вариации ГМП изучены наиболее полно. Они создаются электрическими токами, индуцированными в ионосфере на высотах ~ 90–120 км в результате приливных движений ионизированных масс воздуха в МП Земли (динамо-механизм). Зависимость ионизации (и, следовательно, электропроводности) воздуха от зенитного угла Солнца, а также регулярный суточный ритм солнечных и лунных приливных колебаний обусловливают строго периодический характер S_q– и L –вариаций (рис.5.4.). Суточные вариации невелики по амплитуде, закономерно меняются с географической широтой и временем года, возрастая к экватору и летом; они достаточно хорошо описываются несколькими первыми членами гармонического ряда 2 C_ncos ($nt + -\alpha_n$), где n– номер гармоники, t –местное время (солнечное или лунное). В S_q – вариациях наибольший член – суточный, в L –вариациях – полусуточный [2].

На рис.5.4. представлены магнитограммы обсерватории Красная Пахра (Московская обл.) за двое суток. На рис. 5.4.а хорошо проявляются плавные изменения элементов поля (S_q – вариации), а рис. 5.4.б. иллюстрирует сильное возмущение ГМП – магнитную бурю.

Во время бури колебания магнитных элементов иррегулярны, имеют часто большие амплитуды, особенно в высоких широтах, превышая иногда верхний предел 3000 нТл. Возмущенные вариации ГМП объединяют не только бури, но любые (разные по характеру и амплитуде) отклонения в ходе магнитных элементов от спокойного регулярного суточного хода. Несмотря на нерегулярность, хаотичность изменений ГМП во время возмущений и, в частности, в период бурь, к настоящему времени выявлены достаточно четкие морфологические закономерности этих явлений.

Прямые измерения показали, что Солнце непрерывно излучает поток разреженной плазмы – солнечный ветер (СВ), который, встречая на своем пути Землю с окружающим ее ГМП, образует полость, называемую магнитосферой. ГМП не проникает за границы магнитосферы, а СВ лишь частично проникает внутрь ее.

Положение границы магнитосферы определяется равенством давлений СВ и МП. Под давлением СВ силовые линии ГМП вытягиваются в антисолнечном направлении, образуя магнитосферный хвост. Плазменный слой хвоста и его центральная часть – нейтральный слой, где силовые линии разного направления приближаются друг к другу и ГМП очень мало, – играют важную роль в генерации магнитных возмущений. Плазменный слой всегда, даже в самых спокойных условиях, заполнен частицами высоких энергий. Некоторое количество частиц все время высыпается через "рога" плазменного слоя в ионосферу высоких широт, вызывая там электрические токи, текущие вдоль зоны полярных сияний, и, следовательно, магнитные возмущения. Эта зона в любое время является наиболее возмущенной.

Во время солнечных возмущений потоки частиц СВ с возросшей энергией и плотностью диффундируют в нейтральный слой через далекую область хвоста, вызывая генерацию ЭП, усиление конвективных движений в магнитосфере, поступление частиц в высокие широты, полярные сияния и резкое возрастание силы электрических токов, создающих магнитные бури. Если усиление СВ непродолжительно и сравнительно мало интенсивно, то в магнитосферу проходит как бы один импульс, отражающийся в ГМП в виде единичного бухтообразного возмущения (суббуря по современной терминологии). Большие солнечные возмущения вызывают продолжительную интенсификацию СВ, в магнитосферу поступают импульсы один за другим, что приводит к последовательности суббурь, к их наложению. В целом, последовательность суббурь составляет сложную картину большой магнитной бури.

Во времясуббурь частицы СВ проникают во внутреннюю магнитосферу также через полярные каспы, образуемые силовыми линиями в приполюсной области на дневной стороне магнитосферы. Частицы, проникающие через касп, ответственны за "дневные" полярные сияния, усиление в дневном секторе полярной электроструи и магнитные возмущения. Геометрическое место внедрения частиц (из каспа – с дневной стороны и из нейтрального слоя – с ночной) является наиболее возмущенной зоной на поверхности Земли (авроральный овал).



Рис. 5.4. Магнитограммы магнитных элементов H, D, Zoбc. Красная Пахра (Московская обл.) для спокойного интервала 7 апреля 1978 г. (а) и во время магнитной бури 1 мая 1978 г. (б)

Одновременно с проникновением частиц в высокие широты вовремя суббурь увеличивается также плотность частиц плазменного слоя, что приводит к усилению экваториального кольцевого тока. Кольцевой ток радиусом (3–5) R_3 западного направления существует всегда и в спокойное время вносит небольшой вклад в главную часть ГМП. Во время большой магнитной бури (при массовых поступлениях частиц CB) кольцевой ток сильно возрастает (до $10^6 - 10^7$ A), вызывая значительные понижения горизонтальной составляющей МП. Отдельные всплески суббурь, накладываясь один на другой и на общее понижение H_r , дают картину сложных колебаний, представленную на рис.5.4.6.

Среди возмущенных вариаций МП наиболее характерной является апериодическая вариация поля D_{st} проявляющаяся особенно отчетливо в H_r (или X) – компоненте низкоширотных обсерваторий. В поведении D_{st} (H_r) – вариации обычно выделяют три фазы: начальную (небольшое усиление поля), главную (резкое понижение поля) и фазу восстановления (постепенный возврат поля к начальному состоянию).

D_{st} – вариация на поверхности Земли является суммарным полем трехмерной токовой системы, включающей токи на поверхности магнитосферы, вдоль магнитных силовых линий, нейтрального слоя хвоста магнитосферы и магнитосферный кольцевой ток, который является преобладающим источником поля.

Магнитные суббури на поверхности Земли проявляются в виде бухтообразных возмущений и нерегулярных колебаний ГМП по преимуществу в зоне магнитной активности (~ 62–68° геомагнитной широты). Они вызываются восточным и западным электроструйными токами, образующимися во время магнитных суббурь в полярной ионосфере каждого полушария. Нерегулярные изменения поля вблизи экватора связаны с экваториальной ионосферной электроструей. Во время бури происходит также усиление токов в среднеширотной ионосфере, что отражается на возмущенных солнечносуточных вариациях S_d.

154



Рис. 5.5. Апериодическая D_{st} – вариация магнитной бури 19.УШ 1970 г.

Исследования последних лет доказали, что для возникновения и развития магнитосферной бури большую роль играет не только плотность и скорость частиц СВ, но и ММП, уносимое потоком частиц из Солнца. Несмотря на небольшую величину этого поля (несколько нанатесл) от его направления зависит геоэффективность плазменного потока СВ. Установлено, что суббуря развивается в основном при повороте вертикальной компоненты ММП к югу (перпендикулярно плоскости эклиптики). Воздействие ММП на состояние магнитосферы объясняется механизмом пресоединединия на границе магнитосферы силовых линий ММП и ГМП. Выделяемая при этом энергия и служит, по-видимому, пусковым механизмом для генерации магнитосферной суббури. Кроме того, от направления азимутальной компоненты ММП зависят вариации в приполюсных областях, куда ММП имеет прямой доступ через каспы. Обнаружены также корреляции ММП с другими геофизическими явлениями, например, с состоянием ионосферы, некоторыми тропосферными процессами и т.д., что указывает на исключительно большое значение ММП в развитии физических явлений в околоземном пространстве (рис.5.5).

Заканчивая описание магнитной бури, следует указать, что общая анергия, поступающая в магнитосферу во время бури, колеблется в пределах $10^{16} - 10^{17}$ Дж, поток энергии ~ 10^{13} Дж.с. Это составляет $10^{-8} - 10^{-10}$ от общей энергии волнового и корпускулярного излучений Солнца во время активных процессов.

Изложенные выше представления о природе магнитных возмущений объясняют многие, давно известные свойства возмущений, а именно [3]:

1) широтное распределение возмущенности с основным максимумом в зоне авроральной активности;

2) возмущенный суточный ход: в средних широтах один максимум приходится на вечерние часы, в полярных широтах имеются два максимума утренний и вечерний;

3) сезонный (годовой) ход с максимумами в эпохи равноденствий, обусловленный тем, что Земля в течение года проектируется на различные гелиографические широты Солнца, а, следовательно, на различные активные области;

4) 11-летний циклический ход, следующий за 11-летними колебаниями солнечной активности с запаздыванием максимумов магнитной активности на 1–3 года [4];

5) 27-дневную повторяемость магнитных возмущений, объясняющуюся 27-дневным синодическим периодом вращения Солнца;

6) запаздывание магнитных возмущений на 2–4 дня относительно прохождения активных областей на Солнце через центральный меридиан (определяется скоростью потоков CB).

Эти закономерности, а также некоторые корреляционные связи магнитной возмущенности с другими гелио– и геофизическими явлениями получены не только путем анализа отдельных возмущений, но также путем статистических исследований магнитных характеристик, т.е. числовых и балловых оценок возмущенности. В настоящее время для характеристики магнитной активности чаще всего употребляются индексы К, AE, D_{st}.

Индекс К – трехчасовая 10–балловая характеристика: 0 – совершенно спокойное поле, 9 – очень сильное возмущение. Баллы К–индекса даются в соответствии с амплитудой колебаний магнитных элементов, причем амплитудные шкалы для обсерваторий в разных широтных зонах подобраны так, чтобы по возможности распределения К–индексов сделать одинаковыми на всей мировой сети обсерваторий. Среднее значение К по нескольким субавроральным обсерваториям, определенное с точностью до 0,1 и обозначаемое K_p , является наиболее объективной мерой магнитной активности в планетарном масштабе. Для оценок активности суток в целом используются или $\sum K_p$, а также суммы $\sum a_p$ где a_p – приведенная амплитуда колебаний поля за трехчасовой интервал.

