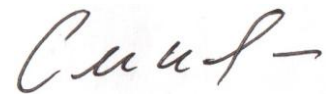


На правах рукописи



СМИРНОВ Сергей Эдуардович

**ВАРИАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ В
СЕЙСМОАКТИВНОМ РЕГИОНЕ КАК ИНДИКАТОРЫ
СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ЭРУПТИВНЫХ ЯВЛЕНИЙ НА
СОЛНЦЕ**

Специальность 25.00.29. Физика атмосферы и гидросферы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

Петропавловск-Камчатский - 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте космофизических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИКИР ДВО РАН).

Официальные оппоненты: **Мареев Евгений Анатольевич**, член-корреспондент Российской академии наук, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук», руководитель Отделения геофизических исследований.

Аджиев Анатолий Хабасович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Высокогорный геофизический институт», заведующий отделом стихийных явлений.

Рахматулин Равиль Анатольевич, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, заведующий комплексной магнитно-ионосферной обсерваторией.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской академии наук.

Защита состоится 16 октября 2018 г. в 10 часов на заседании объединенного диссертационного совета Д999.004.03 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИМГиГ ДВО РАН), Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте вулканологии и сейсмологии Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИВиС ДВО РАН), Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте космофизических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИКИР ДВО РАН) по адресу: 683006, г. Петропавловск-Камчатский, бульвар Пийпа Б.И., 9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеках ИМГиГ ДВО РАН, ИВиС ДВО РАН, ИКИР ДВО РАН и на сайте www.imgg.ru. Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве образования и науки Российской Федерации <http://vak.ed.gov.ru/> и на сайтах www.imgg.ru, www.ikir.ru.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, в 2-х экземплярах направлять по адресу: 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б. Тел/факс (8 4242) 791-517, ученому секретарю диссертационного совета Марине Юрьевне Андреевой, E-mail: andreeva-mu@mail.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д999.004.03
кандидат физико-математических наук

М.Ю. Андреева

Общая характеристика работы

Диссертация посвящена исследованию закономерностей во временных зависимостях вертикальной компоненты квазистатического электрического поля в приземной атмосфере во время крупномасштабных динамических событий: сильных землетрясений и вспышек на Солнце.

Актуальность темы. Интерес к изучению динамических характеристик атмосферного электричества в сейсмоактивных регионах мира зародился давно. Причиной этому послужило обнаружение аномальных эффектов в суточных вариациях напряженности электрического поля с опережением землетрясений от нескольких часов до нескольких суток. На Камчатке, как наиболее сейсмоактивном регионе России, регулярные наблюдения с целью прогноза землетрясений проводятся с 1991 г. в районе Паратунской гидротермической системы (обс. Паратунка, $\varphi = 52^{\circ}58,3' \text{ N}$, $\lambda = 158^{\circ}14,9' \text{ E}$) Институтом космофизических исследований и распространения радиоволн (ИКИР) ДВО РАН Однако до настоящего времени вопрос о закономерностях в вариациях электрического поля, связанных с процессами подготовки очагов землетрясений, остается дискуссионным, что препятствует использованию таких вариаций как прогнозных признаков сильного землетрясения.

Изучение динамических характеристик электрического поля в сейсмоактивных регионах помогает раскрыть различные механизмы взаимодействия в системе литосфера - атмосфера – ионосфера. В современных теоретических моделях, рассматривающих это взаимодействие, электрическое поле вводится как один из основных параметров, участвующих в модификации нестационарной ионосферы по всей ее толще и в подготовительную фазу землетрясений. В некоторых моделях – это величины аномальной напряженности электрического поля перед отдельными землетрясениями, которые неоднократно публиковались в печати. Вместе с тем в ряде других моделей взаимодействие рассматривается через атмосферные волны, в

частности, через внутренние гравитационные волны. Это стимулировало детальные экспериментальные исследования *спектров мощности* напряженности электрического поля. Спектральные вариации вертикальной компоненты электрического поля использованы в ней в качестве одного из средств исследования динамики атмосферы в сейсмоактивном регионе.

Исследования выполнены на Камчатке - в уникальном геодинамически активном регионе с особым климатом. На электрическое состояние приземной атмосферы в этом регионе влияют сейсмические, вулканические и циклонические процессы, происходящие на Камчатке. Это диктовало выбор комплекса проводимых измерений и задачи, которые необходимо было решить.

Целью исследования является поиск и выделение эффектов спектрально-временных вариаций электрического поля в приземной атмосфере на Камчатке, вызванных сейсмическими подвижками и вспышечными событиями на Солнце при различных метеорологических условиях.

Для достижения этой цели в работе необходимо было выполнить следующие **задачи**:

- проведение регулярных наблюдений напряженности электрического поля в комплексе с регистрацией полного набора метеорологических параметров (осадки, давление, температура, облачность, ветер);
- анализ временных вариаций напряженности электрического поля в спокойных и возмущенных метеорологических условиях, а также в период повышенной солнечной и сейсмической активности;
- статистическая обработка аномальных вариаций напряженности электрического поля за длительный период наблюдений;
- анализ спектров мощности суточных вариаций напряженности электрического поля в широком диапазоне периодов 0.5 – 48 ч, совпадающих с периодами внутренних гравитационных волн, тепловых приливных волн и волн планетарного масштаба в атмосфере.

Предмет и методы исследования

Для решения поставленных в работе задач использованы:

- результаты регулярных наблюдений вариаций напряженности электрического поля специальными приемными устройствами на базе автоматизированного комплекса аппаратуры в обс. «Паратунка».

- статистические методы оценки характеристик аномальных временных вариаций напряженности электрического поля с одновременным контролем выше перечисленных метеорологических параметров, существенно влияющих на динамические характеристики электрического поля;

- цифровые методы спектрального анализа суточных вариаций напряженности поля.

Предметом исследования является градиент потенциала электрического поля в приземной атмосфере, который определяет напряженность вертикальной компоненты электрического поля, далее обозначаемой в тексте и на рисунках E_z . Методы исследования включают выделение процессов, формирующих суточный ход E_z в условиях «хорошей погоды». Далее устанавливаются геофизические факторы, которые вызывают аномалии в электрических характеристиках приземной атмосферы на среднеширотной обсерватории. После этого проводится анализ, как сейсмические и солнечные события изменяют спектральные характеристики электрического поля в приземной атмосфере.

Достоверность полученных в диссертации результатов определялась следующим:

- устойчивостью работы приемно-регистрирующей аппаратуры;
- выбором эффективных алгоритмов сбора, первичной и последующей обработки экспериментальных данных;
- набором достаточно большого объема данных;
- соответствием с результатами других исследователей, а также внутренней согласованностью результатов.

Научная новизна работы:

- в спектрах мощности суточных вариаций напряженности электрического поля выделена полоса собственных колебаний атмосферы: $T=0.5 - 3$ ч, которая соответствуют модам внутренних гравитационных волн. Обнаружено, что в период подготовки землетрясения с аномалией в суточном ходе электрического поля интенсивность спектров в полосе периодов $T=0.5 - 3$ ч на порядок по величине и более возростала по сравнению со спектрами в спокойных метеорологических условиях, но была ниже на порядок по величине при наличии осадков;
- впервые экспериментально показана связь максимума суточного хода электрического поля с разностью температур воздуха, измеренных на разных высотах;
- впервые описан возможный индукционный эффект влияния магнитной бури на электрическое состояние приземного воздуха на среднеширотной обсерватории в условиях «хорошей погоды»;
- впервые описан эффект одновременного отклика акустической эмиссии в приповерхностных породах земли и аэроэлектрического поля от воздействия электрического грозового разряда;

Положения, выносимые на защиту

1. Наиболее вероятные значения напряженности электрического поля, зарегистрированные на Камчатке при бухтообразных понижениях, составляют - (0... -300) В/м, а длительности этих аномалий - (40-60) мин с дополнительным максимумом 160 мин. Показано, что в 36% случаев аномалии сопровождаются землетрясениями через 1-24 ч. Не обнаружено зависимостей этих величин от класса землетрясения и от расстояния до эпицентра.

2. Диапазон наиболее вероятных значений напряженности электрического поля атмосферных шумов, наложенных на суточные вариации, в

нормальных метеорологических условиях составляет ± 20 В/м. Аномальные значения напряженности поля в период перед землетрясениями в отсутствие атмосферных осадков достигают величины ± 200 В/м, а при осадках - ± 1000 В/м.

3. Определяющим фактором суточного хода напряженности электрического поля в приземном слое воздуха на равнинной среднеширотной местности в условиях хорошей погоды, является утренний конвективный генератор.

4. Во время и в период подготовки землетрясений происходит усиление колебаний напряженности вертикального электрического поля в полосе периодов внутренних гравитационных волн.

5. Во время магнитных бурь в электрических характеристиках приземной атмосферы происходит усиление волн планетарного масштаба.

Научная и практическая значимость

Полученные в работе результаты по динамике электрического поля в приземной атмосфере Камчатки как во временной, так и в частотной области имеют научное и прикладное значение при построении теоретических моделей взаимодействия литосфера – атмосфера – ионосфера, а именно передача энергии сейсмических событий происходит через электрический канал связи, который включает в себя и внутренние гравитационные волны. Используемые методы исследований спектральных вариаций электрического поля могут в дальнейшем применяться в качестве одного из средств исследования динамических процессов в приземной атмосфере Земли.

Опыт исследований воздействия грозных разрядов на литосферу позволяют усовершенствовать диагностику состояния приповерхностных пород с помощью естественного источника. Результаты оценки вероятности прогноза землетрясений по аномалиям электрического поля могут быть приняты во внимание при разработке системы прогнозов в комплексе с дополнительными геофизическими параметрами.

Апробация работы

Основные результаты работы, составляющие содержание диссертации, докладывались на секциях Ученых советов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт космических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии наук, Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова Российской Академии наук, на международных и российских конференциях, опубликованы в Трудах этих конференций:

1. Солнечно-земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений (Петропавловск-Камчатский, 1998, 2001, 2004, 2007, 2010, 2013, 2017 гг.);
2. Метрологические основы магнитных наблюдений Сибири и Дальнего Востока (Петропавловск-Камчатский, 2003 г.);
3. 23 General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (Sapporo, Japan, 2003 г.);
4. XXIV General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (Perugia, Italy, 2007 г.);
5. Пятая Российская конференция по атмосферному электричеству (Владимир, 2003 г.);
6. VI Российская конференция по атмосферному электричеству (Нижний Новгород, 2007 г.);
7. VII Всероссийская конференция по атмосферному электричеству (Санкт-Петербург, 2012 г.);
8. Всероссийская конференция «Глобальная электрическая цепь» (Ярославль, 2013 г.);
9. Глобальная электрическая цепь. Третья Всероссийская конференция (Борок, 2017 г.);

10.XIV International Conference on Atmospheric Electricity (Rio de Janeiro, Brazil, 2011 г.);

11.XV International Conference on Atmospheric Electricity (Norman, USA, 2014г.);

12.Intern. Conf. Problems of Geocosmos (St.Petersburg, 2002 г.);

13.Всероссийская научная конференция, посвященная 10-летию Российского фонда фундаментальных исследований. «Геофизика на рубеже XX и XXI веков» (Москва, 2002 г.);

14.36th COSPAR Scientific Assembly (Beijing, China, 2006 г.);

15.Международная научная школа COSPAR Capacity Building Workshop (с. Паратунка, 2016 г.);

16.10th International Seminar «Low-frequency wave processes in space plasma» (Zvenigorod, 2007 г.);

17.Inter.Conf. «Atmosphere, ionosphere, safety» (AIS-2008) (Kaliningrad, 2008);

18.International Conference «Electronic Geophysical Year: State of the Art and Results» (Pereslavl-Zalessky, 2009 г.);

19.Международная конференция, посвященная памяти академика А.М. Обухова «Турбулентность, динамика атмосферы и климата» (Москва, 2013 г.);

20.International CAWSES-II Symposium (Nagoya, Japan, 2013 г.);

21.3rd AOSWA Workshop (Fukuoka, Japan, 2015 г.);

22.4th AOSWA Workshop (Jeju, Republic of Korea, 2016 г.).

