ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ИНСТИТУТ КОСМОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК (ИКИР ДВО РАН)

На правах рукописи

СМИРНОВ Сергей Эдуардович

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

25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

Петропавловск-Камчатский - 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. ЛОКАЛЬНЫЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ИЗМЕРЕНИЯ	1.4
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ	
1.1 Суточные вариации электрического поля	
1.2 Климатические и погодные условия в районе обсерватории	
1.3 Влияние метеофакторов на вариации электрического поля	
1.4 Эффект молнии	
1.5 Эффекты грозовой активности в спектрах мощности	
электрического поля	
1.6 Атмосферные шумы, наложенные на суточные вариации напряженнос	
электрического поля	
1.6 Сезонный и вековой тренд электрического поля	00
ГЛАВА 2. АППАРАТНОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ	
ИЗМЕРЕНИЙ	
2.1 Основные инструменты наблюдений	
2.2 Информационный комплекс наблюдений	80
ГЛАВА 3. АНОМАЛИИ В СУТОЧНЫХ ВАРИАЦИЯХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГ	Γ O
ПОЛЯ	
3.1 Положительные аномалии	90
3.2 Отрицательные аномалии	95
ГЛАВА 4. ЭФФЕКТ ВОСХОДА СОЛНЦА В ВАРИАЦИЯХ	
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ	106
4.1 Эффект утренней конвекции	
4.2 Эффект восхода Солнца в спектральных характеристиках электрическ	
поля	
ГЛАВА 5. ЭФФЕКТЫ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ В ВАРИАЦИЯХ	
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ	
	130
5.1 Особенности динамики электрического поля в период подготовки	136
землетрясения	.130
возмущенных условиях	151
ГЛАВА 6. ЭФФЕКТЫ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ВАРИАЦИЯ	
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ	162
6.1 Вариации электрических и метеорологических величин во время	1.00
солнечных событий	
6.2 Эффекты геомагнитных возмущений в спектрах мощности атмосферн	
ВОЛН	196

ЗАКЛЮЧЕНИЕ	234
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	236
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	259

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к изучению динамических характеристик атмосферного электричества в сейсмоактивных регионах мира зародился очень давно. Причиной этому послужило обнаружение аномальных эффектов в суточных вариациях напряженности электрического поля с опережением землетрясений от нескольких часов до нескольких суток. Это навело на мысль об использовании аномального эффекта в качестве одного из возможных предвестников землетрясений и стимулировало интенсивные исследования динамических характеристик электрического поля во многих сейсмически активных регионах мира. В СССР такие целенаправленные наблюдения проводились в Таджикистане, Узбекистане, в Крыму, в Армении [Бончковский, 1954; Чернявский, 1955; Электромагнитные предвестники, 1982]. В азиатском сейсмоактивном регионе наиболее продолжительные наблюдения выполнялись в Японии и Китае [Kondo, 1968; Candidate precursors ..., 1997; Hao et al., 1998] (см. п. 3.2). На Камчатке, как наиболее сейсмоактивном регионе России, регулярные наблюдения с целью прогноза землетрясений были начаты в 1991 г. [Руленко и др., 1992; Руленко и др., 1996; Руленко, 2000; Руленко, 2003] в районе Паратунской гидротермической системы (ф = $52^{\circ}58.3'$ N, $\lambda = 158^{\circ}14.9'$ E) Институтом космофизических исследований и распространения радиоволн (ИКИР) ДВО РАН и продолжаются в настоящее время [Специализированный ..., 1998; Гелиогеофизические эффекты ..., 1998; Бузевич, 2001; Vershinin et al., 1999].

В отличие от ранее проводимых экспериментов, современные наблюдения выполняются в комплексе с регистрацией многих геофизических параметров, непосредственно и опосредованно связанных с динамическими характеристиками электрического поля. Увеличение объема получаемой информации, в свою очередь, потребовало внедрение современных вычислительных средств сбора и первичной обработки данных с целью создания баз данных [Смирнов, 2003а].

Другая сторона проблемы изучения динамических характеристик электрического поля в сейсмоактивных регионах связана с исследованиями различных механизмов 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 поля в электрическом канале связи, которые приведены в [Моргунов, 1988; Моргунов, 2000; Атмосферное электрическое поле ..., 1998] (данные аномальных величин перед отдельными землетрясениями неоднократно публиковались в печати). Вместе с тем в ряде других моделей взаимодействие рассматривается через атмосферные волны, в частности, через внутренние гравитационные волны (см. обзор [Сорокин и др., 1999]). Существенно, что систематические экспериментальные данные такого рода до последнего времени отсутствовали в литературе. В диссертации показано, что этот диапазон периодов атмосферных волн оказался наиболее чувствительным к литосферным процессам. Такой теоретический подход по существу стимулировал детальные экспериментальные исследования спектров мощности напряженности электрического поля, которые впервые выполнены в рамках рассматриваемой работы. При этом спектральные вариации электрического поля использованы в качестве одного из средств исследования динамики атмосферы в сейсмоактивном регионе.

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 были начаты в 1991 г. в районе Паратунской гидротермической системы (обс. Паратунка, $\varphi = 52^{\circ}58,3'$ N, $\lambda = 158^{\circ}14,9'$ E) Институтом космофизических иссле-

дований и распространения радиоволн (ИКИР) ДВО РАН и продолжаются в настоящее время.

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 электрического поля использованы в ней в качестве одного из средств исследования динамики атмосферы в сейсмоактивном регионе.

Исследования выполнены в уникальном геодинамически активном регионе с особым климатом. На электрическое состояние приземной атмосферы 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 спектральновременных 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 Еz. Методы исследования включают выделение процессов, формирующих суточный ход Еz в условиях «хорошей погоды». Далее устанавливаются геофизи-

ческие 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 возрастала 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. <u>Наиболее вероятные значения напряженности электрического поля, за-</u>регистрированные 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. Использованные 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 грозовых разрядов на литосферу позволяет 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 космофизических 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 Γ.);
- 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 Γ.);
- 11.XV International Conference on Atmospheric Electricity (Norman, USA, 2014Γ.);
- 12.Intern. Conf. Problems of Geocosmos (St.Petersburg, 2002 Γ.);
- 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 Γ.);
- 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 Γ.);

- 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 Γ.);
- 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 № $10104-71 / \Pi-30 / 041-404 / 300605-116$ 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.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Направление диссертационной работы, результатов и публикаций соответствует паспорту специальности 25.00.29 «Физика атмосферы и гидросферы», пунктам: 1. строение и физика нижней атмосферы (тропосферы) Земли; 8. взаимодействие гидросферы, атмосферы и литосферы.

Благодарности

В заключении автор выражает глубокую благодарность сотрудникам ИКИР ДВО РАН, коллегам ИЗМИРАН за плодотворное сотрудничество в выполнении данной работы.

ГЛАВА 1. ЛОКАЛЬНЫЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

1.1 Суточные вариации электрического поля

Объектом исследования данной работы является электростатическое поле в приземном слое атмосферы. Электрическое поле в атмосфере, как и всякое электрическое поле можно определить в любой его точке значением скалярной величины, называемой потенциалом φ . Рассматриваемые временные масштабы таковы, что электрическое поле можно считать потенциальным, таким образом $\cot \vec{E} = 0$. Векторная величина напряженности электрического поля тогда определяется как:

$$\vec{E} = -\vec{\nabla}\varphi \ . \tag{1}$$

Известно, что поверхность земли заряжена отрицательно, а ионосфера положительно. В условиях невозмущённого поля потенциал растет с высотой, силовые линии направлены вниз, а за положительное направление нормали мы принимаем направление от земной поверхности. В исследованиях атмосферного электричества чтобы не иметь дела с отрицательными значениями напряжённости поля под её вертикальной составляющей понимается вертикальная компонента градиента потенциала электрического поля, которая в данной работе обозначается как $E_Z = \frac{d\varphi}{dz}$. Такой подход создаёт преемственность в представлении графиков поля, которое сложилось задолго до формирования основных положений теоретической электростатики, когда поле хорошей погоды отображалось положительными значениями. Чалмерс пишет по этому поводу: "Каждый исследователь волен использовать любую систему знаков, которую он считает целесообразной, при условии, что он, во-первых, будет постоянен в её применении и,

во-вторых, отчетливо пояснит всем остальным смысл этой системы, желательно, по отношению к нормальным условиям хорошей погоды" [Чалмерс, 1974], стр. 23. Поэтому здесь и далее под Еz мы будем подразумевать вертикальную компоненту градиента потенциала электрического поля.

Условия хорошей погоды определяется как температура в диапазоне -50 до $+50~^{0}$ C; давление от 650 до 1080 гПа; облачность не более 3 баллов; скорость ветра до 6 м/с, отсутствие гроз, осадков, тумана, мглы, дымки, поземки, метели.

В результате многочисленных исследований удалось установить, что напряженность электрического поля атмосферы испытывает изменения, происходящие во всех точках земного шара одновременно. Наблюдаются синхронные изменения как в суточном, так и в годовом ходе. Эти так называемые унитарные вариации электрического поля атмосферы легче всего выявляются при измерениях над океанами и в полярных областях в условиях хорошей погоды. Измерения электрического поля, проводящиеся на континентальных станциях, подвержены также влиянию ряда локальных факторов, вызывающих изменения проводимости в приземном слое, и поэтому затрудняют определять унитарные вариации.

Дальнейшие исследования показали, что суточный ход унитарной вариации во многом подобен суточному ходу интенсивности грозовой деятельности, рассчитанной для всего земного шара (Рисунок 1, кривые 1 и 2, 3 — площадь, занятая грозами по всему земному шару). Близкое совпадение хода обеих кривых указывает на причинную связь между грозовой деятельностью на Земле и электрическим полем в атмосфере [Имянитов, 1965].

При измерениях на геофизических обсерваториях материка следует учесть, что суточный ход напряженности атмосферного электрического поля формируется под действием целого ряда различных физических механизмов, имеющих различный геофизический характер для различных широт. К ним относятся, прежде всего, унитарная вариация, обусловленная суточным изменением мощности генераторов глобальной атмосферной электрической цепи. Локальная же

вариация даже в условиях «хорошей погоды» определяется взаимодействием таких процессов, как конвенция в пограничном и приземном слоях, изменением проводимости воздуха за счет суточной вариации концентрации ядер аэрозольных частиц и газовых радиоактивных эманаций в атмосфере, имеющих повышенную активность на границах тектонических разломов - местах активной сейсмической деятельности. Типичная суточная вариация Еz на обсерватории «Паратунка» в условиях хорошей погоды приведена на Рисунке 2. Локальное время в Паратунке отличается от мирового на 12 часов. Хорошо видна работа утреннего конвективного генератора, который дал максимум в 21 ч. UT.

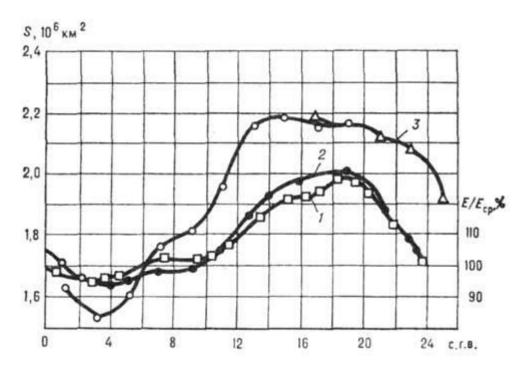


Рисунок 1 - Суточный ход унитарной вариации напряженности по среднему Гринвическому времени (с. г в.) электрического поля над океанами (1), в полярных областях (2), правая шкала и суточный ход площади, занятой грозами (3), левая шкала.

Переход на цифровые методы измерений на обсерваторском уровне потребовал существенной переработки каждого этапа исследовательских работ. В Главной геофизической обсерватория им. А.И. Воейкова (ГГО) были разработаны методические указания по наблюдениям за электрическим полем [Руководя-

щий документ, 2002]. Создание автоматизированных комплексов позволило не только повысить качество измерений, но и существенно увеличить частоту дискретизации и обрабатывать большие объемы информации. А это, в свою очередь, позволяет исследовать более тонкие эффекты в электрическом поле и создавать базы данных по результатам измерений широкого комплекса геофизических и метеорологических параметров, причинно связанных с динамикой электрического поля.

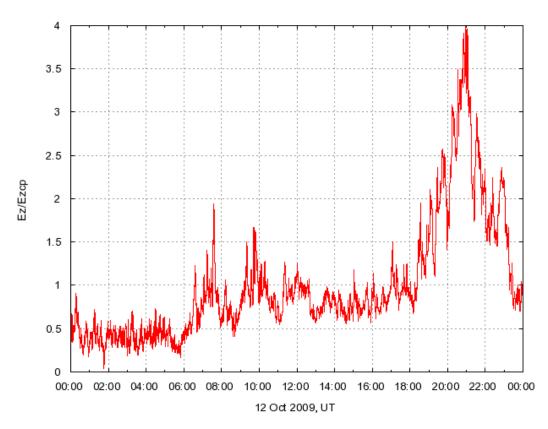


Рисунок 2 - Суточная вариация градиента потенциала электрического поля на обсерватории «Паратунка», деленная на среднесуточное значение.

Автоматизированный комплекс обсерваторских наблюдений был построен в обсерватории «Борок» в 1995 г., в обсерватории «Паратунка» в 1996 г. и во Владимирском университете в 1997 г. Каждый комплекс по-своему уникален и разрабатывался независимо друг от друга для решения специфических научных задач. Так, в обсерватории «Борок» наблюдения ведутся с целью исследования короткопериодных пульсаций электрического поля, вызванных атмосферной тур-

булентностью [Информационные ..., 2003]. В него интегрированы системы сбора информации по программам INTERMAGNET и SAMNET.

Автоматизированный комплекс Владимирского университета предназначен для проведения наблюдений атмосферного электрического поля и его реакции на глобальные геофизические и астрофизические процессы [Система многоканального ..., 2003; Грунская, 2010].

Суточные вариации напряженности электрического поля в приземной атмосфере определяются как глобальными, так и локальными возмущениями. Последние связаны с электродным эффектом вблизи поверхности земли, с наличием аэрозольных частиц в атмосфере, а в сейсмоактивных регионах с повышенной радиоактивностью. Как показано в п. 1.3, п/о Камчатка имеет специфические климатические условия и орографию, которые отражаются в суточных вариациях напряженности поля. Отдельные примеры этих вариаций ранее приводились в работах [Специализированный ..., 1998; Связь вариаций ..., 2003]. Здесь приведены обобщенные результаты за более длительный период [Вариации различных ..., 2002].

В качестве примера возьмем интервал измерений сентябрь – октябрь 1999 г. В этот период на Камчатке произошло несколько довольно сильных землетрясений (3T) (класса $K \ge 13$), данные о которых приведены в Таблице 1 и отображены на Рисунке 3, где r - радиус зоны действия деформационных процессов до 3T, оцененный по известной формуле оценки размеров зоны подготовки 3T по упругим деформациям на уровне 10^{-8} [Dobrovolsky et al., 1979; Добровольский, 2009] $r \sim e^{M}$, где M - магнитуда 3T; а R - расстояние от эпицентра до пункта регистрации (Карымшина: $\phi = 52^{\circ}50'$ N, $\lambda = 158^{\circ}08'$ E, Паратунка: $\phi = 52^{\circ}58,3'$ N, $\lambda = 158^{\circ}14,9'$ E).

Таблица 1 - Пар	аметры земпет	ласеций в пер	иол сентабъ	1_0rtg5ni 1	999 г
таолица т - ттар	амстры эсмлстр	лисспии в пср	иод сситяор	р-октиорь і	フラフコ・

Дата	Время	φ^0 N	Λ^0 E	h, км	K/M	r, KM	R, км
09.09.1999 г.	14:02:02	47.21	154.33	33	13/5.6	270	~600
18.09.1999 г.	21:28:33	51.21	157.56	60	13.4/6.0	403	~190
05.10.1999 г.	05:01:36	51.21	157.61	76	13/5.6	270	~215
24.10.1999 г.	12:24:50	52.30	159.73	11	12.4/4.8	120	~120

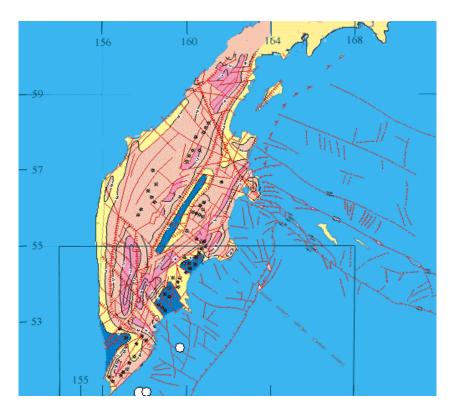


Рисунок 3 - Землетрясения в период сентябрь-октябрь 1999 г. по Таблице 1.

Метеорологические параметры (осадки и давление), осредненные за сутки, приведены на верхних фрагментах, а суммарный Кр-индекс - на нижнем фрагменте Рисунка 4. Чтобы выделить ожидаемые аномалии в поведении Еz, были рассмотрены более детально суточные зависимости величины Еz.

На Рисунках 5 и 6 приведены типичные суточные кривые Ez, измеренные с шагом по времени 1 мин., в спокойных геомагнитных условиях (1 - 7 сентября), при умеренной геомагнитной активности (16 и 18 сентября), при высокой геомагнитной активности (27 сентября), а также при обильных осадках (5 и 26 сен-

тября). Характер суточных зависимостей Еz в приземном слое атмосферы качественно описывается физическими процессами в нем. Возрастание значения Еz в 19 - 24 UT (06 - 11 LT) связано с конвективными процессами в атмосфере при изменении температуры воздуха в утреннее время, которые, как известно, уменьшают проводимость приземного слоя атмосферы и соответственно усиливают электрическое поле.

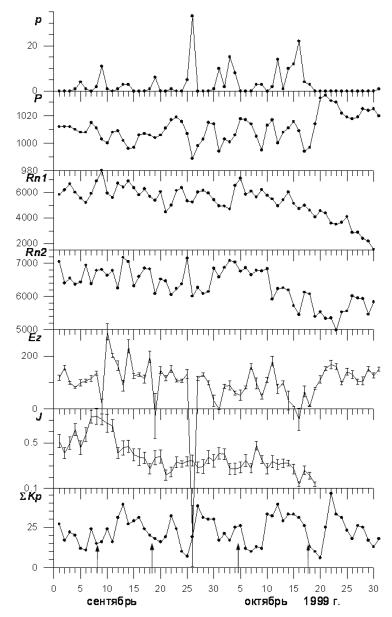


Рисунок 4 - Среднесуточные вариации осадков в мм/м² (р); давления в гПа (Р); радона в Bk/m^3 в т.1 (Rn1), в т.2 (Rn2); атмосферного электрического поля в B/m (Ez); естественного электромагнитного излучения на f = 5.3 к Γ ц в отн. ед. (J); глобальной магнитной активности Σ Kp. Вертикальные отрезки прямых – среднеквадратические отклонения. Стрелками указаны моменты землетрясений.

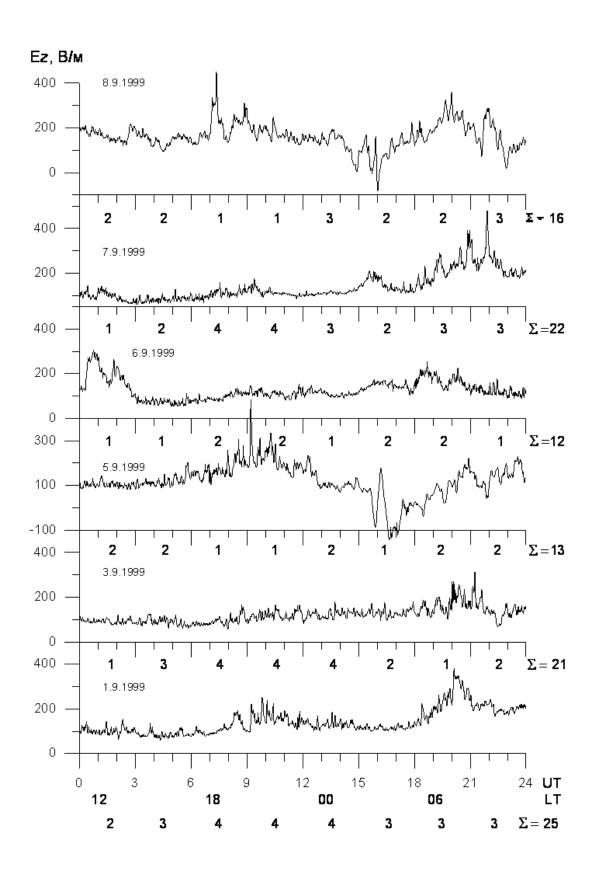


Рисунок 5 - Типичные суточные вариации атмосферного электрического поля Еz в (B/м) в разных геофизических условиях.

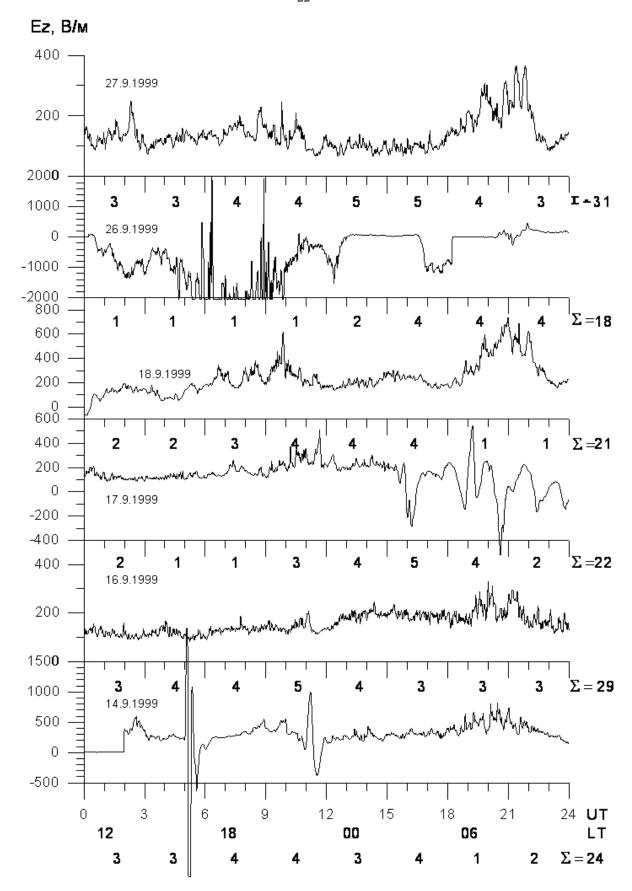


Рисунок 6 - Типичные суточные вариации атмосферного электрического поля Еz в (B/м) в разных геофизических условиях.

Второй максимум в суточном распределении в вечернее (предзаходное) время выражен слабее, чем утренний и наблюдается не всегда. Природа этого максимума также может быть связана с местными колебаниями температуры. Днем и ночью в спокойных условиях электрическое поле ~100 - 120 В/м с некоторыми колебаниями ~ ±20 В/м. Наблюдаемые суточные вариации отличаются от классической кривой Карнеги над открытым океаном, имеющей максимум (19 – 20) и минимум (02-05) UT. Вместе с тем они отличаются и от суточных вариаций на континентах, имеющих два максимума в утреннее и вечернее время, которые связываются с разностью температур земля-воздух.

Во время осадков, которые несут к поверхности Земли объемные заряды, проводимость атмосферы возрастает и соответственно Еz уменьшается, как это видно 5 сентября, на $|\Delta E| \sim 200 \text{ B/m}$, даже изменяя знак величины. При обильных и продолжительных осадках, как это имело место 26 сентября, вариации электрического поля возрастали до кВ/м. При высокой геомагнитной активности 27 сентября не наблюдалось каких-либо особенностей, отличных от среднего суточного хода в спокойных условиях. Обращает на себя внимание поведение суточных кривых 8 и 17 сентября, в которых на фоне спокойных метеорологических и геомагнитных условий наблюдались бухты пониженных значений Еz в 14 - 19 и 15 - 24 UT соответственно. По длительности и перепаду уровня поля они меньше (8 сентября) или одного порядка (17 сентября) с утренним повышением величины Еz. Даже визуально можно отметить изменение спектра колебаний Еz 17 сентября по сравнению с вариациями Ех в утренние часы 16 и 18 сентября, а именно: период колебаний увеличился с 0,5 до 2 ч. Если нет каких-либо других факторов, кроме метеорологических, возмущающих электрическое поле в приземной атмосфере, то этот эффект понижения поля можно приписать сейсмическому источнику, поскольку он наблюдался в обоих случаях почти за сутки до ЗТ (см. Таблицу 1). Подобный бухтообразный характер аномалий электрического поля, даже с переходом через ноль, наблюдается преимущественно во всех случаях, предшествующих землетрясениям (см. п. 3.2). При слабых осадках типа дождя в суточном ходе электрического поля также наблюдаются подобные пониженные бухтообразные вариации, например, 05 и 08 сентября. Но, в отличие от 17 сентября, на эти бухтообразные вариации накладывается шум с более короткими периодами. Для более надежного выделения подобного эффекта в качестве оперативного предвестника ЗТ в будущем было бы полезно наблюдения за Ех дополнить данными метеослужбы о грозовой деятельности в регионе (система пеленгации), о состоянии облачности (радарная и лидарная служба). Все эти метеофакторы вызывают сильные возмущения регионального электрического поля, преимущественно понижая его величину. В отличие от них аэрозоли в воздухе способствуют рекомбинации положительных и отрицательных зарядов в атмосфере, тем самым понижая ее проводимость и увеличивая Ех. То есть аэрозоли оказывают на поведение Ех влияние в противофазе с влиянием осадков и радиоактивных эманаций.

Далее представляло интерес перейти от отдельных суточных кривых к значениям напряженности поля, осредненным за сутки, в комплексе с другими геофизическими параметрами [Вариации различных ..., 2002]. Результирующие среднесуточные вариации за сентябрь - октябрь 1999г. приведены на Рисунке 4. Здесь же на нижней панели приведены вариации суммарной суточной глобальной геомагнитной активности (ΣКр). Как видно из Рисунке 4, среднесуточные значения Еz - компоненты испытывают сильные изменения в рассматриваемый период. В отсутствие осадков средний уровень Ег ~ 100 - 120 В/м (1 - 8; 15 - 17; 21 - 25 сентября), колебание которого в фазе с вариациями давления. Резкое уменьшение среднесуточных значений Еz связано напрямую с выпадением осадков (9, 13, 19, 26 сентября; 1, 9, 16 октября), особенно ярко выражено влияние осадков 26 сентября. При выпадении осадков, несущих положительные и отрицательные аэрочастицы, увеличивается объемная плотность зарядов. Сравнение поведения Ех в период 11 - 16 (с обильными осадками) и в период 21 - 30 октября (в отсутствие осадков), но в обоих случаях при повышенной геомагнитной активности приводит к выводу, что влияние метеорологического фактора является

определяющим в поведении электрического поля. Вариации геомагнитного поля не оказывают влияние на вариации электрического поля (21 – 30 октября). Этот результат является ожидаемым, поскольку частота столкновений ионов с нейтральными молекулами воздуха много больше их гирочастот [Морозов, 1991]. Накануне сейсмических событий 9, 18 сентября и 5 октября в суточном ходе Ег не обнаружено каких-либо существенных аномалий, поскольку именно накануне этих дней наблюдались обильные осадки.

Суточные вариации электрического поля в приземном слое атмосферы на Камчатке отличаются от соответствующих вариаций в открытом океане и на континентах. Они четко контролируются вариациями метеорологических параметров: суточным градиентом температуры, давлением атмосферы и уровнем осадков и слабо реагируют на уровень геомагнитной активности.

Таким образом, для исследования динамических характеристик электрического поля в сейсмоактивных регионах необходимо было проведение не эпизодических, а регулярных наблюдений в комплексе с другими геофизическими параметрами. Такая многофункциональная геофизическая обсерватория в Паратунке, единственная в сейсмоактивном регионе России, была создана Институтом космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН. Регулярные наблюдения электрического поля с целью прогноза землетрясений здесь были начаты в 1996 г. и продолжаются в настоящее время. Это позволило создать обширную базу данных, анализ которых для различных научных задач и составляет содержание диссертации.

1.2 Климатические и погодные условия в районе обсерватории

Известно, что наибольшее влияние на динамические характеристики атмосферного электричества в приземном слое атмосферы оказывают метеорологические процессы и орография местности. Поэтому представляло интерес рассмотреть в диссертации особенности климата на п/о Камчатка [Smirnov, 2017; Смирнов, 2017].

Обсерватория «Паратунка» ($\phi = 52^{\circ}58,3'$ N, $\lambda = 158^{\circ}14,9'$ E) расположена на юге Камчатского полуострова (Рисунок 7) к западу от Авачинской бухты в долине, защищенной грядами невысоких сопок на высоте 50 м над уровнем моря.

Ближайшие крупные населенные пункты: районный центр — город Елизово и областной центр — город Петропавловск-Камчатский. На Рисунке 8 показано взаиморасположение этих населенных пунктов, а на Рисунке 9 общий вид долины, где расположена обсерватория.



Рисунок 7 - Расположение обсерватории «Паратунка» на Камчатском полуострове.

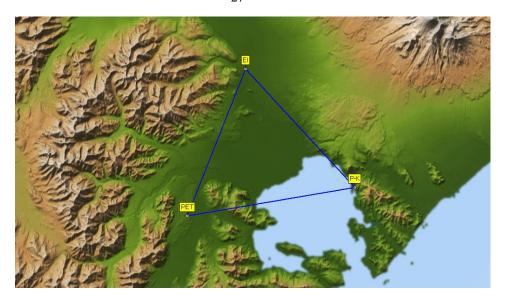


Рисунок 8 - Расположение обсерватории «Паратунка» (РЕТ), г. Елизово (Еl) и г. Петропавловска-Камчатского (Р-К). Расстояние Паратунка (РЕТ) - г. Елизово (Еl) равно 25 км; г. Елизово (Еl) - г. Петропавловск-Камчатский (Р-К) равно 26 км; Паратунка (РЕТ) - г. Петропавловск-Камчатский (Р-К) равно 27 км.



Рисунок 9 - Общий вид долины и расположение (красная стрелка) обсерватории «Паратунка».

Основным климатообразующим процессом на Дальнем Востоке и на Камчатке является атмосферная циркуляция. Она оказывает наибольшее влияние на состояние погоды в целом. Положение Камчатки на восточной окраине Евразии, для которой характерны значительные термобарические контрасты, активная циклоническая деятельность, перестройка и смена генерального направления меридиональных составляющих атмосферной циркуляции, обуславливают здесь сложную и изменчивую погоду.

Основными климатическими центрами действия атмосферы в северной части Тихого океана и в Азии являются алеутская депрессия и сибирский максимум зимой, северотихоокеанский максимум и азиатская депрессия летом, взаимодействием которых и определяется характер атмосферной циркуляции, на Камчатке и омывающих ее морях. Одной из особенностей циркуляции атмосферы над югом полуострова является активная циклоническая деятельность, особенно в осенне-зимний период (Рисунок 10 [Кондратюк, 1983]). Летом циклоническая деятельность заметно ослабевает, однако это ослабление обусловлено не столько уменьшением числа циклонов, сколько уменьшением их глубины. Повторяемость барических образований и связанный с ними характер циркуляции определяют вынос на юго-восточное побережье полуострова той или иной воздушной массы. Совершенно очевидно, что в течение всего года здесь преобладает воздух морской умеренный. Континентальный умеренный воздух, редко отмечаемый на юго-востоке Камчатки, есть не что иное, как трансформированный морской умеренный воздух, поступающий с Охотского моря. Арктический воздух в район обсерватории поступает зимой из северных районов Берингова моря (морской) или из районов Колымы (континентальный), существенно трансформируясь по пути движения.

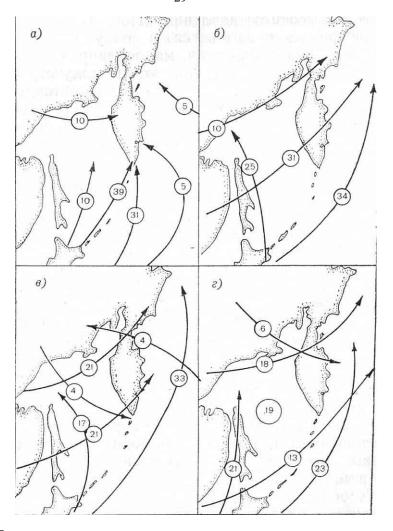


Рисунок 10 - Типовые траектории циклонов, оказывающих влияние на погоду юга Камчатки, и их повторяемость (%) в январе (а), апреле (б), июле (в), октябре (г) [Кондратюк, 1983].

На Рисунке 11 показана гистограмма распределения атмосферного давления на обсерватории по датчику, расположенному на высоте 60 метров над уровнем моря за 2003-й, 2004-й годы. Устойчивость показаний за май и сентябрь свидетельствует, что летне-зимняя перестройка климата проходит по стандартному сценарию. Наименее предсказуемыми являются зимние месяцы. Годовой ход давления полностью определяется циркуляционными процессами над югом Камчатки и омывающими ее водами Тихого океана, Берингово и Охотского морей. Минимум среднемесячного давления приходится на декабрь – январь – период максимального развития циклонической деятельности в алеутском районе.

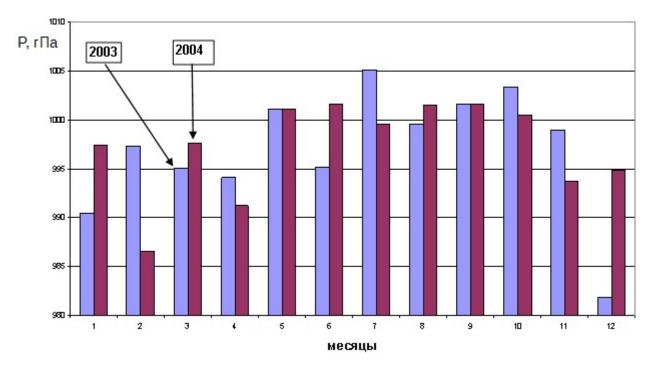


Рисунок 11 - Гистограмма распределения давления по месяцам за 2003-й, 2004-й годы.

Этот ход относится к океаническому типу, для которого характерны небольшая амплитуда годового хода и максимум в теплый период.

Климатическое лето, в отличие от календарного, наступает, когда среднесуточная температура превышает 10 градусов по шкале Цельсия. Устойчиво летняя, но не обязательно солнечная, погода в районе обсерватории наблюдается только в августе. Среднемесячные температуры за период 2003-2009 гг. представлены на Рисунке 12, за период 2010-2016 гг. представлены на Рисунке 13.

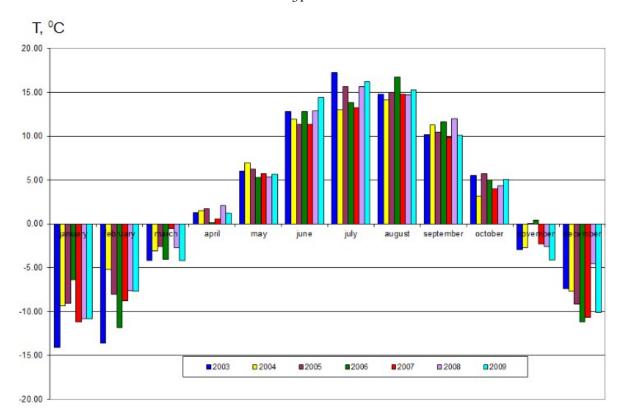


Рисунок 12 - Годовой ход среднемесячной температуры за 2003-2009 гг.

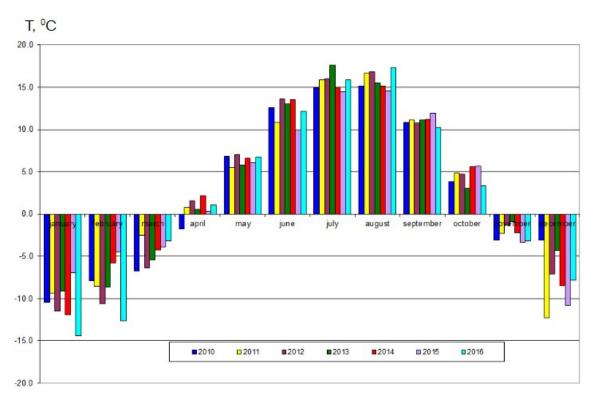


Рисунок 13 - Годовой ход среднемесячной температуры за 2010-2016 гг.

Средняя годовая температура воздуха на обсерватории за 2003-2016 гг. представлена на Рисунке 14. Среднее за весь этот период было 2.7° С, что совпадает со значение из работы [Кондратюк, 1983]. Это ниже, чем в Петербурге и Стокгольме расположенных значительно севернее, на широте белее 60° .

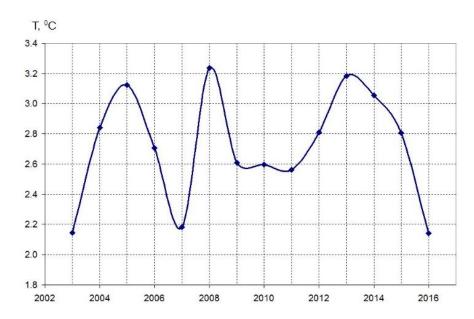


Рисунок 14 - Среднегодовая температура воздуха за 2003-2016 гг.

Ветер — горизонтальное движение воздуха относительно земной поверхности. Датчик ветра был установлен на водонапорной башне на высоте 25 метров. Измерения ведутся с интервалом 10 минут. На Рисунке 15 представлены графики силы ветра в районе обсерватории Паратунка за 2003 и 2004 гг.

Ветер связан со всем комплексом гидрометеорологических характеристик. Особенно четко эта связь прослеживается в прибрежных районах. Так, в зимний период потоки с моря обуславливают теплую с осадками погоду, а ветры с суши (в Паратунке это северо-западные, северные и западные), наоборот, способствуют установлению сухой, холодной погоды.

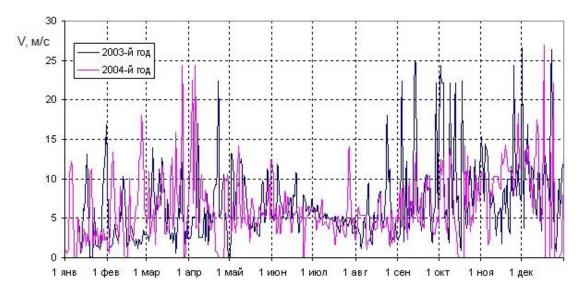


Рисунок 15 - Сила ветра в районе обсерватории Паратунка за 2003 и 2004 гг.