Индекс AE основан на амплитудах колебаний (расстоянии между верхней и нижней огибающими) записей поля в обсерваториях, расположенных на широтах зоны полярных сияний и равномерно распределенных по долготе. Индекс AE является мерой активности полярных электроструй. Его можно представить с неограниченным временным разрешением, однако для практических целей используются 2,5–минутные и часовые значения.

В средних и низких геомагнитных широтах в качестве меры изменения поля часто используют среднечасовые значения горизонтальной составляющей поля отдельной обсерватории или индекс D_{st} , полученный осреднением значения H_r на 3–7 низкоширотных обсерваториях, распределенных более или менее равномерно по долготе. Использование магнитных характеристик дает возможность количественного оформления статистических закономерностей и связей (в том числе магнитобиологических).

Группа короткопериодных колебаний (КПК) по своей структуре и природе существенно отличается от рассмотренных выше макровозмущений. КПК объединяют вариации с периодами от долей секунд до 10 мин и более. Они разделяются на устойчивые периодические колебания Рс (рис.5.6. б, а) и иррегулярные колебания Рі (рис.5.6. б), которые в свою очередь делятся на подгруппы (табл.8) в зависимости от величины периода Т [4,5].



Рис.5.6. Примеры пульсаций типа Рс 4 (а) и Рі2. (б) полного вектора \vec{H} на сети станций 1– Лервик, 2 – Эскдалемюр, 3 – Хартленд

Амплитуды пульсаций, как правило, растут с увеличением периода. Некоторые типы КПК сопровождают магнитные возмущения и наблю-

даются преимущественно в высоких широтах, тогда как другие генерируются исключительно при спокойном поле. Схематическая картина пульсаций во время различных фаз магнитной бури приведена на рис.5.7.

Согласно современным представлениям генерация пульсаций связана с развитием кинетических и гидромагнитных неустойчивостей магнитосферной плазмы и плазмы CB, а также с возбуждением резонансных процессов внутри магнитосферы.

Генерация Рс типична для возмущенных условий в магнитосфере. Иррегулярные пульсации по существу являются элементами развития магнитосферной суббури. Их возбуждение происходит в довольно локализованных областях и сопровождается развитием других геофизических процессов. Генерация Рі–колебаний характеризует более крупномасштабные изменения структуры магнитосферы и в значительной мере реагирует на общепланетарное изменение возмущенности ГМП [5].

Частоты пульсаций PcI близки к гирочастотам протонов в экваториальной плоскости магнитосферы на оболочке более 4R₃, поэтому можно полагать, что генерация PcI связана с развитием неустойчивостей протонов кольцевого тока в окрестности плазмопаузы. Механизм циклотронной неустойчивости в результате анизотропии распределения протонов по питч– углам обеспечивает необходимый частотный диапазон, а нелинейные эффекты обусловливают и динамический спектр PcI.

Пульсации Pc2 наблюдаются значительно чаще в полярной шапке, чем в авроральной зоне и средних широтах. При этом вблизи геомагнитных полюсов генерация Pc2 регистрируется при низком уровне магнитной активности, а в средних широтах – в условиях повышенной возмущенности. При возрастании возмущенности ГМП область максимальных амплитуд смещается из района геомагнитных полюсов в более низкие широты, оставаясь, по–видимому, в полярной шапке или в авроральной зоне. Следовательно, можно полагать, что источник Pc2 расположен в хвосте магнитосферы.

Геомагнитные пульсации Pc3 и Pc4 – самые распространенные пульсации, регистрируемые на поверхности Земли, они зависят от уровня магнитной активности, от параметров плазмосферы и кольцевого тока. Так, параметры пульсаций Pc3 тесно связаны с изменением структуры плазмосферы, а Pc4 – с процессами распада кольцевого тока. В высоких широтах несомненна связь возбуждения Рс3 и Рс4 с модуляцией потоков авроральной плазмы.

Пульсация Pc5 являются следствием процессов дрейфа на дневную сторону и распада плазменных неоднородностей, содержащих авроральные энергичные частицы. Можно полагать, что возбуждения в послеполуденном секторе связаны с протонными неоднородностями, дрейфующими на запад. Возможно также, что длиннопериодные пульсации в диапазоне Pc5 возбуждаются в области магнигопаузы.

Доведение высокоширотных длиннопериодных пульсаций Рсб различно в дневном и ночном секторах. Эти различия обусловлены тем, что дневной и ночной регионы полярной шапки проектируются в разные структурные области магнитосферы: в область дневного каспа и хвоста. Возбуждение ночных пульсаций связано с колебательным режимом хвоста магнитосферы, а источниками дневных пульсаций могут быть либо колебания поверхности магнитосферы, либо флюктуации солнечного ветра. В настоящее время пока нельзя однозначно определить, расположен источник пульсаций Рс 6 на границе магнитосферы или в солнечном ветре.

В диапазоне иррегулярных пульсаций PiI выделяют несколько типов колебаний, различающихся по своим физическим свойствам: PiB– пульсации типа шумовых всплесков, Pi C – колебания с преобладающим периодом 5–10 с, КУП – колебания с убывающим периодом и другие. Генерация КУП наблюдается в области развития восточной авроральной электроструи (на фоне положительных бухт) и связана с развитием неустойчивости протонов в магнитосфере на фоне интенсивного развития асимметричной части кольцевого тока в вечернем секторе магнитосферы. Однако, источники КУП расположены в области развития восточной электроструи, т.е. КУП составляют микроструктуру положительной бухты.

Области пульсирующих полярных сияний и генерация геомагнитных пульсаций РіСнепосредственно примыкают к экваториальной кромке овала полярных сияний или авроральной электроструи. Генерация пульсаций РіС является следствием распада электронных форм сияний на отдельные структуры. Генерация РіВ во времясуббури обычно сопровождает возбуждение Рі2 и происходит в областях, удаленных от экваториальной области магнитосферы. Местоположение источника Рі2 совпадает с силовыми трубками ГМП, в которых активно развиваются авроральные явления. Ге-

159

нерация Pi2 происходит на фоне широкого круга геофизических процессов, связанных в той или иной мере с развитием кинетических неустойчивостей магнитосферной плазмы: инжекцией электронов и протонов в полярную ионосферу, ОНЧ – излучением, пульсациями PcI и т.д.



Рис. 5.7. Допустимые пределы скорости изменения ($\Delta B/\Delta t$) магнитного поля для вариаций различных периодов (T)

Современные представления о структуре поля иррегулярных пульсаций в высоких широтах отражают существование по крайней мере трех видов колебаний в диапазоне Pi3: Pip– полярных иррегулярных пульсаций, P3 б – пульсаций суббури, ilPc – иррегулярных длиннопериодных пульсаций полярной шапки. Местоположение источника пульсаций Pip связано с движущейся к полюсу выпуклостью полярных сияний во время взрывной фазы суббури. Максимум амплитуд пульсаций Psб приурочен к центральной части авроральной электроструи. Пульсации liPссвязаны с проникновением колебаний, возбуждаемых на границе магнитосферы, в область дневного каспа.

Представленные в табл.8 сведения о продолжительности и величине всех перечисленных выше типов геомагнитных вариаций приводят к заключению, что магнитные вариация изменяются в исключительно широком диапазоне периодов (от 2^*10^{-1} до 2^*10^{10} с) и амплитуд (от 1^*10^{-2} до 3^*10^3 нТл). Используя количественные значения периодов колебаний Т и величин амплитуд В вариаций, приведенных в табл. 2, сделаны оценки скорости изменения поля $\Delta B/\Delta t$ для каждого типа вариаций.

На рис.5.7. дана зависимость $ln(\Delta B/\Delta t)$ от lnT в виде отрезков прямых (для строго периодических вариаций Y, L, S_q, S_d) или параллелограммов (для остальных вариаций), представляющих допустимые границы как по скорости изменения поля, гак и по периоду. Из рис.5.7. видно, что для медленных, периодических и части возмущенных вариаций (D_{st}, S_d) изменения $\Delta B/\Delta t$ малы, тогда как для вариаций Pc1–Pc4 и иррегулярных колебаний эти изменения достигают нескольких единиц нанотеслы в секунду.

Из всех типов вариаций, приведенных в табл.8, наибольшие временные изменения ГМП достигаются КПК, иррегулярными вариациями и бухтообразными возмущениями. Периоды этих вариаций заключены во временном интервале от 0,2 с до 3 ч (частотный диапазон от 5 до 2,8–10⁴ Гц).

5.2. Спектральный анализ результатов мониторинга геомагнитного поля по разнесенным в пространстве станциям с помощью корреляционного квадратурного приемника

Геомагнитное поле Земли изучается на физическом экспериментальном полигоне ВлГУ с 2000 года [6-10]. Спектральный анализ геомагнитного поля пограничного слоя атмосферы осуществлялся с помощью корреляционного квадратурного приемника также по большим массивам экспериментальных данных японских геомагнитных станций Какиока (1913-2006гг.) и Мемамбецу (1950-1999гг). На рис. 5.8 – 5.15 приведены массивы баз данных по различным компонентам геомагнитного поля, регистрируемых на разнесенных в пространстве станциях.