Участие в проектах в качестве основного исполнителя:

Программы фундаментальных исследований РАН

№ 13 «Изменения окружающей среды и климата: природные катастрофы».

Проект «Исследование природы краткосрочных предвестников аномалий

геофизических полей перед землетрясениями Камчатки» (04-1-02-008, 05-1-0-02-051)

№ 30 «Солнечная активность и физические процессы в системе Солнце-Земля». Проект «Исследование атмосферных процессов в условиях солнечной активности» (Государственный контракт № 10104-71 / П-30 / 041-404 / 300605-116 от 30.06.2005)

№ 16 «Изменение окружающей среды и климата: природные катастрофы». Проект «Исследование особенностей взаимодействия электрического и магнитного полей атмосферы и геоакустической эмиссии поверхностных горных пород на заключительной стадии подготовки землетрясений Камчатки» (06-I- 0-00-070)

№ 16 «Изменение окружающей среды и климата: природные катастрофы». Проект «Комплексные исследования геосферных процессов в условиях изменчивости солнечной, циклонической и сейсмической активности» (Государственный контракт 10104-34 / П-16 / 041-404 / 310506-014 от 31.05.2006).

Работа, выполненная по теме, была поддержана грантами РФФИ №№ 00-05-65020; 00-05-79047; 00-05-65380; 04-05-65100.

Личный вклад автора состоит:

- в организации и непосредственном участии во всех натурных экспериментальных исследованиях;
- в анализе, обобщении и теоретическом обосновании полученных экспериментальных данных;
- в подготовке самостоятельно и совместно с соавторами публикаций по работе;
- выполнена обширная работа по автоматизации широкого комплекса наблюдаемых геофизических параметров, разработаны алгоритмы и программы сбора и первичной обработки сигналов для создания банка данных.

Публикации по работе

По теме диссертации, кроме тезисов и статей в трудах конференций, опубликовано **28** статей в рецензируемых отечественных и зарубежном журналах, из которых 26 в реферируемых журналах списка ВАК (проиндексированных в Web of Science и SCOPUS) и 2 статьи в журналах, индексируемых РИНЦ.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы, содержащего 194 наименований. Работа содержит 259 листов машинописного текста, 112 рисунков и 13 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее цель и задачи, указаны методы исследований, научная новизна и практическая значимость работы, определен личный вклад автора, а также сформулированы основные научные результаты, выносимые на защиту. Кратко изложены структура и содержание работы.

В **главе первой** описываются локальные факторы, влияющие на измерения электрического поля приземного слоя воздуха на среднеширотной обсерватории.

В *параграфе 1.1* показано, что суточная вариация электрического поля (Рисунок 1) на обсерватории «Паратунка» в условиях «хорошей погоды» отличается от унитарной вариации. Обосновывается необходимость учитывать метеорологические факторы, на больших временных масштабах климатическую обстановку. В сейсмически активном регионе необходимо учитывать возможные процессы подготовки землетрясений. Расположение обсерватории на средних широтах не исключало влияние космических факторов, воздействие космических лучей на ток проводимости земля-ионосфера. Исходя из этого более 20 лет назад автором с другими сотрудниками был организован специальный комплекс измерений, по возможности контролирующей эти факторы.

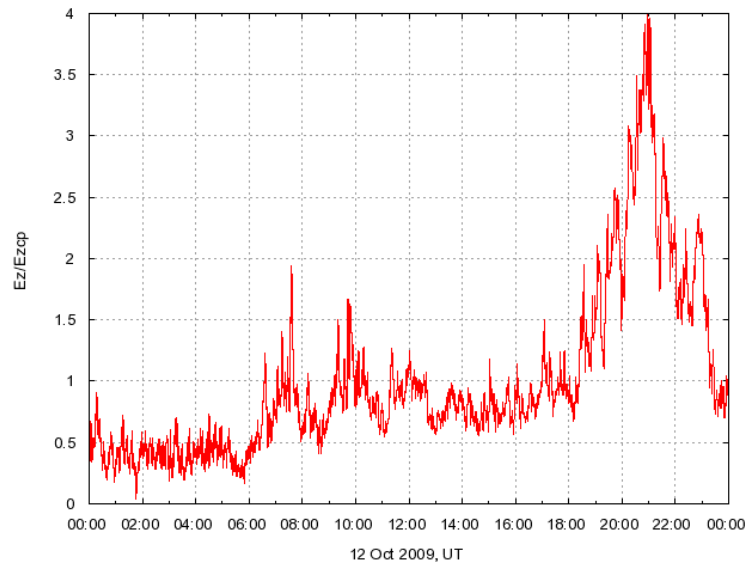


Рисунок 1 - Суточная вариация градиента потенциала электрического поля на обсерватории «Паратунка», деленная на среднесуточное значение.

Вводится обозначение E_z , под которым понимается вертикальная компонента градиента потенциала электрического поля.

В *параграфе 1.2* описываются климатические и погодные условия в районе обсерватории [Smirnov, 2017]. В этом регионе наблюдаются сильные сезонные колебания среднемесячных значений атмосферного давления (585 - 1005 гПа) с относительной устойчивостью в августе - октябре месяцах. В сезонном ходе среднемесячных значений температуры наблюдаются сильные колебания $\pm 20^{\circ}\text{C}$, с относительной стабильностью в августе - первой половине октября месяца. В сезонном ходе силы ветра наиболее неблагоприятные периоды приходятся на март - апрель и сентябрь - декабрь месяцы. Из-за специфического расположения обсерватории, окруженной грядками сопков, ветер не оказывает существенного влияния на вариации электрического поля. Грозы и град – довольно редкие явления на Камчатке. В силу этих климатических особенностей наиболее благоприятным периодом для исследования динамических характеристик электрического поля с целью выделения эффектов литосферной природы является период с августа по октябрь месяц.

В *параграфе 1.3* описываются виды сигналов в электрическом поле, которые дают различные типы осадков [Smirnov, 2017]. При поиске аномалий необходимо фильтровать такие сигналы как ложные.

Особенностью электрического состояния атмосферы на Камчатке является малое количество гроз. По официальным данным с 1937 по 1982 годы (45 лет) было зарегистрировано всего 22 грозы. В *параграфе 1.4* дано первое для региона количественное описание воздействия единичного грозового разряда на электрическое поле при отсутствии осадков и сплошной облачности [Smirnov, Marapulets, 2012]. Электрический разряд вызвал акустическую эмиссию приповерхностных пород. Было выявлено, что в результате разряда, который произошел на расстоянии 8 км, вызвало резкое падение величины градиента потенциала электрического поля в воздухе на высоте 3 м с 80 В/м до минус 21 В/м. Затем поле восстановило свой уровень до значения 70 В/м с характерным временем релаксации 17 с. Впервые на естественное импульсное электрическое воздействие молниевое разряда зарегистрирован одновременный отклик аэроэлектрического поля и акустической эмиссии в приповерхностных породах земли. Из семи спектральных диапазонах измерения акустической эмиссии сигнал проявился в диапазоне частот 6.5 - 11 кГц.

В *параграфе 1.5* описаны эффекты грозовой активности в спектрах мощности электрического поля [Эффекты грозовой активности ..., 2010]. Когда юг Камчатки накрывает циклон с грозовой активностью осадки в районе обсерватории приводят к знакопеременному сигналу большой амплитуды в регистрации электрического поля.

Представляло интерес оценить относительный вклад грозовых источников в спектры мощности квазистатического электрического поля в широкой полосе периодов от 5 мин до 3 ч. Для этой цели был выполнен спектральный анализ записей E_z – компоненты электрического поля в периоды: сентябрь 1999 г., август - октябрь 2002 г. Интервалы выбраны таким образом, чтобы в них попадали прохождения грозовых фронтов и происходили землетрясения с

магнитудой больше 4 на расстоянии 100 - 300 км. На Рисунке 2 приведены кривые спектральной плотности мощности в логарифмическом масштабе (далее для краткости, спектры мощности) в полосе периодов 5 мин - 3 ч. Для оценки спектральной плотности мощности использован метод модифицированных периодограмм.

Анализ кривых показывает следующее: в полосе периодов 0.5 – 3 ч характер спектров во время гроз и в предвестниках землетрясений совпадает между собой. На кривых выделены максимумы интенсивности на периодах порядка 2, 1 и 0.7 ч с последовательно уменьшающейся интенсивностью. Но при этом интенсивность спектра во время грозы на порядок по величине превышает спектр 18 сентября. Оба спектра на 2-3 порядка по величине превышают фоновый уровень. В полосе периодов 5 – 30 мин оба спектра имеют серию максимумов на периодах 10 – 15 и 20 – 25 мин, но различающихся между собой на порядок по величине интенсивности.