Режим ветра у поверхности земли формируется, как известно, под воздействием трех факторов: атмосферной циркуляции, градиента давления и рельефа местности. Первые два фактора являются причиной межгодовых, сезонных и непериодических изменений в режиме ветра, а третий — рельеф местности — проявляется в искажении направления и скорости ветра в пограничном слое, т.е. вносит определенную погрешность в режим ветра. На Рисунке 16 представлена роза ветров в районе обсерватории Паратунка. Наиболее сильными являются северные и северо-западные ветры.

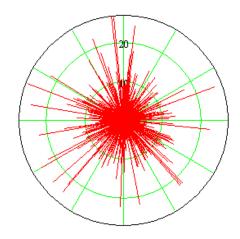


Рисунок 16 - Роза ветров в районе обсерватории Паратунка.

В сезонном ходе силы ветра наиболее неблагоприятные периоды приходятся на март - апрель и сентябрь - декабрь месяцы. Из-за специфического расположения обсерватории, окруженной грядами сопок, 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.

1.3 Влияние метеофакторов на вариации электрического поля

Наиболее сильным метеорологическим фактором, влияющим на возмущенность напряженности электрического поля, являются осадки. Пример поведение поля, когда в течении суток тип осадков менялся по порядку снег-дождь-снег приведен на Рисунке 17. Как видно из рисунка, дождь вызывает отрицательную бухту с понижением напряженности поля до величины порядка 1000 В/м, увеличивая объемную плотность отрицательных зарядов в приземной атмосфере. Со снегом связана положительная бухта в вариациях электрического поля порядка 500 — 1000 В/м, которая, возможно, обусловлена возросшей объемной плотностью положительных зарядов.

График униполярности (отношение концентрации положительных ионов к концентрации отрицательных) во время дождя за 8 августа 2009 г. показан на Рисунке 18. График униполярности во время снегопада за 26 февраля 2010 г. показан на Рисунке 19. Как видно из графиков оба эти явления связаны с избытком в одном случае отрицательных ионов (дождь), в другом случае положительных ионов (снег). Однако нередко бывают события, когда во время сильных осадков в том и другом случае они сопровождаются сильными знакопеременными ос-

цилляциями. Снег в районе обсерватории лежит 7 месяцев в году, с ноября по конец мая.

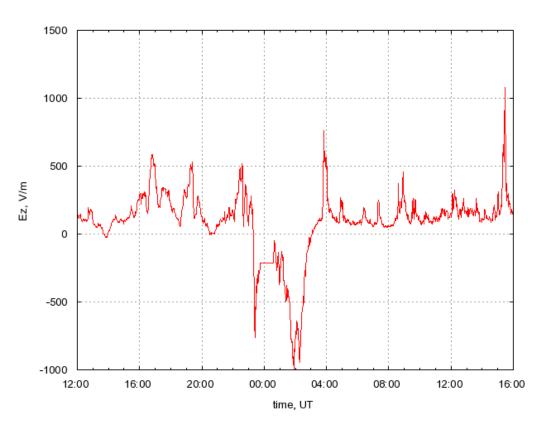


Рисунок 17 - Поведение поля в условиях смены осадков снег-дождь-снег.

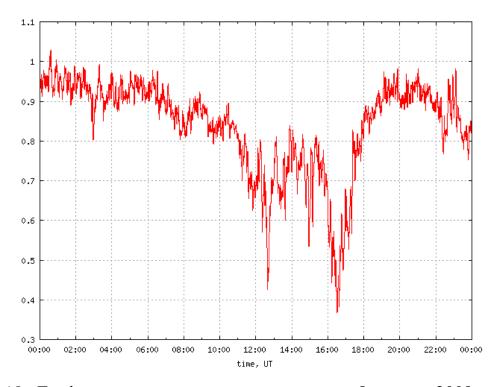


Рисунок 18 – График униполярности во время дождя 8 августа 2009 г.

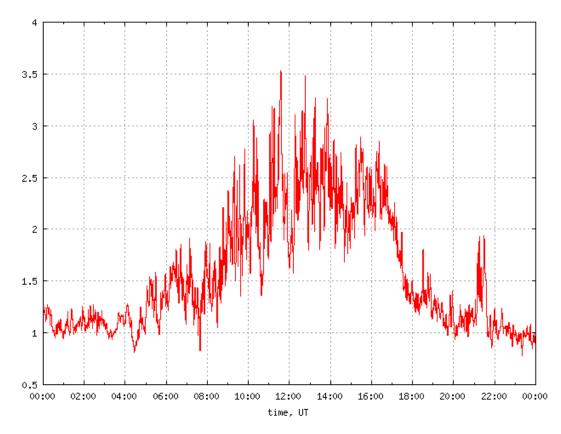


Рисунок 19 – График униполярности во время снега 26 февраля 2010 г.

Гроза - атмосферное явление, при котором между отдельными облаками или между облаком и землей возникают многократные электрические разряды (молнии), сопровождающиеся громом. Грозовая деятельность определяется процессами атмосферной циркуляции и в значительной мере местными физикогеографическими условиями: рельефом местности, близостью водоема. Она характеризуется числом дней с грозой и продолжительностью гроз.

Вследствие недостаточного прогрева в теплое полугодие грозы на Камчатке - явление довольно редкое. С 1937 по 1982 годы (45 лет) было зарегистрировано всего 22 грозы. Все они, кроме двух, отмечались в летнее время. В 1980 г. было две грозы и обе зимой (в марте и в декабре).

В абсолютном большинстве случаев летние грозы на юге Камчатки возникают при прохождении холодных фронтов на фоне сравнительно высоких температур. Зимние же грозы обычно связаны с фронтами окклюзии и адвекцией очень теплой, очень влажной воздушной массы с Тихого океана. Именно при та-

кой ситуации отмечались зимние грозы в Петропавловске-Камчатском в марте и декабре 1980 г.

Среднее годовое число дней с грозой в Паратунке меньше 0,5, максимальное - 3. Средняя продолжительность гроз не превышает 0,5 ч в день с грозой и 0,2 ч в целом за год. В годовом ходе грозы наиболее вероятны в августе (среднее число дней с грозой равно 0,2), а в суточном ходе - от 15 до 18 ч [Кондратюк, 1983].

Град – явление еще более редкое, чем грозы. Среднее годовое число дней с градом составляет 0,2, наибольшее - 3. Выпадение града отмечалось в период с августа по ноябрь, причем в августе и ноябре град наблюдался лишь однажды. В сентябре и октябре среднее число дней с градом меньше 0,1, а максимальное равно 2.

В летне-осенний период в районе обсерватории наблюдается туман. Его эффект проявляется в падении электропроводности воздуха и, соответственно, повышении уровня электрического поля. В тумане проводимость уменьшается в результате присоединения лёгких ионов к частицам тумана, так что подвижность ионов уменьшается. Пример сильного тумана 31 мая 2010 г. приведён на Рисунке 20. О времени развития тумана можно судить по графику повышения влажности воздуха (3). В это время электропроводность воздуха вызванная отрицательными (1) и положительными ионами (2) бухтообразно уменьшилась.

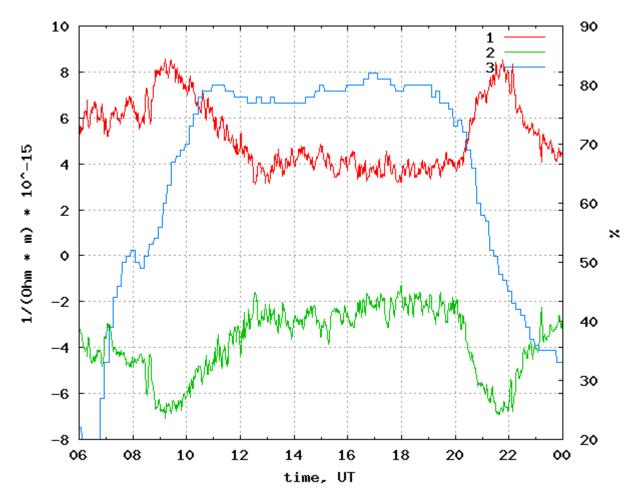


Рисунок 20 — Эффект тумана 31 мая 2010 г. 1 - электропроводность воздуха вызванная отрицательными, и 2 - положительными с множителем (-1) ионами, левая шкала, 3 - влажность воздуха, правая шкала.

Поведение электропроводности можно объяснить следующей формулой:

$$\lambda = e \sum (n_{i+} u_{i+} + n_{i-} u_{i-}) , \qquad (2)$$

где n - концентрация частиц, u - их подвижность. Молекулы воды присоединяются к заряженным ионам аэрозолей, что резко уменьшает их подвижность. Уменьшение подвижности приводит к уменьшению электропроводности.

В сложных климатических условиях п/о Камчатка необходима одновременная регистрация метеорологических параметров, воздействующих на динамические характеристики электрического поля.

1.4 Эффект молнии

Несмотря на длительный период изучения грозовых процессов, научный интерес к этим явлениям не утихает. Принятая в настоящее время идея, что электростатический заряд Земли формируется планетарной грозовой активностью, требует более детального рассмотрения переходных процессов разряда и заряда в облаке. В работе исследован процесс отклика в напряженности электрического поля в приземном воздухе и акустической эмиссии на одиночный молниевый разряд.

Особенностью электрического состояния атмосферы на Камчатке является малое количество гроз. По данным Гидромета с 1937 по 1982 годы (45 лет) было зарегистрировано всего 22 грозы [Кондратюк, 1983]. 2 октября 2008 года произошло уникальное для данной местности событие. В 17 часов 46 минут местного времени (4:46 UT) произошел единичный молниевый разряд, который не сопровождался осадками. Этот разряд наблюдался автором визуально. В электрическом поле и акустической эмиссии на обсерватории «Паратунка» обнаружена реакция на этот разряд. Как известно наибольшим возмущающим фактором электрического состояния приземного воздуха являются атмосферные осадки. В работе [Особенности атмосферных ..., 2005] было показано, что во время осадков уровень шумов электрического сигнала возрастает на два порядка, по сравнению с измерениями в условиях «хорошей погоды» В данном случае динамику изменения электрического состояния атмосферы можно было проследить в невозмущенном осадками виде. Более того, облачность в этот день была не сплошная, а в виде отдельных больших кучевых облаков. Влияние электроимпульсов на активность акустической эмиссии исследовалось ранее на образцах геоматериалов [Соболев, 2003; Acoustic emission ..., 2004; Zacupin et al., 2006], и в горных породах при воздействии импульсами, излучаемыми магнитогидродинамическим (МГД) генератором [Тарасов, 1997; Воздействие мощных ..., 1999; Tarasov, 2004]. В данной работе впервые обнаружено повышение уровня эмиссии в диапазоне 6.5-11 к Γ ц в осадочных породах при воздействии молниевого разряда.

Методы измерения электрического поля описаны в п. 3.1. Данные измерений основного прибора используются с учетом коэффициента редукции. Регистрация акустической эмиссии производилась гидроакустическим приемником (гидрофоном) с чувствительностью вместе со встроенным предусилителем порядка сотен мВ/Па, установленным в искусственном водоеме размерностью 1х1х1 м на расстоянии 54 метра от датчика электрического поля. Сигнал с гидрофона после оцифровки 16-разрядным АЦП с частотой дискретизации 44100 Гц записывается на жесткий диск персонального компьютера. Далее производится фильтрация по диапазонам частот: 0.1-10, 30-60, 70-200, 200-600, 600-2000, 2000-6500, 6500-11000 Гц цифровыми фильтрами с высокой добротностью, исключающие взаимное влияние каналов, детектирование и накопление с временным окном 4 с [Купцов, 2005]. Этот ряд данных используется в дальнейших исследованиях. Анализируемой величиной является суммарное за 4 с акустическое давление Ps по каждому частотному каналу. Проведенными исследованиями установлено, что под действием деформаций порядка $\sim 10^{-7}$ [Deformation and acoustic ..., 2007] наблюдается повышение активности эмиссии в диапазоне частот первых килогерц, что соответствует масштабам источников 10⁻¹ - 1 м [Купцов и др., 2005].

Контроль за метеорологическими параметрами (температурой и влажностью воздуха, атмосферным давлением, уровнем осадков) проводится цифровой метеостанцией WS-2000. H, D, Z компоненты магнитного поля измерялись феррозондовым магнитометром FRG с точностью 0.01 нТ и частотой дискретизации 1 с. Синхронизация времени проводилась с помощью GPS-приемника.

2 октября 2008 года в районе обсерватории была переменная облачность с большими кучевыми облаками. Осадков с 14ч. до 19ч. LT (UT+13h) не наблюдалось. Из одного облака, которое, по-видимому, проходило над каким-то выступом или вершиной сопки произошел единичный молниевый разряд. Повторных разрядов затем не последовало. Молниевый разряд вызвал резкое падение значе-

ния градиента потенциала электрического поля с 80 В/м до величины -21 В/м, затем плавное восстановление значения до 70 В/м (Рисунок 21).

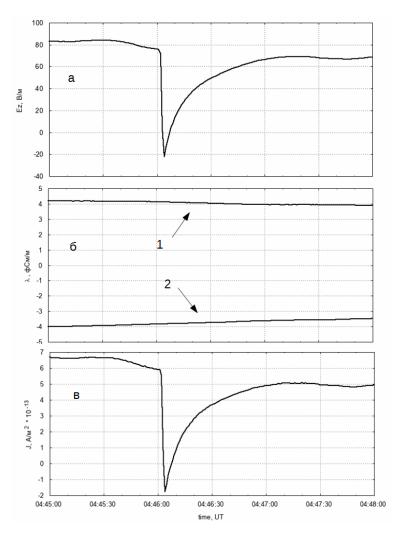


Рисунок 21 — Графики поведения полей во время молниевого разряда 2 октября 2008 г. а) градиента потенциала электрического поля приземного слоя воздуха; б) электропроводности воздуха, вызванная 1 - отрицательными ионами и 2 - положительными ионами с множителем (-1); в) плотности тока проводимости.

Электропроводность воздуха изменялась слабо и составляла величину около 4 φ См/м. Плотность тока проводимости изменялась от величины $-2 \cdot 10^{-13}$ до $+6 \cdot 10^{-13}$ А/м². Она вычислялась так: мы измеряли две величины. Одна - электропроводность воздуха, другая - напряженность электрического поля. Перемножая эти две величины, получаем плотность тока проводимости. Изменение магнитного поля во всех трех компонентах феррозондовым магнитометром, которое

измерялось с интервалом 1 с, во время разряда молнии зафиксировано не было [Smirnov, 2012].

Во время грозы с каждым ударом молнии исходит заряд 20-30 кулон [Feynman et al., 1964]. Восстановление происходит по такому же закону, как и восстановление заряда конденсатора. При этом можно наблюдать внезапный спад поля, а затем экспоненциальный возврат к первоначальному его значению с характерной временной постоянной порядка 5 сек, немного меняющейся от случая к случаю [Feynman et al., 1964]. При изучении разрядов земля — облако форма восстановления заряда принято считать по формуле, предложенной Каземиром [Чалмерс, 1974]:

$$E_z(t) = E_z 1 \cdot \exp(-t/\tau) + E_z 2 \cdot (1 - \exp(-t/\tau))$$
, (3)

где Ez(t) – градиент потенциала электрического поля, Ez1 – его значение сразу после разряда молнии, Ez2 – значение после восстановления. Она определяет время релаксации атмосферы вблизи поверхности земли. По методу наименьших квадратов со средней квадратичной ошибкой 0.2 были определены численные значения в этой формуле: Ez1 = -19.5 B/m; Ez2 = 69.1 B/m.

Таким образом, заряд в облаке восстановился с характерным временем релаксации $\tau=17$ с. Мало того, τ нужно рассматривать в контексте глобальной системы земля - облако - ионосфера, потому что здесь затрагиваются процессы перераспределения наведенных зарядов от грозового облака на поверхности земли, перераспределением зарядов в самом облаке, изменением токовой системы земля - ионосфера. Ez1 соответствует поверхностной плотности заряда на земле. Если представить систему облако — земля как конденсатор, то в таком представлении τ имеет физический смысл как $\tau=RC$, где R — сопротивление, а C — ёмкость конденсатора. Время релаксации τ обуславливается также подвижностью ионов. Обычно ее среднее значение в регионах с высокой грозовой активностью примерно 7 с [Чалмерс, 1974].

График измеренных значений и аппроксимирующей кривой (кривая релаксации) представлен на Рисунке 22. Подобная зависимость с такими же времен-

ными масштабами была получена в модели квазистационарной электрической структуре грозового облака, основанной на точном решении уравнения тонкостатики в плоскослоистой атмосфере с экспоненциальным ходом проводимости в работе [Davydenko et al.,, 2009]. Таким образом, было получено хорошее соответствие модели и наблюдений. Тот факт, что падение напряженности, в отличие от модели, произошел не до нулевого значения, а до величины -21 В/м указывает на ненулевую величину поверхностной плотности заряда.

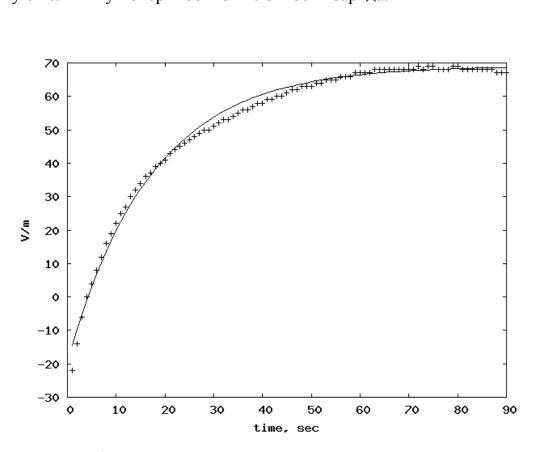


Рисунок 22 — График восстановления поля после разряда молнии (крестики) и аппроксимация формулой (3) (линия).

Одновременно с электрическим полем на разряд молнии наблюдался отклик акустической эмиссии (Рисунок 23). При этом сигнал непосредственно от разряда зарегистрирован в самом высокочастотном диапазоне 6.5 - 11 кГц (Рисунок 23, эллипс 1), а последующая звуковая волна – по всем каналам (Рисунок 23, эллипс 2). По разнице прихода этих сигналов 24 с, с учетом скорости звука в воздухе 330 м/с, расстояние до источника составило ~ 8 км.

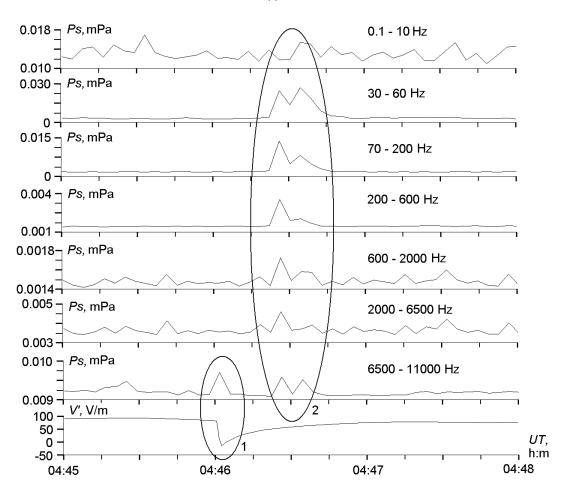


Рисунок 23 — Графики акустической эмиссии в семи частотных диапазонах и градиента потенциала напряжённости электрического поля приземного слоя воздуха (внизу) во время молниевого разряда 2 октября 2008 г.

Влияние электроимпульсов на активность акустической эмиссии ранее исследовалось как в лабораторных экспериментах на образцах геоматериалов [Соболев, 2003; Acoustic emission ..., 2004; Zacupin et al., 2006], так и в натурных условиях [Тарасов, 1997; Воздействие мощных ..., 1999; Tarasov, 2004]. В работе [Соболев, 2003] представлены результаты экспериментов, проведенных на искусственных образцах породы. Показано, что при механическом сжатии образцов в диапазоне значений нагрузок близких к разрушающим с одновременным воздействием электроимпульсами возникает приращение энергии акустической эмиссии на величину ~10⁻³ Дж. Следует отметить, что эффект наблюдается только при воздействии импульсами прямоугольной формы. Суммарная энергия пакета составила ~10⁻³ Дж, т.е. в экспериментах величина приложенной электриче-

ской энергии оказалось соизмеримой с величиной высвободившейся акустической. Подобные результаты были получены и на образцах горных пород с различными пьезоэлектрическими свойствами [Acoustic emission ..., 2004; Zacupin et al., 2006]. Таким образом, на сериях лабораторных экспериментов был выявлен эффект прироста активности акустической эмиссии, стимулированной внешними электромагнитными полями. Характерные масштабы источников эмиссии в этом случае составляли порядки 10^{-3} - 10^{-2} м. Подобные результаты были получены и в натурных условиях при использовании МГД-генераторов на Гармском и Бишкекском полигонах [Тарасов, 1997; Воздействие мощных ..., 1999; Тагаsov, 2004]. Было установлено, что после пусков электрических импульсов от МГД-генератора заметно увеличивается слабая (с энергетическим классом $K \le 6$) сейсмичность на территории полигонов. Характерные масштабы источников в этих экспериментах увеличились по сравнению с лабораторными до порядков 10^3 м.

Отклик акустической эмиссии, зарегистрированный в этом эксперименте, соответствует результатам лабораторных и натурных испытаний. При этом, так как отклик наблюдается только в диапазоне $6.5\text{-}11~\text{к}\Gamma\text{ц}$, можно говорить о характерных размерах источников $\sim 10^{-1}~\text{m}$. Оценка производилась с учетом скорости распространения сигнала в осадочных породах по формуле Бруна [Brune, 1970]. Это на 1 порядок больше лабораторных испытаний и на 4 порядка меньше натурных, на таких масштабах ранее подобные эффекты не наблюдались. В данном случае впервые повышение активности акустической эмиссии при воздействии электрическим импульсом выявлено в натурных условиях при молниевом разряде. Энергия молниевого разряда исследователями оценивается в 10^9 - 10^{10} Дж по работе [Rakov, 2003]. Предполагая, что падение энергии с расстоянием происходит по закону $1/r^2$, можно считать ее величину в точке наблюдения не менее 10^1 Дж. Это на 4 порядка превышает величину суммарной электрической энергии, при которой наблюдалось повышение активности акустической эмиссии в лабораторных экспериментах [Соболев, 2003]. В общем случае закон убысии в лабораторных экспериментах [Соболев, 2003]. В общем случае закон убы-

вания энергии молнии с расстоянием не подчиняется закону $1/r^2$. Падение энергии при удалении от места разряда облако-земля происходит по более сложному закону, исследование которого требует дополнительных инструментальных наблюдений. В данном случае мы применили закон $1/r^2$ для оценки величин, не вдаваясь в подробности этого процесса. Изучение закономерности падения электрической энергии токов в земле (теллурических токов) с расстоянием от молниего разряда выходит за рамки данной работы.

Таким образом, в результате наблюдения одиночного молниевого разряда в условиях отсутствия осадков были обнаружены следующие эффекты:

Резкое падение величины градиента потенциала электрического поля в воздухе на высоте 3м 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 зарегистрирован отклик акустической эмиссии в диапазоне частот 6.5 - 11 кГц.

1.5 Эффекты грозовой активности в спектрах мощности электрического поля

Эффекты грозовой активности в характеристиках различных геофизических параметров экспериментально были обнаружены сравнительно давно (см. ссылки в работе [Pierce, 1966]). Для их интерпретации впервые был предложен механизм, согласно которому колебания воздуха на вершине грозового облака способны генерировать атмосферные волны в полосе внутренних гравитационных волн (ВГВ). Эти волны могут распространяться как вверх, так и вниз. В настоящее время накоплен достаточно большой объем результатов их регистраций в вариациях атмосферного давления, ветров, напряженности квазистатического электрического поля в приземной атмосфере, колебаний электронной концен-

трации на различных высотах ионосферы и т. д. Ограничимся некоторыми из этих результатов. Так, например, использование радаров на сверхвысоких частотах позволило исследовать высотные профили ветра непосредственно вблизи грозовых источников [Larsen, 1982]. Более многочисленные наземные эксперименты по измерению атмосферного давления микробарографами с различными полосами пропускания по частоте показали следующее распределение энергии колебаний в спектрах давления: в полосе периодов 0.5 – 15 мин выделены колебания с максимальной интенсивностью на периодах T = 3.3 - 5.3; 5.5 - 10.7 мин [Balachandran, 1980]. В более широкой полосе периодов (20 – 180 мин) выделены устойчивые максимумы с Т ~ 20 - 40 мин и реже с Т ~ 2 ч. [Грачев и др., 1988]. При прохождении грозового облака над пунктом регистрации обнаружена волновая активность в полосе периодов 5 мин – 3 ч. По мере приближения его в спектре давления возрастают колебания с Т ~ 10 - 20 мин и, по мере его удаления, максимум в спектре смещается на Т ~ 60 - 120 мин. [Данилов, 1991]. Измерены также вариации атмосферного давления и напряженности квазистатического электрического поля в приземной атмосфере в инфразвуковом диапазоне атмосферных волн на частоте Брента-Вяйсяля (Т ~ 5 мин.) [Рыбнов, 2007].

Вариации атмосферного давления в приземной атмосфере, как известно [Попов, 2008], вызывают вариации плотности объемного заряда, определяющие вариации напряженности квазистатического электрического поля. Естественно, в
спектрах мощности напряженности электрического поля должны были бы наблюдаться колебания, периоды которых близко совпадали бы с периодами атмосферных волн: тепловые приливные с Т ~ 4, 8, 16, 24 ч, ВГВ в полосе периодов
0.5 - 3 ч и волны планетарного масштаба (Т > 24 ч). Эти колебания действительно были выделены в спектрах мощности квазистатического электрического поля, измеренного на Камчатке в обс. «Паратунка» [Вариации спектров ..., 2003;
Эффекты геомагнитных возмущений ..., 2009]. Более того, было обнаружено
усиление ВГВ перед сильными землетрясениями (ЗТ), подтверждая тем самым
известный факт, что землетрясения также являются их источником. На фоне

временных вариаций напряженности квазистатического электрического поля как в условиях хорошей погоды, так и при сейсмической активности отчетливо проявляются и имеют характерный вид эффекты грозовой активности.

Представляло интерес оценить относительный вклад грозовых источников в спектры мощности квазистатического электрического поля в широкой полосе периодов от 5 мин до 3 ч. Нижняя граница спектрального диапазона выбрана с учетом того, что она близко совпадает с частотой Брента-Вяйсяля, а верхняя граница примыкает к гармонике суточного теплового прилива. Для этой цели был выполнен спектральный анализ записей Ez – компоненты электрического поля в периоды: сентябрь 1999 г., август – октябрь 2002 г., полученных в обс. «Паратунка» ИКИР ДВО РАН. Проведём сравнение этих результатов с эффектами землетрясений на фоне условий хорошей погоды.

В качестве примера на Рисунке 24 слева приведены характерные суточные вариации напряженности Еz – компоненты электрического поля, измеренного с дискретностью по времени 1 мин для условий хорошей погоды (03.09.1999 г.), с наличием аномалии накануне землетрясения с магнитудой М ~ 6 (17.09.1999 г.) и в день с грозой (14.09.1999 г.). Видно, что в условиях хорошей погоды в течение суток, за исключением возрастания в интервале времени 20-22 UT, связанного с местным восходом Солнца [Kasemir, 1956], вариации напряженности поля имеют место вблизи уровня 100 В/м со слабым понижением после местного полудня, вызванного солнечной радиацией. Ночью наблюдается почти плоский спокойный уровень напряженности поля. 17 сентября накануне землетрясения происходит продолжительное бухтообразное понижение напряженности поля до – 500 В/м с наложенными колебаниями. Этот эффект приписывается увеличению плотности объемного заряда в приземной атмосфере за счет выхода подпочвенного радона в результате интенсивного процесса образования трещин в коре Земли. Наблюдаемое увеличение напряженности электрического поля перед аномалией, по-видимому, может быть связано с ростом температуры воздуха

и с конвекцией объемных зарядов, приводящей к понижению проводимости приземной атмосферы.

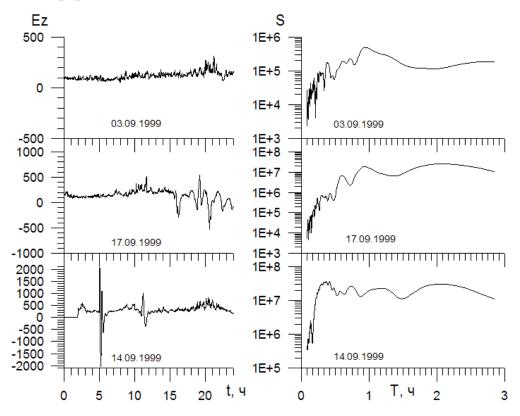


Рисунок 24 — Слева примеры суточных вариаций градиента потенциала электрического поля в условиях хорошей погоды (03.09), накануне землетрясения (17.09) и во время грозы (14.09). Справа спектральная плотность мощности этих вариаций в полосе периодов 5 мин — 3 ч.

Во время грозы 14 сентября в течение короткого интервала времени наблюдаются резкие знакопеременные колебания напряженности поля, достигающие величины \pm 2000 В/м. Справа на рисунке приведены кривые спектральной плотности мощности в логарифмическом масштабе (далее для краткости, спектры мощности) в полосе периодов 5 мин - 3 ч. Из рисунка следует, что интенсивность спектра изменяется в очень широких пределах (от $3 \cdot 10^4$ до $6 \cdot 10^6$ для фона и от $3 \cdot 10^5$ до $4 \cdot 10^7$ при грозовой активности). Поэтому в дальнейшем они будут рассмотрены отдельно в полосах периодов 5 – 30 мин и 0.5 - 3 ч и в линейном масштабе. Для оценки спектральной плотности мощности использован метод модифицированных периодограмм [Welch, 1967]. Для выделения максимального

периода Т ~ 3 ч длительность отдельного сегмента выбрана равной 8 ч с перекрытием в 4 ч, так что общее количество индивидуальных спектров равно 5. На всех последующих рисунках в статье приводится средняя их величина спектральной плотности мощности $S(B^2/M^2\Gamma \mathfrak{q})$ на интервале времени 24 ч. Рассмотрим отдельно результаты анализа записей в различные периоды наблюдений.

Сентябрь 1999г. Общая картина суточных вариаций уровня осадков, атмосферного давления и параметров Dst, Kp, Ez показана на Рисунке 25. Для определения среднего спектрального фона выбраны дни при слабой геомагнитной активности, в отсутствии осадков, гроз и землетрясений. Таких дней в этом месяце оказалось тринадцать, пять дней (10, 13-15, 19) с грозами и три дня с аномалиями перед землетрясениями (6, 17, 18).

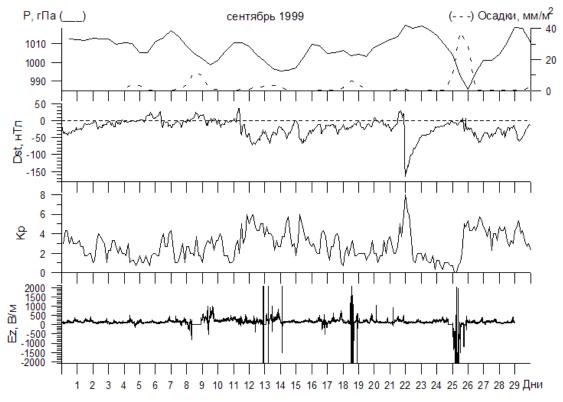


Рисунок 25 — Суточные вариации градиента потенциала электрического поля, атмосферного давления, осадков, Dst - вариаций и Kp — индекса в сентябре 1999 г.

Средний фоновый спектр мощности показан на Рисунке 26 вместе со среднеквадратичными отклонениями (СКО) (вертикальные отрезки прямых), на котором приведен также спектр мощности аномальной вариации электрического поля 18 сентября. В этом месяце 6 и 17 сентября произошли 3Т с магнитудой менее 6 (см. Таблицу 2).

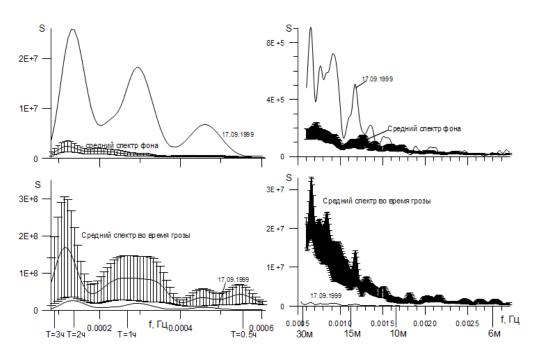


Рисунок 26 — Средний фоновый спектр мощности поля с СКО в полосах периодов 0.5 - 3 ч и 5 - 30 мин и спектральная кривая накануне землетрясений 17 сентября 1999г. в (верхний фрагмент рисунка). Внизу средний спектр мощности поля с СКО во время гроз.

Спектры их предвестников оказались внутри границ СКО фонового спектра и на рисунке не приводятся. Ниже на рисунке показаны средние спектры с СКО для дней с грозами вместе с кривой S для 18 сентября. Анализ всей совокупности кривых показывает следующее: в полосе периодов 0.5 – 3 ч характер спектров во время гроз и в предвестниках ЗТ 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.

Таблица 2 - Землетрясения вблизи п-ова Камчатка, зарегистрированные в сентябре 1999 г. и августе-октябре 2002 г.

N	Дата	Время,	$\varphi^0 N$	$\lambda^0 E$	D,км	Ml	R, км
		UT					
1	06.09.1999 г.	15:04:53	52.09	159.13	40	5.0	180
2	17.09.1999 г.	10:50:18	54.60	161.97	48	4.8	303
3	18.09.1999 г.	21:28:34	50.99	157.84	40	6.0	225
4	09.08.2002 г.	23:31:44	53.28	161.90	22	4.8	245
5	10.08.2002 г.	09:50:55	53.37	161.73	11	4.8	236
6	20.08.2002 г.	05:43:22	50.39	156.93	23	5.3	301
7	22.08.2002 г.	09:38:58	54.88	164.30	40	5.3	448
8	25.08.2002 г.	17:11:57	51.14	153.20	477	5.1	400
9	27.09.2002 г.	14:21:32	52.06	159.77	19	5.3	144
10	03.10.2002 г.	15:56:41	54.48	161.68	36	5.3	281
11	08.10.2002 г.	09:18:55	52.72	160.30	33	5.5	140
12	09.10.2002 г.	13:49:54	50.98	157.87	40	5.0	223
13	13.10.2002 г.	00:55:18	55.48	162.85	40	4.8	408
14	16.10.2002 г.	10:12:22	51.66	157.68	108	5.9	151
15	18.10.2002 г.	10:19:51	51.90	159.24	48	4.8	137
16	20.10.2002 г.	01:34:48	52.85	160.37	26	5.3	143
17	23.10.2002 г.	06:31:01	52.22	158.87	45	5.1	93
18	29.10.2002 г.	15:04:54	52.98	160.42	37	5.0	145

Примечание - D – глубина 3T; r – расстояние от эпицентра до обс. «Паратунка».

Август 2002г. Общая картина суточных вариаций атмосферного давления, Dst – и Kp – индексов, а также напряженности Ez- компоненты электрического поля приведена на Рисунке 27. Из рисунка следует, что грозы имели место 3, 19, 20, 31 августа, а аномалии поля перед 3T – 8, 9, 25-26 августа.

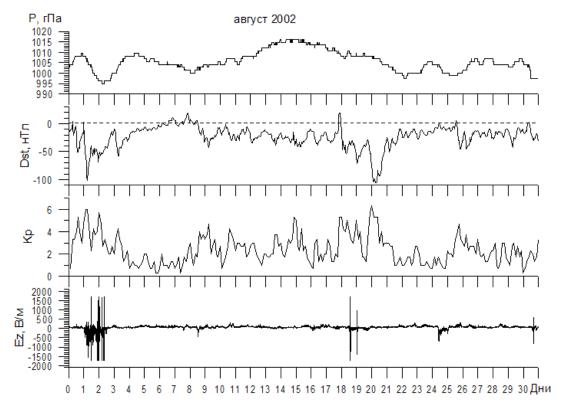


Рисунок 27 – То же, что и на Рисунке 25, но для августа 2002 г.

В качестве фона были выбраны 10 дней без аномалий в поведении напряженности электрического поля. Средний спектр мощности в эти дни вместе с СКО в двух диапазонах периодов показан на верхних фрагментах Рисунка 28. Как на верхних, так и на нижних фрагментах рисунка для сравнения приведен средний спектр мощности с СКО для предвестников 3Т, который более, чем на порядок по величине превышает уровень фона. В спектре мощности предвестников 3Т наблюдались максимумы убывающей интенсивности на периодах 1.9; 1 ч; 44, 37, 30 мин с резким скачком интенсивности на периодах 11-28 мин. Спектры мощности грозовых аномалий электрического поля сильно различаются между собой по положению максимумов и их интенсивности, поэтому ниже на рисунке приведены индивидуальные кривые для четырех дней. Спектр мощности 19 августа показан редкой штриховой кривой с правой осью ординат. Левая ось ординат на рисунке относится к жирной линии (20 августа) и плотной штриховой линии (31 августа). Видно, что максимумы в их спектрах мощности приходятся на периоды Т ~ 1 и 2.8 ч; 35 и 54 мин с интенсивностью порядка ин-

тенсивности предвестников 3Т. Их вклад в спектр мощности в полосе 5-30 мин существенно ниже предвестников и на рисунке не приводится. Гроза 19 августа была на два порядка по интенсивности выше других кривых с ярко выраженным максимумом в спектре на периоде $T \sim 1$ ч. В полосе периодов 5-30 мин преобладают максимумы на периодах $T \sim 8-10$ и 15-25 мин.

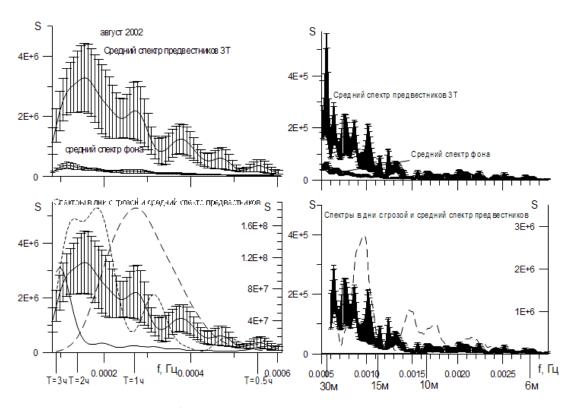


Рисунок 28 — Средний фоновый спектр мощности поля и средний спектр мощности поля предвестников землетрясений с их СКО (верхний фрагмент рисунка). Внизу спектры мощности поля индивидуальных гроз: редкая штриховая кривая с правой осью ординат — 19 августа 2002 г.; жирная линия (20 августа) и плотная штриховая линия (31 августа) с левой осью ординат.