На рис. 5.16 – 5.19 приведены примеры результатов корреляционноспектрального анализа данных геомагнитных станций вблизи частот солнечных приливов (компонента D, H, Z). В таблице дана оценка средних амплитуд и отношения сигнал/шум на частотах термических приливов. Достоверно выделяются четыре термогравитационных солнечных прилива: S1 (сигнал/шум: 8-5), S2 (сигнал/шум:8-4), S3(сигнал/шум:5-4), S4 (сигнал/шум: 6-3). На рис. 5.20 - 5.29 приведены спектры геомагнитного поля японских геомагнитных станций вблизи ряда лунных приливов: M1, M2, N2, O1. Достоверно выделяется лунный прилив M2 (сигнал/шум: 5 – 6). На приливе: N2 – отношение сигнал/шум составляет 2–2,5, O1 (сигнал/шум: 3 – 5) (таблица 9).

Сравнение полученных оценок амплитуд геомагнитного поля (D, H, Z – компоненты) на частотах лунно-солнечных приливов показывает одинаковый порядок результатов с полученными теоретическими оценками. По результатам разработанной модели оценки амплитуды геомагнитного поля на частотах солнечных приливов должны составлять (6 – 20) нТл, на частотах лунных приливов (0,18 – 1) нТл. Результаты корреляционноспектральной обработки данных геомагнитного поля по разнесенным в пространстве станциям с помощь программы корреляционноквадратурного приемника дали: на частотах солнечных приливов (2 – 7) нТл, на частотах лунных приливов (0.004 – 0,4) нТл (таблица 9).



Рисунок 5.8 – База данных по геомагнитной станции Memambetsu, компонента H, 01.01.1950-31.12.1999



Рисунок 5.9 – База данных по геомагнитной станции Memambetsu, компонента D, 01.01.1950-31.12.1999



Рисунок 5.10 – База данных по геомагнитной станции Memambetsu, компонента Z, 01.01.1950-31.12.1999



Рисунок 5.11. – База данных по геомагнитной станции Memambetsu, компонента F, 01.01.1950-31.12.1999



Рисунок 5.12. – База данных по геомагнитной станции Kakioka, компонента D, 01.08.1913-31.07.2006



Рисунок 5.13. – База данных по геомагнитной станции Каkioka, компонента Z, 01.08.1913-31.07.2006



Рисунок 5.14. – База данных по геомагнитной станции Kakioka, компонента F, 01.08.1913-31.07.2006



Рисунок 5.15. – База данных по геомагнитной станции ПолигонВлГУ, компонента H, 21.05.2005 - 13.03.2009







Рисунок 5.13. Примеры результатов корреляционно-спектрального анализа данных геомагнитной станции Какиока вблизи частот солнечных приливов (компонента Z)



Рисунок 5.14. Примеры результатов корреляционно-спектрального анализа данных геомагнитной станции Мемамбецу вблизи частот солнечных приливов (компонента H)



Рисунок 5.15. Примеры результатов корреляционно-спектрального анализа данных геомагнитной станции Мемамбецу вблизи частот солнечных приливов (компонента D)



Рисунок 5.16. Примеры результатов корреляционно-спектрального анализа данных геомагнитной станции Мемамбецу вблизи частот солнечных приливов (компонента Z)



Рисунок 5.17. Примеры результатов корреляционно-спектрального анализа данных геомагнитной станции Полигон ВлГУ вблизи частот солнечных приливов (комп. Н)



Рисунок 5.18. Примеры результатов корреляционно-спектрального анализа данных геомагнитной станции Какиока вблизи частот лунных приливов (компонента D)



Рисунок 5.19. Примеры результатов корреляционно-спектрального анализа данных геомагнитной станции Какиока вблизи частот лунных приливов (компонента D)



Рисунок 5.20. Примеры результатов корреляционно-спектрального анализа данных геомагнитной станции Какиока вблизи частот лунных приливов (компонента Z)



Рисунок 5.21. Примеры результатов корреляционно-спектрального анализа данных геомагнитной станции Какиока вблизи частот лунных приливов (компонента Z)



Рисунок 5.22. Примеры результатов корреляционно-спектрального анализа данных геомагнитной станции Мемамбецу вблизи частот лунных приливов (компонента H)



Рисунок 5.23. Примеры результатов корреляционно-спектрального анализа данных геомагнитной станции Мемамбецу вблизи частот лунных приливов (компонента H)



Рисунок 5.24. Примеры результатов корреляционно-спектрального анализа данных геомагнитной станции Мемамбецу вблизи частот лунных приливов (компонента D)


Рисунок 5.25. Примеры результатов корреляционно-спектрального анализа данных геомагнитной станции Мемамбецу вблизи частот лунных приливов (компонента D)



Рисунок 5.26. Примеры результатов корреляционно-спектрального анализа данных геомагнитной станции Мемамбецу вблизи частот лунных приливов (компонента Z)



Рисунок 5.27. Примеры результатов корреляционно-спектрального анализа данных геомагнитной станции Мемамбецу вблизи частот лунных приливов (компонента Z)



Рисунок 5.28. Примеры результатов корреляционно-спектрального анализа данных геомагнитной станции Полигон ВлГУ вблизи частот лунных приливов (компонента H)



Рисунок 5.29. Примеры результатов корреляционно-спектрального анализа данных геомагнитной станции Полигон ВлГУ вблизи частот лунных приливов (компонента H)

Таблица 9 Лунно-солнечные приливы в геомагнитном поле

игон V Н	у, н 2005- 2000	c/III	0,4	0,7	0,5	0,4	0,6	0,3	0,8	0,3	0,4	0,7	3,4	6,0	4,6	5,2	4,6	3,3	1,9
ПоЛ	ВлІ 21.05.	А, Н нТ ^н	1,200	0,520	0,610	0,010	0,400	0,120	0,340	0,010	0,009	0,200	1,200	3,000	1,700	4,100	5,500	1,300	0,800
Memambetsu,	1950- 1202	c/III	0,8	7,2	1,5	0,3	0,8	0,8	0,7	0,5	0,4	0,7	6,5	7,0	4,3	5,2	4,8	6,0	7,5
	01.01.	A, A, HT_{Π}	1,300	0,400	0,030	0,060	0,030	0,065	0,070	0,019	0,007	0,040	1,100	1,500	0,250	4,500	2,000	1,200	0,500
Memambetsu,	1950- 1920-	c/III	0,6	2,1	0,8	0,2	0,3	1,8	0,5	0,3	0,8	0,4	6,2	5,6	2,0	5,7	5,5	6,0	7,0
	L 01.01.	A, A, HT_{Π}	0,050	0,040	0,007	0,009	0,006	0,040	0,015	0,010	0,008	0,007	0,400	0,700	0,040	1,700	1,100	0,550	0,100
Memambetsu, 11	1 1950- 1920	c/III	0,7	2,1	0,7	6,1	0,5	0,7	0,4	0,6	0.5	0,5	5,1	7,5	5,7	4,0	4,5	5,5	6,5
	01.01.	А, А, нТп	0,600	0,400	0,040	0,100	0,080	0,250	0,008	0,080	0,040	0,080	2,000	2,700	0,800	7,000	7,000	4,000	1,000
oka, Z	1913- .2007	c/III	0,7	5,8	1,5	0,2	0,7	0,9	1,0	0,5	0,9	0,6	4,7	8,2	0,6	6,5	4,9	6,2	5,1
Kakic	01.08. 31.07	А, нТ ^п	0,150	0,530	0,010	0,050	0,040	0,060	0,060	0,020	0,030	0,025	0,900	1,500	0,140	9,000	3,700	3,100	1,100
ka, D	1913- .2007	с/ш	0,7	6,1	0,3	1,1	1,3	0,8	1,0	1,0	1,3	0,5	6,5	8,0	2,2	5,5	5,5	7,0	4,7
Kakic	01.08. 31.07	А, нТ ₁	0,150	0,500	0,004	0,500	0,040	0,060	0,070	0,020	0,030	0,030	1,100	1,500	1,500	8,000	4,000	3,000	9,000
Период, ч			14,3261	12,46(6)	312,0115	12,65	25,8176	25,71(6)	24,8724	23,0646	18,9891	12,1991	23,93(3)	11,96(6)	24,06(6)	24	12	8	9
Частота, 10 ⁻⁵ Гц			1,938951388	2,237136465	0,089028575	2,195871761	1,075921027	1,0801489997	1,11680819445	1,2043449074	1,462806134	2,2770266607	1,1606313835	2,32126276694	1,1542012927	1,157407	2,314814	3,472222	4,629629
Источник			Прилив 2N2	Прилив М2	Прилив Mf	Прилив N2	Прилив О1	Прилив Q1	Прилив М1	Прилив J1	Прилив ОО1	Прилив L2	Прилив К1	Прилив К2	Прилив Р1	Прилив S1	Прилив S2	Прилив S3	Прилив S4

1. Яновский Б.М. Земной магнетизм / Б.М. Яновский. // Л.: Изд-во ЛГУ, 1978. 592 с.

2. L – вариации геомагнитного поля и ионосферы по данным советских станций / Н.П.Бенькова, В.А.Загуляева, Н.А. Кацишвили и др. // Геомагнетизм и аэрономия. т. №3. 1964 с.611–613.

3. Бенькова Н.П. Магнитное поле Земли и его вариации. Физикоматематические и биологические проблемы действия электромагнитных полей и ионизации воздуха. // М.: Наука, т.1. 1975. с. 13–24.

4.Справочник по переменному магнитному полю СССР /под ред. В.И.Афанасьев. // Л.: Гидрометеоиздат, 1954. 268 с.

5.Пудовкин М.И., Распопов О.М., Клейменова Н.Г. Возмущения электромагнитного поля Земли. Короткопериодические колебания геомагнитного поля. //Л.:Изд-во ЛГУ, 1976.271 с.

6.Грунская, Л. В. Экспериментальные и теоретические исследования вариаций напряженности электрического поля, обусловленных солнечными и лунными приливами в приземном слое атмосферы / Л. В. Грунская, В. Н. Морозов // Известия вузов. Физика. – 2005. – № 8. – С. 33 – 39.