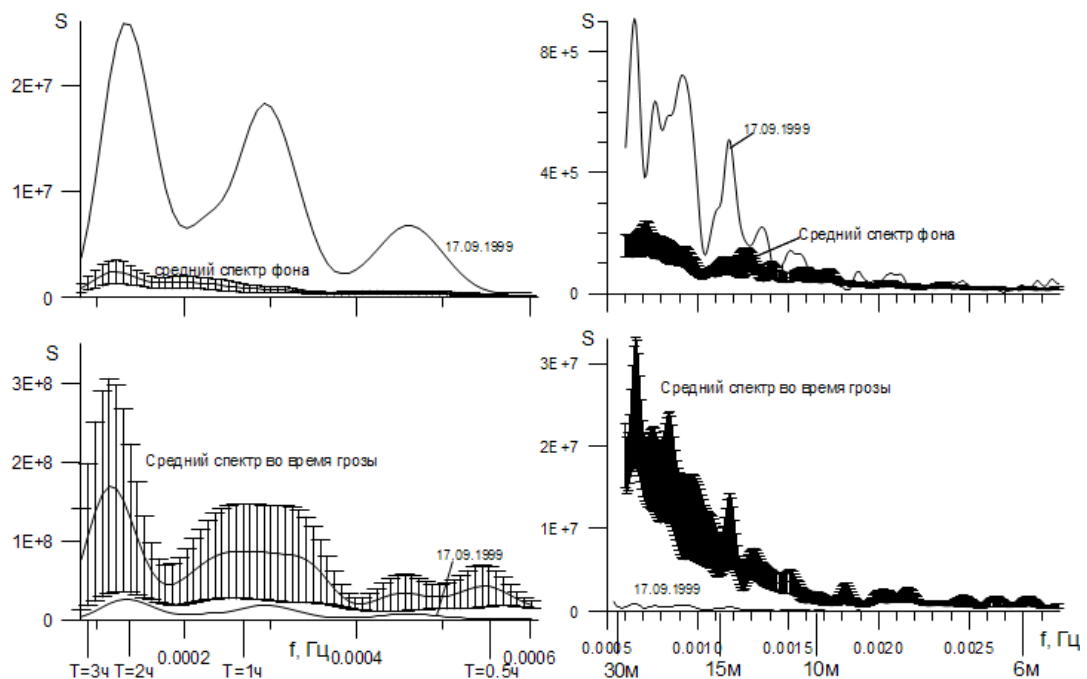


Рисунок 2 - Средний фоновый спектр мощности поля со среднеквадратичными отклонениями в полосах периодов 0.5 – 3 ч и 5 – 30 мин и спектральная кривая накануне землетрясений 17 сентября в (верхний фрагмент рисунка). Внизу средний спектр мощности поля во время гроз.

Таким образом анализ спектров квазистатического электрического поля в приземной атмосфере Камчатки показал следующее:

1. В условиях хорошей погоды (в отсутствие гроз и землетрясений) в фоновом спектре вариаций напряженности поля в полосе периодов 5 мин – 3 ч присутствует широкий спектр колебаний с максимумами на периодах $T \sim 1.8$ и 1 ч, а также 40, 30, 15, 10 - 13 мин. При этом интенсивность спектральной плотности мощности в полосе периодов 0.5 - 3 ч на два и более порядков по величине превышает интенсивность максимумов в полосе периодов 5 – 30 мин.

2. Накануне землетрясений при наличии аномалий в суточных вариациях E_z – компоненты поля наблюдается тенденция усиления фонового спектра на выделенных в нем максимумах. При этом в обеих полосах периодов интенсивность максимумов для землетрясений с магнитудой более шести возрастает по величине на один – полтора порядка. При меньших значениях магнитуд спектры мощности электрического поля лежат в пределах среднеквадратических отклонений фоновых спектров.

3. Характер изменения спектральной плотности мощности электрического поля в дни с грозами проявляет большую изменчивость по сравнению со спектрами предвестников землетрясений как по положению максимумов, так и по их интенсивности. В некоторых случаях они повторяют поведение спектров накануне землетрясений, но интенсивность максимумов в полосе периодов 0.5 - 3 ч на один - полтора порядка по величине превышает соответствующие максимумы накануне землетрясений, и на два порядка и более - в полосе периодов 5-30 мин.

В параграфе 1.6 исследуются атмосферные шумы, наложенные на суточные вариации напряженности электрического поля [Особенности атмосферных ..., 2005]. В спектрах мощности суточных вариаций электрического поля E_z были выделены компоненты с периодами, совпадающими с регулярными тепловыми приливными волнами в атмосфере: $T = 24, 16, 12, 8, 4$ ч., а также с колебаниями

внутренних гравитационных волн с периодами менее 4 ч. Именно интенсивность этих спектральных составляющих существенно изменяется в период подготовки землетрясений. Показано, что накануне землетрясения их интенсивность на порядок и более по величине возрастает по сравнению с фоновыми спектрами в нормальных метеорологических условиях. Этот результат послужил основанием более детального анализа особенностей именно этой части спектра мощности. Во временной форме эти колебания представляют собой случайный шум, наложенный на суточные вариации напряженности квазистатического электрического поля. Были построены распределения величин экстремальных всплесков и значений $\sqrt{E^2}$ и получены следующие результаты. Экстремальные фоновые значения этих колебаний в нормальных метеорологических условиях составляют наиболее вероятные величины в пределах ± 20 В/м. При аномалии напряженности поля, сопровождаемой землетрясениями в отсутствии осадков, эти значения достигают величины ± 200 В/м, а при осадках - ± 1000 В/м.

В *параграфе 1.7* представлены сезонный и вековой тренд электрического поля [Smirnov, 2017]. Детальный анализ многолетнего тренда на обс. «Паратунка» (Рисунок 3) показал, что в период с января 1997 г. по февраль 2000 г. наблюдался положительный тренд с угловым коэффициентом +1.3, а с марта 2000 г. по 2009 г. - отрицательный с угловым коэффициентом -0.3. Такой «изломанный» тренд аэроэлектрического поля может быть обусловлен изменением сейсмического режима в активном геодинамическом регионе наблюдений. Такие сейсмические события, прежде всего, могли повлиять на режим эманаций радиоактивных газов, а, следовательно, на процесс ионизации приземного слоя атмосферы.

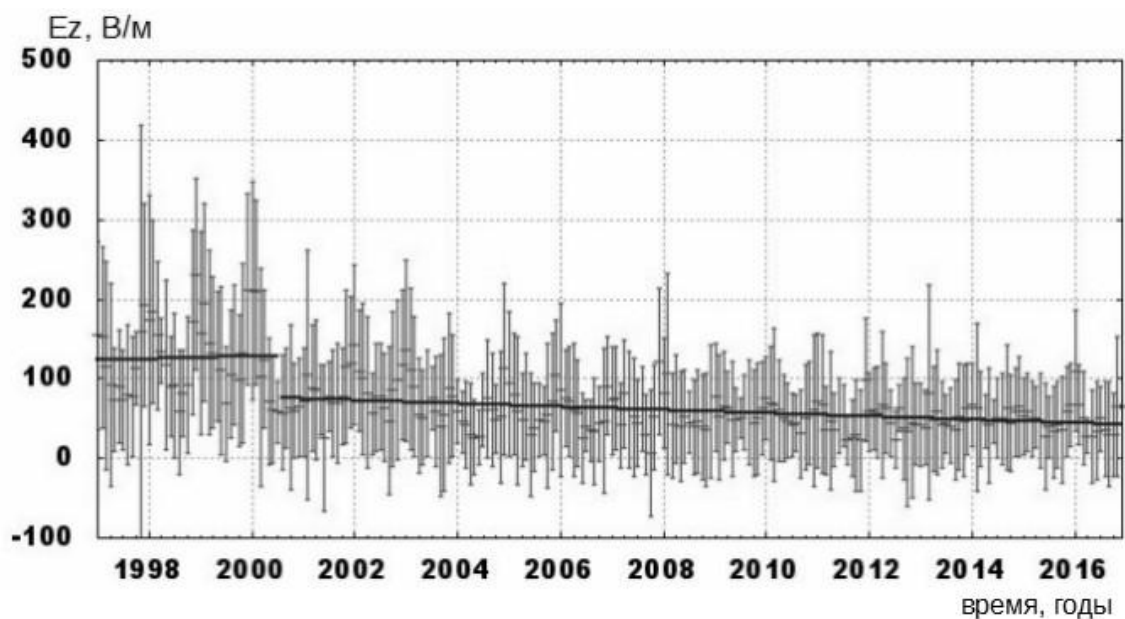


Рисунок 3 - Среднемесячные значения, дисперсия и годовой тренд электрического поля на обсерватории «Паратунка».

Сезонный режим эманации радона определяется величиной диффузии газа через почву. А на диффузию влияет глубина промерзания почвы в зимний период. О глубине и длительности промерзания почвы можно судить по высоте снежного покрова. Было построено распределение среднемесячных значений напряженности поля и уровня снега в окрестности обсерватории «Паратунка». Снег в районе наблюдений лежит около 7 месяцев (с ноября по конец мая).

Вторая глава посвящена аппаратному и программному обеспечению измерений.

В *параграфе 2.1* дается описание основным инструментам измерений, приводятся подробные характеристики датчикам «Поле-2» и «Электропроводность-2». Описываются принципы действия этих приборов. Методика проведения измерений соответствует руководящему документу Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова.

В *параграфе 2.2* описывается специальный программно-аппаратный комплекс наблюдений. Дано описание задач, которые должен был решить комплекс, перечислены условия, которым должны удовлетворять программы и

форматы данных. Для многофункционального измерительного комплекса был разработан ряд следующих программ: оповещение в случае сбоев работы каждого измерительного канала; контроль корректности измерений для каждого канала; выборка данных для каждого вида измерений; визуальное представление данных; коррекция измеренных данных (линейная регрессия); коррекция временных сдвигов.

К 2007 году была построена сеть Wi-Fi, которая представлена на Рисунке 4. Все экспедиционные пункты ИКИР имеют постоянную связь с Интернет.

Ежедневно на сайте института представляются графики: суточного хода электрического поля; суточного хода электропроводности; плотности тока проводимости; униполярности ионов; показаний микробарографа; спектра мощности электрического поля за три предыдущих дня.

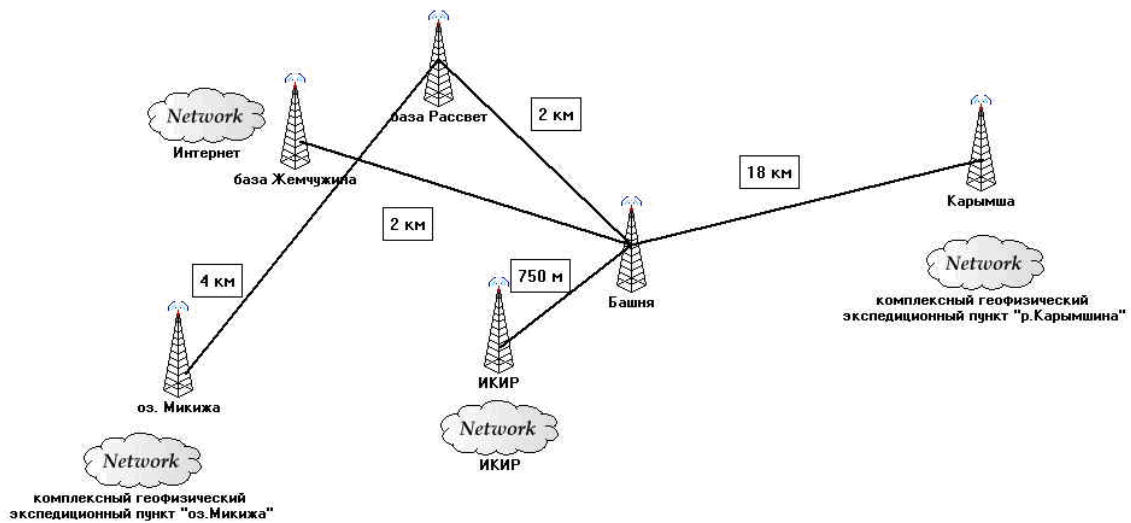


Рисунок 4 - Сеть WiFi связи экспедиционных пунктов с административным центром ИКИР в 2007 г.