Сентябрь 2002г. Общая картина суточных кривых атмосферного давления, Dst— и Kp- индексов, а также Ez — компоненты поля приведена на Рисунке 29. В этом месяце было 8 дней с грозовой активностью и одна слабая аномалия электрического поля 23 сентября накануне 3T (см. Таблицу 2). Индивидуальный спектр за этот день, наложенный на средний фоновый спектр, лежит в пределах

его СКО (Рисунок 30). В фоновом спектре мощности выделяются максимумы убывающей интенсивности с периодами Т ~ 1.85 и 1.15 ч, а также 30 и 40 мин.

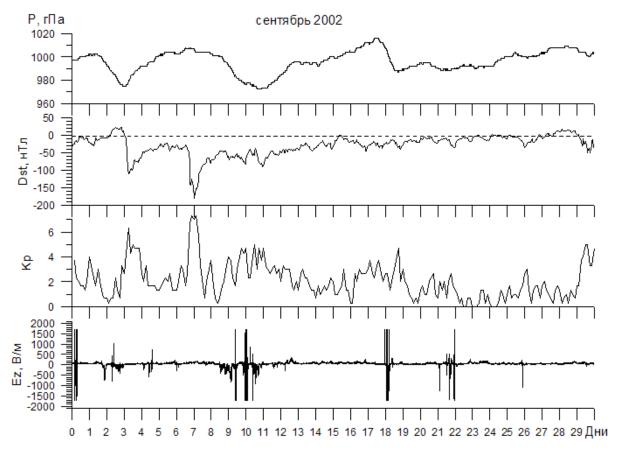


Рисунок 29 – То же, что и на Рисунке 25, но для сентября 2002 г.

В спектре мощности предвестника также присутствуют максимумы убывающей интенсивности на Т ~ 1.7, 1.1 ч и 50.5 мин, т.е. близко совпадающие с фоновым спектром мощности. В полосе периодов 5 - 30 мин в фоновом спектре выделены максимумы на Т ~ 13, 15, 30 мин. На нижних кривых рисунка приведены средние спектры мощности при грозах для знакопеременных вариаций Едкомпоненты поля (а) и однополярных понижений напряженности поля (б). Кривая (б) на порядок по величине ниже кривой (а), но оба эти спектра почти на два порядка превышают фоновый уровень в полосе периодов 0.5 - 3 ч и почти на три порядка (кривая а) в полосе периодов 5 – 30 мин. В спектре знакопеременных вариаций поля наблюдаются максимумы убывающей интенсивности на Т ~ 2,1 ч и 37 - 47 мин. На кривой (б) - максимумы на Т ~ 2 ч, 56 и 35 мин. Для знакопеременных вариаций поля в полосе периодов 5 - 30 мин наблюдается целая серия

максимумов с $T \sim 6.5$, 7.25, 8.3, 9.3, 12-15 и 20 мин. Вклад однополярных разрядов в этот диапазон периодов значительно ниже (на два порядка по величине интенсивности).

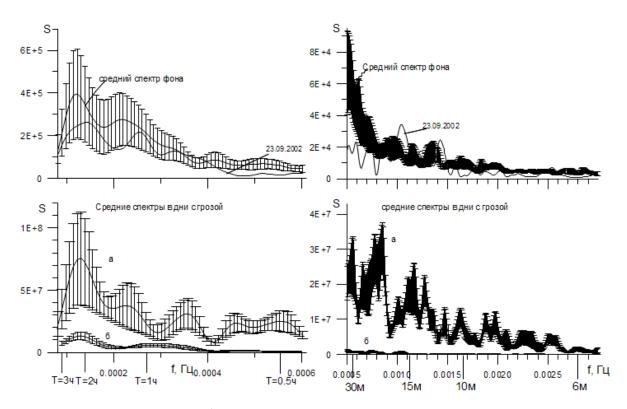


Рисунок 30 — Средний фоновый спектр мощности поля с СКО и спектр мощности поля предвестника землетрясения (верхний фрагмент рисунка. Внизу средние спектры мощности при грозах знакопеременных вариаций Ez — компоненты поля (а) и однополярных понижений напряженности поля (б).

Октябрь 2002г. На Рисунке 31 приведен обзорный график метеорологических и геомагнитных параметров вместе с вариациями напряженности Еz – компоненты поля. Как видно в Таблице 2, в этом месяце произошло землетрясение с магнитудой М = 5.9 (16 октября). Более слабым землетрясениям 3 и 8 октября предшествовали сильные знакопеременные вариации напряженности поля, сопровождаемые обильными осадками. В этом месяце наблюдались также и сильные отрицательные бухтообразные понижения напряженности до значительной величины - минус 1500 В/м и более. Эти вариации по времени совпадали с обильными осадками (Рисунок 31) и с молниевой активностью [Электрические и

электромагнитные ..., 2006]. В период с 3 по 20 октября было выделено 8 дней хорошей погоды в качестве фона.

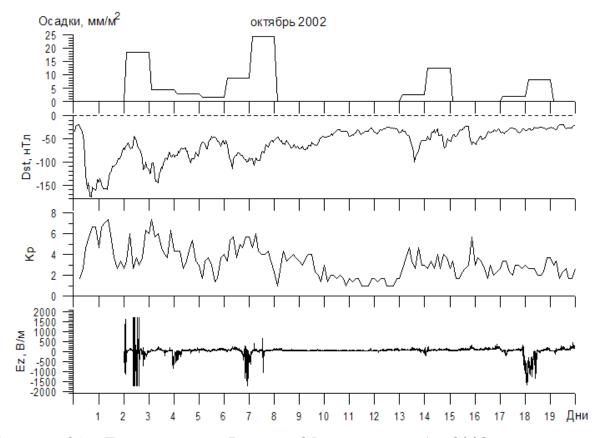


Рисунок 31 – То же, что и на Рисунке 25, но для октября 2002 г.

Их средняя кривая спектра мощности вместе с СКО нанесена на Рисунке 32 вместе с графиком S предвестника 3Т 16 октября. В спектре этой кривой выделены максимумы убывающей интенсивности с частотой на периодах Т ~ 2 ч, 56 и 33 мин в полосе 0.5-3 ч и на Т ~ 14, 20, и 26 мин в полосе 5-30 мин. Интенсивность последних более чем на порядок по величине ниже интенсивности максимумов в полосе 0.5 - 3 ч. В фоновом спектре в полосе 5-30 мин выделены максимумы на Т ~ 28 и 15-20 мин с интенсивностью чуть ниже спектра предвестника ЗТ, в котором также присутствуют максимумы на Т ~ 14, 20, 26 мин. Ситуация с характеристиками спектров мощности в дни с грозами (3, 4, 7, 18 октября) более сложная. Индивидуальные спектры сильно различаются между собой как по положению максимумов, так и по их интенсивности. Поэтому внизу на рисунке они приведены отдельно для каждого дня: кривая 1 соответствует 7 октября,

кривая 2 - 4 октября, кривая 3 — 18 октября и кривая 4 — 3 октября. За исключением кривой 1 максимумы кривых 2 и 3 приходятся на периоды $T \sim 2.8$, 1.8 и 1 ч и интенсивности их близки между собой и одного порядка с кривой 14 октября. В полосе периодов 5 - 30 мин на кривой 2 выделены максимумы на $T \sim 24$, 17, 10-14 мин, а на кривой 4 — на $T \sim 30$, 25, 18 мин с интенсивностью порядка по величине и чуть ниже спектра 14 октября.

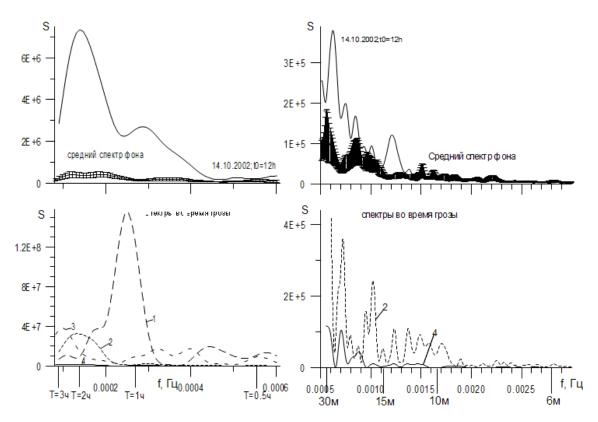


Рисунок 32 — Средний фоновый спектр мощности поля с СКО и спектр мощности поля предвестника землетрясения (верхний фрагмент рисунка). Внизу спектры мощности поля индивидуальных гроз: кривые 1; 2; 3;4 соответствуют 7; 4; 18 и 3 октября.

Вся совокупность представленных в работе результатов за четыре месяца регистрации напряженности Ez — компоненты квазистатического электрического поля в приземной атмосфере Камчатки показала следующее:

В условиях хорошей погоды (в отсутствие гроз и землетрясений) в фоновом спектре вариаций напряженности поля в полосе периодов 5 мин - 3 ч присутст-

вует широкий спектр колебаний с максимумами на периодах Т ~ 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. Поведение фонового спектра в полосе периодов 0.5 - 3 ч близко совпадает с результатами работы [Вариации спектров ..., 2003], а в полосе периодов 5 – 30 мин - со спектрами микропульсаций атмосферного давления [Голицын, 1964].

Накануне землетрясений при наличии аномалий в суточных вариациях Еz – 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 СКО фоновых спектров.

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 3T, и на два порядка и более - в полосе периодов 5-30 мин. Спектральное распределение мощности электрического поля в этой полосе близко совпадает с результатами прямых измерений спектров давления, указанными в работах во введении этого параграфа. Усиление интенсивности внутренних гравитационных волн в полосе периодов 0.5-3 ч ранее было обнаружено в суточных вариациях атмосферных радиошумов на частоте 4.65 кГц во время тропических циклонов [Динамика грозовой активности ..., 2006]. Наблюдаемый большой разброс спектральных кривых при грозах не позволил получить среднестатистические их характеристики. По-видимому, это может быть связано с развитием ин-

дивидуальных конвективных ячеек внутри грозовых облаков. Этот процесс был детально исследован в работе [Krehbill, 1986].

1.6 Атмосферные шумы, наложенные на суточные вариации напряженности электрического поля

Статистический анализ аномалий в виде бухтообразных понижений величины Еz, наблюдаемых в обсерватории Паратунка, показал, что вероятность предсказания землетрясения по аномалии Еz в пределах 24 ч. до него составляет 36% [Смирнов, 2005а; Smirnov, 2008]. Такой низкий процент возникновения землетрясений вслед за аномалией поля указывает на то, что наличие аномалии в электрическом поле не является достаточным условием для появления землетрясения. По-видимому, должны существовать еще какие-то дополнительные условия, либо не все наблюдаемые аномалии в электрическом поле в приземной атмосфере связаны с процессами в земной коре.

В спектрах мощности суточных вариаций напряженности поля Еz 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. В частности, было 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 слу-

чайный шум, наложенный на суточные вариации напряженности квазистатического электрического поля [Особенности атмосферных ..., 2005].

Метод выделения атмосферных шумов, наложенных на суточные вариации напряженности электрического поля Еz, показан на примере записи 29 сентября 1999 г. (Рисунок 33). На кривой 1 показан это суточный ход Ez с дискретностью 1 мин. Кривая 2 — это суточный ход минус среднее за эти сутки значение и дополнение нулями ряд, чтобы количество точек было равно 2048. Кривая 3 — пример отфильтрованного графика в полосе периодов 0,5 - 3,0 ч. По данным кривой 2 был построен спектр мощности и представлен на графике 4 сплошной линией, левая шкала. Так как значения спектра на высоких частотах уменьшаются на 1 — 2 порядка, пунктирной линией была построена эта часть спектра, правая шкала ординат. На фрагменте 5 слева представлен спектр на больших периодах, а справа — на периодах в диапазоне ВГВ, шкала абсцисс в часах. Кривая на фрагменте 5 справа - это шумовой сигнал, наложенный на суточный ход поля (кривая 1).

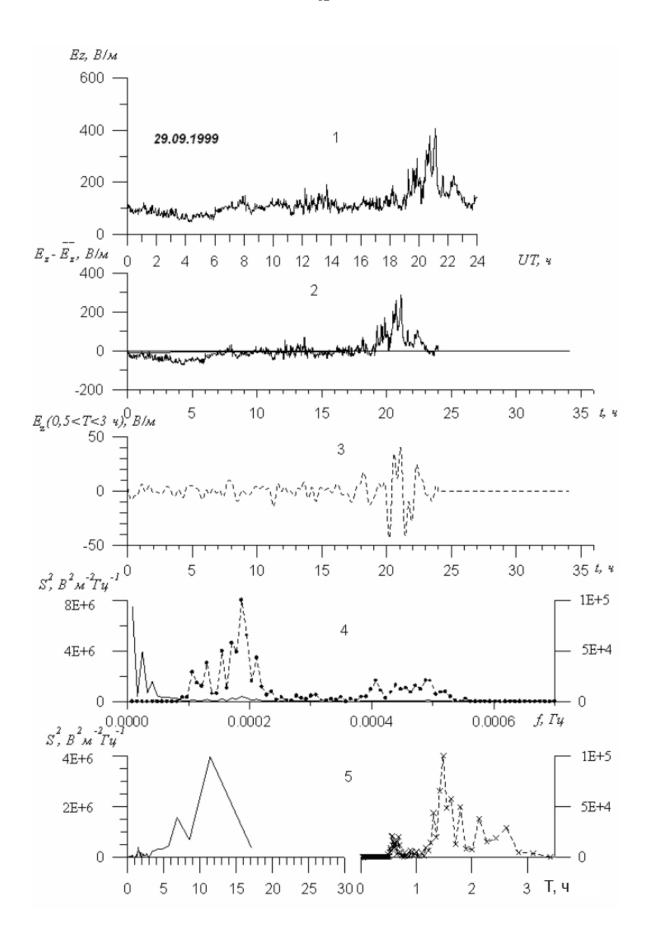


Рисунок 33 – Метод спектральной обработки суточных вариаций.

Для дальнейшего детального анализа выделенного атмосферного шума были сначала использованы данные непрерывных регистраций напряженности Ехкомпоненты поля в период сентябрь - октябрь 1999 г.

Рассмотрим временные вариации интенсивности атмосферных шумов. В качестве иллюстрации на Рисунке 34 приведен метод анализа. На Рисунке 34а показаны экстремальные в течение часа значения всплесков шумов, включая дни с осадками и помехами, а на Рисунке 34б – значения квадратного корня из среднечасовых значений квадрата напряженности поля (вертикальные отрезки – СКВзначения). Здесь же на Рисунке 34в представлены данные об осадках за сентябрь 1999 г. В дни с осадками экстремальные значения шума достигали величин от плюс 800 В/м до минус 1000 В/м, во много раз превышая уровень атмосферного шума в нормальных метеорологических условиях. На Рисунке 35 а и б показаны соответствующие кривые после исключения из исходных экспериментальных данных дней с осадками и помехами (это светлые пробелы на рисунках). На кривых отчетливо выделяется всплеск 17 сентября, превышающий по интенсивности фоновые значения в (2-10) раз. Как известно [Вариации различных ..., 2002], 17 сентября 1999 г. была зарегистрирована отрицательная аномалия Ехкомпоненты поля накануне землетрясения 18 сентября с магнитудой М = 6,0 (см. Таблицу 2). Из рисунка видно, что всплески экстремальных значений атмосферного шума, наложенного на эту аномалию, достигали величины (минус 200 плюс 150) В/м, а $\sqrt{E^2}$ ~120 В/м при глубине аномалии порядка 400 В/м [Вариации различных ..., 2002].

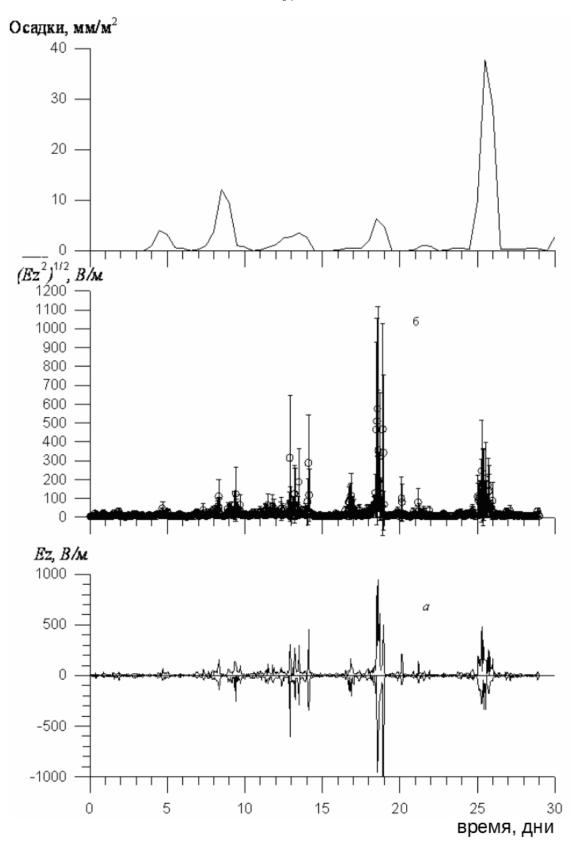


Рисунок 34 — Данные за сентябрь 1999г. Прямоугольный фильтр Т=0.5-3.ч, а — экстремальные значения Еz за 1 час; б - корень из среднего значения квадрата амплитуды (интервал усреднения = 1 час); в — вариации уровня осадков измеренные дважды в сутки.

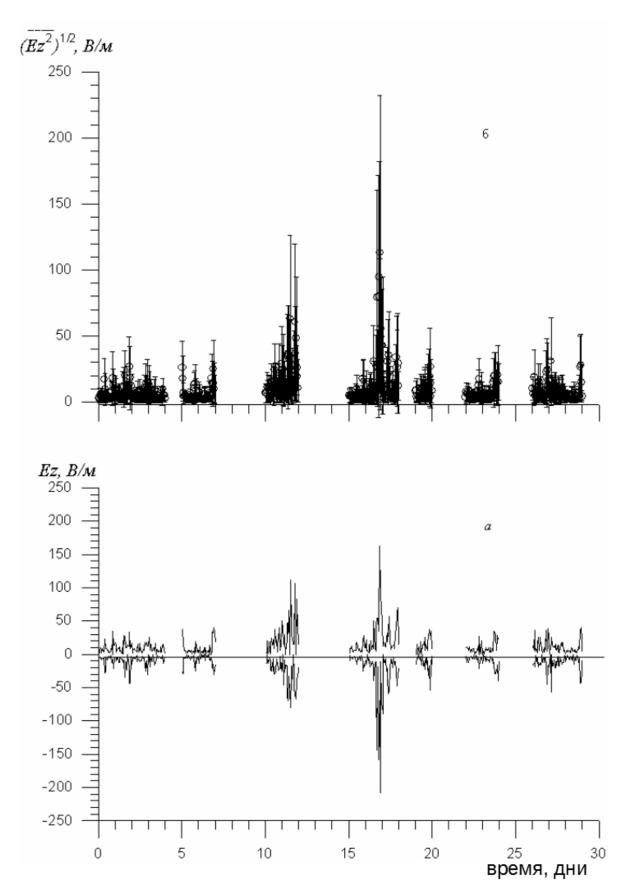


Рисунок 35 – Данные сентября 1999, исключая дни с осадками и помехой.

Далее были определены кривые распределения величин экстремальных всплесков и значений $\sqrt{E^2}$. Был выбран дискретный шаг по интенсивности в 10 В/м. Соответствующие гистограммы их распределения приведены на Рисунке 36 а и б. Как видно, в распределении этих величин в нормальных метеорологических условиях преобладают соответственно значения в 10-20 В/м, более интенсивные шумовые всплески встречаются крайне редко, а всплески шума 17 сентября порядка (минус 200 плюс 150) В/м и $\sqrt{E^2}$ ~120 В/м лежат на «хвосте» распределения.

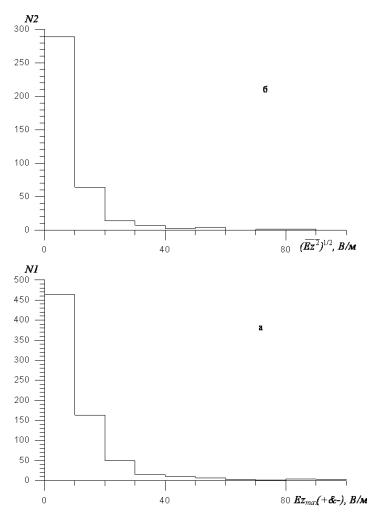


Рисунок 36 — Гистограммы распределения с шагом 10 B/m, а — величин экстремальных значений; 6 — значений $\sqrt{\overline{E^2}}$.

Результаты спектральной обработки атмосферных шумов в полосе периодов 0,5-3,0 ч за сентябрь приведены на Рисунке 37 для нормальных метеорологических условий (кривая 1), для дней с осадками (кривая 2) и для 17 сентября (кри-

вая 3). Сравнение кривых 1 и 3 показывает, 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 (кривая 2) 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 приведенных выше параметров атмосферных шумов наблюдались также и в октябре.

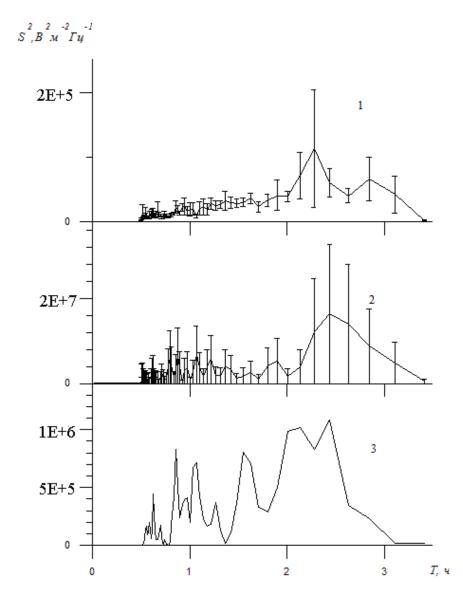


Рисунок 37 — Спектры атмосферных шумов в сентябре 1999: для нормальных метеорологических условий (1), дней с осадками (2) и 17 сентября (3).

Таким образом было показано, что 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. Спектральная плотность мощности в аномалии электрического поля, сопровождаемой землетрясением, на одинполтора порядка по величине превышает соответствующие фоновые значения, но на прядок ниже при наличии осадков.

1.6 Сезонный и вековой тренд электрического поля

Длительные непрерывные обсерваторские аэроэлектрические наблюдения важны для изучения динамики атмосферных процессов. Сегодня считается общепризнанным, что регулярные обсерваторские аэроэлектрические наблюдения рассматриваются как важная составляющая комплексного глобального мониторинга состояния окружающей среды. Сравнение результатов аэроэлектрических наблюдений на дистанционно разнесенных обсерваториях представляет интерес как с точки зрения исследования источников формирования глобальной электрической цепи, так и репрезентативности обсерваторских данных.

Для детального изучения динамики электрического состояния приземной атмосферы необходим непрерывный обсерваторский мониторинг, проводимый синхронно на нескольких дистанционно разнесенных станциях. В работе рассмотрены результаты наблюдений, проведенных на двух среднеширотных обсерваториях Евразийского континента.

Обсерватория «Паратунка» ИКИР ДВО РАН ($\phi = 52^{\circ}58,3'$ N, $\lambda = 158^{\circ}14,9'$ E) расположена на юге Камчатского полуострова к западу от Авачинской бухты в

долине, защищенной грядами невысоких сопок на высоте 50 м над уровнем моря. Методы измерения электрического поля описаны в Главе 2.

Непрерывная цифровая регистрация напряженности электрического поля проводится в геофизической обсерватории «Борок» ($\phi = 58^{\circ}4'$ N, $\lambda = 38^{\circ}14'$ E) с 1998 г. в условиях, характеризующихся отсутствием промышленных и других антропогенных загрязнений, а также низким фоновым уровнем электромагнитных помех. В качестве датчика главной компоненты и вариаций напряженности атмосферного электрического поля используется электростатический флюксметр, расположенный на плоской двухэтажного крыше. Общая высота установки 10 м. Датчик работает в непрерывном обсерваторском режиме наблюдений [Информационные ..., 2003].

На Рисунке 38 приведены графики напряженности аэроэлектрического поля, построенные по результатам наблюдений среднеширотных обсерваторий «Борок» и «Паратунка» с 1997 по 2009 гг. Результаты обработки показали, что ряд среднемесячных значений обсерватории «Борок» стационарен относительно среднего и характеризуется наличием широкого спектра амплитудно-временных вариаций. Общий ход поля обсерватории «Паратунка» характеризуется линейным трендом. Более детальный анализ многолетнего тренда на обс. «Паратунка» (Рисунок 39) показал, что в период с января 1997 г. по февраль 2000 г. наблюдался положительный тренд, а с марта 2000 г. по 2017 г. - отрицательный.

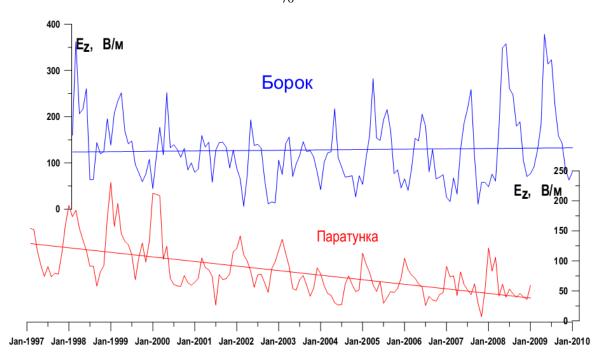


Рисунок 38 — Многолетние изменения аэроэлектрического поля по данным двух обсерваторий.

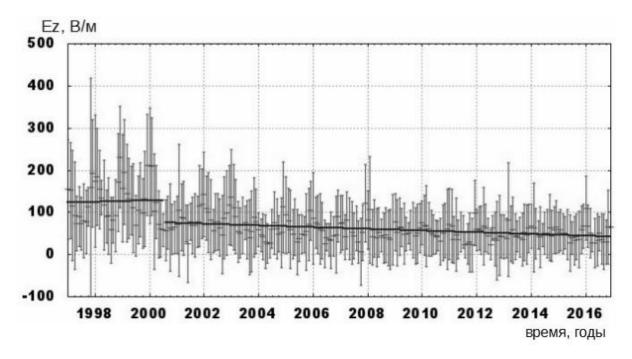


Рисунок 39 — Среднемесячные значения, дисперсия и годовой тренд Ez на обсерватории «Паратунка».

Такой «изломанный» тренд аэроэлектрического поля может быть обусловлен изменением сейсмического режима в активном геодинамическом регионе на-

блюдений. На Рисунке 40 приведен график значений M/lg(R) для близлежащих землетрясений, где М-магнитуда, R-расстояние до обсерватории. По формуле Добровольского R = $10^{0.43\text{M}}$ [Dobrovolsky et al., 1979; Добровольский, 2009] если величина M/lg(R) больше 2.4, то точка наблюдений находится в зоне подготовки землетрясения. Наиболее значимыми по этому показателю были землетрясения: 31 октября 1998г. (ϕ = 52.95° N, λ = 158.26° E, M=5.5, 2.6 км от обсерватории), M/lg(R) = 13.3 и 29 июля 2000г. (ϕ = 52.81° N, λ = 157.96° E, M=5.4, 26.5 км от обсерватории), M/lg(R) = 3.8. Подготовка этих двух землетрясений сопровождалось положительным трендом электрического поля с угловым коэффициентом 0.14 и среднеквадратичным отклонением (СКО), равным 307 В/м. Можно предположить, что в это время изменился режим выхода радиоактивных газов. После июля 2000 г. тренд стал отрицательным, с угловым коэффициентом -0.16, СКО равным 293 В/м.

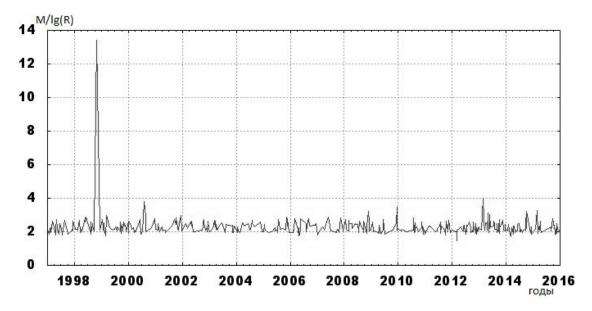


Рисунок $40 - \Gamma$ рафик значений M/lg(R) для сильных сейсмических событий в окрестностях обс. «Паратунка». М — магнитуда, R - расстояние от эпицентра до обсерватории.

В стационарных условиях концентрация ионов определяется уравнением баланса:

$$\frac{dn_{1,2}}{dt} = 0 = q - \alpha n_{1,2}^2 - \beta n_{1,2} N , \qquad (4)$$

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

В стационарных случаях, исключая влияние глобальной электрической цепи, конвективных и турбулентных процессов, можно считать связь напряженности электрического поля с электропроводностью воздуха как $E \sim \lambda^{-1}$. В свою очередь, λ , согласно уравнению (2), пропорционально концентрации (n) и подвижности ионов (u). Концентрация $n \sim q^{1/2}$, отсюда напряженность поля связана с коэффициентом интенсивности ионообразования при определенных условиях как $E \sim q^{-1/2}$.

Другим существенным фактором, влияющим на тренд, является примеси тяжелых аэрозолей в воздухе. Это может быть связано с как антропогенными факторами, так и с вулканической активностью Камчатки. На Камчатке расположено 29 действующих вулканов, и пепловые выбросы вулканов могут в значительной степени определяють величину электрического поля в приземном слое [Смирнов, 2008; Smirnov, 2011]. Напряженность электрического поля связана с концентрацией тяжелых аэрозолей как Е ~ N (см. п. 3.1).

Рассмотрим сезонный ход. 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. Распределение среднемесячных значений напряженности поля и уровня снега в окрестности обсерватории «Паратунка» приведены на Рисунке 41. Снег в районе наблюдений лежит около 7 месяцев (с ноября по конец мая). Здесь также действует зависимость напряженности поля от интенсивности ионообразования $E \sim q^{-1/2}$.

Кроме того, есть зависимость от температуры. Рассмотрим, как подвижность легких ионов $u_{1,2}$ зависит от давления P(z) и температуры воздуха T(z) [Брикар, 1969]:

$$u_{1,2} = u_{1,2}^0 \frac{P(0)}{P(z)} \frac{T(z)}{T(0)}, \tag{5}$$

где P(0) = 1013 мбар, а $T(0) = 273^0$ K.

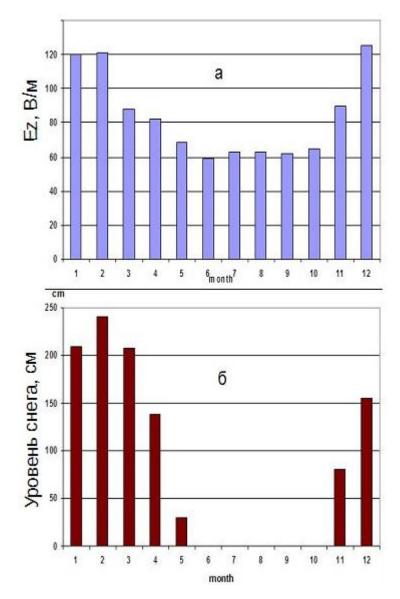


Рисунок 41 – Гистограммы распределения по месяцам средних значений Ez (1997 - 2009 гг.) (а) и уровня снега (2008 - 2009 гг.) (б) на обс. «Паратунка».

В свою очередь, λ , согласно уравнению (2), пропорциональна подвижности ионов (u). Таким образом, через подвижность ионов напряженность поля связана с температурой воздуха пропорцией $E \sim T^{-1}$.

На Рисунке 42 представлен сезонный ход величины Еz, построенный по среднемесячным величинам напряженности поля за период наблюдений 1998 -

2009 гг. по данным обсерватории «Борок» и за период 1997-2008 гг. - для обсерватории «Паратунка». Следует особо подчеркнуть, что по наблюдениям обсерватории «Борок» апрельские средние значения напряженности поля достоверно превосходят таковые для других месяцев [Анисимов, 2008].

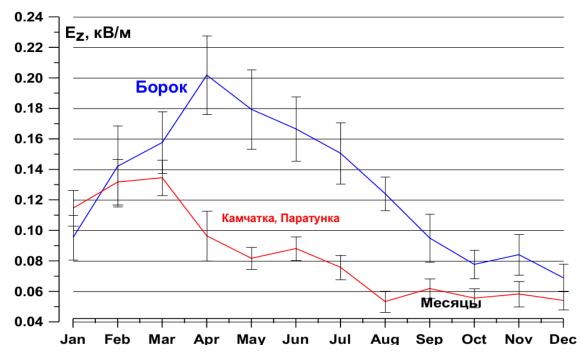


Рисунок 42 — Сезонный ход напряженности аэроэлектрического поля Еz по данным ГО «Борок» ИФЗ РАН за 1998 — 2009 гг. и ГО «Паратунка» за 1997 — 2008 гг. Вертикальные линии — стандартная ошибка среднего значения.

Таким образом, по результатам непрерывных обсерваторских наблюдений проведен сравнительный анализ квазистационарного состояния и динамики атмосферного электрического поля двух среднеширотных обсерваторий: «Борок» ИФЗ РАН ($\phi = 58^{\circ}4'$ N, $\lambda = 38^{\circ}14'$ E) и «Паратунка» ИКИР ДВО РАН ($\phi = 52^{\circ}58,3'$ N, $\lambda = 158^{\circ}14,9'$ E) за 1998 - 2009 гг. Обнаружен значимый линейный тренд среднемесячных значений напряженности поля Ez в Паратунке, находящейся в активном геодинамическом регионе на Камчатке. Выявлено, что вариации среднемесячных значений Ez по наземным наблюдениям обсерватории «Борок» за исследуемый период стационарны относительно среднего.

ГЛАВА 2. АППАРАТНОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИЗМЕРЕНИЙ

2.1 Основные инструменты наблюдений

Датчик «Поле-2», разработанный в Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейково [Имянитов, 1957], является измерительным преобразователем и в комплекте с показывающими или регистрирующими приборами предназначен для измерения напряженности электрического поля атмосферы. Он зарегистрирован в Госстандарте (сертификат RU.E.34.001. А № 7136 от 10.03.2004г.) и занесен в Госреестр 13.09.2005г. № 2941-2005.

«Поле-2» установлен на полигоне в 200 м от административного здания (Рисунок 43) на высоте 3 м. Площадка вокруг него расчищена от деревьев в радиусе 12 м. Конструкция установки датчика такова, что уровенные поверхности напряженности электрического поля в точке измерения параллельны поверхности земли (Рисунок 44). Решетчатая конструкция позволяет аэроионам свободно подниматься от поверхности земли к точке измерения.



Рисунок 43 – Установка прибора Поле-2 на полигоне.

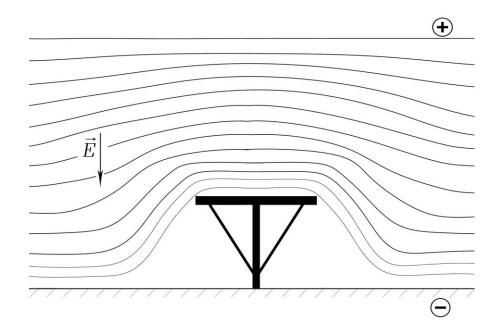


Рисунок 44 — Уровенные поверхности напряженности электрического поля в окрестности установки датчика.

Высота установки датчика определялась максимальным уровнем снега зимой. Уровень снега зимой в районе измерений электрического поля достигает 2.7 м (Рисунок 45).

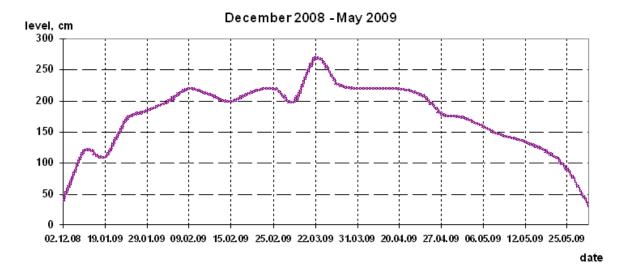


Рисунок 45 – Уровень снега зимой 2008-2009 гг.

Технические характеристики «Поле-2» приведены в Таблице 3.

Таблица 3 - Требования к измерительному прибору градиента потенциала электрического поля атмосферы в напряжение постоянного тока «Поле-2»

Наименование характеристики	Номинальное значение
Диапазоны измерений градиента потенциала электрического	
поля атмосферы, В/м (регулируемые)	
первый	± 200
второй	± 2000
Предел допускаемого среднеквадратического отклонения слу-	
чайной составляющей основной относительной погрешности	
измеряемого значения, %	$\pm (5 + 2V'_m/V')$
Дополнительная относительная погрешность измеряемого зна-	
чения при изменении температуры окружающей среды от -50	
до 50 $^{0}{\rm C}$ для датчика и от 10 до 40 $^{0}{\rm C}$ — для центрального бло-	
ка, $\%$ на каждые 10^{0} С	$\pm (0.5 + 0.8 \text{ V'}_{\text{m}} / \text{V'})$
Дополнительная относительная погрешность измеряемого зна-	
чения при изменении напряжения питания от 187 до 242 В при	
частоте (50±1) Гц, % не более	$\pm (1 + 1.5 \text{ V'}_{\text{m}} / \text{V'})$
Предел допускаемой систематической составляющей погреш-	
ности измерений, %	±10
Выходное напряжение, В	±1
Выходное сопротивление, Ом не более	100
Время установления показаний на уровне 0.97, с не более	100±30
	1±0.3
	0.05±0.02
Напряжение питания при частоте (50±1) Гц, В	220 (-33;+22)
Потребляемая мощность от сети, ВА не более	30
Рабочие условия эксплуатации датчика: температура воздуха,	
⁰ C	От -50 до 50
влажность, %	до 100
давление, гПа	от 680 до 1080
атмосферные явления	любые
Рабочие условия эксплуатации центрального блока:	
температура воздуха, ⁰ С	От 10 до 40
влажность, %	до 80
давление, гПа	от 680 до 1080

Примечание - V'_m — значение первого или второго предела измерений; V' — текущее значение градиента потенциала электрического поля атмосферы.