7.Грунская, Л.В. Приемно-регистрирующая аппаратура для исследования взаимосвязи электрического поля приземного слоя атмосферы с геофизическими процессами / Л.В. Грунская, В.А. Ефимов // Проектирование и технология электронных средств. – 2006. – № 1. – С. 69 – 74.

8.Грунская, Л.В. Система многоканального синхронного мониторинга электромагнитных полей КНЧ диапазона приземного слоя / Л.В. Грунская [и др.] // Проектирование и технология электронных средств. – 2004. – Спец. вып. – С. 38 – 45.

9.Грунская, Л.В. Оценка параметров электрического поля приземного слоя атмосферы на основе метода корреляционного прием: монография / Л.В. Грунская.- Владимир: Владимирский государственный университет 2010. – 123 с. - ISBN 978-5-9984-0054-4.

10.Грунская, Л.В. Лунные приливы в электрическом поле пограничного слоя атмосферы / Л.В.Грунская, В.Н Морозов, В.А. Ефимов, А.А. Закиров // Известия вузов. Физика. - 2010. –т.53.- №1.- С.22-27.

5.3. Модель взаимосвязи геомагнитного поля с термическими и лунными приливами

Для оценки этого влияния будем исходить из уравнения для магнитной индукции, следующего из уравнений магнитной гидродинамики [8]:

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = rot(\vec{v} \times \vec{B}) + \eta \Delta \vec{B}, \tag{1}$$

где : $\vec{B} = \mu \vec{H}$ - вектор магнитной индукции, μ - магнитная проницаемость среды, \vec{H} -напряженность магнитного поля, \vec{v} -вектор скорости гидродинамических течений ионосферной плазмы возбуждаемых приливами, $\eta = \frac{c^2}{4\pi\sigma}$ - магнитная диффузия, с- скорость света, σ - электрическая проводимость ионосферной плазмы.

Далее предполагается, что µ=1, т.е. вектор магнитной индукции совпадает с вектором напряженности электрического поля. Более сложный характер имеет распределение электрической проводимости на ионосферных высотах, где из -за наличия магнитного поля она приобретает анизотропный характер [14]. На ионосферных высотах она определяется электронами ,которые закручиваются вокруг магнитного поля при своем движении. Обычно предполагают, что на ионосферных высотах имеют место горизонтальные электрические поля и для средних щирот имеет место проводимость Педерсона. Мы не будем сейчас учитывать это обстоятельство, а будем предполагать, что имеет место некоторая эффективная электрическая проводимость, равная σ. Оценим величину η при этих условиях. Полагая σ=10⁻⁶ом⁻¹м⁻¹или 9×10³с¹ в системе CGSE, получим $\eta = 8 \times 10^{15} \text{см}^2 \text{с}^{-1} = 8 \times 10^{11} \text{м}^2 \text{c}^{-1}$. Первый член в уравнении (1) по порядку величины равен VB/L, где L- характерный масштаб, V- характерное значение скорости, В - характерное значение напряженности магнитного поля, а второй равен ηВ /L². Их отношение равно Re_m=VL/η. Это отношение называется магнитным числом Рейнольдса [14]. При V=100м/с, L=1000 км $Re_m=1.25\times10^{-4}$. При V=10м/с , L=100км и $\sigma=10^{-2}$ ом⁻¹м⁻¹получаем магнитное число Рейнольдса такого же порядка. При таких малых магнитных числах возмущение геомагнитного поля также мало и будет определяться соотношением:

$$B' = \operatorname{Re}_{m} B_{0}, \operatorname{Re}_{m} = \frac{4\pi\sigma}{c^{2}} VL, \qquad (2)$$

При В₀=0.5гс, $B' = 0.625 \times 10^{-4}$ гс = 0.625×10^{-8} $T_{\pi} = 6.25$ н T_{π} . При таких малых возмущениях геомагнитного поля можно провести линеаризацию уравнения (1), полагая $\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'$ и считая скорость \vec{v} возмущением. Про-изводя соответствующие преобразования, получим вместо (1) уравнение:

$$\frac{\partial B'}{\partial t} = rot(\vec{v} \times \vec{B}_0) + \eta \Delta \vec{B}' \quad . \tag{3}$$

Поскольку \vec{v} меняется в зависимости от вращения Земли, то предполагая $\vec{v} \propto e^{i\omega t}, \vec{B}' \propto e^{i\omega t}, \omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}, \omega$ -угловая скорость вращения Земли, Т-период обращения, получим из (3):

$$i\omega\vec{B}' = rot(\vec{\nu} \times \vec{B}_0) + \eta \Delta \vec{B}' \quad . \tag{4}$$

Характерное время диффузии равно $\tau_D = \frac{L^2}{\eta} = 0.125c$, в то время как для ω имеем $\omega = 7 \times 10^{-5} c^{-1}$. Из этих оценок следует, что при расчетах геомагнитных возмущений, обусловленных приливами, можно использовать стационарное приближение:

$$\eta \Delta \vec{B}' + rot(\vec{v} \times \vec{B}_0) = 0 \quad . \tag{5}$$

Запишем уравнение (5) в сферической системе координат (r, θ, ϕ) с началом в центре Земли, предполагая, что $\vec{v} = (0, v_{\theta}, v_{\phi})$, а магнитное поле имеет дипольный характер:

$$B_r^0 = B_p \cos\theta, B_\theta^0 = -\frac{1}{2} B_p \sin\theta, B_p = \frac{2a}{r^3}, \tag{6}$$

где: *a* - магнитный момент Земли, равный 8.1×10^{25} гс см³ [9]. Напряженность магнитного поля Земли у полюса составляет 0.62 гс. В системе уравнений будем пренебрегать членами порядка $2/r^2$, так как $\frac{2}{r^2} \ll \frac{\partial}{\partial r}$ и в результате преобразований получим систему уравнений:

$$\eta(\frac{\partial^2 B'_r}{\partial r^2} + \frac{2}{r}\frac{\partial B'_r}{\partial r} + \Delta_{\theta,\phi}B'_r) = \frac{1}{r\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}(\sin\theta v_{\theta}B^0_r) ,$$

$$\eta(\frac{\partial^2 B'_{\theta}}{\partial r^2} + \frac{2}{r}\frac{\partial B'_{\theta}}{\partial r} + \Delta_{\theta,\phi}B'_{\theta}) = -\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rv_{\theta}B^0_r) \ ,$$

$$\eta(\frac{\partial^2 B'_{\phi}}{\partial r^2} + \frac{2}{r}\frac{\partial B'_{\phi}}{\partial r} + \Delta_{\theta,\phi}B'_{\phi}) = -\frac{1}{r}\left[\frac{\partial}{\partial r}(rv_{\phi}B^0_r) + \frac{\partial}{\partial\theta}(v_{\phi}B^0_{\theta})\right]$$
(7)

где: $\Delta_{\theta,\phi} = \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta} + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2}$ -угловая часть оператора Лаплаca.

Для составляющих скоростей можно использовать следующие представления [11]:

$$v_{\theta} = \frac{5}{3} V_0^{(Sq)} \cos\theta \cos\tau, v_{\phi} = -\frac{1}{3} V_0^{(Sq)} (6\cos^2\theta - 1) \cos\tau, 70 < r - r_0 < 100 \kappa M, V_0^{(Sq)} \approx 20 M/c$$

$$v_{\theta} = V_0^{(Sq)} \cos\theta \cos(\tau - 2^u), v_{\phi} = V_0^{(Sq)} \sin(\tau - 2^u), r - r_0 > 200 \kappa M, V_0^{(Sq)} \approx 100 M/c$$
(8)

Это распределение скоростей соответствует термически создаваемой солнечным нагревом суточной приливной волне (1.-1) и является причиной так называемых Sq вариаций магнитного поля. Существует также переходная область между 100 и 200 км, где скорость $V_0^{(Sq)}$ увеличивается с высотой от 20 до 100м/с.

Лунные вариации (L) магнитного поля создаются приливами , обусловленными гравитационным полем Луны и являются преимущественно полусуточными и полагают ,что они генерируются в основном ветровой системой моды (2,2). Амплитуда лунных вариаций составляет около 3% от амплитуды Sq вариаций. Составляющие ветровой системы, возникающей в ионосфере, представляются в виде:

$$v_{\theta} = \frac{1}{2} V_0^{(L)} \sin \theta \cos \theta \sin 2\tau, v_{\phi} = \frac{1}{2} V_0^{(L)} (3 - 2\sin^2 \theta) \sin \theta \cos 2\tau, z = r - r_0 \le 100 \kappa M,$$
$$v_{\theta} = V_0^{(L)} \sin \theta \cos \theta \sin 2\tau, v_{\phi} = V_0^{(L)} \sin \theta \cos 2\tau, z = r - r_0 \ge 200 \kappa M,$$
(9)

где: τ - локальное лунное время, V₀^(L)~4м/с. В выражениях (8) τ является локальным солнечным временем, r₀- радиус Земли.