С помощью этого комплекса был получен банк данных за период начиная с 1997 г. по настоящее время [Мандрикова и др., 2008; Мандрикова и др., 2012].

В **третьей** главе описываются положительные и отрицательные аномалии электрического поля.

В параграфе 3.1 представлен возможный механизм положительных аномалий. Обсерватория располагается в регионе, где расположены 29 действующих вулканов. По литературе известно, что шлейфы вулканических выбросов могут быть как электрически заряженными, так и электрически нейтральными. Механизм положительной аномалии от электрически нейтрального шлейфа можно представить следующим образом.

В условиях хорошей погоды через атмосферу течет ток проводимости $j = \lambda E$, где λ — электропроводность воздуха, E — напряжённость электрического поля. Отсюда связь напряженности поля и электропроводности представляется как:

$$E \sim 1/\lambda . \quad (1)$$

Электропроводность связана с подвижностью (u) и концентрацией лёгких ионов (n) формулой:

$$\lambda = e(n_+ u_+ + n_- u_-) . \quad (2)$$

Ионизационно-рекомбинационное уравнение для легких ионов имеет вид:

$$dn_+ / dt = I - \alpha n_+ n_- - \beta n_+ N_- - \gamma n_+ N_0 , \quad (3)$$

где N_- — концентрация отрицательно заряженных тяжелых ионов, N_0 — концентрация нейтральных частиц, α, β, γ — соответствующие коэффициенты рекомбинации, I — интенсивность ионизации. Аналогичные уравнения могут быть написаны для n_- , N_- , N_+ , и N_0 . В стационарном состоянии и в неподвижном воздухе $dn_+/dt = 0$. Таким образом:

$$n_+ = I / (\alpha n_- - \beta N_- - \gamma N_0) . \quad (4)$$

Можно учесть, что $\beta N_- + \gamma N_0 \gg \alpha n_-$ и $\beta \approx \gamma$. Обозначим $N_- + N_0 = N$. Исходя из того, что приблизительно $n_+ = n_-$ и $u_+ = u_-$ зависимость электропроводности от концентрации тяжёлых примесей оценивается как:

$$\lambda \sim 1/N . \quad (5)$$

Возможная реализация такого механизма рассмотрена на примере аномалии 6 декабря 2006 г. и 3 декабря 2007 г. Развитие положительной аномалии исходя из формул (1) и (5) можно представить так: в воздухе появляются тяжелые

примеси, это приводит к уменьшению электропроводности, а уменьшение электропроводности приводит к увеличению напряженности поля.

В параграфе 3.2 детально исследованы отрицательные аномалии в суточном ходе напряженности электрического поля только в спокойных метеорологических условиях [Смирнов, 2005; Smirnov, 2008]. В период с 1997 по 2002 г. было обнаружено 103 случая таких аномалий. Были построены гистограммы распределения аномалий напряженности поля по длительности бухты (Рисунок 5а) и по величине понижения напряженности в бухте (Рисунок 5б). В качестве последней принималось минимальное значение E_z при интервале усреднения выборки 10 мин. Длительность аномалии определялась по уровню 9/10 от минимума бухты. Из гистограммы, построенной с шагом 20 мин (Рисунок 5а), видно, что наиболее вероятные длительности аномалии составляют величину 40-60 мин с дополнительным максимумом ~160 мин. На Рисунке 5б, построенного с шагом 100 В/м, показано, что величины понижения E_z сосредоточены на значениях порядка минус (100-300) В/м. Кроме того, были построены гистограммы распределения аномалий E_z по импульсу (Рисунок 5в) и по энергии (Рисунок 5г). За импульс бухты принималось значение интеграла: $P = \int E_z(t) dt$ в пределах длительности аномалии, а за энергию – значение интеграла: $E = \int E_z^2(t) dt$ в тех же пределах длительности. Из рисунка видно, что аномалии сосредоточены в области малых значений этих параметров. Была исследована связь этих аномалий поля с землетрясениями. За событие принималась ситуация, когда в интервале времени 24ч после аномалии происходило одно или несколько землетрясений класса К от 11 до 15 ($M \sim 4,7 - 6,7$) с эпицентрами в области с координатами $45-55^{\circ}$ N, $155-165^{\circ}$ E, включающей пункт регистрации E_z . В 37 (36%) случаях после аномалии через 1-24 ч происходили землетрясения. Не обнаружена зависимость длительности бухты и величины понижения напряженности поля ни от класса землетрясения, ни от расстояния до его эпицентра.

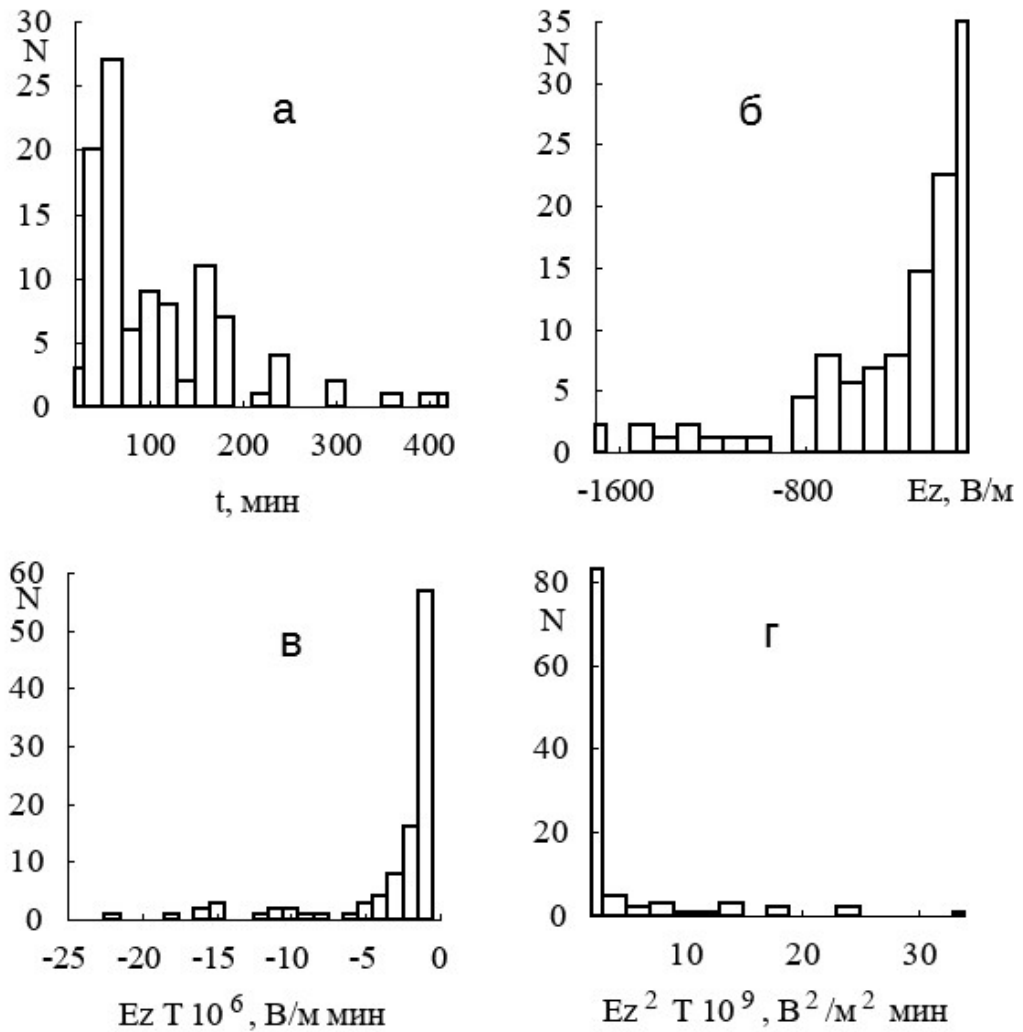


Рисунок 5 - Гистограммы распределения аномалий напряженности электрического поля по длительности бухты (а), по величине понижений напряженности поля (б), по импульсу (в), по энергии (г).

Если рассматривать взаимно наблюдаемые аномалии в электрическом поле приземного воздуха и аномалии в ионосфере, то они подчиняются формуле Сидорина:

$$\lg(\Delta T \times R)_{E_s} = 0.85M - 1.23, \quad (6)$$

$$\lg(\Delta T \times R)_{E_z} = 0.9M - 1.5, \quad (7)$$

где ΔT - время от начала аномалии до землетрясения (сут.), R - расстояние от точки наблюдения до эпицентра (км), M - магнитуда. При этом под аномалией в ионосфере понимается аномально высокий спорадический слой E_s [Экспериментальное ..., 2009; Закономерности ..., 2013; Аномалии в ионосфере ..., 2017].

В **четвертой главе** представлены эффекты восхода Солнца в вариациях электрического поля.

В *параграфе 4.1* рассматриваются эффекты восхода Солнца во временной области [Смирнов, 2013; Смирнов, 2016]. Для выделения различных эффектов в суточных вариациях элементов атмосферного электричества, наблюдения, как правило, проводят в условиях так называемой «хорошей погоды». Каземир (1956) предложил ввести в глобальную электрическую цепь так называемый конвективный генератор, который действует локально в обменном слое атмосферы. Тогда плотность электрического тока при отсутствии грозových источников записывается следующим образом:

$$j = \lambda E + \rho V + D_t \nabla \rho, \quad (8)$$

где λ - электропроводность атмосферы, основной вклад в нее вносят легкие ионы; ρ - плотность электрических зарядов; V - гидродинамическая скорость движения среды; D_t - коэффициент турбулентной диффузии. В квазистационарном случае плотность тока определяется первым слагаемым и приписывается действию грозových генераторов. После восхода Солнца в результате турбулентного теплообмена вступают в действие турбулентные процессы перемешивания ($D_t \nabla \rho$) и механический перенос вверх (ρV) конвективным потоком воздуха положительного объемного заряда, накопленного ночью вблизи поверхности земли. Это, в свою очередь, приводит к увеличению E_z вблизи поверхности земли и усилению электрического тока проводимости.

Была сделана оценка, насколько значимо первое слагаемое формулы (8), по сравнению в другими слагаемыми. Коэффициент корреляции эмпирической кривой за период 28-30.01.2016 г. и кривой, построенной уравнением $E = 7.07 \times 10^2 / \lambda^{0.857}$, составил $\rho = 0.795$ [Аномалии в ионосфере ..., 2017].

Оцененные параметры эффекта: времена его начала и достижения максимума величины напряженности относительно времени восхода, а также

отношение максимума к величине до восхода и длительность эффекта, согласуются с ранее опубликованными в литературе данными.

Для оценки действия конвективного генератора, наиболее ярко проявляющегося на восходе Солнца, в качестве меры интенсивности конвективного потока воздуха была выбрана разность температур на фиксированных высотах 3 и 25 м. Пример сопоставления суточных кривых E_z с разностью температур показан на Рисунке 6. Наиболее близко связь вариаций E_z с разностью температур проявляется на восходе Солнца с коэффициентом корреляции $\sim 0.6 \pm 0.1$.