Принцип действия измерительного прибора напряженности электрического поля. На обсерватории используется прибор типа электростатического флюксметра. Напряженность электрического поля преобразуется в электрический ток с помощью ротационного электростатического генератора, в основу действия которого положено явление электростатической индукции. Поток электростатической индукции измеряемого поля наводит электрический заряд на измерительной пластине. Модулятор — экранирующая пластина периодически экранирует измерительную пластину в электрическом поле, благодаря чему значение наведенного заряда периодически меняется. Натекающий и стекающий с пластины заряд создает ток в цепи нагрузки. Амплитуда этого тока пропорциональна напряженности измеряемого электрического поля, частоте вращения модулирующей пластины и площади измерительной пластины, а фаза определяется направлением электрического поля у поверхности измерительной пластины.

Принцип действия измерительного прибора электропроводности воздуха. Измерение электрической проводимости воздуха производится методом аспирационного конденсатора. Через аспирационные измерительные конденсаторы (АИК) с помощью турбовентилятора протягивается воздух, электрическая проводимость которого изверяется. Под влиянием напряжения, приложенного между обкладками конденсатора, на собирающую (внутреннюю) обкладку течет электрический ток. Значение этого тока пропорционально значению полярной электрической проводимости. Электрический ток, протекая по измерительному резистору электрометрического усилителя (ЭМУ), преобразуется в напряжение, которое с выхода ЭМУ поступает на фильтры низкой частоты и далее на выходной разъем. Технические характеристики приведены в Таблице 4.

Измерение напряженности поля проводятся по двум каналам Первый канал имеет разрешение 0,25~B/m и динамический диапазон $\pm 200~\text{B/m}$. Второй канал имеет разрешение 2,5~B/m и динамический диапазон $\pm 2000~\text{B/m}$. При обработке измерений учитывались показания обоих каналов.

Таблица 4 - Требования к измерительному прибору полярных электрических проводимостей постоянного тока «Электропроводность-2»

Наименование характеристики	Номинальное значение
Диапазон измерений электрических проводимостей воздуха, фСм/м:	
нижний предел	22
верхний предел (регулируемый)	от 22 до 50
Предел допускаемого среднеквадратического отклонения	
случайной составляющей основной	
относительной погрешности измеряемого значения, %	$\pm (5+2\lambda_{pm}/\lambda)^*$
Дополнительная относительная погрешность измеряемого значения при изме-	
нении температуры окружающей среды от -50 до 50 $^{0}\mathrm{C}$ для датчика и от 10 до	$\pm (1+2\lambda_{pm}/\lambda)$
$40~^{0}{\rm C}$ — для центрального блока, % на каждые $10^{0}{\rm C}$	
Дополнительная относительная погрешность измеряемого значения при изме-	
нении напряжения питания от 187 до 242 В при частоте (50 \pm 1) Γ ц, % не более	$\pm (1+5\lambda_{\rm pm}/\lambda)$
Выходное напряжение, В	±1
Выходное сопротивление, Ом не более	100
Время установления показаний на уровне 0.97, с не более	120
Скорость потока воздуха во входной трубе каждого аспирационного измери-	
тельного конденсатора датчика, м/с не менее	2
Напряжение питания при частоте (50±1)Гц, В	220 (-33;+22)
Потребляемая мощность от сети, ВА не более	100
Рабочие условия эксплуатации датчика: температура воздуха, ⁰ C	От -50 до 50
влажность, %	до 100
давление, гПа	от 680 до 1080
атмосферные явления	любые
Рабочие условия эксплуатации центрального блока:	
температура воздуха, ⁰ С	От 10 до 40
влажность, %	до 80
давление, гПа	от 680 до 1080
Удаленность датчика от центрального блока, устанавливаемого в помещении,	
м не более	15
	<u> </u>

Примечание - λ_{pm} — значение предела измерений; λ — текущее значение полярной электрической проводимости воздуха.

Методика проведения измерений соответствует руководящему документу Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова РД 52.04.168-2001 [Руководящий документ, 2002].

2.2 Информационный комплекс наблюдений

Разработанный информационный комплекс (ИК) предназначен для решения широкого круга задач, в частности:

- для исследования влияния солнечной активности на процессы в верхней и нижней атмосфере и их связи с геодинамикой земной коры в Камчатском регионе;
- для решения задачи выделения краткосрочных и оперативных электромагнитных предвестников землетрясений.

Высокое качество проводимых наблюдений, обработка и представление данных позволило принять участие в следующих программах:

- в программе Российской академии наук «Электронная Земля»;
- в международной программе «Прогноз космической погоды»;
- в международной программе «210-й магнитный меридиан»;
- в формировании базы данных по солнечно-земной физике SPIDR;
- в международной программе MAGDAS.

В основе ИК геофизической обсерватории лежит комплексный подход проводимых наблюдений [Специализированный ..., 1998], который формирует банк данных по следующим видам наблюдений:

- вариации геомагнитного поля (H, D, Z –компоненты магнитного поля;
- вертикальной составляющей электрического поля в приземном слое ("Поле-2" либо "Градиент");
 - низкочастотных баровариаций в атмосфере (МБ-11).
- электропроводности приземного слоя атмосферы с помощью установки "Электропроводность-2";
- волновых возмущений в атмосфере в диапазоне частот 0,003-0,5 Гц (микробарограф K-304);

- эманации подпочвенного радона.
- регистрация метеопараметров.

Схема подключения каналов показана на Рисунке 46.

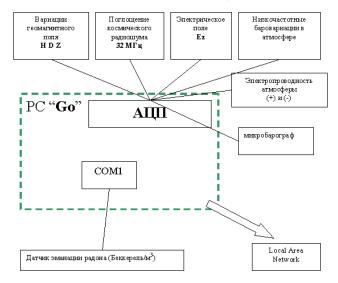


Рисунок 46 — Схема подключения датчиков на компьютер с аналогоцифровым преобразователем (АЦП).

Для преобразования аналогового сигнала с прибора была использована плата аналого-цифрового преобразования (АЦП) L-card 154 (12-bit, 16 каналов). Автором была написана программа Go32 (Рисунок 47) [Смирнов, 1997]. Цифровые измерения ведутся с 1996 г.

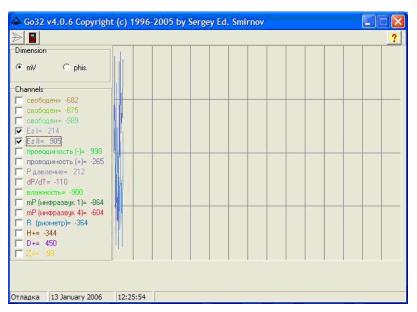


Рисунок 47 – Программа аналого-цифрового преобразования.

Требование к программе АЦП. Программа АЦП должна быть максимально устойчивой. Она должна функционировать в случаях перебоев в работе локальной сети, работе серверов и связи с Интернетом. Соответственно программа не должна что-либо передавать, наоборот, должна предоставлять доступ к своим файлам другим компьютерам в локальной сети. Эта программа должна была быть не ресурсоемкой и функционировать на компьютерах с 486-ми процессорами. Программа пишет данные в два файла. Первый – это файл данных с простой структурой. Одна запись представляет собой строку, где указана дата, время и через знак табуляции значения каналов в условных единицах АЦП. Каждые сутки формируется отдельный файл, время отчитывается по Гринвичу. Второй – файл "semafor", где каждый раз перезаписывается одно число, означающее количество записей (блоков) в текущем файле данных. Введение второго файла позволяет в программах мониторинга избавиться от циклов, где признаком выхода является достижение конца файла, а вместо этого использовать предел количества блоков. Это решение является более устойчивым, так как файл с данными в это время может быть открыт и в него могут дописываться данные.

Контроль за проводимыми измерениями осуществляется с автоматизированным рабочим местом (APM) разработчика, а доступ к данным возможен с APM экспертов и обработчиков. Эти рабочие места развертываются в локальной вычислительной сети. Локальная вычислительная сеть института имеет следующие компоненты:

- Интернет-сервер, включающий:
 - Web-сервер;
 - FTP-сервер;
 - NTP-server;
 - почтовый сервер (postfix), SMTP, POP3.
- файловый сервер (SAMBA);
- Специализированные станции формирования и накопления данных;
- АРМ разработчика-администратора;

- АРМы экспертов;
- Рабочие места обработчиков.

Организация потоков данных в локальной вычислительной сети показана на Рисунке 48. Она позволяет мониторить проводимые измерения, публиковать в реальном времени графики в сети Интернет, отправлять и получать данные по электронной почте.

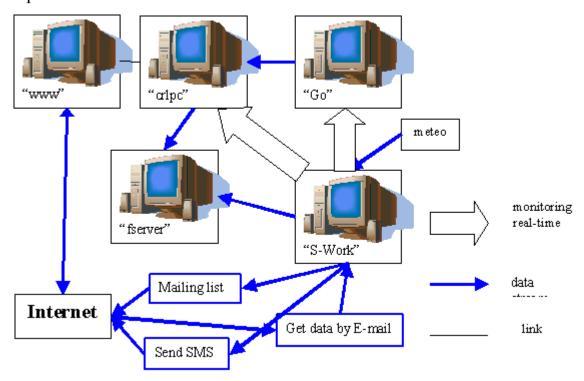


Рисунок 48 – Организация потоков данных в локальной сети.

Для того чтобы информационный комплекс смог выполнять свою задачу должен быть создан целый ряд программ:

- программы оповещения в случае сбоев работы каждого измерительного комплекса;
 - программы контроля корректности измерений для каждого комплекса;
 - программы выборки данных для каждого вида измерений;
 - программы визуального представления данных;
 - программа коррекции измеренных данных (линейная регрессия);
 - программа коррекции временных сдвигов.

Для этих программ разработаны универсальные классы, и был выбран единый формат представления данных.

Форматы данных. Для комплексности информационной системы необходимо иметь единый формат представления данных. Это позволяет разрабатывать универсальные программы обслуживания информационного комплекса. Формат данных должен быть таким, чтобы данные легко можно было вставить в распространённые пакеты программ: Exel, MathCAD, MatLab, SciLab, GnuPlot, POS, «Мезозавр». Помимо этого на такой формат должны легко накладываться программы-фильтры, функционирующие в операционных системах Windows, Unix. Наиболее оптимальным вариантом является текстовой формат. Работа с таким форматом не требует высокой квалификации программистов и может быть освоена обычным пользователем.

Для устойчивого функционирования информационного комплекса необходимо было выбрать правильную программную архитектуру. Основные требования к разрабатываемым программам:

- инвариантность относительно операционной системы (MS Windows, Linux);
 - работа с множеством форматов данных;
 - частота дискретизации данных 1 Гц и менее;
- если позволяет задача, то ее выполнение поручается отдельной программе с ведением собственного файла-отчета;
 - программы запускаются без участия оператора из планировщика.

По возможности запуск, выполнение и завершение работы происходит без участия человека-оператора.

Методы классов возвращают булевы переменные. Таким образом, обработка ошибок может иметь компактный код:

```
if(!ChD.RunDist(d_start,d_end,dan))
{
   ChD.SetLastError(sError);
```

```
check = false;
}
```

При этом сообщение об ошибках транслируется в главную программу.

Для запуска сервера времени в ИКИР используется программа tardis (http://www.kaska.demon.co.uk/) (Рисунок 49). Эта программа берет данные с GPS-приемника через СОМ-порт по протоколу NMEA. Она устанавливает время компьютера по GPS и запускает NTP-сервер.

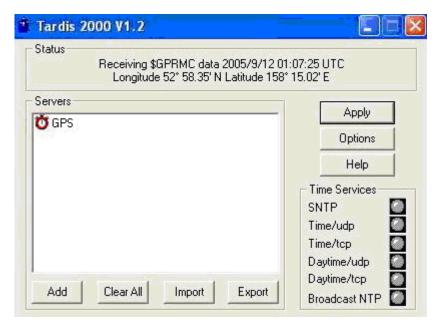


Рисунок 49 – Программа сервера времени

Также были созданы программы удаленного мониторинга проводимых измерений в локальной вычислительной сети. Магнитные и другие геофизические измерения ведутся в технических павильонах, удаленных от основных зданий институтов. При включении компьютеров, стоящих на измерениях, в локальную вычислительную сеть появляется возможность удаленного мониторинга и контроля измерений. По ряду причин, технологии удаленного управления компьютером, подобных VNC, не подходят для этого. Возникает необходимость создать программы, которые непосредственно имеют доступ к данным, получаемым на удаленном компьютере. Эти программы могли бы как непосредственно визуализировать данные, так и проводить первоначальный анализ проводимых измере-

ний. Программы запускаются на рабочих компьютерах пользователей, которые включены в локальную сеть и имеют доступ к общей папке на компьютере измерения. Учитывая существующий парк вычислительной техники, таких программ было создано две. Программа "Strag 2" (Рисунок 50) не ресурсоемка, отображает в скользящем окне 15 минутный интервал измерений. Может отображать данные в условных единицах АЦП и в физических величинах. Коэффициенты преобразований берутся из отдельного файла. Программа реагирует на ошибки перебоев в сети, остановки измерений, сбоев в формате данных, корректно обрабатывает переход к следующему файлу при смене даты. В конфигурационном файле устанавливается интервал обновления информации. Была разработана иерархическая система классов [Смирнов, 2005б]. В проекте участвовало 5 файлов с различными классами.

Программа "Strag 3" (Рисунок 51) более требовательна к ресурсам. В графическом окне отображается весь файл суточных данных текущих измерений. Графики автомасштабируются, любой выбранный фрагмент может быть увеличен. Каждая точка имеет собственную метку времени. Коды цветов графиков в обеих программах задаются в отдельном файле.

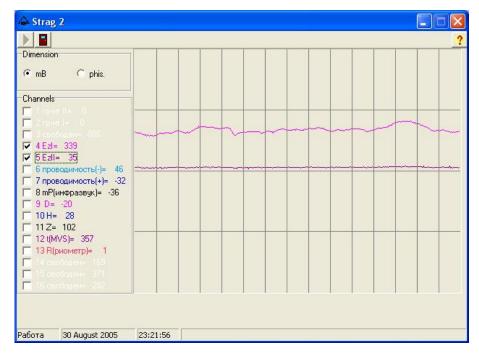


Рисунок 50 – Программа "Strag 2"

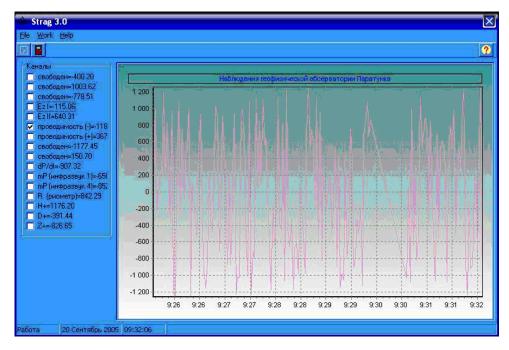


Рисунок 51 – Программа "Strag 3"

Технология 2-х файловой системы записи первичных данных позволило создать очень простую, но эффективную утилиту. При запуске она помещает иконку в «трей». Через заданный интервал времени она проверяет, изменилось ли значение количества блоков в файле "semafor". Если не изменилось, т.е измерения остановились, она реагирует следующим образом: появляется всплывающее окно с соответствующей надписью; отправляется электронное письмо на заданный адрес; используя шлюз e-mail → sms, отправляет sms-сообщение на заданный номер мобильного телефона.

Эти программы предназначены для работы геофизических обсерваторий Камчатки, Магадана, Хабаровска, Сахалина. Программы интегрированы в программно-аппаратный комплекс обсерватории «Паратунка» [Смирнов, 2005в].

Разработка программного обеспечения обсерваторских измерений проходила в три этапа: 1) получение качественных первичных данных обсерваторских наблюдений [Смирнов, 1997]; 2) организация автоматизированного сбора и хранения данных; оперативного представления данных; средства по минимизации потерь данных [Вuzevich, 2003]; 3) комплексная обработка данных и моделиро-

вание процессов [Мандрикова, 2008; Мандрикова и др., 2012; Шереметьева, 2007].

Для комплекса были разработаны следующие классы [Смирнов, 2005в]:

- class SDate класс календарной даты;
- class MGDData базовый класс геофизических данных;
- class MGDReadData класс чтения данных из файлов;
- class MGDWriteData класс записи данных в файлы;
- class ChoiseData класс выборки данных;

На измеряемые геофизические поля большое влияние оказывают метеофакторы. Поэтому, помимо измерений метеодатчиков, ежедневно из Интернета скачиваются фотографии (Рисунок 52) Камчатки со спутника GOES-9 и создается архив для ретроспективного анализа. Таким образом можно судить об общей метеорологической обстановке в регионе.

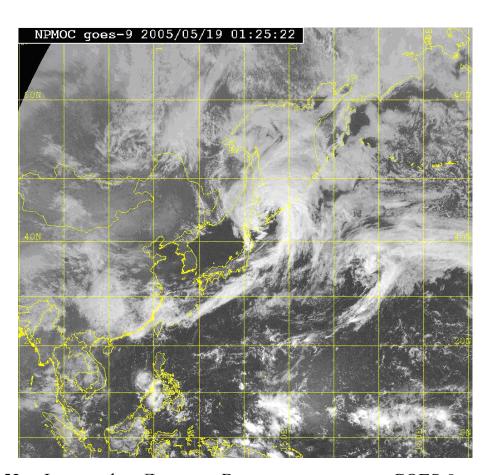


Рисунок 52 – Фотография Дальнего Востока со спутника GOES-9

Для детализации движения циклонов и изолиний барических полей ежедневно из Интернета скачиваются и создается архив погодных карт Камчатки.

К 2007 году была построена сеть Wi-Fi, которая представлена на Рисунке 53. Все экспедиционные пункты ИКИР имеют постоянную связь с Интернет.

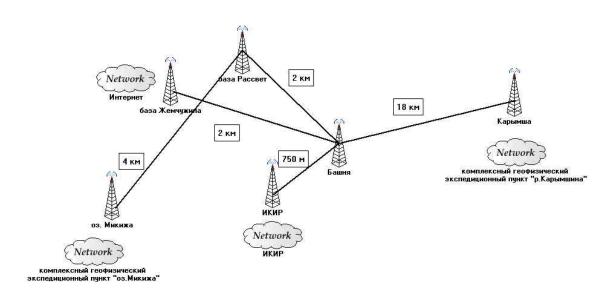


Рисунок 53 — Сеть Wi-Fi связи экспедиционных пунктов с административным центром ИКИР в 2007 г.

Таким образом, был создан информационный комплекс для решения широкого круга задач, в том числе для исследования динамических характеристик электрического поля. Разработаны алгоритмы и программы сбора и первичной комплексной обработки экспериментальных данных. Создана база данных за период начиная с 1996г.

ГЛАВА З. АНОМАЛИИ В СУТОЧНЫХ ВАРИАЦИЯХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

3.1 Положительные аномалии

На напряженность электрического поля Земли в приземной атмосфере влияют многие факторы глобального и локального характера. В условиях хорошей погоды по всему земному шару при минимальном воздействии локальных факторов одновременно наблюдается характерная кривая, называемая унитарной вариацией. На унитарную вариацию накладываются возмущения, вызванные локальными конвективными генераторами, которые изменяются в зависимости от сезона. Аномалии, воспринимаемые как резкое изменение напряженности электрического поля, в условиях хорошей погоды при невозмущенном термодинамическом состоянии воздуха требуют тщательного исследования. Отрицательные аномалии были рассмотрены автором и связывались с действием естественных ионизаторов (п. 3.2, [Смирнов, 2005а; Smirnov, 2008]). Положительные аномалии методически сложнее выделяются и слабо изучены.

Под положительной аномалией в электрическом поле в данном параграфе принимается следующий процесс. Превышение уровня градиента потенциала электрического поля более чем в два раза. Понижение уровня электропроводности воздуха. Длительность аномалии 6-16 часов. Аномалия не должна приходиться на утренние часы местного времени. Должны отсутствовать такие метеорологические явления как грозы, осадки, туман, мгла, дымка, поземка, метель. Отсутствие активного испарения влаги с поверхности земли и снега. Отсутствие больших скачков атмосферного давления. К-индекс геомагнитной активности <4.

Такая положительная аномалия в напряженности электрического поля в условиях хорошей погоды наблюдалась 6 декабря 2006г. на обсерватории «Паратунка» (Рисунок 54а) [Смирнов, 2008].

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:

$$E \sim 1/\lambda \tag{6}$$

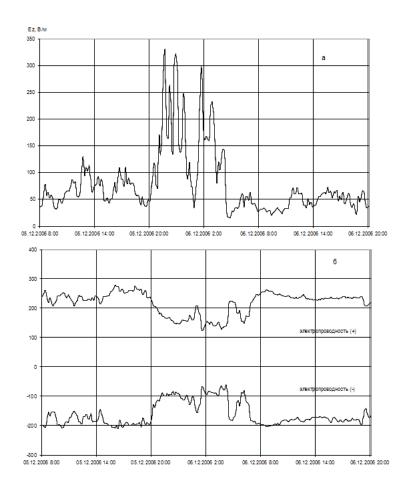


Рисунок 54 — График градиента потенциала электрического поля (a) и электропроводности воздуха, вызванной положительными и отрицательными ионами (б) в приземной атмосфере в условных единицах.

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

$$\lambda = e(n_{-}u_{-} + n_{+}u_{+}). \tag{7}$$

Ионизационно-рекомбинационное уравнение для легких ионов имеет вид [Имянитов, 1962]:

$$dn_{+}/dt = I - \alpha n_{+} n_{-} - \beta n_{+} N_{-} - \gamma n_{+} N_{0}, \qquad (8)$$

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:

$$n_{\perp} = I/(\alpha n_{\perp} - \beta N_{\perp} - \gamma N_{0}). \tag{9}$$

Можно учесть, что $\beta N_- + \gamma N_0 >> \alpha n_-$ 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:

$$\lambda \sim 1/N. \tag{10}$$

Поведение электропроводности, вызванной положительными и отрицательными ионами, во время аномалии представлена на Рисунке 54б. Развитие положительной аномалии исходя из формул (6) и (10) можно представить так: в воздухе появляются тяжелые примеси, это приводит к уменьшению электропроводности, а уменьшение электропроводности приводит к увеличению напряженности поля, что иллюстрируется Рисунком 54.

Падение величины модуля электропроводности воздуха можно было бы объяснить уменьшением эманации радиоактивных веществ в связи с уменьшением атмосферного давления. Однако атмосферное давление за этот период не сопровождалось значительными вариациями (Рисунок 55). Никакого эффекта, «запирающего» эманацию радиоактивных газов, в это время не происходило.

Можно предположить, что атмосферные примеси могли появиться в связи с извержением вулкана Шивелуч ($\phi = 56^{\circ}39'$ N, $\lambda = 161^{\circ}21'$ E), который активизировал свою деятельность в это время. Подобная аномалия с теми же признаками наблюдалась и 3 декабря 2007 г. (Рисунок 56). По данным Камчатской группы

реагирования на вулканические извержения (KVERT) [Действующие вулканы ..., 2008] в это время происходило экструзивно-эксплозивное извержение вулкана Шивелуч. По сейсмическим данным, на куполе происходили газопепловые выбросы и обрушения раскаленных лавин с подъемом пепла до высоты 5.3 км над уровнем моря, а также слабые раскаленные лавины. Аэрозоли этого извержения могли достигнуть района геофизической обсерватории Паратунка и вызвать положительную аномалию напряженности электрического поля в приземном слое воздуха.

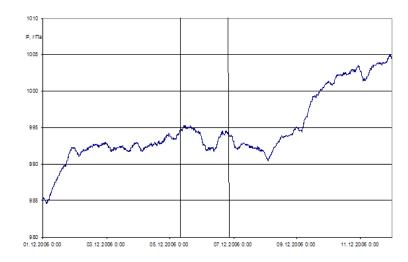


Рисунок 55 — График атмосферного давления. Вертикальными линиями обозначен интервал времени Рисунка 54

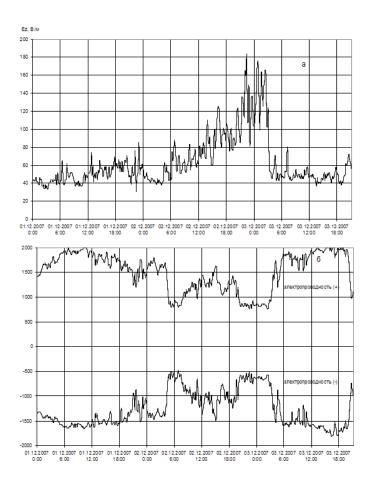


Рисунок 56 – График градиента потенциала напряженности электрического поля (а) и электропроводности воздуха, вызванной положительными и отрицательными ионами (б) в приземной атмосфере в условных единицах

Используемая методика позволяет выделять аномалии длительностью 6—16 часов. Аномалии по длительности большего интервала на фоне суточного хода выявить сложнее. Кроме того, аномалии от более сильных выбросов могли маскироваться действием метеофакторов.

Метод выявления примесей в приземном воздухе, используя регулярные наблюдения напряженности квазистатического электрического поля, может быть использован в качестве мониторинга экологического состояния атмосферы.

3.2 Отрицательные аномалии

В качестве предвестника землетрясений изменение поведения электрического поля отмечалось многими авторами. Пионером исследований атмосферного электричества в связи с землетрясениями, по-видимому, является А.Гумбольт, который наблюдал в начале XIX в. с помощью электроскопа вариации атмосферного электричества во время землетрясений. Обобщение наблюдений аномалий электрического потенциала в 1924г. в Джалал-Абаде (Киргизия), в 1946г. в Ташкенте и в 1949г. в Сталинабаде сделал Е.А.Чернявкий. Этот эффект в наблюдениях был настолько устойчивым, что им была выдвинута гипотеза, что вообще общий заряд Земли обусловлен тектоническими процессами [Чернявский, 1955].

В работе [Бончковский, 1954] описывались аномалии градиента потенциала атмосферы перед землетрясениями на гармском полигоне в 1950 - 1951 гг. Однако ввиду того, что прибор, измеряющий градиент, не мог фиксировать отрицательные значения, в классификации аномалий отсутствуют отрицательные бухты. Бончковский указывает: «Во время дождя, как правило, градиент потенциала равен нулю, исключая случаи грозового дождя» [Бончковский, 1954]. Такой вывод можно было сделать при измерении электрометром Эльстеля и Гейтеля, где о величине поля судили по силе отклонения заряженных листочков друг от друга. Измеренные прибором «Поле-2» дожди регистрируются либо как глубокая отрицательная бухта (Рисунок 17), либо как знакопеременное возмущение большой амплитуды.

В 1966г. на сейсмической обсерватории Matsushiro в Японии также наблюдались аномалии электрического поля перед землетрясениями [Kondo, 1968]. Эти аномалии были преимущественно отрицательными. Частота появлений этих аномалий была прямо пропорциональна сейсмической активности, зарегистри-

рованной на этой обсерватории. Kondo высказал предположение, что эти аномалии связаны с эманацией Радона.

В работе [Нао et al., 1998] приводятся результаты непрерывных наблюдений напряженности квазистатического электрического поля в период за 20 лет в окрестностях Пекина. Аномалии перед землетрясениями имели четкую форму отрицательной бухты глубиной до 500 В/м и длительностью от нескольких минут до десятка часов. Они от 2 до 40 дней предшествовали землетрясениям с М>5. Отсутствие аномалий совпадает с сейсмическими затишьями. Длительность и амплитуда аномалий были пропорциональны магнитуде землетрясений. Если аномалии наблюдались в обширном районе, то и землетрясений могло быть или два сильных или происходил рой землетрясений.

В работе [О возможности прогнозирования ..., 2000] приведены результаты измерений напряженности электрического поля в г. Фрунзе во время землетрясения 18.03.1989. Аномальное поведение электрического поля началось примерно за 6-7 ч до толчка: наблюдалось уменьшение величины поля с изменением знака. Фаза отрицательного знака продолжалось около 2 ч, после чего восстановилось нормальное значение напряженности поля.

Отрицательные аномалии электрического поля во время афтершоковой активности наблюдались в районе г. Спитак в Армении в 1989г. [Моргунов, 2000]. Автор этой работы пишет: «Основной недостаток измерений электрического поля в атмосфере в связи с сейсмичностью заключается в том, что они носят эпизодический характер и лишены планомерности».

Что касается причинно-следственной связи хода радона с сейсмическими процессами, то Г.И. Войтов описывает ее так: «По-видимому, последовательность формирования очаговой зоны тектонических землетрясений адекватно отображается изменением физического состояния пород литосферы в окрестностях очага. Суть этих изменений можно описать следующей схемой: деформации геологической среды → изменение ее емкостных (в большой степени – сорбционных) параметров и проницаемости → усиление мобилизации из дробя-

щихся пород и перевод в поровые и трещинные пространства подвижного флюида → субвертикальное перемещение последнего с обособлением природных газов в самостоятельную фазу → разгрузка природных газов в приземную атмосферу» [Войтов, 1998].

Работы по исследованию электрического поля на Камчатке проводились в период с 1972 по 1994гг. для изучения электризации облаков вулканических выбросов. Первый результат наблюдения аномалии электрического поля перед сильным землетрясением с магнитудой М=6.1 был опубликован в работе [Руленко и др., 1992]. Было показано, что за несколько часов до землетрясения наблюдалась отрицательная аномалия напряженности поля бухтообразной формы с резким передним фронтом и последующим плавным возвращением к фоновому уровню в течении полутора часов. Вместе с тем был так же зарегистрирован аномальный выброс электрического поля перед землетрясением с М=7.0, но положительной полярности [Руленко и др., 1996]. Обзор результатов наблюдений аномальных эффектов в электрическом поле в сейсмоактивных регионах северовосточной Азии приведен в работе [Руленко, 2000].

Для аномальных изменений Еz перед 3T, как показали предыдущие публикации данных измерений на Камчатке, характерны преимущественно бухтообразные понижения величины поля с переходом через нуль. Типичные суточные вариации Еz-компоненты поля для условий хорошей погоды, но без аномалий (а), для дней с осадками (б), а также для дней в хорошую погоду, но с аномальным поведением Еz, часто сопровождаемым 3T (в), приведены на Рисунке 57.

В нормальных метеорологических условиях величина градиента потенциала поля составляет +100 В/м. Атмосферные шумы в условиях хорошей погоды составляет ±20 В/м. Отрицательное значение – это уже аномалия, которую необходимо объяснять. Бухтообразную отрицательную аномалию определим следующим образом. Первичные измерения проводятся с интервалом 1 сек. Сигнал усреднялся с интервалом 10 мин. По форме отбирались бухтообразные аномалии с переходом через ноль до отрицательных значений без краевых пиков. Должны

отсутствовать такие метеорологические явления как грозы, осадки, туман, мгла, дымка, поземка, метель. Отсутствие больших скачков атмосферного давления. К-индекс геомагнитной активности меньше 4. В сомнительных случаях строились графики по 1-секундным значениям. Для интерпретации сигнала привлекались метеоданные обсерватории Паратунка, журнал наблюдений, метеоданные Гидромета, спутниковые снимки.

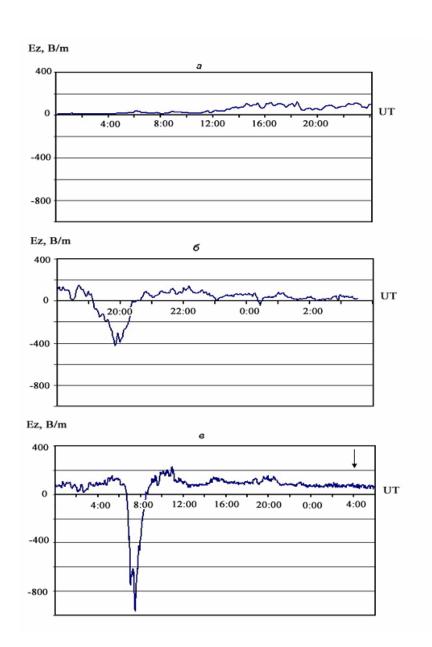


Рисунок 57 — Типичные суточные вариации Еz-компоненты в условиях хорошей погоды, но без аномалий (а), для дней с осадками (б), для дней в хорошую погоду, но с аномальным поведением Ez (в). Стрелкой указан момент землетрясения 24 сентября 1997 г., K=11.4

Первые результаты статистического анализа особенностей аномальных вариаций Еz за период 1997 – 2000 гг. опубликованы в кратком сообщении [Смирнов, 2001]. Ниже приведены результаты подобных исследований за более продолжительный период: с 1 января 1997 г. по 31 декабря 2002 г. Предварительные результаты этих исследований опубликованы в работе [Смирнов, 20036]. В данном параграфе представлен более полный статистический анализ таких параметров Еz, как величина ослабления при переходе через нуль, длительность аномалии, зависимость этих параметров от класса (магнитуды) землетрясений и от расстояния до эпицентра от пункта регистрации. Рассмотрены только отрицательные аномалии, т.е. отклонения Еz в отрицательную область от положительного суточного хода в интервале времени 24 ч. до землетрясения [Смирнов, 2005а; Smirnov, 2008].

Для статистической обработки были отобраны данные только для дней с хорошей погодой. При этом исключались такие аномалии, когда до или после бухты наблюдалось повышение уровня Ez. T.e. такие аномалии, которые можно было бы промоделировать прохождением вертикального или горизонтального диполей над точкой наблюдения.

За сейсмическое событие принималась ситуация, когда в интервале времени 24ч после аномалии происходило одно или несколько 3Т класса К от 11 до 15 (М \cong 4,7 - 6,7) с эпицентрами в области с координатами (45-55) 0 N, (155-165) 0 E, включающей пункт регистрации Ez. За период с 1 января 1997г. по 31 декабря 2002г. (т.е. за 2189 дней) было обнаружено 103 случая аномального поведения компоненты Ez. В 37 (36%) случаях происходили землетрясения после аномалии через 1-24 ч. Оценим сейсмическую активность в этот период. Разобьем исследуемый период 2189 дней на 2189 одинаковых интервалов и за сейсмическое событие принималась ситуация, когда в интервале времени произошло одно или несколько 3Т класса К от 11 до 15 (М \cong 4,7 - 6,7) с эпицентрами в области с координатами (45-55) 0 N, (155-165) 0 E независимо от состояния погоды. За иссле-

дуемый период произошло 409 сейсмических событий. Если за 2189 интервалов произошло 409 сейсмических событий, то можно предположить, что за 103 интервала их произошло бы около 19. Вероятность пропуска события пока невозможно оценить из-за того, что перед многими землетрясениями погода не удовлетворяла требований хорошей погоды.

Были построены гистограммы распределения аномалий напряженности поля по длительности бухты (Рисунок 58а) и по величине понижения напряженности в бухте (Рисунок 58б). В качестве последней принималось минимальное значение Еz при интервале усреднения выборки 10 мин. Длительность аномалии определялась по уровню 9/10 от минимума бухты. Из Рисунка 58а, построенного с шагом 20 мин, видно, что наиболее вероятные длительности аномалии составляют величину 40-60 мин с дополнительным максимумом ~160 мин. На Рисунке 58б, построенного с шагом 100 В/м, показано, что величины понижения Еz сосредоточены на значениях порядка минус (100-300) В/м.

Кроме того, были построены гистограммы распределения аномалий Еz по импульсу (Рисунок 58в) и по энергии (Рисунок 58г). За импульс бухты принималось значение интеграла: $P = \int Ez(t)dt$ в пределах длительности аномалии, а за энергию — значение интеграла: $E = \int Ez^2(t)dt$ в тех же пределах длительности. Из рисунка видно, что аномалии сосредоточены в области малых значений этих параметров. На Рисунке 59 показаны зависимости аномалий величины Ez в бухте от класса T (а) и от расстояния от его эпицентра до пункта регистрации (б). Рассчитанные коэффициенты корреляций этих величин соответственно равны 0.17 и 0.09, свидетельствует практически об отсутствии связи между рассмотренными параметрами.

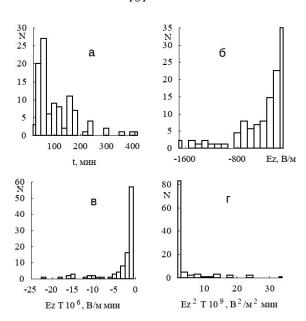


Рисунок 58 — Гистограммы распределения аномалий напряженности электрического поля по длительности бухты (а), по величине понижений напряженности поля (б), по импульсу (в), по энергии (г)

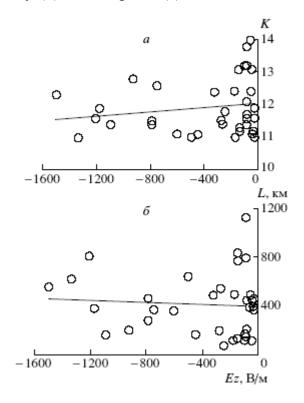


Рисунок 59 — Зависимости величины аномалий Ez от класса землетрясения (a) и от расстояния до его эпицентра (б)

Были рассмотрены статистические свойства отрицательных аномалий квазистатического электрического поля в атмосфере в пределах 24ч до землетрясения.