Отметим, что в области ниже ионосферных высот решение системы уравнений (7) должно сшиваться с решением уравнения Лапласа:

$$\Delta \vec{B}' = 0 \quad . \tag{10}$$

Рассмотрим решение системы уравнений (7) и (8). Для этого воспользуемся разложением функций, входящих в эти уравнения по сферическим гармоникам [10]. Рассмотрим это решение на примере третьего уравнения системы (7). Представим это разложение в следующем виде:

$$B'_{\phi} = \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=-i}^{i} B'_{\phi i j}(r) Y_{i j}(\theta, \phi), B'_{\phi i j} = \int_{0}^{\pi} \int_{0}^{2\pi} d\Omega B'_{\phi}(r, \theta, \phi) Y_{i j}^{*}(\theta, \phi), d\Omega = \sin\theta d\theta d\phi.$$
(11)

Аналогичное разложение имеет место и для правой части этого уравнения. В результате получим уравнение:

Общее решение уравнения (12) находится методом вариации произвольных постоянных[6] и представляется в виде:

$$B'_{\phi ij}(r) = C_{1,ij}r^{i} + C_{2,ij}\frac{1}{r^{i+1}} - \frac{1}{(2i+1)r^{i+1}}\int_{r_{0}}^{r}r'^{(i+2)}\frac{S_{\phi ij}(r')}{\eta}dr' + \frac{1}{2i+1}r^{i}\int_{r_{0}}^{r}\frac{1}{r'^{(i-1)}}\frac{S_{\phi ij}(r')}{\eta}dr'.$$
 (13)

В области, где источники отсутствуют: r<r₁, r₁- нижняя граница ионосферы, для $B'_{\phi i i}$ имеем:

$$B'_{\phi ij} = C_{1,ij}r^{i} + C_{2,ij}\frac{1}{r^{i+1}}.$$
(14)

Переходя к пределу при $r \to \infty$, получим для $C_{1,ij}$ выражение:

$$C_{1,ij} = -\frac{1}{2i+1} \int_{r_1}^{\infty} \frac{1}{r'^{(i-1)}} \frac{S_{\phi ij}(r')}{\eta} dr'.$$
 (15)

При этом можно положить $C_{2,ij} = 0$. Тогда в области $r_0 < r < r_1$ решение (13) записывается в виде:

$$B'_{\phi ij} = -\left(\frac{1}{2i+1}\int_{r_1}^{\infty} \frac{1}{r'^{(i-1)}} \frac{S_{\phi ij}(r')}{\eta} dr'\right) r^i.$$
(16)

Вычислим $B'_{\phi ij}$ на поверхности Земли, т.е. при г=r_{0.} .Для этого представим выражение (16) в следующем виде:

$$B'_{\phi ij} = -\frac{1}{2i+1} r_0 \frac{4\pi}{c^2} \Sigma_{\sigma} \overline{S}_{\phi,ij}, \Sigma_{\sigma} = \sigma \Delta z, \qquad (17)$$

где : Σ_{σ} - интегральная проводимость ионосферы, Δz - толщина ионосферы.

Используя первое выражение в (8),
получим для \bar{S}_{ϕ} следующее представление:

$$\bar{S}_{\phi} = \frac{V_0^{(Sq)} B_p^0}{r_0} [\frac{1}{6} (6\cos^2 \theta - 1) + \sin^2 \theta \cos \theta].$$
(18)

Вычислим $\overline{S}_{\phi,ij}$ при i=j=0, используя второе выражение в (11). Проводя соответствующие преобразования, получим:

$$\overline{S}_{\phi,00} = \frac{2\pi}{3\sqrt{4\pi}} \frac{V_0^{(Sq)} B_p^0}{r_0}.$$
(19)

При i=1 получим:

$$\bar{S}_{\phi,10} = \frac{8\pi\sqrt{3}}{15\sqrt{4\pi}} \frac{V_0^{(Sq)} B_p^0}{r_0}, \bar{S}_{\phi,11} = 0.$$
⁽²⁰⁾

С учетом этих двух членов получим для B'_{ϕ} выражение:

$$B'_{\phi} = B'_{\phi,00}Y_{00}(\theta,\phi) + B'_{\phi,10}Y_{10}(\theta,\phi) + \dots =$$

= $-\frac{4\pi}{c^2}\Sigma_{\sigma}V_0^{(Sq)}B_p^0(\frac{2\pi}{3\sqrt{4\pi}}\frac{1}{\sqrt{4\pi}} + \frac{8\pi\sqrt{3}}{15\sqrt{4\pi}}\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{4\pi}}\cos\theta)\sin\tau =$
= $-\frac{4\pi\sigma\Delta z}{c^2}V_0^{(Sq)}B_P^0(\frac{1}{6} + \frac{2}{5}\cos\theta)\sin\tau$ (21)

Аналогично можно рассчитать другие компоненты возмущенного магнитного поля, которые также определяются магнитным числом Рейнольдса : Re_m= $(4\pi\sigma\Delta z/c^2)V_0^{(Sq)}/$ В случае лунных вариаций магнитного поля их величина может составлять 0.18нТл.

Другой подход к оценке приливов на вариации геомагнитного поля был предложен в монографии [13]. Для оценки связи между ветром и ионосферной плазмой использовалась упрощенная модель гидромагнитного динамо. Динамо–слой представлял тонкую оболочку толщиной Δz , пронизанную вертикальным магнитным полем $B_0 = -2\hat{B}\sin\phi, \phi$ - географическая широта, которое является вертикальной компонентой земного магнитного диполя (6). Допускается, что горизонтальный ветер не меняет свою фазу внутри этого тонкого слоя и тензор электрической проводимости определяется выражением:

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \Sigma_p \Sigma_h \\ -\Sigma_h \Sigma_p \end{pmatrix}, \tag{22}$$

где проинтегрированная по высоте электропроводность Педерсона $\Sigma_p = \sigma_p \Delta z \cong 10S$ и проинтегрированная по толщине слоя электропроводность Холла $\Sigma_h = \sigma_h \Delta z \cong 10S$.

Электрическое поле \vec{E} и электрический ток \vec{J} имеют только горизонтальные компоненты. Для напряженности электрического поля имеет место представление:

$$\vec{E} = -\nabla \Psi, \tag{23}$$

где: Ψ - потенциал электрического поля.

Электрический ток связан с электрическим полем в системе отсчета, связанной с движущейся плазмой законом Ома:

$$\vec{I} = \Sigma \cdot (\vec{E} + \vec{U} \times \vec{B}). \tag{24}$$

Выражение (24) есть суперпозиция токов, обусловленных электрическим полем поляризации и полем Лоренца, связанного с движением среды. Скорость \vec{U} представляет объемную скорость смеси нейтрального газа и плазмы. В рассматриваемом нами случае эта скорость совпадает со скоростью нейтрального газа, так как внутри слоя плазма является слабо ионизованной. Электрический ток является источнико-свободным и удовлетворяет уравнению:

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0. \tag{25}$$

Далее поле Лоренца представим в следующем виде:

$$\vec{U} \times \vec{B}_0 = -\nabla V + \nabla \times W \vec{r}. \tag{26}$$

Функции V и W определяются из решения следующих уравнений:

$$\Delta V = div(\vec{U} \times \vec{B}_0), \nabla \times \nabla \times W\vec{r} = rot(\vec{U} \times \vec{B}_0).$$
⁽²⁷⁾

Для тока получено с использованием приведенных выше соотношений выражение:

$$J = -\nabla T + \nabla \times S\vec{r},$$

$$T = \sum_{p} (\Psi + V) + \sum_{h} W, S = \sum_{p} W - \sum_{h} (\Psi + V).$$
 (28)

Используя уравнения (25) и (28), получим уравнение для определения Т:

$$\nabla^2 T = 0. \tag{29}$$

Решением (29) является: T=const. Полагая T=0, получим из (28):

$$\Psi + V = -\frac{\Sigma_h}{\Sigma_p} W. \tag{30}$$

И для тока Ј получим выражение:

$$\vec{J} = \nabla \times S\vec{r}$$
 , $S = \Sigma_c W$, $\Sigma_c = \Sigma_p + \frac{\Sigma_h^2}{\Sigma_p}$. (31)

Здесь S - потоковая функция (функция тока), Σ_c - проводимость Каулинга. Кривые S=const функции тока описывают линии тока электрического тока, причем ток течет вправо ортогонально направлению увеличения S. Горизонтальное расстояние между двумя линиями тока обратно пропорционально силе тока.

В динамо области электрическое поле поляризации частично компенсируется безвихревой компонентой поля Лоренца. Кроме того эффективной проводимостью является проводимость Каулинга, которая больше проводимости Педерсона примерно в два раза. Это следует из запирания электрического тока внутри тонкого слоя с конечной электрической проводимостью, которое предотвращает течение значительного вертикального тока.

Магнитное поле такого слоевого электрического тока снаружи слоя на высоте *r*₀ находится с помощью закона Био-Савара:

$$B = -\nabla R,$$

$$R = \mu_0 \sum_{s=0}^{\infty} \sum_{m=-s}^{s} S_s^m P_s^m \frac{s}{(2s+1)} (\frac{r}{r_0})^s.$$
(32)

где: r_0 - высота токового слоя, S_s^m - коэффициенты разложения токовой функции S по сферическим гармоникам, P_s^m - присоединенные полиномы Лежандра.