Предложенный экспериментальный метод измерения разности температур на различных высотах атмосферы в качестве меры конвективных процессов оказался очень эффективным в изучении суточных вариаций параметров атмосферного электричества. Полученные результаты подтверждают физический механизм развития эффекта восхода Солнца. Согласно этому механизму, аномальные вариации напряженности электрического поля вблизи восхода Солнца обусловлены процессами турбулентности и конвекции в приземной атмосфере при изменении температуры атмосферы.

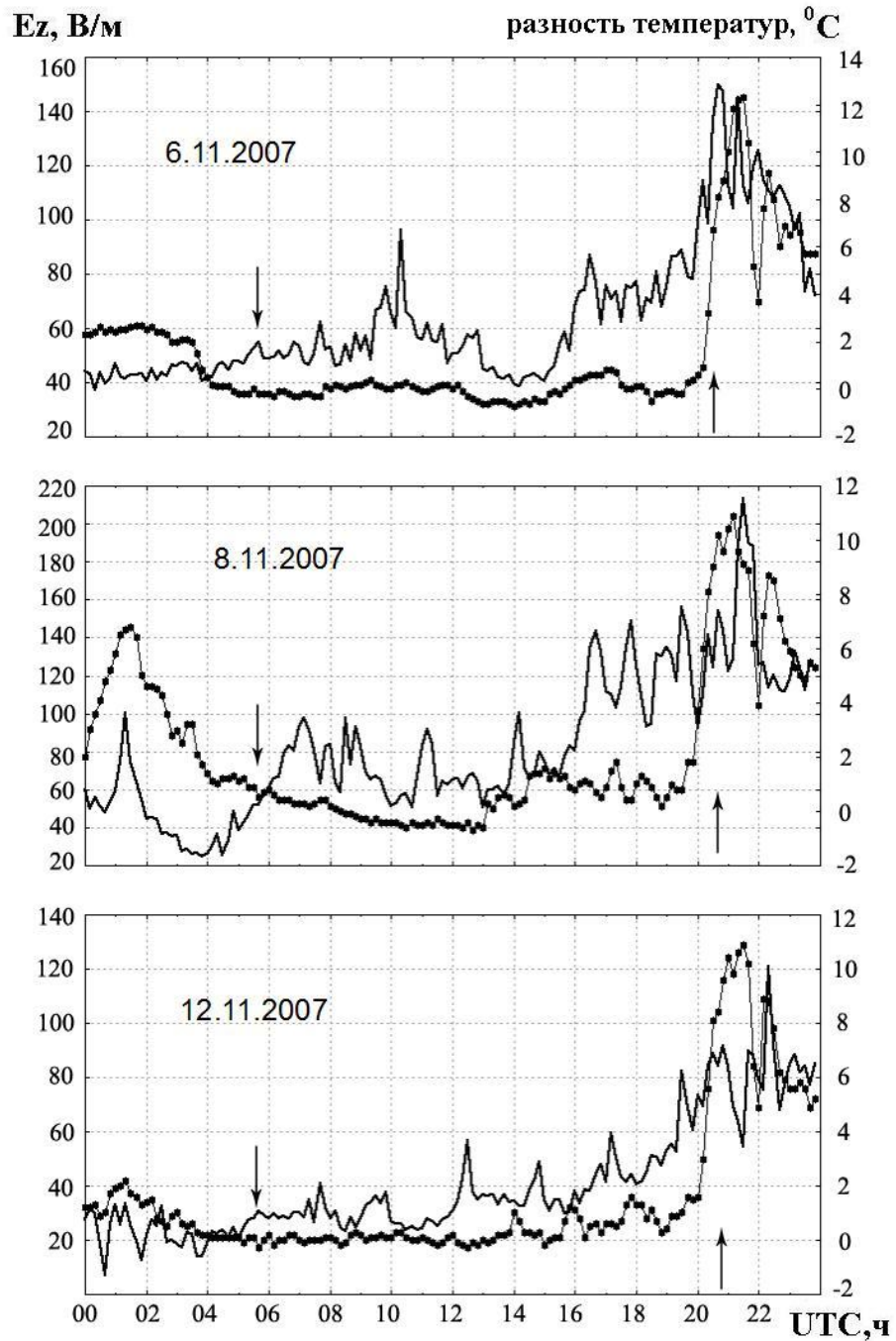


Рисунок 6 - Суточные вариации градиента потенциала электрического поля (сплошная линия, левая шкала,) и разности температур на высотах 25 и 3 м (точки, правая шкала).

Механизм конвективного генератора атмосферного электричества известен давно, и в последние годы другими авторами были выполнены подробные исследования этого вопроса. В данной работе рассматривались вклад различных механизмов в суточный ход электрического поля в условиях «хорошей погоды». Если ранжировать эти механизмы по степени влияния, то можно представить

следующий порядок в формуле $\Delta E = \Delta E_p + \Delta E_\lambda + \Delta E_{\text{unit}}$. Главный максимум суточного хода обусловлен конвективными и турбулентными процессами в приземной атмосфере ΔE_p . Вторичный вечерний максимум обусловлен суточным ходом электропроводности воздуха ΔE_λ . И уже на третьем месте стоит унитарная вариация ΔE_{unit} .

В *параграфе 4.2* выполнен детальный спектральный анализ временных вариаций напряженности электрического поля и вариаций геомагнитного поля с целью определения природы их короткопериодных колебаний, наблюдаемых одновременно в период восхода Солнца [Михайлова и др., 2013; Смирнов, 2016]. Использованы записи электрического и геомагнитного полей в сентябре 1999 г. в obs. «Паратунка» ИКИР ДВО РАН. Данные измерений электрического поля выбирались при выполнении условий «хорошей погоды», а также при слабой геомагнитной ($K_p \leq 4$) и сейсмической ($M < 4$) активностях. Для поиска связи между волновыми процессами на различных высотах атмосферы и определения местоположения их источника оценены авто- и взаимные спектры мощности также метод модифицированных периодограмм.

На восходе Солнца в спектрах мощности напряженности квазистатического электрического поля в приземной атмосфере на Камчатке (obs. «Паратунка») обнаружено усиление колебаний в полосе периодов $T < 1$ ч, энергия которых недостаточна для прохождения на высоты динамо-области ионосферы.

Одним из возможных источников этих колебаний могут быть вихревые движения зарождающихся конвективных ячеек в пограничном слое атмосферы, переносящие объемные заряды вверх при увеличении температуры воздуха на восходе Солнца. Но возможны и другие источники этих колебаний.

В **пятой главе** более подробно описываются эффекты сейсмической активности в вариациях электрического поля.

В *параграфе 5.1* представлены особенности динамики электрического поля в период подготовки землетрясений [Вариации различных ..., 2002].

Анализ индивидуальных сильных землетрясений, произошедших на Камчатке, таких как 5 декабря 1997 г., 1 июня 1998 г., 8 марта 1999 г., 18 сентября 1999 г., 8 октября 2001 г., 16 октября 2002 г., показал что возникновение аномалий напряженности E_z -компоненты поля за сутки до главного толчка землетрясений как в одиночных толчках, так и при их рое; в бухте аномалии поля при нормальных метеорологических условиях наблюдалось усиление интенсивности шумов в полосе периодов 0.5 – 3 ч. и соответствующее усиление спектров мощности шумов по сравнению с фоновыми уровнями; при осадках, так же, как и в случае аномалий, сопровождаемых землетрясениями, происходит усиление интенсивности шумов, которые «замазывают» эффекты в электрическом поле литосферной природы [Электрические и электромагнитные ..., 2006].

В параграфе 5.2 приведены результаты анализа спектров мощности квазистатического электрического поля E_z [Вариации спектров ..., 2003; Power spectrum ..., 2004; Прохождение внутренних ..., 2008; Эффекты геомагнитных возмущений ..., 2009; Спектры мощности тепловых ..., 2009].

Рисунок 7 демонстрирует метод спектральной обработки суточных данных E_z на примере 29 сентября 1999 г. Верхняя кривая (1) – это суточный ход E_z с дискретностью $\Delta t = 1$ мин. Следующая вниз кривая (2) - суточный ход с исключенным из кривой 1 среднесуточным значением E_z . Эти значения дополнены нулями до 2048 точек, необходимых для использования алгоритма быстрого преобразования Фурье. Спектр мощности дополненного ряда значений E_z рассчитывается методом периодограмм с прямоугольным временным “окном” на частотах $f_k = k \cdot \Delta f$ с соответствующим шагом по частоте $\Delta f = 1/2048 \cdot \Delta t = 8.14 \cdot 10^{-6}$ Гц и периодами $T_k = 1/f_k$, где $k = 1, 2, \dots, 1024$ и показан на рисунке с цифрой 4 сплошной кривой и с левой осью ординат. В этом спектре преобладает гармоника с периодом $T = 12$ ч, а также присутствуют более слабые по интенсивности гармоники с периодами 1 – 5 ч. Для их выделения в спектре исключены периоды более 5 ч (штриховая линия с точками, правая ось ординат

на том же рисунке). Временная форма отфильтрованного ряда представлена кривой под цифрой 3. Для наглядности внизу рисунка (цифра 5) показаны отдельно спектры в зависимости от периода от 2 мин до 24 ч (слева), а также с $T < 5$ ч (справа), шкала абсцисс в часах.