Эти аномалии по классификации [Соболев, 1993] можно отнести к категории краткосрочных прогнозов. Для них, как указывалось, например, в работах [Соболев, 1993; Моргунов, 2003], отсутствует значимая связь между такими параметрами, как время опережения события, величина аномалии и магнитуда М землетрясений. Пространственные размеры зоны подготовки ЗТ не подчиняются формулам оценки этой зоны по упругим деформациям [Dobrovolsky et al., 1979; Добровольский, 2009] $r \sim e^M$ и $r \sim 10^{0.43M}$, пригодным для событий в долгосрочных прогнозах [Соболев, 1993; Сидорин, 1979]. Объясняется это наличием неоднородности напряженно-деформированных процессов в земной коре непосредственно перед землетрясениями, которая косвенно проявляется в мозаичной структуре различных геофизических параметров (см. например, [Моргунов, 2003]). Отсутствие значимой связи между величиной аномалии Еz с расстоянием до эпицентра и магнитудой ЗТ, показанной на Рисунке 59, по-видимому, может быть связано с неоднородным по пространству выходом радона в атмосферу, основного агента изменения квазистатического электрического поля в приземной атмосфере [Radon behavior ..., 1997]. Подобный эффект, т.е. отсутствие связи между расстоянием до эпицентра и магнитудой двух сильных 3Т на Камчатке ранее наблюдалось в вариациях короткопериодических возмущений электротеллурического поля [Соболев, 1970]. Что касается природы наблюдаемых на Камчатке аномалий квазистатического электрического поля перед 3Т, то она до сих пор не ясна. В литературе предложено несколько моделей этого явления. Первые теоретические оценки вариаций Еz в приземной атмосфере в результате изменения концентрации радона были сделаны в работе [Pierce, 1976]. Все последующие предложенные механизмы также предполагали в качестве главного агента, изменяющего проводимость приземной атмосферы и, следовательно, электрическое поле, радон [Руленко, 2000; Руленко, 2003; Шулейкин, 2003]. Содержание его в земной коре и поступление в атмосферу тесно связано с состоянием деформационных процессов в поверхностных слоях Земли в период активного трещинообразования при подготовке ЗТ. Исключение составляет модель [Моргунов, 2003], в которой рассмотрено образование поляризационных зарядов на стенках трещин в горных породах, порождающих квазистатическое поле в атмосфере в дополнение к фоновой величине. В работе [Алексеев, 2003] выполнено математическое моделирование предвестников землетрясений в электрических полях (Ех,Еу,Еz). Показано, что модуль |Ez| поля зависит от разности электрических проводимостей воздуха и земли. Последняя, в свою очередь, определяется проводимостью флюидов, заполняющих поры и трещины в горных породах. Как видно, указанные выше примеры различных моделей механизмов образования аномалий скорее отражают сложность быстропротекающих тектонических процессов в земной коре непосредственно перед 3T, но не дают окончательного ответа о природе этих аномалий.

Аналогичные аномалии по форме и по знаку понижения напряженности Еz накануне землетрясения наблюдались ранее в эпизодических регистрациях, например, на Камчатке [Руленко и др., 1992; Руленко и др., 1996], в Армении [Моргунов, 2000], в Киргизии [О возможности прогнозирования ..., 2000]. Вместе с тем на Кавказе отмечены случае как отрицательной так и положительной аномалии Ez [Kachakhidze, 2000; Specific variations ..., 2009].

Настоящий интерес представляет сопоставление полученных в работе результатов с данными непрерывных многолетних (20 лет) наблюдений, выполненных в Китае [Нао et al., 1998]. В этих публикациях результаты совпадают как по форме аномалий Еz, их длительности и частично скачку напряженности Еz. Отсутствие зависимости величины понижения Еz в бухте от класса землетрясения и от расстояния до эпицентра в отличие от работы Нао может быть связано с методикой обработки данных (здесь рассмотрены аномалии в пределах 24 ч до возможного землетрясения, в то время как в работе Нао учтены все аномалии на протяжении 2 - 40 дней до землетрясения). Не исключена также геологическая специфика района Камчатки. Вопрос остается открытым.

Оценим эффективность метода 3T прогноза по отрицательным аномалиям. В 64% случаях сейсмических событий после отрицательных аномалий не было.

Это говорит о низкой эффективности метода. Проведем оценку метода, пользуясь округленными величинами. В течение примерно 2000 дней с любой метеорологической обстановкой произошло примерно 400 сейсмических событий. Если в половине этого срока были проявления таких явлений, как осадки, туман, мгла, дымка, поземка, метель, то за 1000 дней хорошей погоды произошло бы 200 сейсмических событий. Сейсмические события происходят независимо от локальных погодных условий. Т.о. 200 событий были бы пропущены по погодным условиям, когда метод не работает. Примерно 40 событий можно связать с отрицательными аномалиями, а 160 с такими аномалиями не связано. Получаем, что 40/200=20% - вероятность прогноза события, а 160/200=80% событий не связаны с отрицательными аномалиями. А если учесть дни с нарушенной метеорологической обстановкой, то эффективность метода будет 40/400=10%, и вероятность пропуска события будет 90%. Поэтому для повышения эффективности метода необходимо привлекать другие виды наблюдений.

Если рассматривать только взаимно наблюдаемые аномалии в электрическом поле приземного воздуха и аномалии в ионосфере, то они подчиняются формуле Сидорина [Сидорин, 1979]:

$$\lg(\Delta T \times R)_{E_S} = 0.85M - 1.23 \quad , \tag{11}$$

$$\lg(\Delta T \times R)_{E_z} = 0.9M - 1.5$$
 , (12)

где ΔT - время от начала аномалии до землетрясения (сут.), R - расстояние от точки наблюдения до эпицентра (км), М - магнитуда. При этом под аномалией в ионосфере понимается аномально высокий спорадический слой Es [Экспериментальное ..., 2009; Experimental Evidence ..., 2010; Закономерности ..., 2013; Аномалии в ионосфере ..., 2017].

Таким образом, статистический анализ 103 случаев бухтообразного понижения величины Еz-компоненты квазистатического электрического поля в приземной атмосфере на Камчатке показал следующее:

- наиболее вероятная длительность бухты составляет 40 - 60 мин. С дополнительным максимумом ~160 мин;

- наиболее вероятные величины понижения напряженности электрического поля составляют минус 100 300 В/м. Аномалии минус 800 1000 В/м крайне редки;
- не обнаружена зависимость длительности бухты и величины понижения напряженности электрического поля ни от класса землетрясения, ни от расстояния до его эпицентра;
- вероятность предсказания землетрясения по аномалии Ez в пределах 24 ч. до него составляет ~ 36%.

ГЛАВА 4. ЭФФЕКТ ВОСХОДА СОЛНЦА В ВАРИАЦИЯХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

4.1 Эффект утренней конвекции

Над океанами и на открытых пространствах в полярных областях в условиях хорошей погоды одновременно наблюдаются подобные суточные вариации градиента потенциала электрического поля (Еz) в приземной атмосфере в зависимости от мирового времени. Это так называемая «унитарная вариация» (UT- вариация) с Ez в 03-05 UT и максимумами в 18-19 UT (зимой) и 20-21 UT (летом), обусловленная суточными вариациями глобальной грозовой активности. Однако в измерениях электрических полей в приземной атмосфере на материковых станциях существенное влияние на суточные вариации оказывают местные метеорологические процессы, которые подавляют «унитарную вариацию». Для выделения различных эффектов в суточных вариациях элементов атмосферного электричества, наблюдения, как правило, проводят в условиях так называемой «хорошей погоды». Эти условия включают в себя отсутствие гроз, осадков, мглы, туманов, низкой облачности при общей облачности не более 3 баллов, при скорости ветра до 6 м/с. [Руководящий документ, 2002; Reiter, 1992]. Но даже в таких условиях наиболее ярким локальным эффектом в суточных вариациях Ег имеет место так называемый «эффект восхода» Солнца, который проявляется в усилении напряженности поля, увеличении токов проводимости и величины пространственного заряда. Первое сообщение об этом эффекте появилось в работе [Nichols, 1916], в которой записи Еz были получены лишь в интервале времени ± 15 мин относительно местного восхода Солнца. Более поздние измерения Ех в различных пунктах земного шара позволили выделить характерные особенности этого эффекта. Уже в ранних исследованиях авторы пытались объяснить

его физическую природу. Так, Браун [Brown, 1936], исключив «унитарную вариацию» из измеренных суточных вариаций Ez, отчетливо выделил этот аномальный эффект. Автор высказал идею о наличии в обменном слое атмосферы положительно заряженных ядер конденсации и переносе их вверх в результате процессов турбулентности и конвекции в атмосфере с ростом температуры воздуха. Интенсивность конвекции, как известно, зависит от разности температур между слоями, теплопроводности и вязкости среды. В другой работе [Israel, 1953] исследована связь напряженности электрического поля с концентрацией водяного пара и сделан вывод о том, что суточные вариации вертикального распределения концентрации водяного пара зависят от конвективных процессов в атмосфере и, следовательно, влияют на суточные вариации Еz. Измерения Еz и плотности вертикального электрического тока, выполненные в безоблачные дни [Kasemir, 1956], показали их одновременное возрастание в два-три раза после восхода Солнца. При этом электропроводность атмосферы возросла всего лишь на 20% по сравнению с соответствующими величинами перед восходом. Этот результат противоречил теории грозового генератора, объясняющего поведение электрического поля атмосферы только совокупным действием грозовых генераторов, образующих глобальную электрическую цепь атмосферы (ГЭЦ). Каземир предложил дополнительно ввести в ГЭЦ так называемый конвективный генератор, который действует локально в обменном слое атмосферы. Его действие сводится к механическому переносу вверх конвективным потоком воздуха положительного объемного заряда, накопленного ночью вблизи поверхности земли. Это, в свою очередь, приводит к усилению электрического тока проводимости и увеличению Еz, что и наблюдается в экспериментах. Этой точки зрения придерживаются и авторы работы [Анисимов и др., 2006] для объяснения положительной корреляции между Ег и температурой воздуха у поверхности земли в утренние часы.

Предложенная физическая модель конвективного генератора получила экспериментальное подтверждение в последующих работах многих авторов по ис-

следованию эффекта восхода Солнца в вариациях Еz в приземной атмосфере [Anisimov et al., 2017]. Численные оценки параметров модели конвективного генератора даны в докладе [Convective Generator ..., 2011].

Было проведено сравнение основных характеристик эффект восхода Солнца в суточных вариациях Еz, полученных на обс. Паратунка, с результатами других авторов [Смирнов и др., 2012]. Оказалось, что эффект начинается либо в момент восхода [Каsemir, 1956], либо спустя 20-30 мин [A study of enhanced ..., 1999]. Длительность эффекта составляет ~ 4 - 7 ч [Muhleisen, 1958], ~ 4 ч [Каmra, 1969], ~ 3-4 ч [Diurnal and seasonal ..., 1980], ~ 3 ч [A study of enhanced ..., 1999]. Запаздывание максимума Еz относительно момента восхода Солнца составляет ~ 2,5 ч [Каsemir, 1956]; ~ 2-4 ч [Fair-weather atmospheric ..., 1962]; ~ 1-1.5 [A study of enhanced ..., 1999]. Величина Еz в максимуме эффекта возрастает относительно уровня до восхода ~ 2,5-3 раз [Каsemir, 1956], ~ 3 раз [Muhleisen, 1958], ~ 4 раз [A study of enhanced ..., 1999].

Одновременные измерения Еz и плотности пространственного заряда [Muhleisen, 1958; Fair-weather atmospheric ..., 1962; Diurnal and seasonal ..., 1980; A study of enhanced ..., 1999] показали, что одновременно с ростом величины Еz возрастает плотность положительного заряда, а также величина вертикального тока [Kasemir, 1956; Muhleisen, 1958]. Одновременно измеренная концентрация ядер конденсации составила очень высокий уровень ночью, который уменьшался с восходом Солнца и сходил до нуля в местный полдень [Fair-weather atmospheric ..., 1962]. Этот экспериментальный результат показал постепенное развитие процесса конвекции в атмосфере с ростом температуры на восходе Солнца.

Усиление ветра приводит к ослаблению эффекта восхода Солнца [Brown, 1936; Kamra, 1969; Diurnal and seasonal ..., 1980; A study of enhanced ..., 1999]. При сильном тумане и плотной облачности без осадков пространственный заряд становится отрицательным, что приводит практически к ослаблению и даже исчезновению эффекта восхода. Этот эффект практически не проявляется в горах [Muhleisen, 1958].

Настоящая работа является продолжением исследования электрических процессов в приземной атмосфере на восходе Солнца. При этом, кроме наблюдений Еz, дополнительно использованы одновременные записи электропроводности атмосферы, а также ее температуры около земной поверхности и на высоте 25 м. Такой эксперимент с целью прямого подтверждения наличия конвективного генератора в ГЭЦ выполнен впервые.

В эксперименте измерения метеорологических параметров проводится цифровыми метеостанциями WS-2000 и WS-2300. Выходные данные с них поступают в обсерваторию по радиоканалу на частоте 433 МГц. В наблюдениях используются два датчика температуры воздуха. Один из них установлен на высоте 3 м на теневой стороне административного здания. Особенность установки другого датчика состоит в следующем. С северной стороны водонапорной башни на высоте 25 м прикреплена балка, одним концом отстоящая от кромки башни на 5 м, на котором за белым непрозрачным экраном прикреплен датчик температуры с радиоинтерфейсом. Такая конструкция позволяет избежать влияния нагрева башни солнечными лучами на датчик температуры. Датчик ветра установлен на этой же башне на высоте 25 м. Дискретность по времени метеорологических данных составляет 10 мин. Таким образом, мы имеем следующие контролируемые метеорологические данные: сила и направление ветра, а также температура на высоте 25 м; атмосферное давление, температура и влажность воздуха на высоте 3 м; облачность и осадки по информации местной метеостанции. Эти данные позволяют нам выбирать дни с условиями «хорошей погоды».

В отличие от континентальных условий, в которых выполнены ранее проведенные исследования, условия наблюдений на Камчатке обладают специфическими геофизическими особенностями. Во-первых, здесь в результате повышенной сейсмической активности постоянно «дышит» Земля, нагревая её поверхность и выделяя газы, насыщенные радоном, главным агентом ионизации в приземном слое атмосферы. Во-вторых, здесь постоянно «дышат» вулканы, обогащая атмосферу аэрозолями. В-третьих, на полуострове активно действуют ци-

клоны и антициклоны. Так что условия так называемой «хорошей погоды», сформулированные в работах [Руководящий документ, 2002; Reiter, 1992] на Камчатке реализуются крайне редко. Поэтому в обработку включены данные, полученные в дни без осадков, гроз, туманов, при скорости ветра менее 6 м/с и при наличии нижнего яруса слоисто-кучевых облаков менее двух баллов. (Согласно выводам работ [Fair-weather atmospheric ..., 1962; Kamra, 1969], слабая слоисто-дождевая облачность без осадков вызывает слабые возмущения величины Еz). Для исследования эффектов восхода выборочно были использованы суточные кривых Еz в сентябре 1999 г.(13 дней), в октябре 2002 г. (5 дней), августе 2004 г. (6 дней), октябре 2005 г. (2 дня) и ноябре 2007 г. (3 дня).

Одновременно проводятся измерения электропроводности воздуха прибором «Электропроводность-2», разработанным также в Главной геофизической обсерватории. Он имеет два воздухозаборника, расположенных на высоте 3 м, для измерений электропроводности, вызванной отдельно положительными (λ_+) и отрицательными (λ_-) ионами воздуха. Далее в формулах используется суммарная электропроводность $\lambda = \lambda_+ + \lambda_-$. Все измерительные приборы разнесены друг от друга на расстояние не более 200 м.

Далее, для каждого дня обработки были определены моменты восхода и захода как моменты появления верхнего края диска Солнца над горизонтом и погружения его под горизонт для географических координат обс. «Паратунка». Далее на каждой кривой отмечалось время начала эффекта восхода, его запаздывание относительно времени восхода, длительность эффекта, время достижения максимума Еz и отношение максимума к величине Еz до восхода. Эти параметры, определенные по всем анализируемым данным с точностью до получаса, приведены в Таблице 5. Знак минус в столбце (tH – tB) указывает, что начало эффекта в поведении Еz наступает до момента восхода Солнца. В столбце «Примечания» указаны условия «хорошей погоды» (УХП), а также наличие слабой облачности (менее 2 баллов). Видно, что начало эффекта в большинстве случаев совпадает по времени с

Таблица 5 - Параметры эффекта восхода и захода солнца в суточных вариа-

циях градиента электрического потенциала (Еz).

дата Градие	Ez	Ez	Тэф.В	t _{max} -t _B	Ez ₃	t _H -t _B	Примечания	
	B _{max} , B/M	В/ фон	Ч	Ч	В/м	Ч		
01.09.1999 г.	300	3	4	1.5	100	0	УХП	
02.09.1999 г.	400	2	2	2	200	0.5	УХП	
07.09.1999 г.	300	3	7	3	100	0	Слаб. облачн.	
14.09.1999 г.	500	2	4	2	250	0	Слаб. облачн.	
16.09.1999 г.	200	2	3	1.5	100	0	Слаб. облачн.	
18.09.1999 г.	600	3	4	2	200	0	тахВ совпал с 3Т	
20.09.1999 г.	400	4	6	2	100	0	УХП	
21.09.1999 г.	200	2	4	2	100	0	УХП	
24.09.1999 г.	200	2	5	2	100	0	Слаб. облачн.	
27.09.1999 г.	300	3	3	2	100	0	Слаб. облачн.	
28.09.1999 г.	200	2	5	2.5	100	-5	УХП+серия 3T с M ~ 4,5	
29.09.1999 г.	300	3	5	1.5	100	0	УХП	
16.10.2002 г.	200	2	4.5	2	100	0	УХП	
17.10.2002 г.	200	2	-	3	100	0	Слаб. облачн.	
20.10.2002 г.	250	2.5	5	1	100	-2	Слаб. облачн.	
25.10.2002 г.	200	2	3.5	2	100	0	УХП+слаб. облач.	
26.10.2002 г.	250	2.5	5.5	1	100	-2	УХП+слаб. облач.	
15.08.2004 г.	200	2	5	3.5	100	0	УХП	
16.08.2004 г.	150	2	6	3.5	50	0	УХП	
27.08.2004 г.	350	7	5	3.5	50	0	УХП	
28.08.2004 г.	200	2	4	2	80	0.5	УХП+слаб. облач.	
29.08.2004 г.	300	3	4	1.5	70	-3	УХП+слаб. облач.	
30.08.2004 г.	400	4	5	1.5	100	-2	УХП+3Т в 12 UT	
06.10.2005 г.	100	5	4	2	20	0		
28.10.2005 г.	200	4	6	0	25	-2.5		
06.11.2007 г.	140	2.5	4	1.5	50	0		
08.11.2007 г.	200	3	4	1.5	60	0		
12.11.2007 г.	100	3	5	2.5	30	0		

Примечание - t_B — время восхода Солнца; t_H — начало эффекта; t_{max} - время наступления максимума Ez; B_{max} - величина максимума Ez; фон - величина Ez перед восходом.

моментом восхода, за исключением нескольких случаев, когда эффект наступал до восхода. Величина Еz в максимуме эффекта превышает уровень до восхода в 2 - 4 раза; сдвиг максимума эффекта относительно момента восхода составляет величину от 0 до 4.5 ч, а длительность эффекта — от 2 до 7 ч. Практически во всех случаях эффект исчезает в местный полдень. Эффект усиления Еz при заходе Солнца выделен существенно слабее по сравнению с эффектом восхода, и в таблице указана только величина Еz.

Типичные суточные вариации Ez в условиях «хорошей погоды» и близких к ним в обс. «Паратунка» показаны на Рисунке 60. Для удобства сравнения с UT – вариацией и другими геофизическими параметрами кривые приведены в зависимости от универсального времени. Стрелками указаны времена восхода (вверх) и захода (вниз) Солнца. С учетом географического положения обсерватории эти времена для каждой даты определялись по временам восхода и захода, приведенным в Астрономических ежегодниках для нулевого меридиана, и затем рассчитывались по соотношению LT = UT + 10.55, где t = 10.55 ч – часовой угол для долготы обсерватории 158.25⁰ E. Как видно на рисунке, максимум суточного хода наблюдается в утренние часы солнечного местного времени. В некоторые дни появляется вечерний максимум более слабой интенсивности по сравнению с утренним. В период активного таяния снега (апрель - май) подобный характер суточного хода, как правило, нарушается. Для анализа выбирались сутки не только с условиями «хорошей погоды», но и при устойчивой работе всего комплекса измерительной аппаратуры. Таких дней в период 2005 - 2009 гг. оказалось 16 со среднесуточным значением Ег ~ 60 В/м и со среднеквадратическим отклонением ~ 15 В/м. Столь низкие значения Еz объясняются региональными особенностями и низким расположением станции относительно уровня моря (50м). При этом утреннее возрастание напряженности поля, обусловленное конвективными процессами, чаще всего повышает средний уровень в два – три раза.

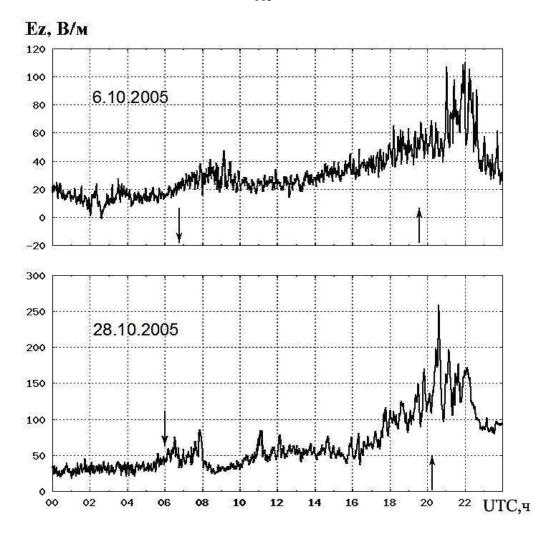


Рисунок 60 — Типичные суточные вариации градиента потенциала электрического поля в условиях «хорошей погоды». Стрелки вверх - время восхода, вниз — время захода Солнца.

В качестве иллюстрации на Рисунке 61 (10 сентября 2007 г.) приведен набор одновременных суточных вариаций Еz (а); суммарной электропроводности воздуха, вызванной отрицательными и положительными ионами б); температуры на высотах 25 м (в) и 3 м (г); влажности воздуха (д). Видно, что суточные кривые температуры на различных высотах подобны между собой и изменяются в противофазе с суточной кривой влажности, повторяя характерные особенности этих параметров в условиях «хорошей погоды» [Матвеев, 1965].

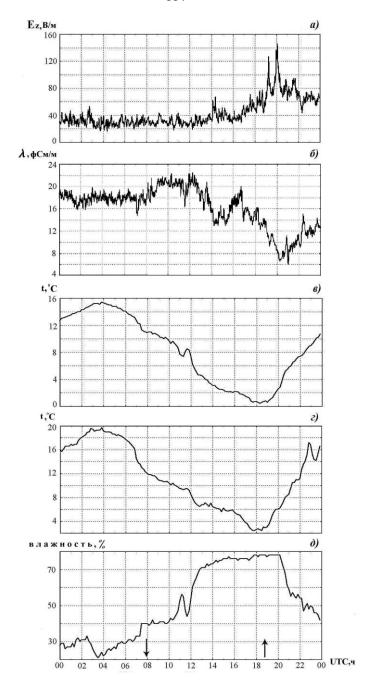


Рисунок 61 — Суточные вариации градиента потенциала электрического поля (а); суммарной электропроводности воздуха, вызванной отрицательными и положительными ионами б); температуры воздуха на высотах 25 м (в) и 3 м (г), а также влажности (д) 10 сентября 2007 г.

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 Еz с разностью температур показан на

Рисунке 62. Наиболее близко связь вариаций Еz с разностью температур проявляется на восходе Солнца с коэффициентом корреляции $\sim 0.6 \pm 0.1$ [Смирнов, 2013]. В некоторых случая, как видно 12.11.2007 г., кривые близко совпадают между собой, в то время как в других случаях, показанных на рисунке, суточная вариация Еz заметно отклоняется от кривой разности температур, позволяя предполагать о наличии в приземной атмосфере объемных зарядов другой природы.

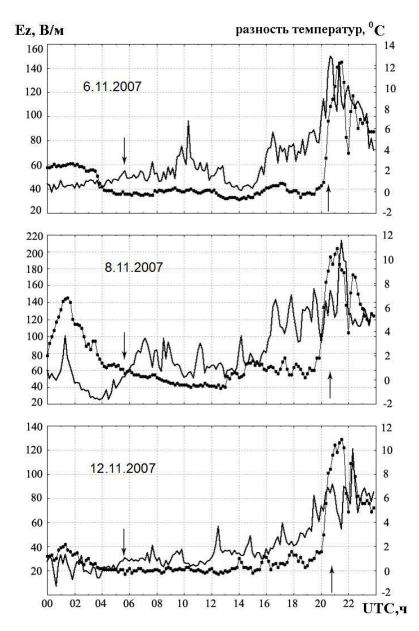


Рисунок 62 — Суточные вариации градиента потенциала электрического поля (сплошная линия, левая шкала,) и разности температур на высотах 25 и 3 м (точки, правая шкала).

Как следует из Таблицы 5, результаты анализа эффекта восхода Солнца в суточных вариациях Еz в обс. «Паратунка» по всем выделенным параметрам близко совпадают с ранее опубликованными в литературе данными, приведенными во Введении. Этот факт наводит на мысль, что независимо от геофизических особенностей пункта регистрации Еz в приземной атмосфере в условиях «хорошей погоды» действует общий физический механизм, порождающий этот эффект. Уже в ранних исследованиях авторы пытались объяснить природу этого эффекта. Так, Brown [Brown, 1936], исключив унитарную вариацию из измеренных суточных кривых Еz, отчетливо выделил аномальный эффект в период восхода Солнца. Автор высказал идею о наличии в этот период в обменном слое атмосферы положительно заряженных ядер конденсации и переносе их вверх в результате процессов турбулентности и конвекции с ростом температуры воздуха.

Одновременные измерения величины Еz и плотности вертикального электрического тока, выполненные в ясные и безоблачные дни [Kasemir, 1956], показали их одновременное возрастание в два-три раза после восхода Солнца. При этом электропроводность атмосферы увеличилась всего лишь на 20% по сравнению с соответствующими величинами перед восходом. Этот результат противоречил теории грозового генератора, объясняющего происхождение электрического поля атмосферы только совокупным действием грозовых генераторов, создающих глобальную электрическую цепь атмосферы (ГЭЦ).

Используя результаты этих наблюдений в совокупности с имеющимися в литературе экспериментальными данными до 1956 г. Kasemir [Kasemir, 1956] предложил дополнительно ввести в ГЭЦ так называемый обменный конвективный генератор [Атмосфера, 1991], с.395, который действует локально в пограничном слое атмосферы. Тогда плотность электрического тока при отсутствии грозовых источников записывается следующим образом [Атмосфера, 1991], с.395:

$$j = \lambda E + \rho V + D_t \nabla \rho \,, \tag{13}$$

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 грозовых 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 Еz вблизи поверхности земли и усилению электрического тока проводимости.

Сделаем оценку, насколько значимо первое слагаемое формулы (13, в сравнении с другими слагаемыми. На Рисунке 63 представлено поле корреляции значений (Еz; λ_{Σ}) за период 28-30.01.2016 г., на котором показана кривая нелинейной регрессии (сплошная линия), соответствующая эмпирическому уравнению Е = $7.07 \times 10^2/\lambda^{0.857}$, а стандартная ошибка регрессии дана штрихпунктирными линиями. Для этой кривой коэффициент корреляции $\rho = 0.795$ [Аномалии в ионосфере ..., 2017]. Квадрат коэффициента корреляции, или коэффициент детерминации, показывает долю вариации результативного признака, объясненную вариацией факторного признака. Чаще всего, давая интерпретацию коэффициента детерминации, его выражают в процентах, т. е. $\rho^2 = 0.795^2 \cong 0.632$ и, следовательно, в 63.2% случаев изменения λ_{Σ} приводят к изменению Еz (63.2% всех точек, входящих в поле корреляции, лежит между верхней и нижней штрихпунктирными линиями). Остальные 36.8% изменений Еz объясняются факторами, не учтенными в такой однофакторной модели [Аномалии в ионосфере ..., 2017].

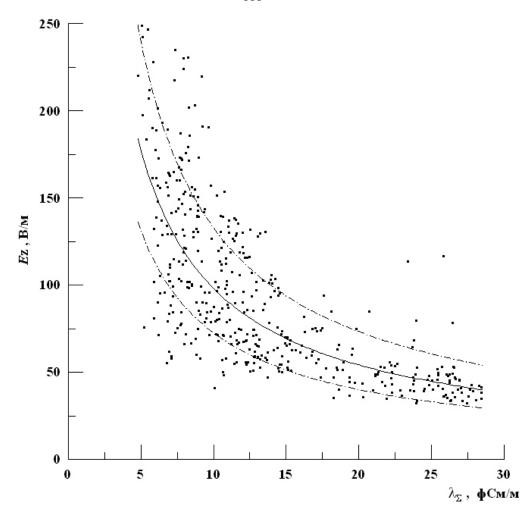


Рисунок 63 — Поле корреляции значений (Еz; λ_{Σ}) за период 28-30.01.2016 г. (точки), кривая нелинейной регрессии, соответствующая эмпирическому уравнению $E = 7.07 \times 10^2/\lambda^{0.857}$ (сплошная линия) и стандартная ошибка регрессии (штрихпунктирные линии).

Качественно действие конвективного генератора в приземной атмосфере можно проследить по суточным кривым Рисунка 61. Как видно на кривых (г) и (д), с резким ростом температуры после восхода Солнца в результате увеличения скорости испарения влаги также резко падает влажность воздуха. При этом положительно заряженные ядра конденсации увлекаются вверх. Этот процесс отражается в уменьшении суммарной электропроводности воздуха (кривые 1 и 2 на фрагменте (б)) и в одновременном возрастании Еz (фрагмент (а)) и продолжается несколько часов (2-7 ч), достигая максимума Еz через 1-4.5 ч после восхода Солнца. Как правило, эффект исчезает в местный полдень в максимуме темпера-

туры (фрагмент (в)) в результате максимального усиления конвективного процесса и переноса положительно заряженных ядер конденсации в более высокие слои атмосферы. В этот период времени, как следствие значения суммарной электропроводности и Еz слабо изменяются. После полудня с ослаблением солнечной радиации температура воздуха плавно уменьшается до минимального значения перед восходом Солнца, также плавно в противофазе начинает возрастать влажность воздуха, приводя к накоплению объемных зарядов у поверхности земли. И суммарная электропроводность, и Еz слабо изменяются в ночные часы.

Для объяснения наблюдаемой связи разности температур атмосферы с суточными вариациями напряженности электрического поля в приземной атмосфере рассмотрим вариацию напряженности поля $\Delta E = \Delta E_{unit} + \Delta E_{\lambda} + \Delta E_{\rho}$ [Тверской, 1949], где:

$$\Delta E_{unit} = \frac{\Delta \varphi}{R} \frac{1}{\lambda},\tag{14}$$

- унитарная вариация, $\Delta \phi$ — разность потенциалов земля — ионосфера, R — сопротивление столба воздуха земля - ионосфера, λ — среднесуточное значение электропроводности воздуха;

$$\Delta E_{\lambda} = -\frac{E}{\lambda} \Delta \lambda \,, \tag{15}$$

- вариация, связанная с проводимостью воздуха, E – среднесуточное значение напряженности поля, λ – среднесуточное значение электропроводности воздуха;

$$\Delta E_{\rho} = -\frac{1}{\lambda} \cdot \Delta (k \frac{\partial \rho}{\partial h}), \qquad (16)$$

- вариация, связанная с конвекцией воздуха, k – коэффициент турбулентности, ρ – плотность объемного заряда, λ – среднесуточное значение электропроводности воздуха. Последняя формула учитывает плотность тока турбулентной диффузии $-k\frac{\partial \rho}{\partial h}$.

В утренний максимум Еz на обс. Паратунка наибольший вклад вносит утренняя конвекция воздуха, формула (16), затем изредка вариация электропро-

водности, формула (15) и унитарная вариация, поскольку восход солнца совпадает с ее максимумом, формула (14). Конвективный механизм утреннего максимума можно объяснить следующим. После восхода солнца положительные объемные заряды, скопившиеся за ночь вблизи земной поверхности, начинают подниматься вверх. При большом значении разности температур, до 12°C (Рисунок 62), часто в максимуме наблюдаются сильные колебания Еz и разности температур. По-видимому, эти колебания вызваны зарождением конвективных ячеек с турбулентным движением положительно заряженных ядер конденсации. Вечерний максимум обусловлен вариацией электропроводности, формула (15). В качестве иллюстрации этого эффекта, в дополнение к Рисунку 62, на Рисунке 64 приведены суточные вариации Еz (кривая 2, правая шкала) с главным максимумом в утренние часы и вторичным максимумом в вечерние и электропроводности воздуха (кривая 1, левая шкала). В вечернее время суммарная электропроводность падает и, соответственно, растет Еz. Этот вторичный максимум в вечернее и даже ночное время, по-видимому, можно объяснить наличием слабого тумана, который конденсируется в месте установки датчика

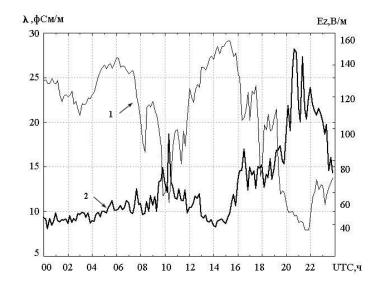


Рисунок 64 — Суточная вариация 1 - электропроводности воздуха, левая шкала, 2 - градиента потенциала электрического поля, правая шкала, за 6 ноября 2007 г.

Ультрафиолетовые лучи Солнца, являющиеся основным ионизатором атмосферы на больших высотах, в нижних слоях атмосферы существенной роли не играют, так как все лучи с малой длиной волны, обладающие энергией, достаточной для ионизации газов, входящих в состав атмосферы, поглощаются уже на больших высотах, и до пределов тропосферы доходят лишь лучи, которые могут произвести только фотоэлектрический эффект. Но вследствие малой фотоэлектрической эффективности пород, встречающихся на поверхности земли, воды и взвешенных в атмосфере частиц ионизация настолько мала, что практически ею можно пренебречь [Тверской, 1949]. Этот вывод получил прямое экспериментальное подтверждение в работе [К вопросу о взаимосвязи ..., 2003].

Оценку связи между градиентом потенциала электрического поля и разностью температур по семи наиболее характерным ходам можно представить в виде пропорции:

$$\nabla \phi \approx (0.6 \pm 0.1) \Delta T \,, \tag{17}$$

где $\nabla \phi$ - градиент потенциала электрического поля, ΔT — разность температур воздуха на высотах 3 м и 25 м.

Отсутствие устойчивого суточного хода в весенние месяцы можно объяснить следующими факторами. Уровень снега в районе обсерватории достигает 270 см и этот максимум высоты снежного покрова приходится на конец марта. Такая масса снега продлевает период таяния до конца мая и приводит к сложному характеру суточных вариаций влажности в точке наблюдения. Как влажность воздуха влияет на электрические свойства воздуха можно проследить на примере Рисунка 61.

Конвективный характер максимума Еz на восходе Солнца, подтвержденный данными измерениями, согласуется с результатами работы [Влияние процессов ..., 2007], в которой проводились измерения вертикального движения воздуха двумя крыльчатыми анемометрами на высотах 0,5 и 1,0 м. Их чувствительность позволяла отследить даже самые слабые движения воздуха вверх и вниз. Было получено хорошее согласование между вертикальным движением воздуха и

плотностью вертикального тока проводимости. Увеличение плотности тока проводимости при слабо изменяющейся электропроводности приводит к увеличению напряженности электрического поля в приземной атмосфере.

Анализ суточных вариации напряженности электрического поля, электропроводности и температуры в приземной атмосфере в условиях «хорошей погоды» в обс. «Паратунка» в 2005 — 2009 гг. показал следующее:

- 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;
- полученные результаты подтверждают физический механизм развития эффекта восхода Солнца, предложенный [Kasemir, 1956]. Согласно этому механизму, аномальные вариации напряженности электрического поля вблизи восхода Солнца обусловлены процессами турбулентности и конвекции в приземной атмосфере при изменении температуры атмосферы;
- утренний максимум суточного хода электрического поля в условиях «хорошей погоды» обусловлен конвективными процессами в атмосфере при резком возрастании температуры на восходе Солнца. Интенсивность этого максимума с коэффициентом корреляции порядка 0.6 ± 0.1 связана разностью температур на высотах 3 и 25 м;
- вечерний максимум суточного хода электрического поля оказался слабо или совсем не связанным с разностью температур, что позволило предположить влияние тумана у поверхности земли на электропроводность и соответственно напряженность электрического поля;
- 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.

4.2 Эффект восхода Солнца в спектральных характеристиках электрического поля

Известно, что солнечный терминатор (СТ) является эффективным источником волн в атмосфере Земли (см., например, обзор [Сомсиков, 1991]). По определению, СТ – это переходная область, разделяющая атмосферу от полной тени до области, освещенной полным диском Солнца. В этой области в результате изменения солнечной радиации возникает горизонтальный градиент температуры и соответственно изменяются другие геофизические параметры (давление, плотность среды). Эта область имеет конечную ширину в пространстве в зависимости от широты, высоты и геофизических условий, а по времени совпадает с периодами восхода и захода Солнца. В результате движения СТ со скоростью вращения Земли происходит генерация атмосферных волн на различных высотах в широком диапазоне периодов. Первоначально они были обнаружены различными радиофизическими методами преимущественно на ионосферных высотах в полосе периодов от нескольких минут до нескольких часов, которые относятся к диапазону акустико-гравитационных волн (АГВ) [Сомсиков, 1991; Сомсиков, 2011].

К настоящему времени накоплено много как теоретических, так и экспериментальных результатов изучения эффектов СТ. Наиболее полный обзор современного состояния этой проблемы приведен в обзоре [Сомсиков, 1991]. К сожалению, в нем слабо представлены работы, посвященные исследованию эффектов СТ в нижней и средней атмосферах. Для средней атмосферы (h ~ 20-25 км) это работа [Комплексное ..., 1988], в которой выполнен детальный анализ спектров АГВ, обнаруженных лазерным методом в пространственно-временных вариациях коэффициента обратного рассеяния света. Здесь следует заметить, что лазерный метод, используемый в лидарных установках, позволяет определить распределение по высоте температуры атмосферы, аэрозолей, концентрации озона и др. в стратосфере и верхней тропосфере, т.е. на высотах 15-60 км. Что же касает-

ся нижней атмосферы, то в обзоре процитирована всего лишь одна работа [Кузнецов, 2008], в которой рассмотрены суточные вариации Еz (см. определение терминов в п. 1.1), наблюдаемые в обс. Паратунка. В условиях «хорошей погоды» в записях отчетливо проявляется эффект восхода Солнца как бухтообразное возрастание величины Еz, на котором наложены короткопериодные колебания. Визуально, без детального спектрального анализа, авторы оценили их период (~1 ч) и приписали эти колебания действию СТ на высотах ионосферы.

В настоящем параграфе выполнен детальный спектральный анализ временных вариаций Еz и вариаций геомагнитного поля с целью определения природы их короткопериодных колебаний, наблюдаемых одновременно в период восхода Солнца. Использованы записи электрического и геомагнитного полей в сентябре 1999г. в обс. Паратунка ИКИР ДВО РАН.