Для определения потоковой функции S необходимо определить функцию W из уравнения (26), задавая скорость горизонтального ветра U, которая определяется выражением:

$$\vec{U} = -\nabla\xi + \nabla \times \psi \vec{r}. \tag{33}$$

Первый член в (33) определяет безвихревую составляющую скорости, а второй – компоненту вихревую, \vec{r} - единичный вектор в радиальном направлении, ξ, ψ - функции широты ϕ и долготы λ . Для компонент вектора скорости имеет место представление:

$$u = -\frac{\partial\xi}{\partial x} + \frac{\partial\psi}{\partial y}, v = -\frac{\partial\xi}{\partial y} - \frac{\partial\psi}{\partial x}, \qquad (34)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{1}{a\cos\phi} \frac{\partial}{\partial\lambda}$$
, $\mathbf{H} = \frac{\partial}{\partial y} = \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial\phi}$

Функция ξ является потенциалом скорости. Безвихревой ветер направлен ортогонально линиям постоянного ξ , текущего в направлении уменьшения ξ . Компонента ψ является потоковой функцией. Линии постоянной ψ является линиями тока безисточникового ветра. Ветер направлен вправо направления увеличения ψ . Используя (33) можно получить уравнение для функции W, входящей в потоковую функцию S:

$$\nabla^2 W = 2\hat{B}(\frac{im\psi}{a^2} + [\sin\phi\nabla^2\xi + \frac{\cos\phi}{a^2}\frac{\partial\xi}{\partial\phi}]), \qquad (35)$$

где: *а* - радиус Земли, $\hat{B} = 3 \times 10^{-5} T$ - значение магнитной индукции дипольного поля на геомагнитном экваторе при r=a. Расчеты, проведенные монографии [13] показывают, что электрический ток, создаваемый модой (1,-1,-1) солнечного прилива, приводит к вариациям геомагнитного поля, которые описываются формулами [14]:

$$X = -B_{\phi} = iFP_1^0,$$

$$Y = B_{\lambda} = FP_0^0,$$

$$Z = -B_r = iFP_1^1.$$
(36)

где: $F = |U_{-1}^{-1}|\Sigma_c \hat{B}\mu_0 / 3 \cong 25 \mu T$ при максимальной амплитуде ветра $|U_{-1}^{-1}| = 10$ м/с.

Эти числа характерны для генерации токов внутри динамо области, при этом ток, текущий, составляет 40 кА. Для суточной моды (1,-2,-1),имеющей большую скорость ветра величина общего тока составляет 100 кА [13].

Регулярные геомагнитные вариации, наблюдаемые на земле с основным периодом один солнечный день, и создаваемые солнечными суточными приливными модами называются Sq вариациями. Соответствующий электрический ток внутри динамо слоя, Sq ток может быть промоделирован эквивалентным, тонким слоевым током, получаемым из потоковой функции S в (31). На рис.1 приведены линии тока получаемого таким образом Sq тока для условий равноденствия в 12 UT. Так как токовая система движется вместе с Солнцем по электрически проводящей Земле, электрический ток индуцируется внутри Земли. Существуют хорошо известные методы разделения внешней и внутренней частей геомагнитного поля наблюдаемых на земле [14]. Эта концепция уже применена на рис.1. Индуцированный ток на рис. 16 (нижний рисунок) имеет интенсивность 1/3 первоначального ионосферного тока и немного смещен по фазе. Горизонтальная компонента геомагнитного поля увеличивается на 50% и вертикальная компонента уменьшается на ¹/₂ по сравнению с магнитным полем первичного тока.

Первичный ток на рис. 1а течет в двух вихрях на дневной полусфере, против часовой стрелки в Северном полушарии и по часовой стрелке в Южном полушарии с максимальной силой тока внутри каждого вихря около 150 кА. В течение солнцестояния летний вихрь усиливается и немного смещается к югу в зимнее полушарие. Sq ток увеличивается по силе примерно в два раза от минимума по солнечным пятнам к максимуму солнечных пятен.

Повседневная переменность центров вихрей, которые располагаются около $\pm 40^{\circ}$ широты наблюдается. Региональные различия Sq, возникающие вследствие недипольной компоненты внутреннего геомагнитного поля также наблюдались.

Простая оценка геомагнитного эффекта такого тока над головой может быть получена с помощью формулы [12]:

$$\Delta H \cong 800J, \qquad (37)$$

где: Δ H - горизонтальная компонента геомагнитных вариаций на земной поверхности, измеряемая в нT, J - сила тока, текущего в слое над головой, измеряемая в А/м. Направление тока может быть найдено с помощью «правила большого пальца». Если большой палец правой руки указывает направление тока, то отогнутые пальцы дают направление магнитного поля. Для характерной величины силы тока J=25 мA/м величина геомагнитных вариаций составляет Δ H=20нT.

Sq ток содержит значительную полу суточную составляющую. Можно разложить горизонтальную составляющую Sq в ряд Фурье:

$$\Delta H = \sum_{m=0}^{\infty} h_m(\phi) \cos[m\tau + \gamma_m(\phi)], \qquad (38)$$

Лунные вариации, называемые L вариациями примерно в 20 раз слабее Sq вариаций. Доминирующей компонентой является лунная полусуточная приливная волна. Рис.5.32 показывает первичный и вторичный эквивалентные ионосферные слоевые токи, как функции широты и локального лунного времени, ответственные за геомагнитные L вариации, наблюдаемые на земной поверхности. Полный электрический ток внутри одного вихря равен 4.2 кА и центры вихрей располагаются около $\pm 20^{\circ}$ широты. Противоположные часовой стрелке токи в Северном полушарии имеют максимумы в 8^h30^m и 20^h30^m лунного локального времени.



Рис. 5.30. Линии тока (потоковые линии) первичного эквивалентного электрического Sq тока внутри динамо-слоя, как функции широты и долготы в 12^h00^m UT во время равноденствия (верхний рисунок) и электромагнитно индуцированная вторичная то-ковая система внутри Земли (нижний рисунок). Между двумя потоковыми линиями течет ток 20 кА



Рис. 5.31. Вариации с дипольной широтой амплитуды (нТ) (сплошные линии и левая шкала) и фазы (в град) (штриховые линии и правая шкала) первых двух фурье компонент (гармоник) (38) для горизонтальной напряженности магнитного поля для геомагнитных Sq вариаций



Рис. 5.32. Первичная (верхний рисунок) и вторичная часть эквивалентного L тока (периодично усредненного) как функция лунного времени и дипольной широты. Между двумя линиями течет ток в 1 кА. Толстые сплошные линии указывают линии нулевой интенсивности. Тонкие сплошные (штриховые) линии показывают ток, текущий против часовой стрелки (ток, текущий по часовой стрелке)

Данные на рис.5.32 усреднены по солнечным локальным временам. L вариации приближаются к нулю в течение ночи и имеют максимальные амплитуды в течение дня. Поэтому они модулируются с солнечным локальным временем. Сезонные вариации L больше чем сезонные вариации Sq. L вариации дают вклад в экваториальный электроджет с амплитудами порядка 20 нТ. Малая, но не пренебрежимая компонента L генерируется динамо действием океана. Лунное приливное движение проводящего океана через силовые линии основного геомагнитного поля вызывает электрические токи внутри океана, которые производят геомагнитные L вариации.

Наиболее эффективным генератором ионосферных токов Sq является внешняя приливная мода (1; -2; -1), которая имеет очень большую вертикальную длину волны и может поэтому генерировать синхронные электрические токи во всей динамо области. Допуская, что электрическая проводимость известна, можно построить структуру горизонтального ветра из наблюдаемых Sq вариаций, используя соотношение (24). Такой подход и привел к открытию рассматриваемой моды.

Численные расчеты этого тока и электрического поля поляризации обычно начинается с задания рассчитываемых приливных ветров и расчета \vec{J} и \vec{E} с помощью (24).Эти расчеты пренебрегают обратным воздействием

силы Лоренца на ветер и такие модели относятся к моделям кинематического динамо. Проведенные расчеты указывают, что мода (1; -2; -1) дает вклад от 70 до 80% в общий Sq ток. Оставшиеся 20-30% приходят от суточной моды (1;1; -1) и полусуточных мод (2;2; -2) и (2; 4; -2). Эти внутренние моды с их конечными вертикальными длинами волн в основном являются ответственными за наблюдаемой повседневно вариацией Sq. Ток Sq состоит из токов Педерсона, текущих в направлении \vec{E} и токов Холла, текущих ортогонально \vec{E} , как это следует из (22). Токи Педерсона текут в широкой области между 120 и 170 км высоты, в то время как токи Холла концентрируются в области между 100 и 120 км. В экваториальной области, где геомагнитное поле ориентировано почти горизонтально, проводимость Каулинга увеличивается в почти два раза в малой широтной полосе. Это вызывает экваториальный электроджет. Электроджет сопровождается меридиональными токовыми системами, около геомагнитного экватора и тороидальными магнитными полями, которые не наблюдаются на земной поверхности, наблюдаются со спутников.

Численные расчеты L токов, обусловленных лунными приливами , рассматривают моду (2; 2; -2) как генерирующую силу.

Приближенный магнитогидродинамический подход, рассмотренный в монографии [12], учитывает влияние силы Лоренца на приливный ветер. В этом случае расчеты приводят к следующему выражению для потоковой функции для моды (1; -2; -1):

$$S_{1} = \frac{3|V_{1}|\Sigma_{c}\hat{B}a\sin 2\phi}{10\sqrt{1 + (2\delta/15)^{2}}}\cos(\tau - \tau_{0}) \qquad \delta = (4\hat{B}^{2}\Sigma_{c})/(\rho\Omega\Delta z),$$

$$\tau_{0} = \frac{12}{\pi}arctg(2\delta/15) + \tau_{1} + 12(\alpha acax),$$

$$v_{1} = |V_{1}|\sin\phi\cos(\tau - \tau_{1}).$$
(39)

где: v_1 - меридиональная скорость данной моды, δ - число Чандрасекхара.