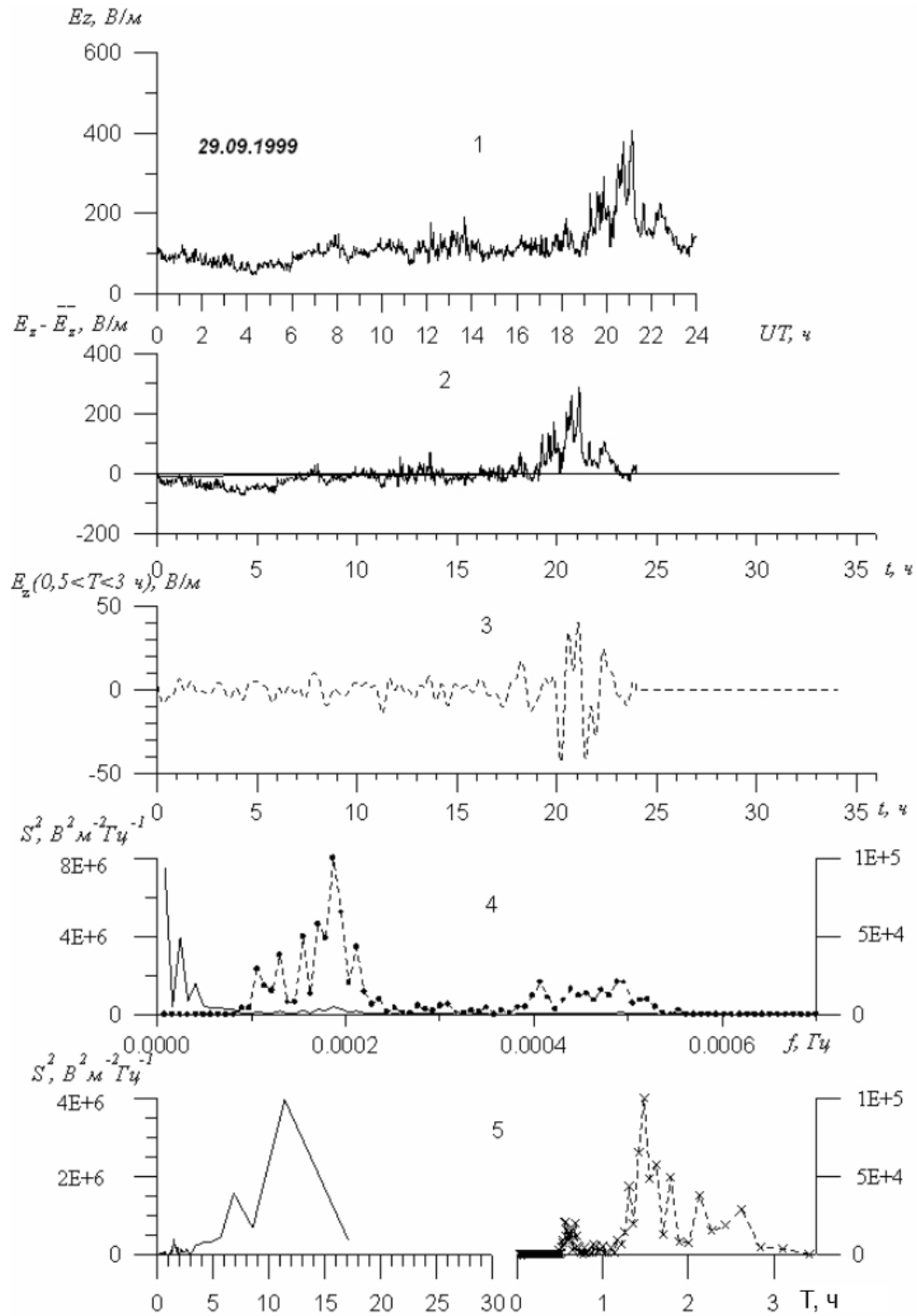


Рисунок 7 - Метод спектральной обработки суточных вариаций E_z .

Описанным методом был выполнен спектральный анализ суточных кривых Ez за сентябрь-октябрь 1999 г. Естественно, что вид спектров изменялся ото дня ко дню. Для получения статистически надежных спектров и выделения устойчивых максимумов было использовано осреднение данных по числу дней с характерными особенностями поведения Ez . Это дни без осадков и землетрясений, когда вариации спектров могут быть вызваны глобальными эффектами в земной коре данного региона и, следовательно, в приземной атмосфере. Локальные источники вариаций Ez и их спектров – это местные осадки и землетрясения.

Далее была проведена спектральная обработка атмосферных шумов в полосе периодов 0.5-3.0 ч за сентябрь для нормальных метеорологических условий, для дней с осадками и для 17 сентября (Рисунок 8). Анализ показал, что спектральная плотность атмосферного шума накануне землетрясения в полосе периодов 2-3 ч возросла на порядок, а на $T < 2$ ч - почти на 1.5 порядка по величине по сравнению с фоновым спектром. В дни с осадками спектральная плотность атмосферного шума во всей полосе периодов 0.5-3.0 ч на порядок по величине превышает интенсивность 17 сентября и на два порядка – фоновый уровень. Аналогичные значения наблюдались также и в другие периоды времени. Это диапазон периодов внутренних гравитационных волн, которые отчетливо проявляются в сейсмогравитационных колебаниях Земли и связанных с ними возмущениях давления в приземной атмосфере. Совпадение спектров мощности Ez с вариациями спектров сейсмогравитационных колебаний Земли позволяет утверждать, что вариации Ez имеют «поршневой» механизм сейсмической природы.

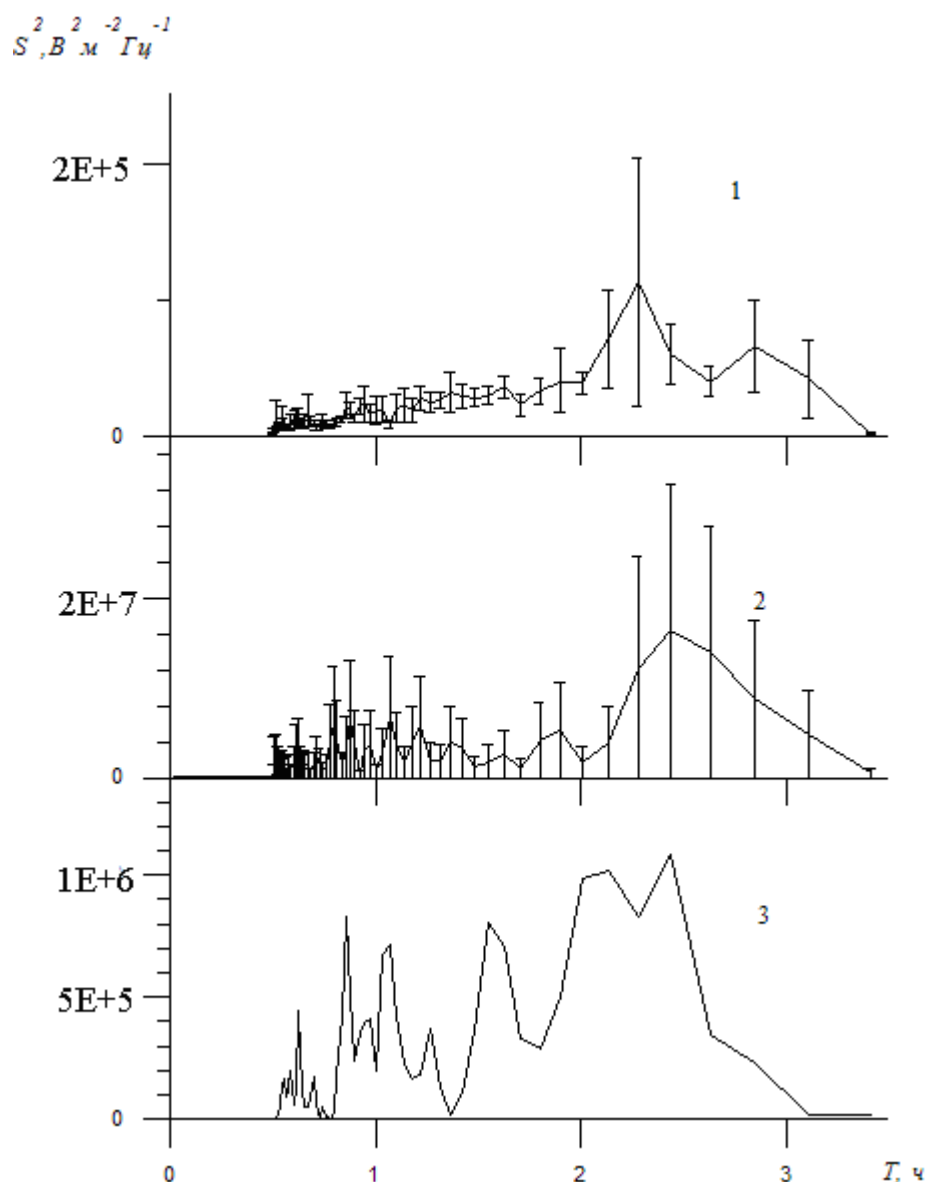


Рисунок 8 - Спектры атмосферных шумов в сентябре 1999: для нормальных метеорологических условий (1), дней с осадками (2) и 17 сентября (3).

В результате было получено, что спектральная плотность мощности в аномалии электрического поля, сопровождаемой землетрясением, на один-полтора порядка по величине превышает соответствующие фоновые значения, но на порядок ниже при наличии осадков.

В **шестой** главе представлены исследование эффектов геомагнитных возмущений в вариациях электрического поля.

В *параграфе 6.1* рассматриваются вариации электрических и метеорологических величин во время нескольких солнечных событий. [Смирнов и др., 2013; Смирнов и др., 2014; Анализ явлений ..., 2016]

В отличие от предшествующих работ, для исследования эффектов геомагнитных бурь в электрическом поле в приземной атмосфере на Камчатке (обс. «Паратунка») использован более широкий набор различных геофизических и метеорологических величин, наблюдаемых одновременно.

В результате исследования суточных вариаций электропроводности воздуха, напряженности электрического поля и метеорологических величин в приземной атмосфере на Камчатке во время солнечных событий было обнаружено увеличение электропроводности воздуха в течение двух суток накануне геомагнитной бури 29 - 30 октября 2003 г. в результате действия солнечных космических лучей и уменьшение ее во время Форбуш - понижения галактических космических лучей с соответствующим ростом напряженности электрического поля. Последовательность сильных солнечных вспышек, сопровождаемых усилением излучения в оптическом диапазоне электромагнитного излучения Солнца, сопровождалась аномальным повышением температуры и влажности атмосферы, что привело к возбуждению аномально мощных грозových процессов во время геомагнитной бури 8 ноября 2004.

3 апреля 2010 года на Солнце произошла рентгеновская вспышка класса В7.4, которая привела к выбросу коронального волокна. По интенсивности она была небольшой, но весьма продолжительной (более 7 часов). 5 апреля 2010 г. в 8:27 UT было зафиксировано начало магнитной бури с внезапным началом. На Рисунке 9 представлены усредненные по 1-мин данные измерений геофизических полей на обс. Паратунка. На Рисунке 9а представлен график Н-компоненты геомагнитного поля за 5 – 6 апреля. Кр-индекс этой бури равнялся 7. Предыдущая буря такого класса была 11 октября 2008 г., т.е. это была самая сильная буря за предыдущие полтора года.

В развитии бури 5 апреля 2010 можно проследить три эффекта [Смирнов, 2014; Smirnov, 2014]. Первый связан с уменьшением электропроводности воздуха (Рисунок 9в). Такое уменьшение могло быть обусловлено

«выключением» одного из ионизаторов молекул воздуха. Ионизаторами на этом уровне являются радон и галактические космические лучи. Сейсмическая обстановка в это время была спокойной, а значит не было значительных деформационных процессов, которые привели бы к резкому увеличению эманации радона. Значит, уменьшение электропроводности можно связать с уменьшением потока галактических космических лучей.