Измерения напряженности электрического поля проводились с помощью прибора «Поле-2». Одновременно проводились записи метеорологических параметров для выделения так называемых условий «хорошей погоды», т.е. дней без осадков, гроз, туманов, при скорости ветра менее 6 м/с, при наличии яруса слоисто-кучевых облаков менее двух баллов [Руководящий документ, 2002; Reiter, 1992], а также при слабой геомагнитной (Кр ≤ 4) и сейсмической (М < 4) активностях. Более детально методы измерения электрического поля описаны в п. 3.1. На Рисунке 65 показаны типичные записи суточных вариаций Еz, наблюдаемых при различных метеорологических условиях, накануне землетрясений и в условиях «хорошей погоды».

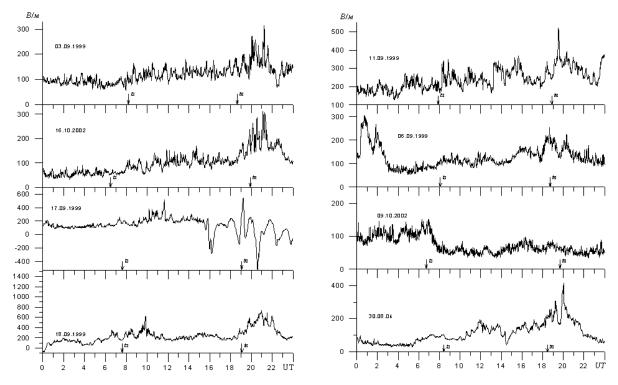


Рисунок 65 — Суточные вариации Еz в различных геофизических условиях: $03.09.1999\ \Gamma$. и $16.10.2002\ \Gamma$. — условия «хорошей погоды»; $17.09.1999\ \Gamma$. — аномалия накануне землетрясения; $18.09.1999\ \Gamma$. — землетрясение $21:28:33\ UT$; $(51.21^0\mathrm{N};\ 157.56^0\mathrm{E})$; $h=60\ \mathrm{km};\ M=6.0$; $11.09.1999\ \Gamma$. — облачность со слабыми осадками; $06.09.1999\ \Gamma$. — землетрясение $15:04:52,81\ UT$; $(52.10^0\mathrm{N};\ 159.15^0\mathrm{E})$; $h=33\ \mathrm{km};\ M=5.0$; $09.10.2002\ \Gamma$. — сильный порывистый ветер, нижний ярус слоистодождевой облачности (~ $10\ \mathrm{баллов}$), но без осадков; $30.08.2004\ \Gamma$.— землетрясение $12:23:21.60\ \mathrm{UT};\ (49.38^0\mathrm{N};\ 157.42^0\mathrm{E})$; $h=40\ \mathrm{km};\ M=6.0$.

Для комплексной обработки экспериментальных данных, кроме записей Ez, были использованы также одновременные записи горизонтальной компоненты геомагнитного поля в обсерваториях Паратунка (HP) и Barrow (ϕ =71.3°N, λ =203.4°E) (HB) (последние получены из ресурса в Интернете SPIDR). В качестве иллюстрации на Рисунке 66 приведен пример одновременных записей этих параметров для трех дней: (01-03).09.1999 г.

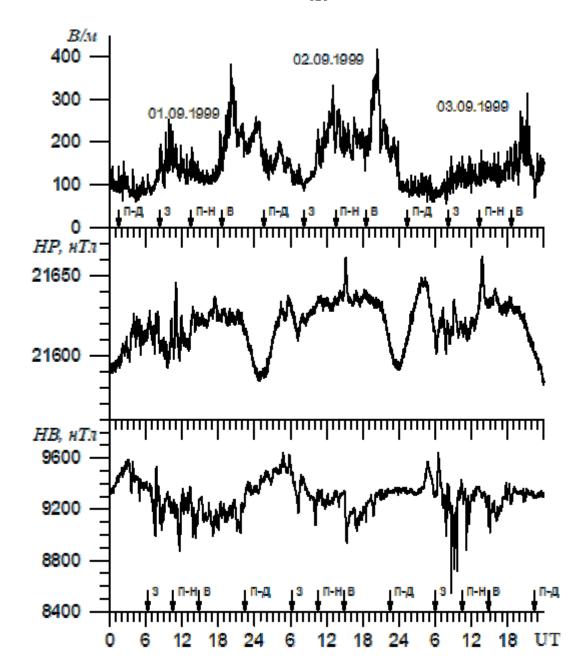


Рисунок 66 – Пример одновременных записей напряженности электрического поля (E), горизонтальной компоненты геомагнитного поля в обс. Паратунка (HP) и в обс. Ваггоw (HB) в течение трех дней: 01-03 сентября. На оси абсцисс стрелками указаны времена восхода и захода Солнца, полудня и полуночи.

Метод спектральной обработки показан (Рисунок 67) на примере записи 14.09.1999 г. для периода, включающего время восхода Солнца (12-24 UT), и состоял в следующем. Из исходной записи Еz (а) и НР (б) (фрагмент 1) исключалась величина, равная среднему значению за этот период, и результирующая кривая (фрагмент 2) без потери точности анализа [Харкевич, 1957] дополнялась

нулями до 2048 точек. По алгоритму БПФ оценивался амплитудный спектр этой кривой (жирная линия на фрагменте 4 в зависимости от частоты с левой осью ординат и в зависимости от периода T=1/f слева на фрагменте 5). Далее с помощью фильтра выделялся спектр в полосе периодов 0.5-3ч (штриховая линия на фрагменте 4 с правой осью ординат и справа на фрагменте 5 в зависимости от периода). Выделенная полоса периодов включает в себя внутренние гравитационные волны (ВГВ). С помощью обратного преобразования Фурье определялась временная зависимость отфильтрованного сигнала (фрагмент 3). Этот сигнал использовался далее для спектральной обработки, а именно, для оценки авто- и взаимной спектральной плотности мощности (для краткости, спектров мощности) в полосе периодов 0.5-3 ч с помощью метода модифицированных периодограмм (ММП) [Welch, 1967]. Согласно этому методу, исходная запись разделялась на n коротких сегментов $t_i = 6$ ч (с перекрытием на половину сегмента 3ч). Для каждого сегмента оценивалась модифицированная периодограмма введением временного «окна» вида $0.5(1-\cos^2(t/t_i))$ при $0 < t \le t_i$. Для более детального расчета спектров по частоте на этом интервале t_i использовалась процедура дополнения его нулями до 2048 точек. Результирующий спектр мощности исходной записи определялся путем усреднения спектров, рассчитанных для коротких сегментов. Известно, что ММП при увеличении количества и коротких сегментов при заданной длительности исходной записи уменьшает дисперсию оценки спектра мощности и повышает ее устойчивость, но при этом понижает разрешение спектров по частоте (сравнение спектра фрагмента 5 справа и кривой 1 на Рисунке 67в). В нашем случае для выделения гармоники с T ~ 3 ч t_i было выбрано равным 6 ч, тогда число n на исходной записи длительностью 12 ч равно трем. Для поиска связи между волновыми процессами на различных высотах атмосферы и определения местоположения их источника оценены авто- и взаимные спектры мощности также ММП. Взаимный спектр двух процессов [Бендат, 1989], с. 385-394 определяется как $Sxy(f) = |Sxy(f)| \cdot exp(-j\theta xy(f))$, где модуль |Sxy| $= (ReSxy^2 + JmSxy^2)^{1/2}$, а аргумент $\theta xy = arctg(JmSxy/ReSxy)$. Модуль взаимного

спектра характеризует вклад отдельных источников во взаимный процесс, а его аргумент позволяет определить запаздывание или опережение одного волнового процесса относительно другого. В относительных единицах связь двух волновых процессов характеризуется величиной квадрата функции когерентности $\gamma^2(f) = |\mathrm{Sxy}(f)|^2/(\mathrm{Sxx}(f)\mathrm{Syy}(f))$. Величина $\gamma^2(f)$ аналогична квадрату нормированной корреляционной функции на данной частоте. Она мала в тех случаях, когда мало отношение полезного сигнала к шуму, когда два процесса между собой не связаны линейно, когда второй процесс (Y) зависит не только от базового процесса (X), но и от других источников [Бендат, 1989]. Пример предложенного метода обработки исходных записей Еz и HP - компоненты для периода 12-24 UT, включающего момент восхода Солнца, показан на Рисунке 67в.

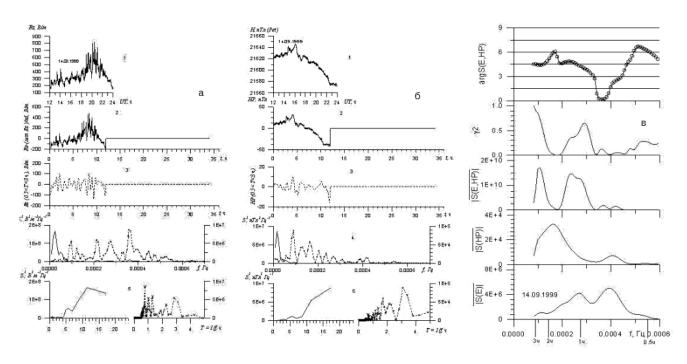


Рисунок 67 — Пример спектральной обработки одновременных записей напряженности электрического поля (E) и горизонтальной компоненты геомагнитного поля (HP) на интервале времени 12-24 UT, включающем восход Солнца (подробно см. в тексте).

В качестве базового процесса X приняты вариации Ez, а в качестве Y — вариации Ez и Ez и Ez и Ez вариации Ez и Ez и

периодов T < 1 ч и T ~ 1 ч, интенсивность которых существенно превышает колебания с T ~ 2-2.5 ч. В то же время в автоспектре HP S(HP), наоборот, преобладают колебания в полосе периодов T ~ 2-2.5 ч со слабо выраженными колебаниями на T ~ 0.7 ч. Во взаимном спектре S(E,HP) последние колебания заметно подавлены, и величина когерентности γ^2 ~ 0.1, что указывает на отсутствие связи волновых процессов в динамо-области и приземной атмосфере. Следовательно, источник колебаний Ez сосредоточен в нижней атмосфере.

Два других максимума во взаимном спектре на $T \sim 2\text{-}2.5$ ч и $T \sim 1$ ч с коэффициентом когерентности $\gamma^2 \sim 0.9$ и 0.6, соответственно, указывают на связь процессов в нижней атмосфере и в динамо-области ионосферы. Источник этих колебаний, как следует из характера кривой аргумента взаимного спектра, в первом случае расположен выше динамо-области (аргумент практически постоянен), а во втором случае — в нижней атмосфере (фаза взаимного спектра указывает на запаздывание процесса в динамо-области относительно приземной атмосферы).

Описанный спектральный метод использован для обработки одновременных записей Еz, HP и HB на восходе, заходе Солнца и для ночных условий. Результирующие авто- и взаимные спектры, усредненные за несколько дней «хорошей погоды» в сентябре 1999 г., приведены на Рисунке 68, где использовано 14 дней на восходе (а), 7 дней на заходе (б) и 12 дней в ночное время (в). Вертикальными отрезками прямых на кривых показаны величины среднеквадратического отклонения (СКО) как корень квадратный из дисперсии оценок.

Мощность ВГВ в авто- S(E), S(HP), S(HP) и взаимных S(E,HP), S(E,HB) спектрах сосредоточена преимущественно в полосе периодов 1.5-3 ч с выраженным максимумом на $T \sim 2\text{-}2.5$ ч. Наличие этой полосы колебаний во взаимных спектрах S(E,HP) и S(E,HB) с коэффициентами когерентности, изменяющимися от 0.3 до 0.9, указывает на взаимосвязь процессов в нижней атмосфере и на высотах динамо-области, но источник этих волновых процессов, как следует из анализа кривых аргумента взаимных спектров, расположен выше динамо-области. Ис-

ключение составляют спектры мощности Еz (нижняя кривая на Рисунке 68). Здесь, кроме полосы колебаний вблизи 1.5-2 ч, выделены более слабо выраженные колебания с максимумами на периодах Т ~ 0.8 и 0.6 ч, которые практически отсутствуют на взаимных спектрах S(E,HP) и S(E,HB). Это указывает на то, что источник этих колебаний сосредоточен в приземной атмосфере, но энергии этих колебаний недостаточно для прохождения на высоты динамо-области ионосферы. Для присутствующего максимума во взаимных спектрах S(E,HP) и S(E,HB) вблизи Т ~ 1 ч с коэффициентом когерентности, изменяющемся от 0.2 до 0.7, источник колебаний в спектре Еz определен недостаточно уверенно. Аргумент взаимного спектра изменяется сложным образом (не исключено, что это связано с низким разрешением по частоте ММП) и указывает либо на удаленный источник выше динамо-области, либо на источник в нижней атмосфере.

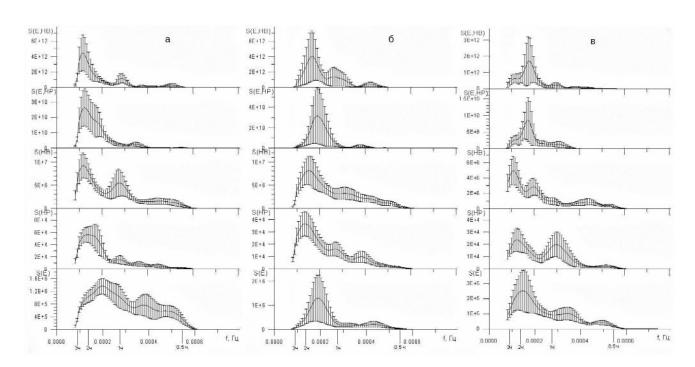


Рисунок 68 — Средние авто- и взаимные спектры мощности на восходе (a), заходе (б) Солнца и в ночное время (в). Вертикальные отрезки линий на кривых – СКО.

В ночное время (08-14 UT), когда оптическое излучение Солнца «выключено», но сохраняется корпускулярное, характер автоспектров Еz по форме изме-

няется слабо, но интенсивность выделенных максимумов почти на порядок ниже по сравнению с периодом времени 12-24 ч, особенно на периодах $T \sim 0.6$ и 0.8 ч. В этот период более существенно изменяются автоспектры S(HP) и S(HB), усиливаясь на $T \sim 1$ ч. Возможно, это связано с появлением всплесков суббурь, которые отчетливо видны на временных вариациях горизонтальных компонент геомагнитного поля, особенно на широте 71^0 N (Barrow) (см. Рисунок 66).

При заходе Солнца (00-12 UT) в автоспектрах Еz четко выделен один максимум на $T \sim 1.5$ ч и сильно подавлены колебания на периодах ниже 1 ч. Этот период ближе соответствует дневным условиям в атмосфере, поскольку время полудня в обс. Паратунка приходится на 1.45ч UT, а в обс. Ваггоw - на 22.5ч UT (см. Рисунок 66). После полудня интенсивность солнечной радиации уменьшается, соответственно падает температура воздуха. Как видно на Рисунке 66, характер временных вариаций Ez и горизонтальных компонент геомагнитного поля, на широтах 53° N и 71° N существенно различаются между собой. Это проявляется и в их авто- и взаимных спектрах. Характер изменения аргумента взаимных спектров S(E,HP) и S(E,HB) показывает, что колебания на $T \sim 2$ -2.5 ч вызваны удаленным источником, а колебания на $T \sim 1$ -1.5 ч, присутствующие в автоспектрах S(HP) и S(HB) и отсутствующие в автоспектре Ez, вызваны источником в динамо-области или выше. Но волны в силу их слабости не проходят в нижнюю атмосферу.

Таким образом, анализ авто- и взаимных спектров мощности Ez в приземной атмосфере и горизонтальной компоненты геомагнитного поля на широтах $53^0\mathrm{N}$ и $71^0\mathrm{N}$ показал, что колебания с $T\sim 2\text{-}2.5$ ч вызваны удаленным источником, а колебания с $T\sim 1$ ч, которые в ночное время и на восходе Солнца обнаруживаются на высотах нижней атмосферы, возможно, вызваны источником в динамообласти или выше. Что же касается колебаний с периодами T<1 ч, обнаруженных только в нижней атмосфере, то они слабо проникают на высоты динамообласти.

Присутствие постоянного источника непрерывной генерации атмосферных гравитационных волн на полярных широтах было обнаружено в измерениях концентраций нейтральных газов [O] и [N₂] на спутнике DE2 [Лизунов, 2010]. Действительно, в вариациях горизонтальной компоненты в обс. Вагтом эти колебания более интенсивны (см. Рисунок 66), чем в обс. Паратунка.

Таким образом, эффект восхода Солнца в суточных вариациях Ег проявляется в расширении спектра мощности в область более коротких периодов (Т < 1 ч) со значительным ослаблением этих колебаний в вечернее и ночное время. Этот эффект слабо выражен в авто-спектрах НР и НВ и во взаимных спектрах Еz и геомагнитного поля на широтах 53^{0} N и 71^{0} N, что указывает на слабое прохождение ВГВ на восходе на высоты динамо-области. Вместе с тем в авто- и взаимных спектрах рассмотренных параметров в течение суток постоянно наблюдаются колебания в полосе Т ~ 2-2.5 ч, интенсивность которых максимальна в период восхода Солнца. Эти колебания наблюдались ранее в квазипериодических вариациях других геофизических параметров, например, во флуктуациях атмосферного давления [Грачев и др., 1988], а также на высотах D – и динамо - областей ионосферы [Прохождение внутренних ..., 2008; Михайлов и др., 2008]. Возможно, эти колебания обусловлены глобальными колебаниями Солнца, которые могут воздействовать на атмосферу Земли через соответствующие колебания солнечного излучения как в оптическом, так и корпускулярном потоках. Наличие таких колебаний Солнца как сферы с Т ~ 160 мин действительно было обнаружено сравнительно давно [Северный, 1983]. В данной работе показано их усиление на восходе Солнца.

Колебания в спектрах мощности рассмотренных параметров вблизи периода Т ~ 1.5 ч, как показано в работе, обусловлены источниками либо в динамообласти, либо выше нее. Возможно, как показано в работе [Колебания ..., 1992], эти колебания обусловлены собственными радиальными колебаниями ионосферы, которые, по оценкам авторов, составляют величины Т ~ 85.8 мин (Dобласть), 86.8 мин (Е-область), 87.6 мин (F1-область) и 89.5 мин (F2-область).

Эти колебания проявляются в периодических сжатиях и расширениях всей толщи газа и выражаются в изменении его плотности, давлении и температуры.

Колебания в спектрах мощности Ez в полосе периодов T < 1 ч включают в себя диапазон собственных колебаний Земли, Т ~ 57 мин [Возбуждение колебаний ..., 1989]. Эти колебания в вариациях Еz на Камчатке, которые усиливались в период подготовки землетрясения, ранее были обнаружены в работе [Михайлов и др., 2008]. Более того, было показано, что усиленные ВГВ способны распространяться до высот D- и динамо- областей, но только при сильных землетрясениях (с магнитудой $M \ge 6$). В этой связи представляло интерес сопоставить интенсивности ВГВ на восходе Солнца и накануне землетрясения. Для этой цели выбраны три землетрясения, произошедшие на Камчатке в сентябре 1999 г. на расстояниях r ~ 150-250 км от обс. «Паратунка». На верхнем фрагменте Рисунка 69 приведены суточные вариации Еz накануне этих землетрясений. Видно, что аномалии Еz, связанные с землетрясениями, по времени совпадают с периодами восхода Солнца (см. Рисунок 65, $t_{\rm B} \sim 18.7-19$ UT). А их индивидуальные автоспектры, приведенные на нижнем фрагменте рисунка вместе со средним автоспектром на восходе Солнца, по форме близко совпадают между собой. А именно, во всех спектрах присутствуют преобладающий максимум в полосе периодов 2 - 2.5 ч и дополнительные менее интенсивные максимумы на периодах $T \le 1$ ч. По интенсивности эти максимумы одного порядка по величине для случая восхода и землетрясений с магнитудой М < 6 (левая шкала), энергия которых, как показано в работе [Прохождение внутренних ..., 2008], оказалась недостаточной для прохождения до высот динамо-области. Этот результат позволяет сделать вывод, что колебания ВГВ, возбуждаемые на восходе Солнца в нижней атмосфере, также не могут проникать выше. Этот факт подтверждается отсутствием колебаний в спектрах геомагнитного поля, наблюдаемых на восходе в обсерваториях Паратунка и Barrow. На мой взгляд, источник этих колебаний в нижней атмосфере связан с вариациями метеорологических параметров на восходе

Солнца, т.е. с изменением температуры и соответственно давления атмосферы в результате их модуляции вариациями солнечной радиации.

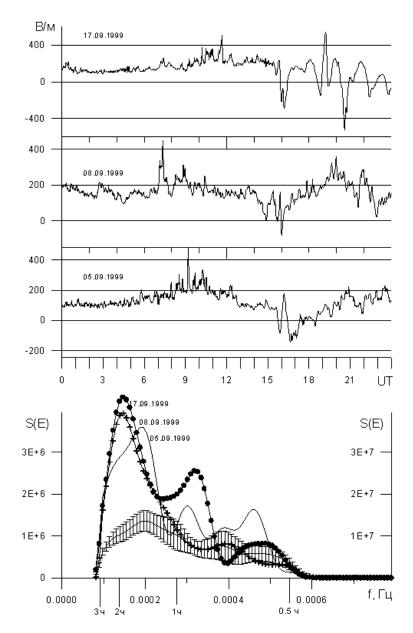


Рисунок 69 — Суточные вариации напряженности электрического поля с аномалией накануне землетрясений: (верхний фрагмент) и их автоспектры вместе с усредненным автоспектром в периоды с восходом Солнца (нижний фрагмент). Правая ось ординат относится только к кривой 17.09.1999 г.

В заключении параграфа можно отметить, что на восходе Солнца в спектрах мощности напряженности квазистатического электрического поля в приземной атмосфере на Камчатке (обс. Паратунка) обнаружено следующее:

- усиление интенсивности колебаний в полосе периодов 2-2,5 ч;
- усиление колебаний в полосе периодов T < 1 ч, интенсивность которых соизмерима с интенсивностью ВГВ накануне слабых землетрясений с магнитудой M < 6, недостаточна для прохождения на высоты динамо-области ионосферы;
- вариации аргумента взаимных спектров напряженности электрического поля и вариаций горизонтальной компоненты геомагнитного поля, одновременно наблюдаемых в обсерваториях Паратунка и Barrow, позволили установить местоположение источников этих колебаний, а именно, в нижней атмосфере;
- 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.

ГЛАВА 5. ЭФФЕКТЫ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ В ВАРИАЦИЯХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

5.1 Особенности динамики электрического поля в период подготовки землетрясения

Как было показано в п. 1.6, в период подготовки землетрясений атмосферные шумы на порядок — полтора порядка возрастают по сравнению с фоновым уровнем. Рассмотрим более детально динамику развития атмосферных шумов в полосе периодов 0.5-3 ч. на примере индивидуальных землетрясений. Начнем с Кроноцкого землетрясения, которое занимает особое место в сейсмической истории Камчатки последних десятилетий [Гелиогеофизические эффекты ..., 1998]. Оно произошло на юге Камчатского залива вблизи Кроноцкого полуострова 5 декабря 1997г. в 11 ч. 27 мин. на глубине 10 км с энергетическим классом К=14.9 (М=7.7). Главному толчку в течение почти двух суток предшествовали форшоковые землетрясения. Интенсивность колебаний грунта в Паратунке во время главного толчка достигала 5-6 баллов.

Развитие во времени сейсмической активности форшок - афтершоковой последовательности Кроноцкого землетрясения 5 декабря 1997 г., поведение электрических характеристик приземного слоя атмосферы и метеорологических параметров за период 29.11. - 8.12. приведены на Рисунке 70. Значения электрических характеристик приземного слоя атмосферы усреднялись в десятиминутных интервалах. После резких возмущений Еz, связанных с циклонической деятельностью с 2 декабря наблюдалась стабилизация сигнала Еz на сравнительно высоком уровне до конца дня 4 декабря, в то время как условия «хорошей погоды» выполнялись 4-5 декабря.

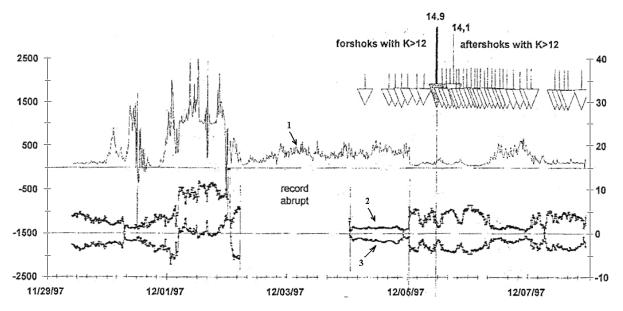


Рисунок 70 — Развитие форшок-афтершоковой последовательности и электрические характеристики приземного слоя атмосферы, осредненные в десятиминутном интервале: 1 - градиент потенциала атмосферного электрического поля - Ez, 2 - электропроводность воздуха вызванная отрицательными и 3 - положительными с множителем (-1) ионами.

Аналогичная картина прослеживается и в поведении электропроводности. Выполнение условий «хорошей» погоды определено по наблюдениям метеопараметров в п. Паратунка и подтверждается данными Камчатской зональной гидрометеообсерватории.

За 11.5 ч. перед Кроноцким землетрясением в течение 20 мин. произошли ступенчатые изменения в электрических характеристиках приземного слоя атмосферы: Еz уменьшилось на 400 В/м., λ_+ уменьшилось на 180 условных единиц, а λ_- уменьшилось на 160 условных единиц. Данные изменения предположительно можно рассматривать как оперативный предвестник.

Рассмотрим динамику электрического поля и наложенных атмосферных шумов этого землетрясения и других более слабых. Во время Кроноцкого землетрясения наблюдался рой землетрясений, параметры которых представлены в Таблице 6 и изображены на Рисунке 71, хотя, кроме этих толчков, произошло более 20 форшоков с магнитудой $M \ge 5$ и более 60 афтешоков в течение 5 и 6 декабря.

Вариации Еz-компоненты поля в течение пяти дней приведены на Рисунке 72 фрагмент 1. Стрелками указаны моменты самых сильных толчков. Видно, что за 11.5ч перед главным толчком происходит скачкообразное уменьшение уровня Еz от величины ~560 В/м почти до нулевого уровня с последующими более слабыми бухтообразными понижениями перед двумя последующими сильными толчками.

Таблица 6 - Землетрясения 5-6 декабря 1997 г.

Дата	Время	$\phi^0 N$	$\lambda^0 E$	h, км	K/M	R, км
05.12.1997 г.	11:26	54.95	163.23	4	15.5/7.7	392
05.12.1997 г.	18:48	53.60	161.84	0	14.1/6.8	248
06.12.1997 г.	10:59	53.87	161.99	10	13.7/6.3	280

Примечание - h - глубина, K - класс 3T, M - магнитуда, R - расстояние от эпицентра до обс. «Паратунка».

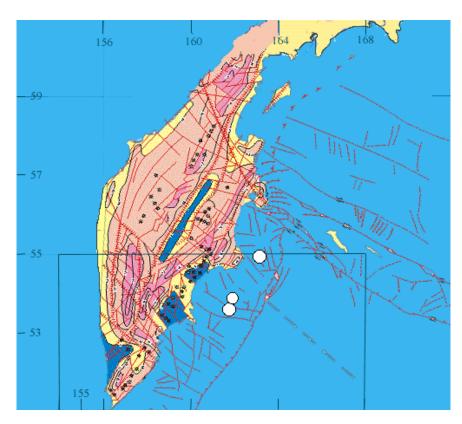


Рисунок 71 – Землетрясения в декабре 1997 г. по Таблице 6.

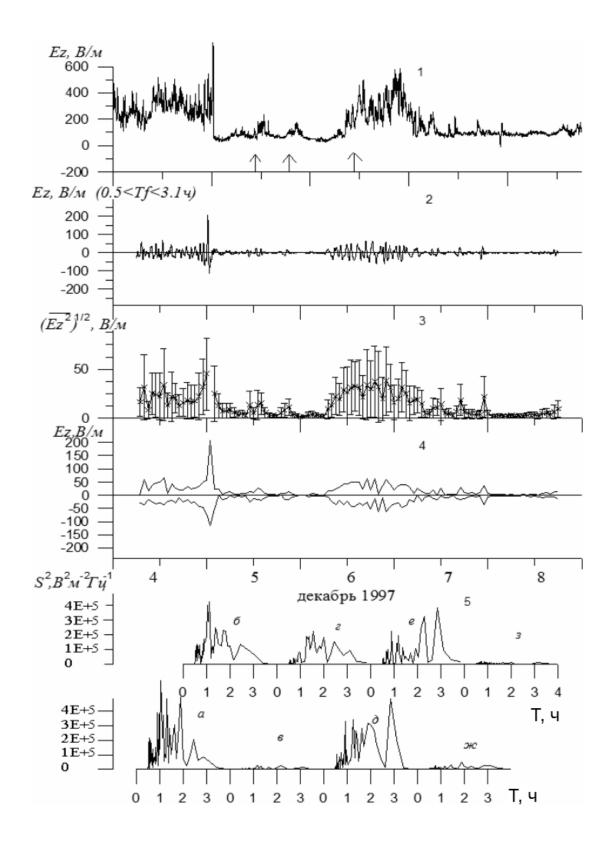


Рисунок 72 — Обработка сигналов во время Кроноцкого землетрясения 5 декабря 1997 г.

Далее исходная запись Еz-компоненты поля за период с 4 по 8 декабря обрабатывалась методом, описанным в п. 1.6, но с перекрытием на половину суток. Из исходного ряда вычиталось среднее за интервал сутки значение. Отфильтрованный сигнал в диапазоне периодов 0.5 < T < 3.1 ч представлен на фрагменте 2. На фрагменте 3 представлены значения квадратного корня из среднечасовых значений квадрата напряженности поля (вертикальные отрезки – СКВ-значения). На фрагменте 4 показаны экстремальные в течение часа значения всплесков шумов. На фрагменте 3 и 4 отчетливо видно усиление интенсивности шумов по сравнению с фоновыми значениями и особенно с минимальным уровнем в бухте понижения Еz. На панели 5 приведена последовательность спектров мощности, оцененных на временных интервалах длительностью одни сутки, но с перекрытием в 0.5 суток, начиная с 4 декабря в 06 UT. Интервал времени, за который строился спектр, проецируется на ось абсцисс фрагмента 4. Максимальная интенсивность спектра мощности поля приходится на 4 декабря (а), т.е. за сутки до главного толчка, в полосе периодов Т ~ 1-2 ч. По мере развития сейсмической активности интенсивность этих компонент уменьшалась (б), была минимальной в бухте (в), затем возрастала, не превышая уровня 4 декабря. При этом 6 и 7 декабря (после трех сильных толчков) спектр мощности, в отличие от 4 декабря, расширился в область более длинных периодов, т.е. Т > 2ч.

Землетрясение 1 июня 1998 г. Это был рой землетрясений, форшоки имели место с 27 мая (см. Таблицу 7 и Рисунок 73), магнитуда первого из них достигала величины М = 5,95. Наиболее сильный толчок произошел 1 июня с магнитудой М = 6,1. На Рисунке 74 приведены вариации Еz-компоненты поля в течение пяти дней (фрагмент 1), на котором стрелками указаны моменты землетрясений. 26 и 27 мая наблюдения, к сожалению, отсутствовали. На рисунке видна серия бухтообразных понижений величины поля порядка (50-150)В/м с различным упреждением моментов землетрясений. Усиление шумов, связанных с этими аномалиями, составляет величину ~ (20-30) В/м. Перед сильным толчком с М = 6.1 усиление шума незначительное, всего в два раза превышает фоновые значения

(фрагмент 3 и 4). В последовательности спектров мощности поля нет заметных вариаций в полосе периодов 1-2 ч подобно Кроноцкому землетрясению. Экстремальные фоновые значения шума лежат преимущественно в пределах 0 ± 10 В/м с возрастанием до (плюс 50 — минус 30) В/м в бухте понижения напряженности поля.

Таблица 7 - Землетрясения в мае-июне 1998 г.

Дата	Время	$\varphi^0 N$	λ ⁰ E	h, км	K/M	R, км
27.05.1998 г.	20:41	52.33	159.74	12	13.4/5.95	123
28.05.1998 г.	04:58	52.14	159.97	5	13.1/5.8	148
28.05.1998 г.	13:18	52.16	159.96	10	12.7/5.6	146
29.05.1998 г.	02:09	52.14	159.72	10	11.0/4.75	136
30.05.1998 г.	03:51	53.75	160.95	37	11.5/5.0	199
01.06.1998 г.	05:34	52.88	160.22	35	13.7/6.1	132

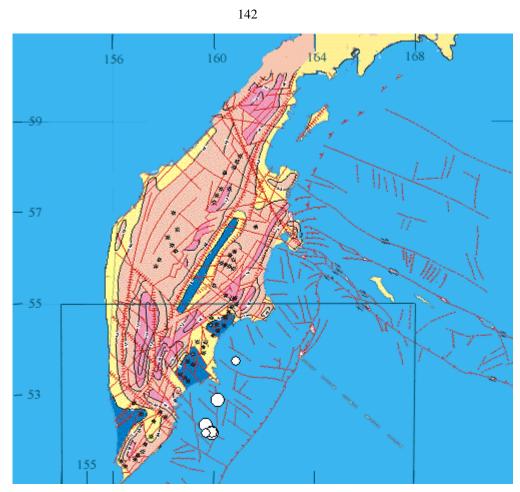


Рисунок 73 – Землетрясения в мае-июне 1998 г. по Таблице 7.

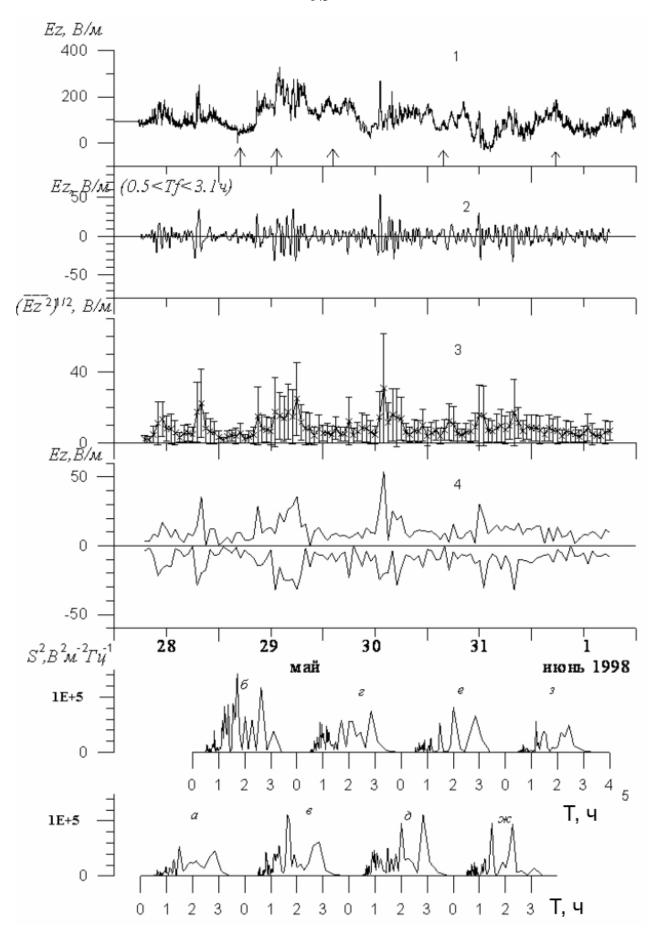


Рисунок 74 – Землетрясение 1 июня 1998 г.

Землетрясение 8 марта 1999г. Как видно из Таблицы 8 и Рисунка 75, в этом случае также происходил рой землетрясений с первым форшоком 7 марта с магнитудой М = 5,1 и с последующей серией до самого сильного толчка 8 марта в 12:25 UT с M = 6,35. Суточные вариации Ez-компоненты поля для периода с 5 по 9 марта приведены на Рисунке 76 (фрагмент 1). Бухтообразные понижения напряженности поля величиной порядка 100 В/м наблюдались перед первым форшоком и перед роем толчков 8 марта. Экстремальные всплески шумов порядка [плюс (40-60) и минус 40] В/м отмечены в первой половине суток 6 марта перед бухтообразным понижением напряженности поля 7 марта. Фоновые значения экстремальных всплесков составляют величины \pm (10-15) B/м (фрагмент 3 и 4). На фрагменте 5 приведена последовательность спектров мощности поля, оцененных на интервалах длительностью в одни сутки с перекрытием на половину суток. Отчетливо видно усиление шума 6 марта (в) (перед бухтообразным понижением поля 7 марта (е)). 8 марта интенсивность спектральных компонент минимальная. В рассматриваемый период 5-9 марта метеорологическая обстановка была спокойной.

Землетрясение 8 октября 2001г. Таблица 9 и Рисунок 77 представляют динамику сейсмического события с двумя форшоками 5 и 7 октября, предваряющими два мощных толчка 8 октября с М = 6.2 и 6.0, сопровождаемыми серией афтершоков. Как видно из Рисунка 78, поведение напряженности Ехкомпоненты поля в период 6-10 октября было очень изменчивым без выраженных аномалий, с наложенным усилением поля, совпадающим по времени с моментами толчков. Это проявилось и в поведении экстремальных значений шумов, когда при фоновых значениях ±5 В/м, максимальные всплески шумов приходились как на моменты времени до землетрясений, так и во время их (фрагменты 3 и 4). Последовательность спектров мощности подтвердило также отсутствие усиления спектров в полосе периодов 1-2 ч до толчка.