В случае лунных полусуточных приливов (2;2; -2) получим для потоковой функции выражение :

$$S_{2} = \frac{4|V_{2}|\Sigma_{c}\hat{B}a\sin 2\phi}{9\sqrt{1+(\delta/9)^{2}}}\cos(2\tau_{L}+\lambda_{0}),$$

$$\lambda_{0} = \lambda_{2} - arctg(\delta/9) + \pi,$$

$$v_{2} = |V_{2}|\sin 2\phi\cos(2\tau_{L}+\lambda_{2}).$$
(40)

Потоковые линии для S в (39) образуют четыре вихря с центрами при $\pm 45^{\circ}$ широты. Полный электрический ток внутри одного вихря дается величиной $|S_{\max}| = S(\phi = 45^{\circ}; \tau = \tau_{0})$. Суточная компонента Sq имеет также четыре вихря с полным током около 100 кА внутри одного вихря. Ночные вихри подавляются полусуточной компонентой. Можно оценить амплитуду меридиональной скорости, которая необходима для создания

Sq тока с помощью (39). Полагая $S_{\text{max}} = 100 kA; \tau_0 = 114; \delta = 2; \Sigma_c = 30S$, получим $|V_1| = 58 m/c$ и $\tau_1 = 10445 muh$. Эта амплитуда совместима с наблюдаемой суточной компонентой ветра на высотах динамо слоя.

В случае лунных приливов потоковые линии S в (40) образуют восемь вихрей с центрами около $\pm 35^{\circ}$ широты. Если использовать те же величины для δ и Σ_c как и выше и если положить $S_{\text{max}} = 4.2kA$ и $\lambda_0 = 110^{\circ}$, то получим для амплитуды меридиональной скорости, которая создает L ток, величину $|V_2| = 2.1m/c$ и $\lambda_2 = 110^{\circ}$, что соответствует 8 час 20 мин лунного времени.

Таким образом приведенные выше расчеты и оценки амплитуд ветра совместимы с наблюдениями и теорией [13] и соответствуют оценкам вариаций напряженности магнитного следующим из наблюдений.

Библиографические ссылки

1. Грунская, Л. В. Приемно-регистрирующая аппаратура для исследования взаимосвязи электрического поля приземного слоя атмосферы с геофизическими процессами / Л. В. Грунская, В. А. Ефимов // Проектирование и технология электронных средств. – 2006. – № 1. – С. 63 – 68.

2. Грунская, Л. В. Мониторинг электромагнитного поля приземного слоя в УНЧ диапазоне / Л.В. Грунская, В.А/ Ефимов // Тр. 6-й Междунар. науч.-техн. конф. «Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии». – Владимир, 2004. – С. 219 – 222.

3. Грунская, Л. В. Экспериментальные и теоретические исследования вариаций напряженности электрического поля, обусловленных солнечными и лунными приливами в приземном слое атмосферы / Л. В. Грунская, В. Н. Морозов // Известия вузов. Физика. – 2005. – № 8. – С. 33 – 39.

4. Грунская Л. В. Лунно-солнечные приливы в электрическом поле атмосферы Земли / Л.В. Грунская, В.Н. Морозов // Известия вузов. Физи-ка. – 2003. – № 12. – С. 71 – 77.

5. Грунская, Л. В. Экспериментальные и теоретические исследования вариаций напряженности электрического поля,обусловленных солнечными и лунными приливами в приземном слое атмосферы / Л. В. Грунская, В. Н. Морозов /. Известия вузов. Физика. – 2005. – № 8. – С. 33 – 39.

6. Грунская, Л. В. Модифицированный вариант корреляционного квадратурного приемника / Л.В. Грунская, В.А. Мишин // Тез. 10-й Междунар. науч.-техн. конф. «Радиофизика». – Москва, 2004. – С. 527.

7. Грунская, Л. В. Повышение достоверности спектральной оценки, получаемой с помощью корреляционного квадратурного приёмника / Л. В. Грунская [и др.] // Проектирование и технология электронных средств. – 2004. –Спец. вып. – С. 66 – 71.

8. Т. Каулинг Магнитная гидродинамика. М.:Атомиздат, 1978, 142с

9. Г. Альвен, К.-Г Фельтхаммер. Космическая электродинамика.М.: Мир,1967,260с

10. Дж. Джексон. Классическая электродинамика. М.:Мир,1965,702с..

11. Volland H. Global Quasi-Static Electric Fields in the Earth's environment. – Electrical Processes in Atmosphere.-Darmastadt, Verlag.-1977.-p.509-529/

12. Volland H. Atmospheric Electrodynamics- Berlin, Springer. 1984 , 205p/

13. H.Volland. Atmospheric Tidal and Planetary Waves. Klumer Academic Publishers.Dordrecht.1988.348p.

14. S. Chapman, J.Bartels. Geomagnetism/V.II,Oxford,1962,1049p..

Заключение к главе

Изложенные представления о природе геомагнитных возмущений объясняют многие, давно известные свойства возмущений, а именно:

1) широтное распределение возмущенности с основным максимумом в зоне авроральной активности;

2) возмущенный суточный ход: в средних широтах один максимум приходится на вечерние часы, в полярных широтах имеются два максимума утренний и вечерний;

3) сезонный (годовой) ход с максимумами в эпохи равноденствий, обусловленный тем, что Земля в течение года проектируется на различные

гелиографические широты Солнца, а, следовательно, на различные активные области;

4) 11-летний циклический ход, следующий за 11-летними колебаниями солнечной активности с запаздыванием максимумов магнитной активности на 1–3 года [4];

5) 27-дневную повторяемость магнитных возмущений, объясняющуюся 27-дневным синодическим периодом вращения Солнца;

6) запаздывание магнитных возмущений на 2–4 дня относительно прохождения активных областей на Солнце через центральный меридиан (определяется скоростью потоков CB).

Спектральный анализ параметров электрического и геомагнитного полей пограничного слоя атмосферы Земли по разнесенным в пространстве станциям позволил оценить амплитуды недоминирующих составляющих (для электрического поля $\text{Ez} \approx 0,5-6$ В/м, для геомагнитного H $\approx 0,004-0,4$ нTл), которые согласуются с модельными оценками ($\text{Ez} \approx 0,3-1$ В/м, H $\approx 0,18-1$ нTл).

Отношения сигнал шум при использовании классических и параметрических методов в решаемой задаче составляют соответственно для электрического 0,4–2,7 и и геомагнитного 0,5–2,1 полей пограничного слоя атмосферы Земли.

Контрольные вопросы

- 1. Перечислите составные части геомагнитного поля (ГМП) Земли.
- 2. Какими тремя магнитными элементами характеризуют распределение геомагнитного поля в пространстве?
- 3. Пропорционально какой степени геоцентрического расстояния от Земли уменьшается ГМП?
- 4. Чем вызваны региональные и локальные аномалии геомагнитного поля?
- 5. Как возникает основная крупномасштабная часть ГМП (поле однородного намагничения и материковых аномалий), называемая "главным" полем?
- 6. Каков механизм генерации ГМП?
- 7. Что такое магнитосфера Земли?
- 8. Какие бывают циклы солнечной активности, проявляющиеся в геомагнитном поле?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования, результаты которых представлены в настоящем учебном пособии, посвящены решению одной из актуальных проблем физики Земли, связанной с исследованием взаимосвязи электрического поля в приземном слое с геофизическими процессами, конкретизации физических механизмов реализующих это воздействие и обоснованию перспективности использования метода корреляционного приемника в решении прикладных геофизических задач. Основные выводы, полученные в результате проведенных исследований, могут быть сформулированы следующим образом:

1. Создана система многоканального синхронного мониторинга, отслеживания, хранения и обработки информации по электрическому полю приземного слоя атмосферы с метеоданными в сети разнесенных в пространстве станций: станция на экспериментальном полигоне ВлГУ; станция в радиофизическом корпусе ВлГУ; станция в ГГО НИЦ ДЗА.

2. Разработана модель проникновения электрического поля, возникающего на уровне ионосферы под действием лунно-солнечных приливов, в приземный слой атмосферы с учетом конечной и бесконечной проводимости земной коры. Получены теоретические оценки воздействия приливных сил на вертикальную составляющую электрического поля приземного слоя атмосферы, подтвержденные в ходе экспериментальных исследований. Из модельных расчетов получено, что для солнечных приливов $E_z \cong$ (10 - 15) В/м с учетом электродного приземного слоя, для лунных приливов $E_z \cong (0,3 - 0,5)$ В/м.

3. Модернизирована структура ККП путем включения ФНЧ вместо интегратора или путем обработки входных данных взвешивающим косинусоидальным окном с целью снижения уровня боковых лепестков в частотной характеристике ККП. При обработке входных данных взвешивающим окном уровень боковых лепестков в частотной характеристике ККП снижен до 7% от высоты главного при его незначительном расширении, что повысило разрешающую способность данного метода. Разработанная структура позволяет получать оптимальную оценку средней амплитуды на частотах приливов, так как оценка осуществляется на выходе ККП, являющегося узкополосным фильтром, на фоне гауссовых помех.

4. Получены каталоги спектров вблизи частот лунно-солнечных при-

ливов с помощью корреляционного квадратурного приемника на основе регистраций электрических полей в приземном слое атмосферы на разнесенных в пространстве станциях.

6. Получены оценки средней амплитуды и дисперсии относительной ошибки оценки на спектральных компонентах электрического поля приземного слоя атмосферы термогравитационных солнечных приливов и лунных приливов по результатам анализа электрического поля приземного слоя атмосферы с помощью корреляционного квадратурного приемника. Обработка экспериментальных данных в сети разнесенных в пространстве станций осуществлена за период 1997-2004 годы. Диапазон изменения средней амплитуды на частотах термогравитационных солнечных приливов по станциям ВлГУ и ГГО составил: 16 В/м (S1), 8 В/м (S2), 3 В/м (S3). Отношения сигнал/шум на частотах термогравитационных приливов составили: на S1 – с/ш 7.5÷3 ; на S2 с/ш $5.2\div3$; на S3 с/ш $3\div2$; на S4 с/ш $2.5\div2$.