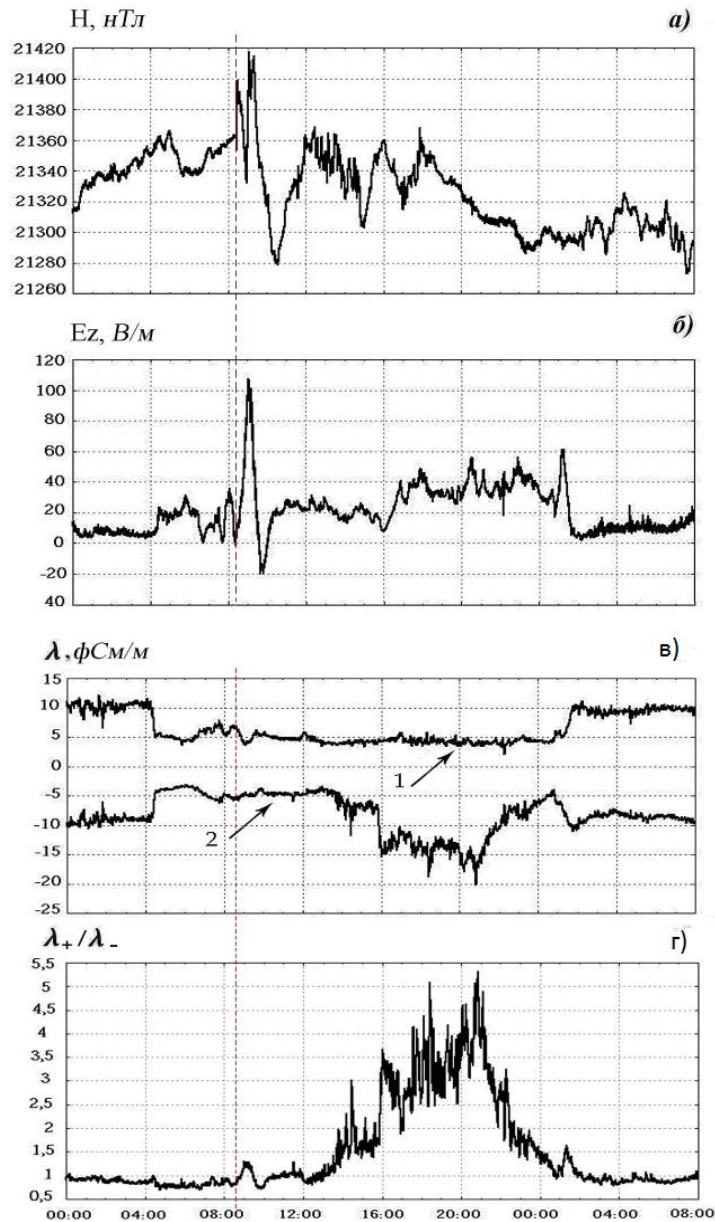


Рисунок 9 - Развитие магнитной бури (начало – пунктирная линия) 5-6 апреля 2010г. а) H-компонента магнитного поля, б) градиент потенциала электрического поля, в) электропроводность воздуха, вызванная отрицательными (1) и положительными ионами (2) г) коэффициент униполярности.

Второй эффект проявился в резких изменениях E_z на начальных стадиях бури (Рисунок 9б). По-видимому, он связан с индукционными явлениями электромагнитных процессов. Какие именно эти процессы, пока не ясно. Солнечные космические лучи могут способствовать дополнительной ионизации верхней атмосферы и, тем самым, увеличивают ток глобальной электрической цепи атмосферы. Это привело к изменению электрического поля у поверхности земли.

Третий эффект показал положительное бухтообразное изменение коэффициента униполярности (Рисунок 9г). Коэффициент униполярности $K = \lambda_+ / \lambda_-$ учитывает концентрацию ионов и их подвижность. Избыток положительных ионов мог быть вызван их очень сильным снегопадом в районе наблюдений. Но, поскольку осадкомер не зафиксировал каких-либо осадков, то, возможно, осадки в виде мелких снежинок были весьма слабые. Наблюдения в зимние месяцы на обс. Паратунка показывают что эффект снегопада вызывает положительную бухту коэффициента униполярности. Метеорологические процессы во время бури могли вызвать усиление этого эффекта.

В *параграфе 6.2* рассматриваются эффекты геомагнитных возмущений в спектрах мощности атмосферных волн [Михайлова и др., 2014]. При этом были рассмотрены одновременно наблюдаемые вариации локальных метеорологических величин (температура, давление, влажность атмосферы и скорость ветра), а также солнечных и геомагнитных параметров (поток рентгеновского излучения как показателя уровня солнечной активности, поток солнечных и галактических космических лучей, Dst – вариации, Kp – индексы, горизонтальная компонента геомагнитного поля). Для оценки спектральной плотности мощности использован классический метод периодограмм. Выбор длительности T временного «окна» ($T = 2$ сут) обусловлен продолжительностью периодов аномальных всплесков солнечной и соответственно, геомагнитной активностей.

На Рисунке 10 приведены спектры мощности в разных геофизических условиях: 21-22 октября - дни «хорошей погоды»; 22-23 октября - период повышенной солнечной активности с серией солнечных вспышек (X-лучи до 10^{-4} Вт/м²); 24-25 октября - период высокой ($K_p \sim 6$) геомагнитной активности с появлением сильной грозовой активности; 28-29 октября - сложный период, когда произошли две солнечные вспышки с одновременно высокой геомагнитной активностью ($K_p \sim 9$); 29-30 октября - одна, но достаточно мощная ($\sim 10^{-3}$ Вт/м²) солнечная вспышка с продолжительным периодом высокой геомагнитной активности и Форбуш-понижением космических лучей; 30-31 октября - период высокой геомагнитной активности с появлением кратковременной грозовой активности.

На Рисунке 10 представлены спектры мощности электрического поля (SE), электропроводности, вызванной отрицательными ионами ($S\lambda_-$), электропроводности, вызванной положительными ионами ($S\lambda_+$), магнитного поля (SH).

Рассмотрим спектры мощности параметров атмосферного электричества: электропроводности воздуха $S\lambda_-$ и $S\lambda_+$ и напряженности электрического поля SE. 21 - 22 октября в условиях «хорошей погоды» в спектре мощности SE преобладает широкий максимум интенсивности в полосе периодов $24 \text{ ч} < T < 48 \text{ ч}$ и более слабый максимум с $T \sim 12 \text{ ч}$. При солнечной активности 22 и 23 октября спектр изменился таким образом, что почти вся мощность оказалась сосредоточенной в полосе периодов 12 - 24 ч. Вместе с тем во время солнечных вспышек 28 - 29 октября спектр мощности обогатился компонентом в широком диапазоне периодов 12 - 48 ч. Во время магнитных бурь 24 - 25 и 29 - 30 октября в спектре преобладают компоненты с $T \sim 48 \text{ ч}$, по интенсивности превышающие на порядок по величине соответствующий компонент 21 - 22 октября. Сложный характер спектра SE 24 - 25 и 30 - 31 октября связан с влиянием грозовой активности, наблюдаемой в эти дни.

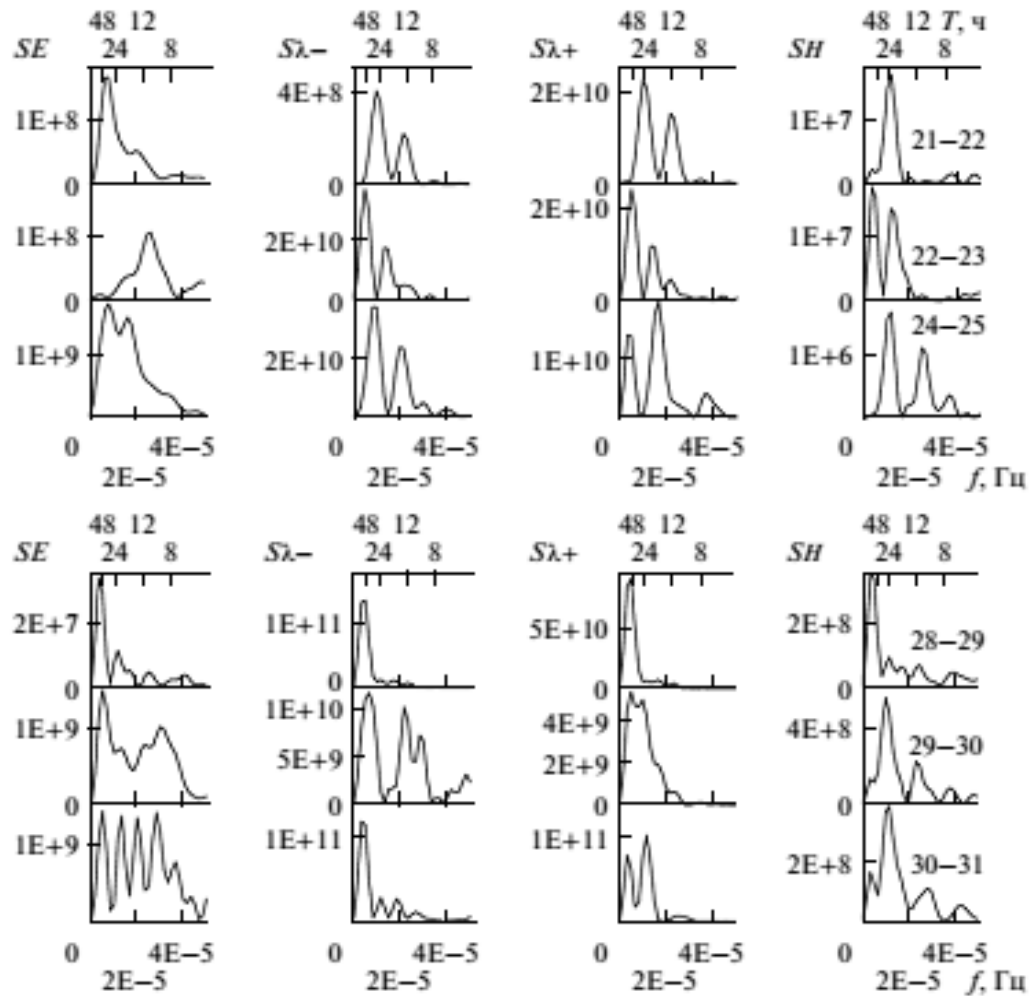


Рисунок 10 - Последовательность кривых спектральной плотности мощности в разных геофизических условиях (см. текст). На нижней оси абсцисс показана частота f , Гц, а на верхней - соответствующие периоды T .

Столь же сложный характер спектров мощности $S\lambda_-$ и $S\lambda_+$ наблюдался в эти дни. В условиях «хорошей погоды» 21 - 22 октября в спектре выделены два компонента 12 и 24 ч, совпадающие с периодами тепловых приливных волн. Но с усилением солнечной активности 22 - 23 октября наблюдалось усиление преобладающего компонента с $T \sim 48$ ч на фоне компонентов с $T \sim 24, 12, 8$ ч. Во время магнитной бури и соответствующим понижением потоков ГКЛ спектры мощности $S\lambda_-$ и $S\lambda_+$ расширяются в область более высоких периодов ($T \sim 48$ ч).

В спектрах мощности галактических космических лучей интенсивность компоненты с $T \sim 48$ ч 29 октября возросла на порядок по величине по сравнению с периодом 21-22 октября. Поскольку понижение интенсивности потоков ГКЛ связано с усилением солнечного ветра, блокирующего эти потоки,

можно предположить, что спектральный состав ГКЛ определяется периодичностью процессов на Солнце, которая также проявляется в спектральном составе рентгеновских лучей.