Таблица 8 - 3	Землетрясен:	ия 7-8 март	га 1999 г.
---------------	--------------	-------------	------------

Дата	Время	$\varphi^0 N$	λ ⁰ E	h, км	K/M	R, км
07.03.1999 г.	10:55	52.68	159.69	40.6	11.7/5.1	102
08.03.1999 г.	05:39	52.11	159.74	34.5	13.2/5.85	139
08.03.1999 г.	05:45	52.16	159.69	23.6	12.5/5.5	133
08.03.1999 г.	05:47	52.22	159.68	10.9	11.0/4.75	128
08.03.1999 г.	05:57	52.07	159.90	5.10	13.0/5.75	150
08.03.1999 г.	12:25	52.19	159.74	2.6	14.2/6.35	133
08.03.1999 г.	13:05	52.10	159.85	5.3	11.2/4.85	145
08.03.1999 г.	13:11	52.15	159.71	10.9	11.4/4.95	134

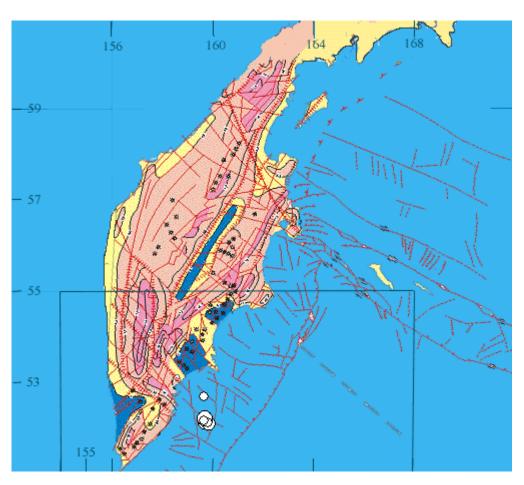


Рисунок 75 – Землетрясения 7-8 марта 1999 г. по Таблице 8.

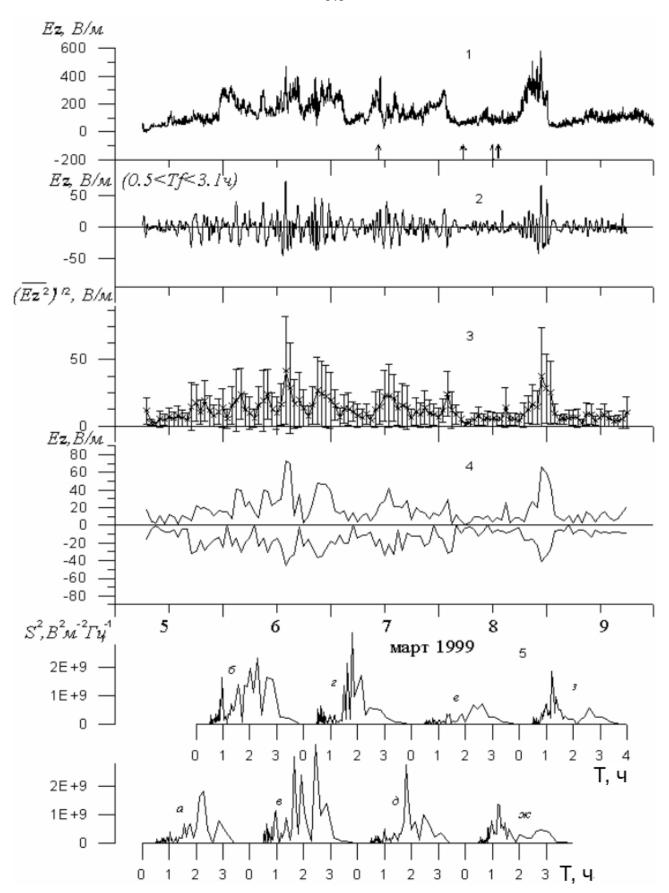


Рисунок 76 – Землетрясение 8 марта 1999 г.

Таблица 9 - Землетрясения в октябре 2001г.

Дата	Время	φ ⁰ N	λ ⁰ E	h, км	K/M	R, км
05.10.2001 г.	16:32	52.51	160.48	16	11.2/4.85	158
07.10.2001 г.	22:46	52.38	160.70	12	12.5/5.5	177
08.10.2001 г.	06:18	52.52	160.49	5	12.6/5.51	159
08.10.2001 г.	18:14	52.65	160.42	26	13.9/6.2	150
08.10.2001 г.	18:20	52.64	160.45	17	13.5/6.0	152
08.10.2001 г.	18:25	52.60	160.49	15	11.8/5.15	156
08.10.2001 г.	20:02	52.67	160.27	26	11.8/5.15	140
08.10.2001 г.	22:50	52.60	160.37	23	11.4/4.95	148
08.10.2001 г.	23:51	52.62	160.28	12	11.4/4.95	142
09.10.2001 г.	01:35	52.65	160.55	11	11.3/4.9	158
09.10.2001 г.	02:49	52.52	160.52	11	12.0/5.25	161
09.10.2001 г.	04:21	52.48	160.60	10	11.0/4.75	167
09.10.2001 г.	09:31	52.43	160.63	16	11.5/5.0	171
10.10.2001 г.	01:32	52.53	160.66	6	12.8/5.65	169
10.10.2001 г.	11:28	52.39	161.08	18	12.8/5.65	201
10.10.2001 г.	15:49	52.52	161.00	16	11.7/5.1	191

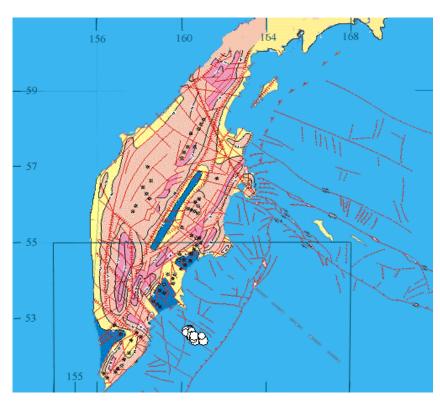


Рисунок 77 – Землетрясения в октябре 2001 г. по Таблице 9.

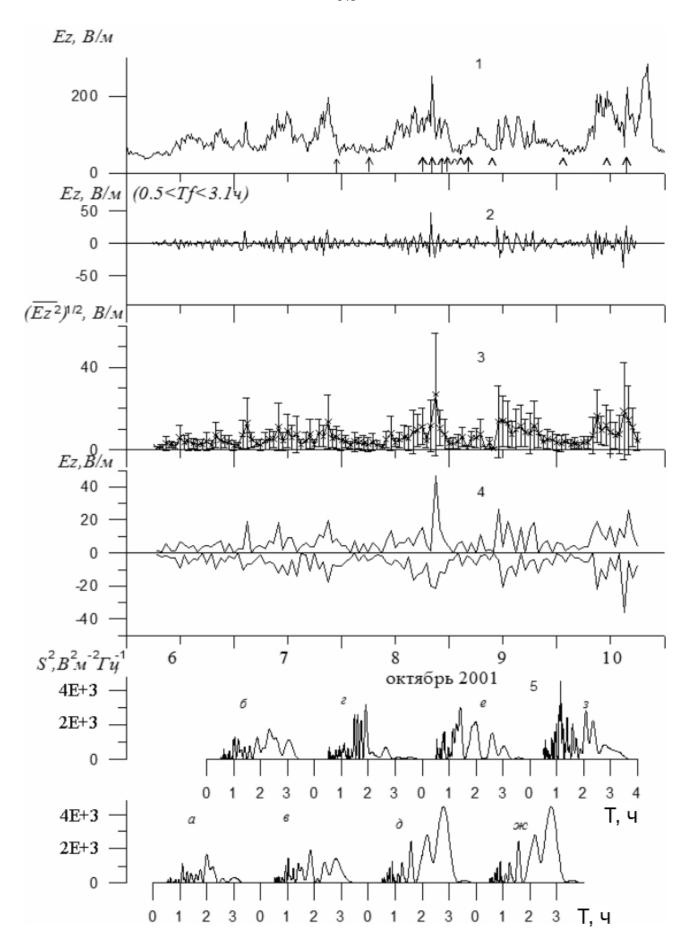


Рисунок 78 – Землетрясение 8 октября 2001 г.

Для примера того, как осадки могут скрывать эффекты подготовки землетрясений, ниже приведены результаты индивидуальных аномалий Еz-компоненты поля, зарегистрированные в октябре 2002 г. Параметры сильных землетрясений в этот период приведены в Таблице 10 (Рисунок 79). На Рисунке 80 приведены 4 фрагмента, представляющие собой аномалии Еz-компоненты поля 3 октября в отсутствии последующего землетрясения (а), 7-8 октября при наличии дождя и последующего землетрясения (б), 15 октября без осадков, но с последующим землетрясением 16 октября (в) и 18 октября при сильном дожде (г). Во всех четырех случаях отмечается усиление интенсивности шума, экстремальные значения которого приходятся на «хвост» распределения (см. Рисунок 36), намного превышая фоновый уровень ±20 В/м, а также всплески шума в аномалии, сопровождаемой землетрясением (в).

Таблица 10 - Землетрясения в октябре 2002 г.

Дата	Время	φ ⁰ N	λ ⁰ E	h, км	K/M	R, км
08.10.2002 г.	09:18	52.67	160.36	26.8	12.4/5.45	145
09.10.2002 г.	13:49	51.07	158.16	41.1	11.3/4.9	211
16.10.2002 г.	10:12	51.65	157.95	113	13.4/5.95	148
20.10.2002 г.	01:34	52.86	160.36	29.4	12.5/5.5	142

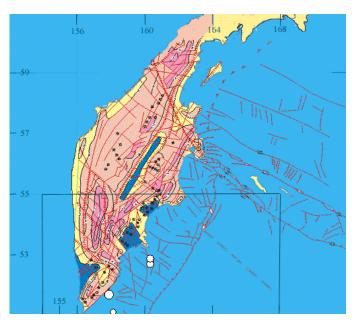


Рисунок 79 – Землетрясения в октябре 2002 г. по Таблице 10.

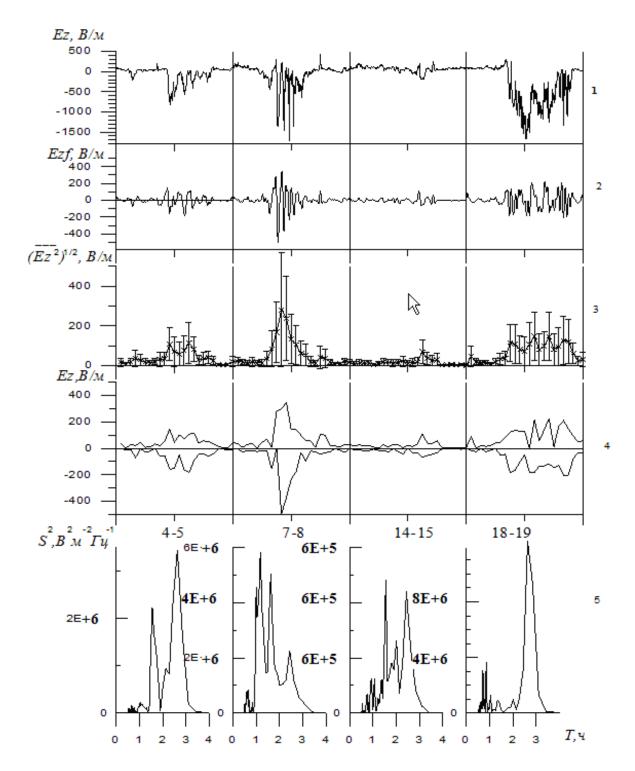


Рисунок 80 — Временные и спектральные характеристики атмосферных шумов: при уровне осадков 4 мм/м 2 4-5 октября; при уровне осадков 9 мм/м 2 7-8 октября перед землетрясением с магнитудой M = 5.45; при слабых осадках 14-15 октября перед землетрясением с магнитудой M = 5.95; при уровне осадков 9 мм/м 2 18-19 октября перед землетрясением с магнитудой M = 5.5 2002 г.

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 следующее:

- возникновение аномалий напряженности Ez-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 наличии неблагоприятных метеорологических условий (дождь, снег) перед землетрясением вариации Еz-компоненты поля были очень изменчивыми без выраженных аномалий. Как показано на Рисунке 37, при осадках, так же, как и в случае аномалий, сопровождаемых землетрясениями, происходит усиление интенсивности шумов, которые «замазывают» эффекты в электрическом поле литосферной природы.

5.2 Спектры мощности электрического поля в сейсмически спокойных и возмущенных условиях

В настоящее время предложены теоретические модели литосферно-атмосферно-ионосферного взаимодействия, включающие в себя электромагнитные явления, внутренние гравитационные волны, акустические волны, сторонние токи и токи смещения в глобальной атмосферно - электрической цепи. Критический анализ возможных моделей взаимодействия дан в работе [Сорокин и др., 1999].

В качестве косвенного средства экспериментального исследования усиления атмосферных волн в сейсмоактивной зоне в период подготовки землетрясений в

настоящей работе использованы вариации спектров мощности электрического поля в сейсмически спокойных и возмущеных условиях.

Ниже приведены результаты анализа спектров мощности квазистатического электрического поля Ez [Вариации спектров ..., 2003; Обнаружение атмосферных ..., 2004; Power spectrum ..., 2004]. Напомним типичные суточные вариации Ez, измеренные с шагом 1 мин в дни «хорошей погоды» (кривые 1 и 2), в день землетрясения (кривая 3) 18 сентября 1999 г. 21:28 UT, $\phi = 51.21^{0}$ N, $\lambda = 157.56^{0}$ E, h = 60 км, K = 13.4 (M = 6.0) и кривая 4 с сильными осадками (Рисунок 81). Как видно из кривой 1, в суточном ходе выделяется небольшой максимум в утренние часы, связанный с температурным градиентом, более слабый вечерний максимум, спокойный ход днем и ночью, при этом дневной уровень Ez несколько ниже ночного при среднем значении Ez ~ 120 B/м. 17 сентября, за сутки до землетрясения на кривой Ez наблюдалась бухта пониженных значений Ez с возрастанием среднего значения до 200 B/м. В день с осадками 19 сентября величина Ez в течение ~6 ч уменьшилась до $-2\cdot10^{3}$ B/м.

Рисунок 82 повторяет Рисунок 33 и демонстрирует метод спектральной обработки суточных данных Еz на примере 29 сентября 1999 г. Верхняя кривая (1) – это суточный ход Ez с дискретностью $\Delta t = 1$ мин. Следующая вниз кривая (2) - суточный ход с исключенным из кривой 1 среднесуточным значением Ez. Эти значения дополнены нулями до 2048 точек, необходимых для использования алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ). Спектр мощности дополненного ряда значений Ez рассчитывается методом периодограмм с прямоугольным временным "окном" на частотах $f_k = k \cdot \Delta f$ с соответствующим шагом по частоте $\Delta f = 1/2048 \cdot \Delta t = 8.14 \cdot 10^{-6}$ Γ ц и периодами $Tk = 1/f_k$, где k = 1, 2, ... 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 пред-

ставлена 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.

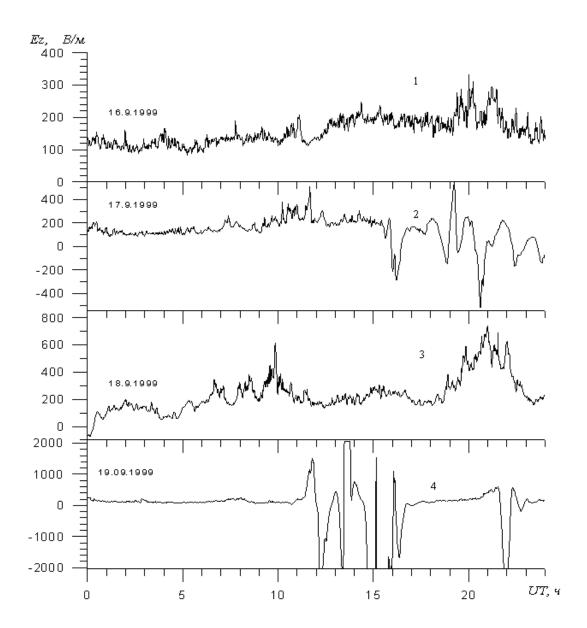


Рисунок 81 — Типичные суточные вариации величины квазистатического электрического поля Еz приземной атмосферы: 4 — день с сильными осадками; остальные кривые дней без осадков, но 3 — в день землетрясения, в 2 — накануне этого дня.

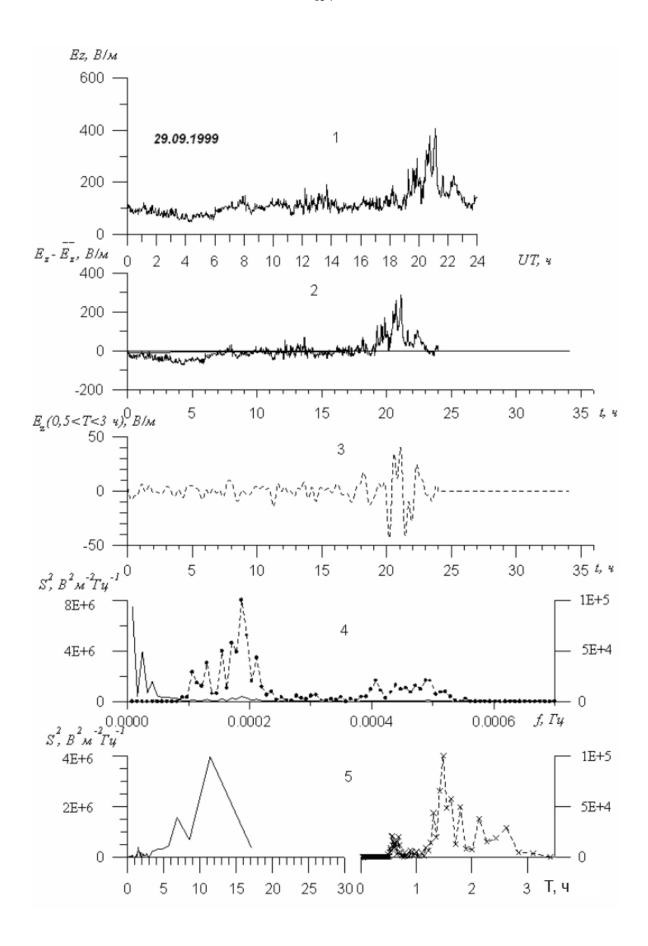
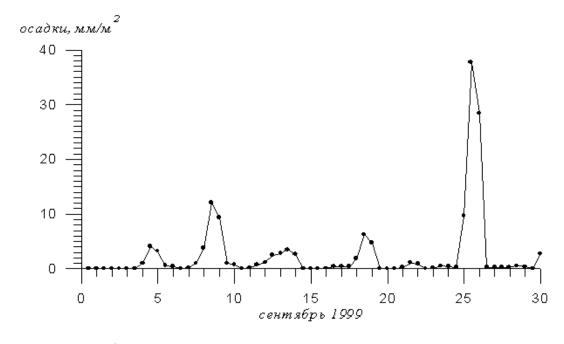


Рисунок 82 – Метод спектральной обработки суточных вариаций Еz.

Описанным выше методом был выполнен спектральный анализ суточных кривых Еz 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 Еz. 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 Еz и их спектров — это местные осадки и землетрясения. Для контроля на Рисунке 83 приведены данные по осадкам за период наблюдений.



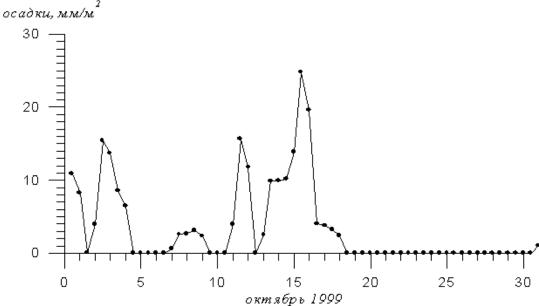


Рисунок 83 – Изменение уровня осадков, измеренных два раза в сутки в течение сентября-октября месяцев 1999 г.

Результирующие осредненные спектры для дней без осадков (22 дня, кривая 1) и с осадками (11 дней, кривая 2) показаны на Рисунке 84 (T < 5 ч) и Рисунке 85 (5 ч < T < 24 ч) вместе с отдельным спектром 17 сентября (кривая 3). Вертикальными отрезками на кривых 1 и 2 нанесены среднеквадратические отклонения.

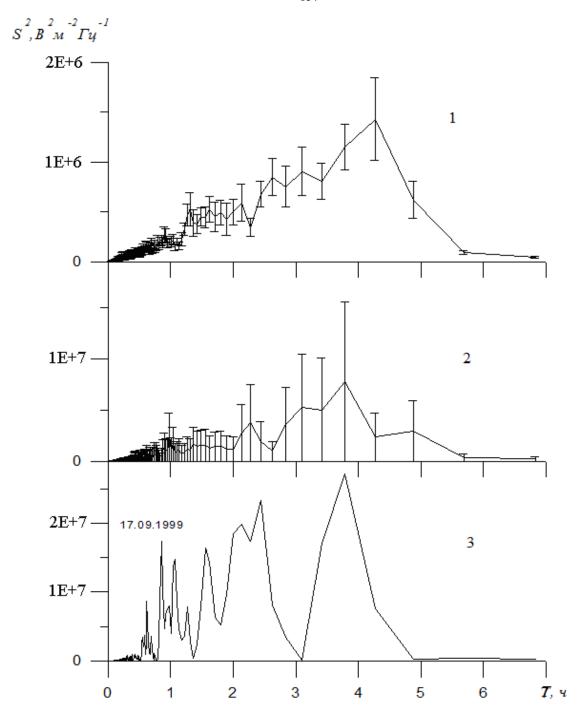


Рисунок 84 — Осредненные спектры мощности электрического поля Ez в полосе периодов менее 5 ч в дни без осадков (кривая 1), с осадками (кривая 2) и 17 сентября с аномалией Ez в суточном ходе (кривая 3).

На кривой 1 Рисунка 84 видна тенденция ослабления спектра от $\sim 1.5 \cdot 10^6$ В 2 /м 2 Гц на Т ~ 4 ч до $\sim 0.2 \cdot 10^6$ В 2 /м 2 Гц на Т ~ 1 ч без уверенного выделения изолированных всплесков по уровню 0.5 от максимального значения.

На кривой 2 характер спектра изменился незначительно: выделяется усиление энергии на $T \sim 4$ ч и ~ 2 ч, но уровень мощности возрос в два раза по сравне-

нию с кривой 1, при очень большой величине среднеквадратических отклонений, указывающих на сильную изменчивость индивидуальных спектров.

И, наконец, кривая 3 представляет индивидуальный спектр мощности Ez 17 сентября 1999г. в отсутствие осадков, но с аномалией в суточном ходе (см. Рисунок 81). На этой кривой четко выделяются следующие особенности:

- наличие спектральных полос (по уровню 0,5 от максимума) на T=0.6; 1; 1.8; 2.2; 3.8 ч;
- интенсивность в максимумах этих полос на порядок и более превышает соответствующие значения в дни без осадков;
 - появление спектральных максимумов на периодах менее 2 ч.

На Рисунке 85 приведены осредненные спектры мощности Ez на T > 5 ч, полученные аналогичным методом. В дни без осадков практически каждые сутки выделяются гармоники с периодами T = 6-8 и ~11-12 ч. В осредненной кривой 1 они также проявляются. В дни с осадками возрастает общий уровень мощности более, чем на порядок, увеличивается разброс отдельных значений, но при этом все-таки выделяются указанные выше гармоники. Особое поведение индивидуального спектра мощности поля 17 сентября (кривая 3), на котором видна гармоника с $T \sim 6$ ч, полусуточная гармоника с T = 12 ч подавляется и резко возрастает интенсивность на T > 12 ч.

Для выделения гармоник с периодами T > 12 ч были рассчитаны спектры (Рисунок 84 и 85) удлиненного ряда исходных данных с дискретностью по времени $\Delta t = 1$ ч только для дней с хорошей погодой, т.е. 1-4 сентября, 20-24 сентября, 20-24 октября, 25-29 октября.

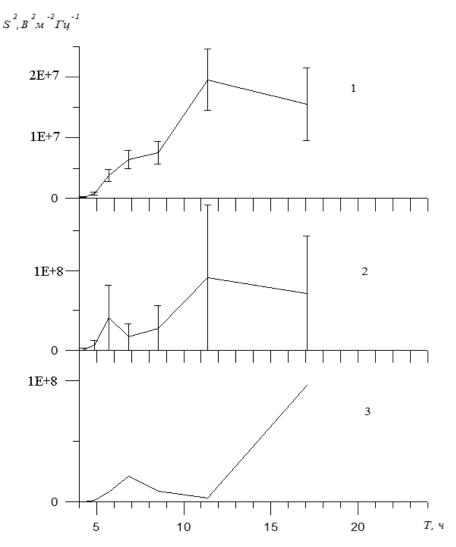


Рисунок 85 — То же, что и на Рисунке 84, но в полосе периодов, превышающих 5ч.

Результирующий спектр, осредненный по этим дням, приведен на Рисунке 86. Как видно, на кривой четко выделяются максимумы с $T \sim 8$, 12, 24 ч.

В период сентябрь-октябрь месяцы на Камчатке, кроме 18 сентября, произошли еще два землетрясения, в зону подготовки которых попадал пункт регистрации Ez. Это 5 октября, 05:01 UT, $\varphi = 51.21^{\circ}$ N, $\lambda = 157.61^{\circ}$ E, h = 76 км, K = 13 (M = 5.6) и 18 октября, 20:49 UT, $\varphi = 51.30^{\circ}$ N, $\lambda = 157.12^{\circ}$ E, h = 138 км, K = 12.3 (M = 4.8). Однако, как видно на Рисунке 83, в эти дни были зарегистрированы осадки, которые, вероятно, экранировали эффекты в Ez, вызванные другими источниками.

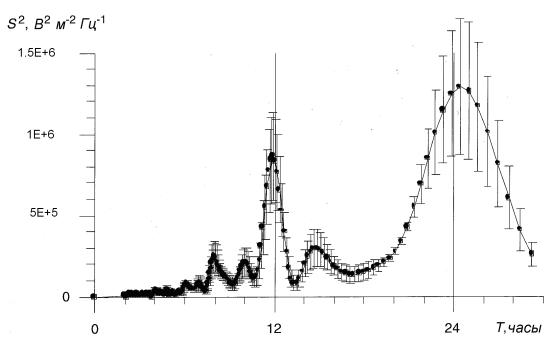


Рисунок 86 — Осредненный спектр мощности электрического поля Ez с периодами 2 ч < T < 60 ч для дней с хорошей погодой в период с 1 сентября по 29 октября 1999 г.

Непрерывные измерения вариаций квазистатического электрического поля Еz с дискретностью 1 мин позволили исследовать тонкую структуру спектров мощности с периодами от 4 мин (период, соответствующий половине частоты Найквиста) и выше. Анализ суточных вариаций Еz за интервал сентябрь-октябрь 1999 г. выявил присутствие двух спектральных полос с периодами Т = 1-5 ч и 6-24 ч. В условиях хорошей погоды в первой полосе нет четко выделенных максимумов (по уровню 0.5), но есть тенденция ослабления интенсивности при уменьшении периода от 5 до 1 ч. Как известно, это периоды внутренних гравитационных волн, которые отчетливо проявляются в сейсмогравитационных колебаниях Земли и связанных с ними возмущениях давления в приземной атмосфере [Возбуждение колебаний ..., 1989; Петрова, 1999]. Совпадение спектров мощности Еz с вариациями спектров сейсмогравитационных колебаний Земли позволяет утверждать, что вариации Ez сейсмической природы. Если принять «поршневой» механизм генерации колебаний атмосферного давления колебаниями поверхности Земли [Возбуждение колебаний ..., 1989], то можно ожидать

аналогичные вариации спектров концентрации радона в подпочвенных газах. Если это так, то корреляция Rn и Ez будет установлена. К сожалению, в проведенных комплексных экспериментах концентрация Rn измерялась два раза в сутки.

Во второй полосе спектров четко выделяются гармоники с T = 8, 12, 24 ч. Это солнечные тепловые (приливные) волны в нижней атмосфере, связанные с вариациями температуры подстилающей поверхности. Их интенсивность на много превышает интенсивность внутренних гравитационных волн.

За сутки до землетрясения 18 сентября 1999г. в спектре мощности Еz четко (по уровню 0.5 от максимума) выделились 5 полос с T = 0.6; 1; 1.8; 2.2; 3.8 ч. Интенсивность их возросла на порядок и более, особенно на T < 3 ч, по сравнению со спектрами Еz в дни без осадков. Более того, появились полосы на T = 0.6; 1 ч. Подобные спектральные структуры в полосе 1-5 ч и их усиление в вариациях сейсмогравитационных колебаний Земли и одновременных вариациях давления приземной атмосферы перед сильными землетрясениями наблюдались в работе [Линьков и др., 1990]. Совпадение спектров Ez с результатами этой работы свидетельствует о том, что не только спокойные суточные вариации Ez, но и аномалии перед землетрясениями имеют одинаковую сейсмогравитационную природу.

ГЛАВА 6. ЭФФЕКТЫ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ВАРИАЦИЯХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

6.1 Вариации электрических и метеорологических величин во время солнечных событий

Исследованию эффектов солнечной активности и связанных с ней геомагнитных бурь в атмосферном электричестве высоких и средних широт посвящена довольно обширная литература (см., например, [Магнитосферные ..., 1988]). Для нас представляют интерес эффекты мощных солнечных вспышек, сопровождаемых геомагнитными бурями с Форбуш-понижением ГКЛ, в приземном слое атмосферы исключительно на средних широтах над континентом. К сожалению, эти результаты очень ограничены и довольно противоречивы. Последнее обстоятельство может быть связано не только с особенностями физических процессов в приземной атмосфере для индивидуальных геомагнитных бурь, но и с выбором, например, места регистрации, нулевого дня в методе наложенных эпох, интервалов усреднения данных (от минут до суток), а также с состоянием атмосферы до и во время бури и т.д. Не менее противоречивы предлагаемые возможные механизмы этих эффектов. Ниже кратко представлены некоторые результаты этих исследований.

Так, в работах [Markson, 1981; Марксон, 1982] впервые была предложена гипотеза влияния солнечной активности на атмосферное электричество. Суть ее сводится к тому, что под действием космических лучей (одного из главных ионизаторов атмосферы) изменяется проводимость глобальной электрической цепи (ГЭЦ). Глобальная электрическая цепь представляет собой замкнутую токовую систему, главным генератором которой, согласно модели сферического конденсатора, являются тропические грозы (Глобальный грозовой генератор,

ГГГ). Токи этого генератора через сопротивление воздуха выше него текут в нижнюю ионосферу и замыкаются через невозмущенную удаленную атмосферу и поверхность Земли. Эти токи обеспечивают заряд сферического конденсатора. В нижней части этой цепи на высотах до ~ 2 км основным ионизатором атмосферы является естественная радиоактивность почвы, а на высотах ~ 15-20 км (максимум в распределении галактических космических лучей) – ГКЛ. Проникая в нижнюю стратосферу и верхнюю тропосферу, они способны вызвать ионизацию, которая ведет к усилению токов ГЭЦ. Именно поэтому для изучения влияния солнечной и геомагнитной активностей стали использоваться одновременные наблюдения параметров атмосферного электричества и ГКЛ либо в горах, либо на изолированных островах с использованием аппаратуры на самолетах или баллонах, т.е. выше обменного слоя атмосферы, где существенно влияние на вариации напряженности электрического поля локальных конвективных и турбулентных процессов. В таких условиях в работе [Markson, 1981] была обнаружена положительная корреляция между электрическим потенциалом нижней ионосферы и интенсивностью ГКЛ. Вместе с тем в экспериментах, выполненных в горной местности, обнаружена отрицательная корреляция этих параметрах [Кречетов, 2000].

В экспериментах, выполненных на равнинах, получены также противоречивые результаты. В серии работ коллектива В.М. Шефтеля [Шефтель, 1991; Шефтель, 1992; Шефтель и др., 1992] было показано увеличение напряженности поля относительно фонового уровня за пять—шесть часов до начала понижения ГКЛ. И эта фаза положительного возмущения поля продолжалась до момента максимальной глубины Форбуш-эффекта, а затем наступала более продолжительная отрицательная фаза возмущения поля. Опережение положительной фазы относительно начала Форбуш-эффекта авторы связали с действием солнечных протонов, а сам же эффект положительной фазы возмущения поля в стадии углубления Форбуш-эффекта - с воздействием на атмосферу жесткой мюонной ком-

поненты ГКЛ, которая достигает уровня моря и определяет их вклад в проводимость атмосферы в месте регистрации электрического поля.

Подобный результат получен в работе [Магсz, 1997]: в день максимальной глубины Форбуш-эффекта во время сильных геомагнитных бурь наблюдалась положительная фаза возмущения напряженности электрического поля ~ 2%. И далее наступала продолжительная отрицательная фаза с постепенным восстановлением напряженности электрического поля в течение десяти дней. Причина эффекта, по мнению автора, - это изменение проводимости ГЭЦ под действием ГКЛ. Модельные расчеты отклика электрического поля и плотности тока проводимости в ГЭЦ при изменении профиля проводимости во время Форбушпонижения при постоянном токе ГГГ, выполненные в работе [Making, 1984], показали отрицательную корреляцию между этими параметрами и интенсивностью ГКЛ.

В серии сильных геомагнитных бурь, включающей бурю 30 октября 2003 г., [Необычные вариации ..., 2005; Эффект магнитных бурь ..., 2008] на ст. «Свидер» были зарегистрированы отрицательные бухты градиента потенциала электрического поля. Совпадение по времени их длительностей с длительностью всплесков риометрического поглощения в субавроральной зоне позволило авторам предположить, что «причиной появления отрицательных значений градиента потенциала электрического поля может быть возрастание проводимости верхней атмосферы, вызванное вторжением энергичных электронов в субавроральные широты» [Необычные вариации ..., 2005], с.152.

А на ст. «Борок», наоборот, в главную фазу бури 28-31 марта 2000 г. наблюдалась положительная бухта напряженности электрического поля. В качестве механизма эффекта автор предполагает «проникновение полей магнитосферно-ионосферного источника в нижнюю атмосферу средних широт» [Анисимов, 2007].

Магнитная буря 23 декабря 2014 г. с внезапным началом на обс. Паратунка вызвало затухающий колебательный процесс градиента потенциала электриче-

ского поля с периодом ~ 1 час. Каких-либо значительных изменений в электропроводности приземного воздуха не возникало [Анализ явлений ..., 2016].

При изучении связи напряженности электрического поля с Форбушпонижением ГКЛ в обс. «Паратунка» было обнаружено понижение напряженности электрического поля практически одновременно с понижением потока ГКЛ [Кузнецов, 2008]. Максимальная величина отрицательной фазы возмущения электрического поля была ~ 5-10% с последующим восстановлением поля в течение 5-10 дней. В обсерватории измерялась также электропроводность положительных и отрицательных легких ионов в приземной атмосфере.

Приведенные выше результаты получены в различных пунктах наблюдений преимущественно в условиях так называемой «хорошей погоды» [Руководящий документ, 2002; Reiter, 1992].

Вместе с тем в литературе представлена другая группа работ, посвященная исследованию связи атмосферных параметров (температура, давление, ветер) с геомагнитной активностью и, в частности, с геомагнитными бурями. На второй день после начала бури были обнаружены суточные перепады атмосферного давления, величина и знак которых оказались зависимыми от региона и времени года [Мустель и др., 1977; Мустель и др., 1979; Чертопруд и др., 1979; Пудовкин, 1990]. На больших временных масштабах связь вариаций температуры и давления атмосферы с корпускулярными потоками от Солнца экспериментально была обнаружена также в работе [Bucha, 1980]. В обзорах [Lastovicka, 1996; Авдюшин, 2000] приведены дополнительные данные об эффектах геомагнитных бурь в вариациях атмосферных параметров, в частности, в вариациях индекса площади завихренности в тропосфере на уровне 500 гПа (h ~ 5 км). Этот индекс по существу характеризует усиление волн планетарного масштаба на этих высотах. В обзорах приведены также возможные механизмы влияния геомагнитных бурь на тропосферу: это динамический механизм, связанный с усилением акустикогравитационных атмосферных волн и волн планетарного масштаба; это электрический механизм, связанный с глобальной электрической цепью и проникновением космических лучей в атмосферу; это оптический механизм, связанный с изменением прозрачности атмосферы и химического состава в стратосфере под действием коротковолнового излучения Солнца и ГКЛ. Но в более позднем и расширенном обзоре [Danilov, 2001] авторы отдали предпочтение единственно возможному механизму влияния геомагнитных бурь на тропосферные процессы через изменение параметров глобальной электрической цепи под действием космических лучей.

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. Выбор этих бурь обусловлен экстремальными событиями на Солнце, проявление которых детально рассмотрено в поведении многих геофизических процессов в магнитосфере и ионосфере Земли [Год спустя ..., 2005]. Однако до настоящего времени как в отечественной, так и в зарубежной литературе, отсутствувала информация об эффектах этих солнечных событий в вариациях напряженности электрического поля и метеорологических величин в приземной атмосфере, наблюдаемых одновременно. В настоящей работе восстанавливается этот пробел.

Исходные данные и основные результаты обработки бури октября 2003 г. Реакцию электрических и метеорологических процессов в приземной атмосфере на мощную геомагнитную бурю целесообразно рассматривать методом наложенных эпох в комплексе с процессами, происходящими на Солнце и у земной поверхности. В этой связи на Рисунке 87 приведены результаты наблюдений различных геофизических и метеорологических величин в период с 21 по 31 октября 2003 г.

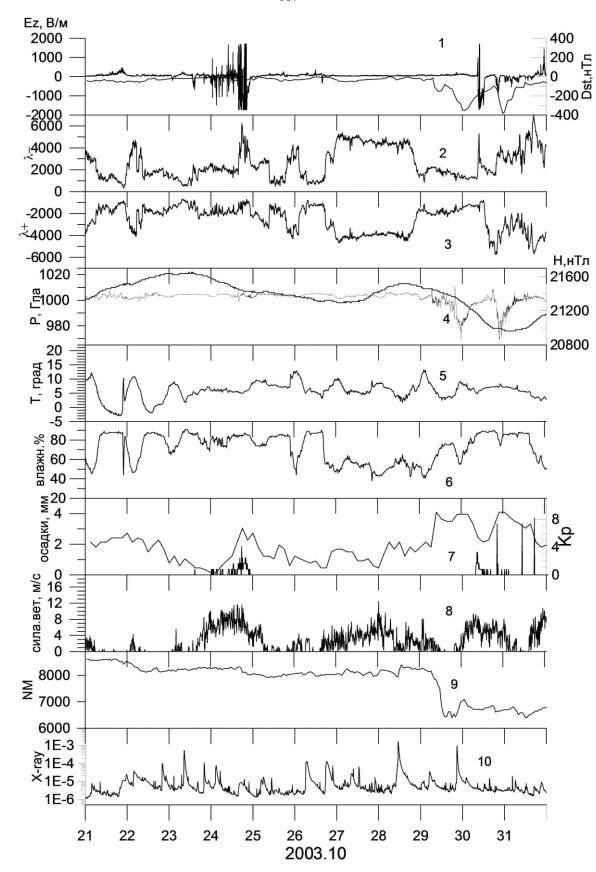


Рисунок 87 — Суточные вариации градиента потенциала электрического поля, электропроводности воздуха, метеорологических, геофизических и солнечных параметров в период 21 - 31 октября 2003 г.