7. Установленные экспериментально закономерности сопоставлялись с широким комплексом наземных геофизических данных других станций. Были проанализированы экспериментальные данные по электрическому полю приземного слоя атмосферы по станциям Гидрометеорологической службы: Воейково – 1966-1995; Верхнее Дуброво – 1974-1995; Душети – 1967-1980.Среднее значение амплитуды электрического поля и отношение сигнал/шум на частотах приливов S1, S2, S3 по указанным станциям составили соответственно: S1(15В/м, с/ш- 6,4; 10В/м, с/ш-3,9; 12В/м, с/ш-4,2); S2 (10 В/м,с/ш-5,2; 7 В/м, с/ш-4,9; 10В/м, с/ш-5,4); S3 (3В/м, с/ш-5,3; 4В/м, с/ш- 4,9; 6В/м, с/ш-3,5). Большой массив данных (29 лет, 21 год, 14 лет) позволил получить необходимую разрешающую способность для разделения близких по частоте приливов P1 и S1.

8. Сравнение полученных оценок амплитуды электрического поля на частотах термогравитационных солнечных приливов по станции полигона ВлГУ, станции в ВлГУ, станции в ГГО НИЦ ДЗА, станциям Гидрометеорологической службы показывает их сопоставимость и одинаковый порядок результатов с полученными теоретическими оценками. Результат сравнения теоретических и экспериментальных оценок абсолютных значений электрического поля в приземном слое на частотах термогравитационных приливов позволяет сделать вывод об адекватности разработанной модели реальным условиям. 9. Спектральный анализ параметров электрического и геомагнитного полей пограничного слоя атмосферы Земли по разнесенным в пространстве станциям позволил оценить амплитуды недоминирующих составляющих (для электрического поля $\text{Ez} \approx 0,5-6$ В/м, для геомагнитного Н $\approx 0,004-0,4$ нТл), которые согласуются с модельными оценками (Ez $\approx 0,3-1$ В/м, H $\approx 0,18-1$ нТл).

10.Отношения сигнал шум при использовании классических и параметрических методов в решаемой задаче составляют соответственно для электрического 0,4–2,7 и и геомагнитного 0,5–2,1 полей пограничного слоя атмосферы Земли.

11.Практическая реализация результатов проведенных исследований возможна в трех основных направлениях. Во-первых, это постановка регулярных измерений атмосферно-электрических параметров и данных магнитометрии в сети разнесенных в пространстве станций с целью наземной диагностики полей различной природы и анализа их взаимосвязей. Во-вторых, намечены пути решения задачи обнаружения воздействия лунных гравитационных приливов на электрическое поле приземного слоя атмосферы. В-третьих, создание системы мониторинга электрического поля приземного слоя атмосферы в сети разнесенных в пространстве станций с достоверной оценкой степени воздействия глобальных геофизических процессов открывает на этой основе возможность процессов природного и техногенного характера, проводить анализ сейсмической активности и взаимосвязь атмосферного электричества с динамикой метеопроцессов.

послесловие

Учебное пособие «Электромагнетизм земной атмосферы» содержит информацию по следующим направлениям: воздействие геофизических факторов на электрическое поле в приземном слое атмосферы; теоретическая модель электрических процессов в атмосфере; воздействие лунносолнечных приливов на вертикальную составляющую напряженности электрического поля в приземном слое атмосферы; система мониторинга электромагнитных полей в приземном слое атмосферы в сети разнесенных в пространстве станций; взаимосвязь электромагнитного поля Земли с астрофизическими процессами.

Автор надеется, что материалы, изложенные в пособии, помогут студентам, магистрантам, аспирантам, специализирующимся в направлении изучения характеристик земной атмосферы, разобраться в особенностях электромагнетизма Земли. Человечество живет в резонаторе Земля–ионосфера, обладающем своим электрическим и геомагнитным полем. Электромагнитное поле (ЭМП) резонатора формирует и оказывает непосредственное воздействие на все жизненные процессы на Земле.

Электромагнитное поле Земли тесно связано с процессами, протекающими в пространстве от уровня земной поверхности до высот в десятки земных радиусов. Источниками наиболее сильных полей в атмосфере являются грозовые облака, напряженность поля под которыми у земной поверхности достигает 10⁴ В/м.

За последние десятилетия значительно возросла относительная роль антропогенных факторов в формировании электрических полей у земной поверхности. Радио– и телевизионные станции, линии электропередач, объемные заряды, возникающие в атмосфере в результате действия промышленности и транспорта, вследствие процессов горения, испарения, диспергирования веществ в воздухе, создают дополнительные изменения электрических полей (ЭП).

По ряду вопросов, связанных с земным электромагнетизмом, можно порекомендовать обратиться к литературе, которая приведена автором в рекомендательном библиографическом списке.

206

РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИИЙ СПИСОК

- Грунская Л.В., Золотов А.Н., Бушуев А.С., Сныгина И.А. / Мониторинг электромагнитных полей земли инфранизкочастотного диапазона с целью исследования влияния их на здоровье человека// Труды XIIIII Международной научно-технической конференции "Физика и радиоэлектроника в медицине и экологии" ФРЭМЭ-2018' ISBN:978-5-905527-27-2,2018, 02 - 05 июля 2018 г., Владимир – Суздаль, с.295-298.
- 2. Грунская Л.В., Золотов А.Н., Бушуев А.С., Сныгина И.А./ Универсальная система удаленного сбора данных для мониторинга характеристик природной среды // Динамика сложных систем –XXI век. Москва:Издательство «Радиотехника».- ISSN 1999-7493. № 4 .-2018.с.28-42.
- 3. Грунская Л. В.,Исакевич В. В., Исакевич Д. В. / Исследование воздействия релятивистских двойных звездных систем на электрическое поле земли // Известия вузов.Физика.-2019г.-т.62.-№1.-с.47-53.-ISSN00213411, <u>https://elibrary.ru/contents.asp?id=36798231</u>
- 4. Грунская Л.В., В. А. Ефимов. Оценка степени воздействия лунно солнечных приливов на электрическое поле приземного слоя атмосферы// Известия вузов. Физика. 2007, т. 50, № 8, с. 69-73.
- Грунская Л.В., Елисеева С.В., Ефимов В.А., Мишин В.А., Исакевич В.В., Никитин О.Р. Оптимальный приемник в системе мониторинга электрического поля приземного слоя атмосферы// Статья в журнале «Проектирование и технология электронных средств». – № 2. – 2005. – С.56-60.
- 6. Грунская Л.В., Ефимов В.А.,Исакевич В.В.,Федотов М.Ю.,Апполонов Ю.А., Соколов М.С.,Тарасов А.В.,Киселев А.В.,Фатеев В.С. Мобильный приемный регистрирующий комплекс для мониторинга электромагнитного поля приземного слоя атмосферы// Статья в журнале «Проектирование и технология электронных средств». № 2. 2005. С.69-74.
- 7. Грунская Л.В., Морозов В.Н. Экспериментальные и теоретические исследования вариаций напряженности электрического поля, обусловленных солнечными и лунными приливами в приземном слое

атмосферы// Статья в журнале «Известия ВУЗов, Физика». – №8. – 2005. – С.33-39.

- Л.В.Грунская, В.В.Исакевич, Д.В.Рубай, Д.В.Исакевич / Воздействие лунных приливов на электрическое поле пограничного слоя атмосферы Земли» // Материалы второй всероссийской конференции «Глобальная электрическая цепь» ISBN 978-5- 906682-39-0, 5 – 9 октября 2015 г., Борок, с. 26.
- Грунская Л.В. Оценка амплитуды и исследование свойств составляющих электрического поля пограничного слоя атмосферы Земли, спектрально локализованных на частотах лунно-солнечных приливов / Грунская Л.В., Исакевич В.В., Исакевич Д.В., Рубай Д.В., Золотов А.Н.//Известия высших учебных заведений. Физика. 2014. Т. 57. № 5. С.118-124.
- 10.Грунская Л.В., Решение задачи обнаружения лунных приливов в электрическом поле пограничного слоя атмосферы/ Л.В. Грунская, В.В. Исакевич, В.А. Ефимов, Л.Т. Сушкова, А.А. Закиров, Д.В. Рубай // Электромагнитные волны. Изд. Радиотехника. 2012. - №3.-С. 45-50.
- 11. Грунская Л.В. Мониторинг электромагнитных полей инфранизко частотного диапазона пограничного слоя атмосферы Земли/ Грунская Л.В., Ефимов В.А., Закиров А.А., Золотов А.Н., Рубай Д.В., Лещев И.А.// Пространство, время и фундаментальные взаимодействия. Москва Изд. «Профиль». 2014. ISSN 2226-8812. Вып.2.с.32-42.
- 12. Грунская Л.В. Мониторинг электромагнитных полей пограничного слоя атмосферы Земли / Грунская Л. В., Морозов В. Н., Ефимов В. А., Золотов А.Н., Рубай Д. В.,Закиров А. А.// Монография Издатель:Germany,LAPLAMBERTA cademic Publishing. – ISBN: 978-3-659-32919-7. -2013 г, 192 с.

Учебное электронное издание

ГРУНСКАЯ Любовь Валентиновна

ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ ЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ

Учебное пособие

Издается в авторской редакции

Системные требования: Intel от 1,3 ГГц; Windows XP/7/8/10; Adobe Acrobat Reader; дисковод CD-ROM; 5,08 Мб. Загл. с титул. экрана.

Тираж 30 экз.

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых Изд-во ВлГУ rio.vlgu@yandex.ru

Институт прикладной математики, физики и информатики кафедра общей и прикладной физики grunsk@vlsu.ru