Заключение

В диссертационной работе, на основе разработанной автором автоматизированной системы сбора и первичной обработки экспериментальных данных обс. «Паратунка», функционирующей с 1996 г., получены следующие основные результаты:

1. Определены основные виды сигналов от метеорологических эффектов. Экспериментально подтверждены основные механизмы формирования суточного хода электрического поля в условиях «хорошей погоды». Если ранжировать вклад различных механизмов в суточный ход электрического поля в условиях «хорошей погоды», то получается следующее. Главный максимум обусловлен утренним конвективным генератором. Реже встречается вторичный, вечерний максимум, который обусловлен суточным ходом электропроводности. И уже на третьем месте стоит унитарная вариация.

2. Получены статистические характеристики отрицательных аномалий градиента потенциала электрического поля. Наиболее вероятные значения бухт понижения градиента потенциала электрического поля составляют величины минус (100 – 300) В/м, а длительности этих аномалий – (40 – 60) мин с дополнительным максимумом 160 мин. Показано, что в 36% случаев аномалии сопровождаются землетрясениями через 1–24 ч. Не обнаружено зависимостей этих величин от класса землетрясения и от расстояния до эпицентра, что указывает на сложный мозаичный характер процессов в литосфере Земли в период подготовки землетрясений. Для разработки электромагнитных методов прогноза землетрясений необходимо привлекать другие виды измерений. Предложен механизм положительных аномалий и возможную связь с вулканической активностью.

3. Обнаружено усиление интенсивности спектральной плотности мощности электрического поля в диапазоне периодов внутренних гравитационных волн, что подтверждает «поршневой» механизм воздействия в канале литосфера-атмосфера-ионосфера. В дни с землетрясениями с аномалией в суточном ходе электрического поля интенсивность спектров в полосе периодов $T=0.5 - 3$ ч на порядок по величине и более возрастала по сравнению со спектрами в спокойных метеорологических условиях, но была ниже на порядок по величине при наличии осадков.

4. Описан эффект одновременного отклика акустической эмиссии в приповерхностных породах земли и аэроэлектрического поля от воздействия электрического грозового разряда, обнаружено повышение уровня эмиссии в диапазоне 6.5 – 11 кГц в осадочных породах.

5. Обнаружен эффект воздействия солнечного события на электрическое поле приземной атмосферы среднеширотной обсерватории. Магнитная буря с внезапным началом вызывает индукционный эффект в электрическом поле. В спектральной области электрических параметрах приземной атмосферы происходит усиление волн планетарного масштаба, которое является следствием изменения волновых характеристик потока галактических космических лучей.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации, входящие в список ВАК:

1. Вариации различных атмосферно - ионосферных параметров в периоды подготовки землетрясений на Камчатке: предварительные результаты / Ю.М. Михайлов, Г.А. Михайлова, О.В. Капустина и др. // Геомагнетизм и аэрономия. – 2002. – Т. 42, № 6. – С. 805-813.
2. Вариации спектров мощности электрического поля приземной атмосферы на Камчатке / Ю.М. Михайлов, Г.А. Михайлова, О.В. Капустина и др. // Геомагнетизм и аэрономия. – 2003. – Т. 43, № 3. – С. 750-758.

3. Power spectrum features of near-Earth atmospheric electric field in Kamchatka / Y.M. Mikhailov, G.A. Mikhailova, O.V. Kapustina et al. // *Annals of Geophysics*. – 2004. – Vol. 47, N. 1. – P. 237-245.
4. **Смирнов, С.Э.** Особенности отрицательных аномалий квазистатического электрического поля в приземной атмосфере на Камчатке / **С.Э. Смирнов** // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 2005. – Т. 45, № 2. – С. 282-287.
5. Особенности атмосферных шумов, наложенных на вариации квазистатического электрического поля в приземной атмосфере Камчатки / Ю.М. Михайлов, Г.А. Михайлова, О.В. Капустина и др. // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 2005. – Т. 45, № 5. – С. 690-705.
6. Электрические и электромагнитные процессы в приземной атмосфере перед землетрясениями на Камчатке / Ю.М. Михайлов, Г.А. Михайлова, О.В. Капустина и др. // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 2006. – Т. 46, № 6. – С. 839-852.
7. Прохождение внутренних гравитационных волн на высоты D- и динамо-областей ионосферы в сейсмически активном регионе (Камчатка): предварительные результаты / Г.А. Михайлова, Ю.М. Михайлов, О.В. Капустина и др. // *Геомагнетизм и аэрономия*. – 2008. – Т. 48, № 2. – С. 261-269.
8. **Smirnov, S.** Association of the negative anomalies of the quasistatic electric field in atmosphere with Kamchatka seismicity / **S. Smirnov** // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* – 2008. – N. 8. – P. 745-749.
9. Мандрикова, О.В. Автоматизация вычисления К-индекса с использованием пакетного вейвлет-преобразования / О.В. Мандрикова, **С.Э. Смирнов** // *Известия вузов, Северо-Кавказский регион, г. Ростов-на-Дону, Серия естественные науки*. – 2008. – № 6. – С. 49-51.
10. Эффекты геомагнитных возмущений в спектрах мощности атмосферных волн в динамо-области ионосферы на Камчатке / Г.А. Михайлова, Ю.М.

- Михайлов, О.В. Капустина и др. // Геомагнетизм и аэрономия. – 2009. – Т. 49, № 2. – С. 262-266.
11. Спектры мощности тепловых приливных и планетарных волн в приземной атмосфере и в D-области ионосферы на Камчатке / Г.А. Михайлова, Ю.М. Михайлов, О.В. Капустина и др. // Геомагнетизм и аэрономия. – 2009. – Т. 49, № 5. – С. 639-653.
12. Экспериментальное подтверждение взаимосвязи возможных предвестников землетрясений в приземных квазистатических электрических полях и в ионосфере / Л.П. Корсунова, Ю.М. Михайлов, В.В. Хегай и др. // Солнечно-земная физика. – 2009. – Вып. 14. – С. 125-130.
13. Эффекты грозовой активности в спектрах мощности электрического поля в приземной атмосфере на Камчатке / Г.А. Михайлова, Ю.М. Михайлов, О.В. Капустина и др. // Геомагнетизм и аэрономия. – 2010. – Т. 50, № 6. – С. 843-852.
14. Мандрикова, О.В. Метод определения индекса геомагнитной активности на основе вейвлет-пакетов / О.В. Мандрикова, И.С. Соловьёв, **С.Э. Смирнов** // Геомагнетизм и аэрономия. – 2012. – Т. 52, № 1. – С. 117-127.
15. **Смирнов, С.Э.** Влияние конвективного генератора на суточный ход напряженности электрического поля в приземной атмосфере на Камчатке / **С.Э. Смирнов** // Геомагнетизм и аэрономия. – 2013. – Т. 53, № 4. – С. 546-552.
16. **Смирнов, С.Э.** К вопросу о природе эффекта восхода Солнца в суточных вариациях электрического поля атмосферы на Камчатке: I. Временные вариации электрического поля / **С.Э. Смирнов**, Г.А. Михайлова, О.В. Капустина // Геомагнетизм и аэрономия. – 2012. – Т. 52, № 4. – С. 535-540.
17. Михайлова, Г.А. К вопросу о природе эффекта восхода Солнца в суточных вариациях электрического поля атмосферы на Камчатке. II. Частотные

- вариации электрического поля / Г.А. Михайлова, О.В. Капустина, **С.Э. Смирнов** // Геомагнетизм и аэрономия. – 2013. – Т. 53, № 2. – С. 247-255.
18. **Smirnov, S.E.** Influence of a single lightning discharge on the intensity of an air electric field and acoustic emission of near-surface rocks / **S.E. Smirnov**, Y.V. Marapulets // Solid Earth. – 2012. – Vol. 3, N. 2. – P. 307-311.
19. Закономерности в проявлении предвестников землетрясений в ионосфере и приземных атмосферных электрических полях на Камчатке / Л.П. Корсунова, В.В. Хегай, Ю.М. Михайлов и др. // Геомагнетизм и аэрономия. – 2013. – Т. 53, № 2. – С. 239-246.
20. **Смирнов, С.Э.** Реакция квазистатического электрического поля и метеорологических параметров в приземной атмосфере на Камчатке на геомагнитные бури в ноябре 2004 г. / **С.Э. Смирнов**, Г.А. Михайлова, О.В. Капустина // Геомагнетизм и аэрономия. – 2013. – Т. 53, № 4. – С. 532-545.
21. **Смирнов, С.Э.** Вариации электрических и метеорологических величин в приземной атмосфере на Камчатке во время солнечных событий в октябре 2003 г. / **С.Э. Смирнов**, Г.А. Михайлова, О.В. Капустина // Геомагнетизм и аэрономия. – 2014. – Т. 54, № 2. – С. 257-265.
22. **Смирнов, С.Э.** Реакция электрического состояния приземной атмосферы на геомагнитную бурю 5 апреля 2010 г. / **С.Э. Смирнов** // ДАН. – 2014. – Т. 456, № 3. – С. 342-346.
23. Михайлова, Г.А. Эффекты солнечной и геомагнитной активностей в вариациях спектров мощности электрических и метеорологических величин в приземной атмосфере на Камчатке во время солнечных событий в октябре 2003 г. / Г.А. Михайлова, О.В. Капустина, **С.Э. Смирнов** // Геомагнетизм и аэрономия. – 2014. – Т. 54, № 5. – С. 691-700.
24. **Smirnov, S.** Reaction of electric and meteorological states of the near-ground atmosphere during a geomagnetic storm on 5 April 2010 / **S. Smirnov** // Earth, Planets and Space. – 2014. – 66:154. doi: 10.1186/s40623-014-0154-2

25. **Smirnov, S.** Variations of atmospheric electric field and meteorological parameters in Kamchatka in 1997-2016 / **S. Smirnov** // E3S Web Conference. – 2017. – Vol. 20. – P.01012, doi: 10.1051/e3sconf/20172001012
26. Аномалии в ионосфере и электричестве приземного слоя атмосферы перед камчатским землетрясением 30.01.2016 г. по данным обсерватории «Паратунка» / В.В. Бычков, Л.П. Корсунова, **С.Э. Смирнов** и др. // Геомагнетизм и аэрономия. – 2017. – Т. 57, № 4. – С. 532-540.

Публикации, входящие в список РИНЦ:

1. Анализ явлений космической погоды в 2014 году по наблюдениям в северо-восточном регионе России / **С.Э. Смирнов**, В.В. Бычков, О.В. Мандрикова и др. // Вестник КРАУНЦ. Серия: Физико-математические науки. – 2016. – № 1(12). – С. 66-84.
2. **Смирнов, С.Э.** Частотный и временной анализ эффекта восхода Солнца в электрическом поле приземного слоя атмосферы / **С.Э. Смирнов** // Вестник КРАУНЦ. Серия: Физико-математические науки. – 2016. – № 4(15). – С. 86-91.