Кривые 1 - градиента потенциала квазистатического электрического поля, измеренная прибором «Поле-2» с точностью 0.3 В/м и с дискретностью по времени 1 мин, а также значения Dst — индекса (нТл), определенные с дискретностью по времени 1 ч.

Кривые 2 и 3 - электропроводности воздуха, обусловленные отдельно положительными (λ_{+}) и отрицательными (λ_{-}) ионами и измеренные прибором «Электропроводность-2» (в условных единица).

Кривые 4-8 - соответственно, давление (Р, гПа); температура (Т, ⁰С); влажность (%) воздуха; осадки и скорость ветра (V, м/с), измеренные с дискретностью по времени 10 мин в обс. «Паратунка» цифровыми метеостанциями WS-2000 и WS-2300. Выходные данные с них поступают в обсерваторию по радиоканалу на частоте 433 МГц. На кривую 4 нанесена дополнительно величина горизонтальной компоненты геомагнитного поля (Н), измеренная в обс. «Паратунка» феррозондовым магнитометром FRG-601G с точностью 0,01 нТл и с дискретностью по времени 1 мин (правая ось ординат).

В работе использованы также данные наблюдений состояния облачности и осадков на местной метеорологической станции. К сожалению, в этот период отсутствовали результаты актинометрических измерений.

Кривая 7 - трехчасовые значения Кр-индекса.

Кривая 9 - поток галактических космических лучей (N - число частиц/мин), измеренный нейтронным монитором с дискретностью по времени 1 мин в обс. «Стекольный» ИКИР ДВО РАН.

Кривая 10 - последовательность солнечных вспышек, измеренная на спутнике GOES-12.

В дополнение к этому рисунку в Таблице 11 приведена более детально хронологическая последовательность этих событий, подробно описанная в статье [Солнечные и гелиосферные ..., 2004], а на Рисунке 88 и Рисунке 89 показана последовательность нескольких наиболее интересных фрагментов записей электропроводности и напряженности поля в более увеличенном масштабе в зависи-

мости от универсального времени UT. (На долготе обсерватории местный полдень приходился в 1:45 UT, полночь – в 10:55 UT).

Таблица 11 - Вспышечные события в АО 10484 и 10486 в период 19 - 31 октября 2003 г. и их проявления в околоземном пространстве [Солнечные и гелиосферные ..., 2004], данные из INTERNET: dst – (http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/); kp – (http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/cgi-bin/kp-cgi).

Дата	Вспышка		Dst,	Kp	СКЛ	ГКЛ,	Главная фаза
		T	нТл		Е, МэВ	%	бури
	Время,	Балл			P, cm ⁻² c ⁻¹ cp ⁻¹		
	Длит.,						
	мин						
19	16:29;	X1.1/1N	-40	5-			
	79						
22	19:45;	M9.9	-33	3-			
	>41						
23	08:17;	X5.4/1B	-21	2		-5	
	64						
23	19:50;	X1.1/1N	-11	1-		-5	
	38	11111/111				J	
24	02:22;	M7.6/1N	-8	1+		-3	
21	66	1417.07114		1		3	
26	05:17;	X1.2/3B	-27	2		-7	
20	213	X1.2/3D	-27			- /	
26	17:17;	X1.2/1N	-5	3-	2	_''_	
20	17.17,	A1.2/11N	-3	3-			
26	+	NAT CANI	1.0	4	10	_''_	
26	21:26;	M7.6/2N	-16	4-			
27	60	N 65 0 / 1 E	40	2			
27	09:21;	M5.0/1F	-49	2		-6	
	23						
27	12:27;	M6.7/1F	-41	2		-"-	
	37						
28	09:51;	X17.2/4B	-30	4+	1	-10	
	>269		-80	8-	1000		
29	20:37;	X10.0/2B	-233	9-	_ ^ -	-5	14.00-
	136					-25	29
30					-"-	-15	00.01
			-350	9-			30
							$\tau = 11$ ч.
30					_''_	-22	18.00-
			-100	9			30
30			1		_''_	-24	23.00
			-383	9			30
							τ = 5 ч
		1					V = 3 1

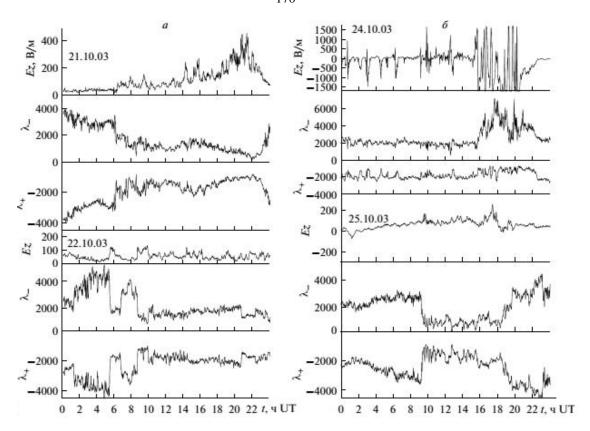


Рисунок 88 — Суточные вариации градиента потенциала электрического поля и электропроводности воздуха в выделенные интервалы наблюдений (а, б).

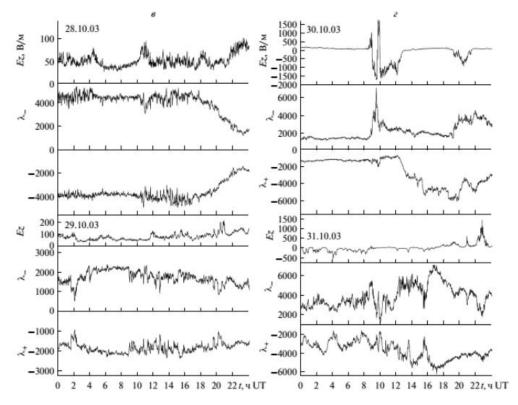


Рисунок 89 — Суточные вариации градиента потенциала электрического поля и электропроводности воздуха в выделенные интервалы наблюдений (в, г).

Рассмотрим детально процессы, происходящие в приземной атмосфере. Как видно на Рисунке 87 и в Таблице 11, в период 21-22 октября солнечная (рентгеновское излучение балла М 9.9) и геомагнитная (Кр < 3) активности были относительно спокойными, а метеорологические условия при наличии высокослоистых облаков и в отсутствии осадков близко соответствовали условиям «хорошей погоды». При этом 21 и 22 октября температура воздуха в полдень составляла +12°C (кривая 5 на Рисунке 87), а влажность - 45% (кривая 6), электропроводность ~4000 условных единиц. В эти дни, согласно данным местной метеорологической станции, наблюдалась сплошная облачность высокослоистых облаков при слабом ветре и отсутствии осадков, вариации электропроводности и напряженности электрического поля имели регулярный суточный ход, соответствующий условиям «хорошей погоды».

23 октября характер поведения электропроводности и напряженности поля в течение суток, в отличие от предыдущего дня с подобным суточным ходом температуры и влажности, несколько изменился: нарушился плавный ход уменьшения электропроводности в результате небольшого дождя (данные местной метеорологической станции), несущего, как известно [Имянитов, 1965], объемные заряды к земле. Кроме того, наличие сплошной облачности среднего яруса 10 баллов, по-видимому, привело к понижению среднесуточного уровня напряженности электрического поля и к ослаблению эффекта восхода Солнца. В эти два дня амплитуды суточных вариаций (как половины разности максимальных и минимальных величин) температуры составляли 7.5-8°C, а влажности — 22.5%.

23 октября на Солнце произошли две вспышки в 08:17 UT X5.4/1В и в 19:50 UT X1.1/1N. В последующие два дня резко изменился температурный режим в атмосфере: суточная амплитуда температуры упала, соответственно, до 5 и 1°C за счет аномального повышения ее в ночное время, а влажности — соответственно, до 0.5 и 2.5% за счет повышения, наоборот, в дневное время. В этих условиях 23 октября появилась сплошная облачность нижнего яруса в 10 баллов, а 24 октября она сопровождалась умеренным в начале суток и позже обложным дож-

дем. Эти метеорологические явления отчетливо проявились в сложном характере изменения электропроводности и напряженности электрического поля.

26 октября на Солнце произошли три вспышки: в 05:17 UT X1.2/3B, в 17:17 UT X1.2/1N, в 21:26 UT M7.6/2N. Вслед за ней 27 и 28 октября суточные амплитуды температуры составляли, соответственно, 2 и 2^{0} С за счет повышения температуры ночью до $+6^{\circ}$ C, а влажности - 5 и 10%, что привело к образованию слоисто-кучевых облаков нижнего яруса от 4 до 6 баллов, но без осадков. Как видно на Рисунке 87, электропроводность была очень высокой (~ 4000) и сохранялась практически постоянной в течение этих двух суток (Рисунок 89в). Среднесуточная величина напряженности электрического поля была очень низкой (~50 B/м). Начиная с 16:00 UT 28 октября электропроводность начала плавно уменьшаться до величины порядка 1000, оставаясь неизменной до 06:00 UT 30 октября. При этом напряженность поля одновременно возросла до 100 В/м, также слабо изменяясь в течение выделенного интервала времени. Этот интервал совпал со временем глубокого минимума Dst-вариации и Форбуш-понижения ГКЛ. 29 и 30 октября наблюдались кучевые облака нижнего яруса от 1 до 10 баллов без осадков до 06.00 UT 30 октября. С этого момента начался обложной дождь, временами выпадал снег. В вариациях электропроводности и напряженности электрического поля проявились соответствующие изменения, характерные для дней с осадками (см. Рисунок 886, 24 октября).

Давление воздуха (Рисунок 87, кривая 4) в течение рассмотренного периода с 21 по 29 октября изменялось в пределах 1000-1020 гПа, за исключением периода 29-31 октября, когда после геомагнитной бури наблюдался отрицательный перепад давления с величины 1010 до 980 гПа.

Исходные данные и основные результаты обработки бури ноября 2004 г. Реакцию электрического поля в приземной атмосфере на мощную геомагнитную бурю целесообразно рассматривать методом наложенных эпох в комплексе с процессами, происходящими на Солнце и у земной поверхности. В этой связи на

Рисунке 90 приведены результаты наблюдений различных геофизических и метеорологических параметров в период с 4 по 15 ноября 2004 г.

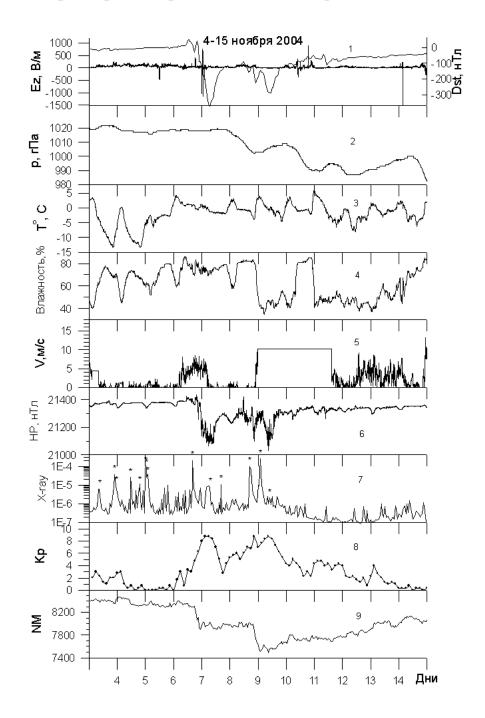


Рисунок 90 — Суточные вариации градиента потенциала электрического поля, метеорологических, геофизических и солнечных параметров в период 4-15 ноября 2004 г.

Кривые 1 — напряженность квазистатического электрического поля (Ez – компонента), измеренная прибором «Поле-2» с точностью 0.3 В/м и с дискрет-

ностью по времени 1 мин, а также значения Dst – индекса (нТл), определенные с дискретностью по времени 1 ч.

Кривые 2 - 5 — соответственно, давление (P, гПа); температура (T, ⁰C); влажность (%) атмосферы и скорость ветра (V, м/с), измеренные с дискретностью по времени 10 мин в обс. «Паратунка». (На графике скорости ветра отсутствуют данные в период с 9 по 12 ноября). В работе дополнительно использованы данные наблюдений состояния облачности и осадков на местной метеорологической станции. К сожалению, в этот период отсутствовали данные актинометрических измерений.

Кривая 6 – горизонтальная компонента геомагнитного поля (HP), измеренная в обс. «Паратунка» феррозондовым магнитометром FRG-601G с точностью 0.01 нТл и с дискретностью по времени 1 мин.

Кривая 7 – последовательность солнечных вспышек, измеренная на спутнике GOES-12.

Кривая 8 – трехчасовые значения планетарного К-индекса.

Кривая 9 — поток галактических космических лучей (N - число частиц/мин), измеренный нейтронным монитором с дискретностью по времени 1 мин в обс. «Стекольный» ИКИР ДВО РАН.

В дополнение к этому рисунку в Таблице 12 приведена более детально хронологическая последовательность этих событий, подробно описанная в статье [Год спустя ..., 2005]. Как видно на Рисунке 90 и в Таблице 12, в период 4-5 ноября солнечная (рентгеновское излучение балла М, слабое оптическое излучение интенсивностью F и SF) и геомагнитная (Кр < 3) активности были относительно спокойными. Но вначале 6 ноября на Солнце одновременно с тремя всплесками рентгеновского излучения баллов М9.3/2N (00:11 UT); М5.9(00:44 UT); М3.6(01:40 UT) произошла достаточно сильная оптическая вспышка балла 2N. Они сопровождались соответственно выбросами корональной массы (ВКМ) в 01:31, 02:06 и 02:42 UT. В результате на Земле наблюдалась сильная геомагнитная буря (данные Dst -вариаций) с внезапным началом 7 ноября в 02:57, 10:52 и

18:27 UT, которая достигла максимума интенсивности (Dst = - 373 нТл) 8 ноября в 07:00 UT. Длительность главной фазы этой бури составляла 13.5 ч. Вслед за ней на фазе восстановления 9 и 10 ноября на Солнце произошли еще две мощные вспышки, сопровождаемые рентгеновским излучением баллов M8.9/2N (16:59 UT) и X2.5/3B (01:59 UT) и усилением излучения в оптическом диапазоне до 3 В. Внезапное начало бури отмечено 9 ноября в 09:30 UT. Она достигла максимума (Dst = - 289 нТл) 10 ноября в 10:00 UT. Длительность главной фазы этой бури составила 8 ч. Одновременно с этими бурями наблюдались два сильных понижения ГКЛ.

По данным спутника GOES – 12 (Рисунок 16 из [Год спустя ..., 2005]), потоки протонов в северной полярной шапке с энергией E = 1 - 5 МэВ в период 4 - 5 ноября составляли величину $N \sim 1 / \text{см}^2\text{с.ср.}$ С ростом солнечной активности 6 ноября потоки протонов в этой полосе энергии возросли приблизительно в десять раз, 7 ноября – в сто раз, а 8 и 9 ноября - в тысячу раз. Максимальные потоки энергии протонов наблюдались 8 ноября в диапазоне 14-26 МэВ.

Рассмотрим детально процессы, происходящие в приземной атмосфере в обс. «Паратунка» в этот период наблюдений. 4-5 ноября при слабой геомагнитной активности ($Kp \le 3$) солнечная активность в оптической области спектра была слабой (SF). В этих условиях суточный ход температуры атмосферы (кривая 3, Рисунок 90) изменялся типичным образом, т.е. максимум температуры $T = +4^{\circ}$ С приходился на местный полдень (01:30 UT) и минимум $T = -14^{\circ}$ С — перед восходом Солнца. Соответственно в противофазе с температурой влажность воздуха составляла величины ~40 и ~75%. В отсутствие облачности и осадков (данные местной метеорологической службы) давление атмосферы изменялось незначительно, а скорость ветра была менее 2 м/с, т. е. выполнялись условия так называемой «хорошей погоды». В этих условиях градиент потенциала электрического поля, показанный в увеличенном масштабе на Рисунке 91, имел характерный суточный ход с типичным максимумом на восходе Солнца (см. п. 4.1). Далее в t = 01:00 UT 6 ноября произошла солнечная вспышка, в оптической об-

ласти спектра которой яркость усилилась до 2N. Одновременно произошло резкое искажение суточного хода температуры и влажности атмосферы: в полдень температура возросла от 0 до $+4^{\circ}$ C, а ночью – от минус 13 до минус $(5-2)^{\circ}$ C. При отсутствии ветра появилась небольшая облачность с прояснениями, которая исказила суточный ход напряженности поля (Рисунок 91).

7 ноября в t ~ 16:00 UT произошла следующая мощная вспышка (X2.0/2B), которая привела к дальнейшему повышению температуры в полдень до +5°C и росту влажности до 85%, а также к усилению ветра до ~7 м/с. Такие резкие изменения атмосферных процессов в нижнем слое атмосферы, как известно, могут сопровождаться усилением турбулентных и конвективных потоков воздуха и приводить к образованию облачности и осадков. Действительно, по данным местной метеорологической службы, в период 7 - 10 ноября наблюдалась сплошная облачность с прояснениями, а в период 8 - 9 ноября выпал снег. Более того, в таких метеорологических условиях возможно образование грозовых процессов. Действительно, как видно на Рисунке 90 и Рисунке 91, в полдень 8 ноября в вариациях Еz наблюдались большой величины (±800 В/м) знакопеременные колебания, характерные для грозовых процессов [Эффекты грозовой активности ..., 2010]. Это грозовое явление совпало по времени с главной фазой геомагнитной бури 8 ноября (Рисунок 90, кривая 1), а ее начало - с началом Форбуш-эффекта ГКЛ (Рисунок 90, кривая 9).

Во время геомагнитной бури 10 ноября при относительно высокой температуре воздуха, но низкой влажности подобное явление не наблюдалось. Однако 11 ноября при высокой температуре воздуха влажность его возросла до 90%, что привело также к зарождению грозовых процессов в атмосфере и появлению сильных знакопеременных вариаций напряженности электрического поля (Рисунок 90).

Таблица 12 - Вспышечные события в АО 10696 в период 04-15 ноября 2004г. и их проявления в околоземном пространстве [Год спустя ..., 2005], данные из IN-TERNET: dst - (http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/); kp - (http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/cgi-bin/kp-cgi)]

Дата	Вспышка		SC	Dst,	Kp	СКЛ	ГКЛ,	Главная
	Время,	Балл	UT	нТл		Е, МэВ	%	фаза бу-
	UT					P, см ⁻² с ⁻¹ ср ⁻¹	Rc=1	ри
	Длит.,						0 ГВ	
	МИН							
04	08:45;	C6.3/SF		-18	2+	1-5		
	>79					1		
04	21:42;	M2.5/SF		-10	3-	-"-		
	>131							
04	22:53	M5.4/1N		-8	3-	-"-		
05	11:23;	M4.0/1F		-8	1-	-"-		
	>10							
05	19:10	M1.2/SF		-6	1-	-"-		
06	00:11;	M9.3/2N		-3	0	1-5		
	157					10		
06	00:44	M5.9		-3	0	_"-		
06	01:40-	M1.4		-1	0	_"-		
	02:08							
07	15:42-	X2.0/2B				10	0.6	
			02:57	1	2	100		
07	-16:15					_''_	0.4	
	>33		10:52	20	3+			
07						- "-		18:30;
			18:27	-29	6+			07; -
08	07			-373	8+	14-26	7.3	07:00;
						1000		08;
08	15:43-	M2.3/1N		-151	3-	_"-		τ=12,5ч
	-15:52							
09	17:00	M8.9/2N				-"-		
	90		09:30	-110	6			
10	02:00	X2.5/3B		-146	8-	-	8.1	02:00-
	76							
10	10:00			-289	8+	-	-"-	10:00;
								τ=8ч

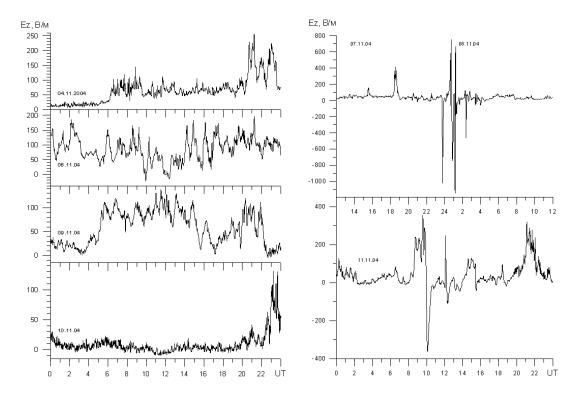


Рисунок 91 — Суточные вариации градиента потенциала электрического поля в выделенные интервалы наблюдений.

Кроме того, на вторые сутки после начала геомагнитных бурь (Рисунок 90, кривая 2) наблюдался отрицательный перепад суточного давления ΔP порядка 20 г Πa .

Для сравнения наблюдаемых вариаций напряженности электрического поля с результатами других исследований на Рисунке 92 приведены кривые исходных значений напряженности поля с дискретностью 1 мин (а) и усредненных значений за 1 ч (б). Начиная с 7 ноября (начало первого Форбуш-эффекта) на графике (б) наблюдаются отрицательные возмущения электрического поля с колебаниями $\Delta E \sim 90\%$ относительного среднего уровня в условиях «хорошей погоды» 4-5 ноября. С дальнейшим падением интенсивности потока ГКЛ знак возмущения сохраняется вплоть до 15 ноября. В периоды главных фаз геомагнитных бурь, совпадающих с резким понижением интенсивности ГКЛ, вариации отрицательных возмущений электрического поля ведут себя по-разному: во время бури 8 ноября в результате появления в атмосфере процессов грозового характера от-

рицательное возмущение по величине заметно уменьшается, а во время бури 10 ноября несколько возрастает.

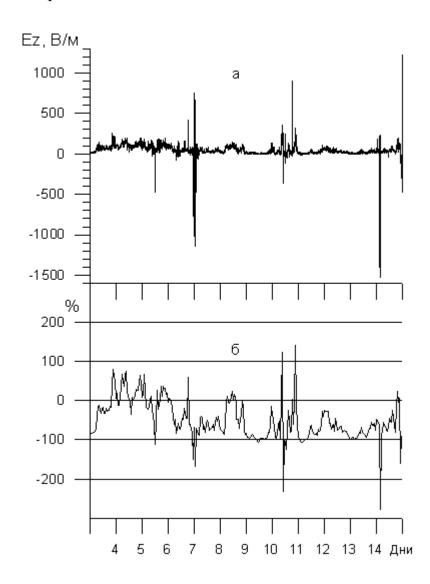


Рисунок 92 — Наблюдаемые вариации градиента потенциала электрического поля, измеренные с дискретностью по времени 1 мин (a) и усредненные значения за 1 ч (б).

Исходные данные и основные результаты обработки бури 5 апреля 2010 г. Минимум 23 цикла солнечной активности был достигнут в декабре 2008 г. Период 2006 - 2010 характеризуется малым числом магнитных бурь. 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 зафик-

сировано начало магнитной бури с внезапным началом. На Рисунке 93 представлены усредненные по 1-мин данные измерений геофизических полей на обс. Паратунка. На Рисунке 93а 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.

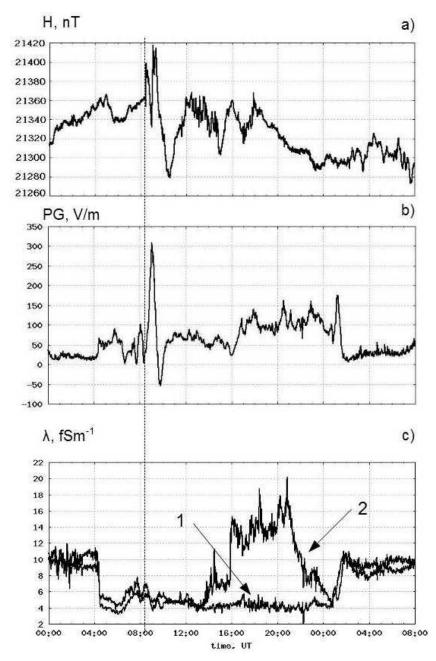


Рисунок 93 — Развитие магнитной бури (начало — пунктирная линия) 5-6 апреля 2010г. а) Н-компонента магнитного поля, b) градиент потенциала электрического поля, c) электропроводность воздуха, вызванная отрицательными (1) и положительными ионами (2).

Воздействие магнитной бури на электрическое состояние приземного воздуха можно разделить на три этапа. Фоновый уровень Еz до начала бури был около 25 В/м (Рисунок 93b). Низкий уровень поля обусловлен сезонным ходом большой амплитуды от 60 ± 40 до 120 ± 60 . Для этого месяца для этой обсерватории был характерен низкий уровень поля. В этом нет ничего необычного. Например в работе [Fair-weather atmospheric electricity ..., 2013] представлен суточный ход Ех на различных обсерваториях в разные сезоны года от диапазона 48 - 82 В/м до 130 - 185 В/м. Первый этап с 4:25 до 8:27 UT характеризуется повышением уровня электрического поля до 50 В/м. Одновременно с этим электропроводность воздуха уменьшилось в 2 раза (Рисунок 93с). Причиной повышения Ег могло быть резкое уменьшение уровня проникновения ГКЛ до поверхности земли. В пользу такой интерпретации свидетельствуют два фактора. Во-первых, вариации значений плотности тока проводимости в этот период были не столь значительными, как в последующий отрезок времени (Рисунок 94b). Эта величина была получена косвенным методом из вычисления $j = E(\lambda_+ + \lambda_-)$, где $E - \mu$ пряженность электрического поля, λ_+ и λ_- - электропроводность воздуха, вызванная, соответственно, положительными и отрицательными ионами. Во-вторых, электропроводность воздуха резко уменьшается в этот период (Рисунок 93с). ГКЛ, наряду с радоном, являются одним из ионизаторов воздуха. Уменьшение ионизирующего воздействия ГКЛ приводит к уменьшению электропроводности (Рисунок 93с) и, соответственно, к увеличению Еz (Рисунок 93b). На Камчатке и близлежащих районах нет станций измерения космических лучей. На Рисунке 95 приведены данные потока протонов по данным GOES-15 и поток космических лучей. Данные получены из сайта National Geophysical Data Center. Возможно ионизационные процессы в приземном слое средних широт настолько сложны и нелинейны, что на Камчатке они проявились таким образом.

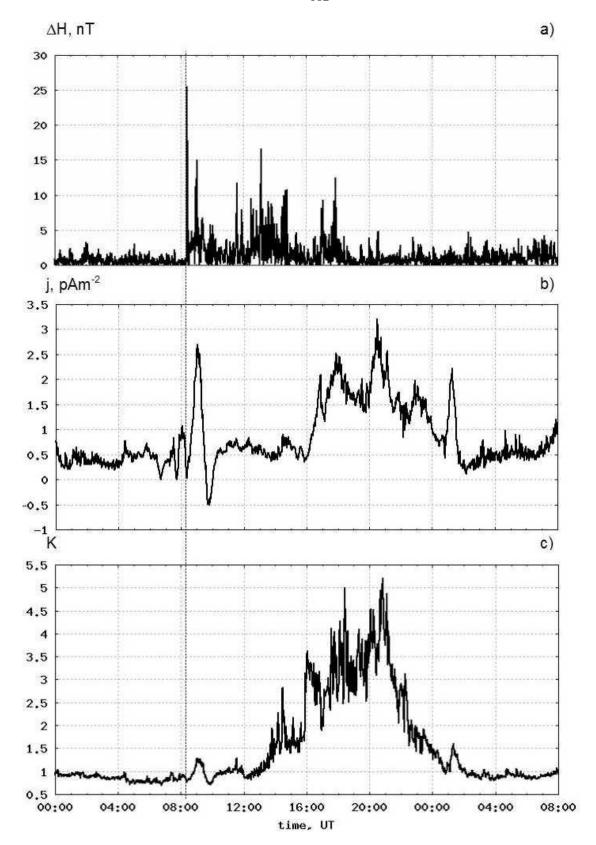


Рисунок 94 — Развитие магнитной бури (начало — пунктирная линия) 5 — 6 апреля 2010г. а) изменение магнитного поля ΔH b) плотность тока проводимости, c) униполярность (λ_+/λ_-) воздуха.

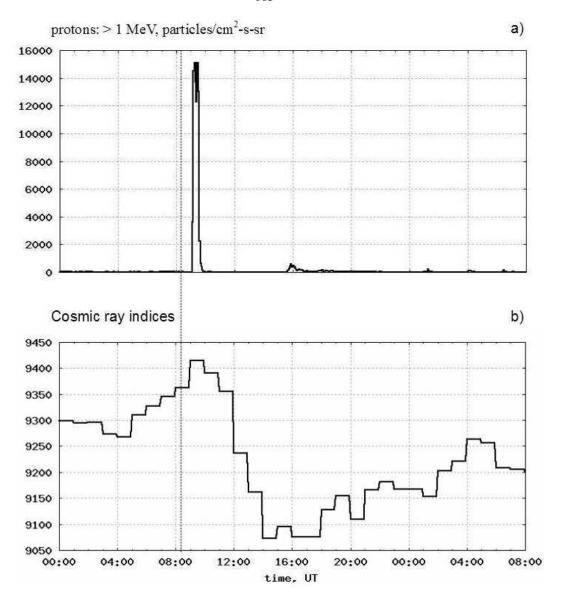


Рисунок 95 — Поля в околоземном пространстве во время магнитной бури (начало — пунктирная линия) 5 — 6 апреля 2010г. a) поток протонов > MeV, b) поток космических лучей.

На втором этапе в интервале с примерно 8:27 до 12:00 UT происходит резкое возрастание электрического поля, а затем его понижение. Это совпадает по времени с резкими осцилляциями Н-компоненты геомагнитного поля. Аналогично вела себя плотность тока проводимости. Такие возмущения имеют, возможно, индукционную природу. На Рисунке 94а построен график изменений магнитного поля $\Delta H_i = H_{i+1}$ - H_i , где H_i – ряд измерений Н-компоненты магнитного поля с усреднением 1 мин. На Рисунке 94b – построена плотность тока проводимости. На Рисунке 94 видно, что начало бури с внезапным вступлением сильно изменяет

токовую систему в приземном слое воздуха. Однако на последующих этапах влияние магнитного возмущения на токовую систему выражено слабо.

На третьем этапе с примерно 12:00 5 апреля до 1:30 6 апреля UT происходит возрастание электрического поля, связанного с увеличением коэффициента униполярности (Рисунок 94с). Коэффициент униполярности $K=\lambda_{+}/\lambda_{-}$ учитывает концентрацию ионов и их подвижность. Наблюдения на обс. Паратунка показывают, что эффект дождя приводит к отрицательной бухте коэффициента униполярности, а эффект снегопада наоборот, к положительной бухте. Плотность вертикального тока в это время превысила уровень, который был на втором этапе (Рисунок 94b).

Поведение экспериментально наблюдаемой электропроводности воздуха как удельной проводимости столба воздуха сечением 1 см² и высотой h в модели шарового конденсатора описывается следующим образом [Тверской, 1949]:

$$\lambda = e \sum n_i u_i = e \sum (n_u u_u + n_c u_c + N u_T), \qquad (18)$$

где е - элементарный заряд; n_i - концентрация ионов i - го сорта; u_i - их подвижность; л, с, Т – лёгкие, средние и тяжёлые ионы соответственно; N и $u_{\scriptscriptstyle T}$ – концентрация и подвижность тяжелых ионов. В приземной атмосфере концентрация легких и средних ионов одного порядка по величине ($n_i \sim 200-300 \text{ cm}^{-3}$), а $N \sim 5000 \text{ см}^{-3}$. Но подвижность средних и тяжелых ионов соответственно на два и на четыре порядка по величине ниже, чем легких ионов. Так что проводимость воздуха определяется преимущественно легкими ионами обоих знаков: $\lambda = \lambda_{\scriptscriptstyle +} + \lambda_{\scriptscriptstyle -}$. Концентрация и подвижность легких ионов зависят от воздействия ионизаторов воздуха и его температуры [Брикар, 1969], а также от турбулентного состояния пограничного слоя атмосферы, которое, в свою очередь, зависит от термобарического режима атмосферы [Тверской, 1949]. Исходя из этих зависимостей, качественно можно объяснить поведение электропроводности в рассматриваемый период. Так, в условиях «хорошей погоды» 21 - 22 октября суточные вариации электропроводности близко согласуются с суточным вариациями температуры и влажности воздуха: днем при высокой температуре благодаря увеличению подвижности легких ионов, а также, возможно, интенсивному образованию легких ионов в результате благоприятного выхода подпочвенных газов, содержащих радон, электропроводность высокая (~ 4000). Соответственно наблюдается низкая величина напряженности поля. С понижением температуры воздуха величина электропроводности плавно уменьшается, оставаясь практически постоянной (~ 1000) в ночное время со слабыми колебаниями. В это время, как видно на Рисунке 87, кривая 6, влажность воздуха возросла до величины ~90% в виде капель воды, на которые, по-видимому, и стали оседать легкие ионы, в результате чего их концентрация уменьшилась. Кроме того, при низких температурах уменьшается их подвижность и выход подпочвенных газов. Соответственно возрастает напряженность электрического поля (см. Рисунок 88а). Минимум в суточном ходе электропроводности наступает на восходе Солнца в результате действия локального конвективного генератора, когда вместе с нагретым теплым воздухом выносятся вверх ионы. Это приводит к уменьшению их концентрации и соответственно росту напряженности электрического поля [Смирнов, 2013] п. 4.1.

При наличии облаков разного типа и особенно облаков нижнего яруса, содержащих преимущественно отрицательные заряды в нижней их части, уменьшается средний суточный уровень напряженности электрического поля с искажением его суточного хода на восходе Солнца [Имянитов, 1965]. При выпадении осадков, несущих объемные заряды к поверхности земли, электропроводность также резко изменяется (см. Рисунок 88 б и г, 24 и 30 октября).

Но кроме локальных ионизаторов, в атмосфере постоянно действуют и глобальные ионизаторы. Это солнечные и галактические космические лучи, которые испытывают сильные вариации во время солнечных вспышек и геомагнитных бурь. В период 21 - 31 октября, как видно на Рисунке 22 в работе [Солнечные и гелиосферные ..., 2004], после сильной солнечной вспышки 26 октября поток ядер СКЛ в северном полушарии 27 октября возрос с 1 до \sim 10 2 , а 28 – 29 октября - до \sim 10 3 ч/см 2 с.ср при спокойных вариациях ГКЛ (см. 87, кривая 9). При

этом, как известно, снижается граница жесткого обрезания потоков СКЛ. Это не могло не привести к росту концентрации в верхней тропосфере и соответственно проводимости во всем столбе воздуха. По-видимому, этим процессом качественно можно объяснить высокий постоянный уровень электропроводности в течение суток 27 и 28 октября. Но с началом геомагнитной бури и вступлением эффекта Форбуш-понижения ГКЛ в 16.00 UT, который, по-видимому, подавил действие СКЛ, при слабом изменении температуры воздуха электропроводность начинает уменьшаться с 4000 до 1000, оставаясь неизменной до 06.00 UT 30 октября (Рисунок 88 в и г). Одновременно возросла напряженность поля с 50 до 100 В/м. Этот интервал времени совпал со временем глубокого минимума Dstвариации и Форбуш-понижения ГКЛ. Таким образом, глобальный источник ионизации атмосферы подавил действие локальных источников: и конвективного генератора, и облаков, и осадков.

Более сложная ситуация наблюдалась в вариациях метеорологических величин, особенно температуры и влажности. По данным местной метеорологической станции в период с 21 по 31 октября облака по форме изменялись от верхнеслоистых (21 - 22 октября) до кучево-дождевых, сопровождаемых грозовыми процессами и ливневыми дождями (24 и 30 октября). Вместе с тем известно (см., например, [Матвеев, 2000]), что образование облаков, особенно кучево-грозовых форм, связано с дополнительным притоком солнечной радиации, когда с повышением температуры и влажности потоки нагретого воздуха, содержащего водяной пар, поднимается вверх. Процесс изменения этих величин отчетливо прослеживается на Рисунке 87 (кривые 5 и 6) 24 - 25 и 27 - 28 октября. А именно: благодаря значительному повышению температуры в ночное время с одновременным повышением влажности воздуха суточные амплитуды температуры и влажности в эти дни уменьшились соответственно до 5°C и 0.5% по сравнению с условиями «хорошей погоды» 21 - 22 октября (7.5-8°C и 22.5%). Этот экспериментальный факт свидетельствует о том, что в нижнюю атмосферу действительно поступил значительный дополнительный поток солнечной радиации даже

при наличии облачности, снижающей прозрачность атмосферы. Совпадение по времени этих периодов с моментами солнечных вспышек 23 и 28 октября позволяет полагать, что суточные аномалии температуры и влажности воздуха вызваны высокой солнечной активностью. Во время солнечных вспышек, как известно, наблюдается усиление потоков солнечного излучения не только в полосе Хлучей как показателе интенсивности вспышки, но и в более широкой полосе [Ап observational overview ..., 2011], особенно в случаях, когда вспышки происходят вблизи центра диска, как это имело место в октябре 2003 г. [Solar irradiace ..., 2004]. По данным космического аппарата NASA Solar Radiation and Climate Experiment (SORCE) 28 октября было зарегистрировано усиление полного потока энергии излучения приблизительно в 50 раз по сравнению с уровнем до вспышки. Около 50% от полной энергии излучения приходится на ближний ультрафиолет (~200 нм) и видимую части спектра [Woods et al., 2006]. Обнаружено также заметное усиление потока и в инфракрасной полосе на 1.553 нм [Тhe signature ..., 2004]. Из полного спектра излучения в нижнюю атмосферу поступает только часть его через так называемое «окно прозрачности». Оно включает в себя ближний ультрафиолет и видимую полосу ($1000 - 2 \times 10^4 \text{ Å}$, 100 - 2000 нм), т.е. максимум интенсивности солнечного излучения (см., например, [Физика космоса, 1986], с.39), а также полосу инфракрасного излучения (1-20 нм). Повидимому, именно в этой полосе излучения и поступал дополнительный приток тепла во время солнечных вспышек в октябре 2003 г. (Мы не касаемся вопроса вариаций прозрачности атмосферы в зависимости от геомагнитной активности, наблюдаемой на субавроральных обсерваториях [Пудовкин, 1996], поскольку в обс. «Паратунка» отсутствовали актинометрические измерения).

Дополнительным источником теплового излучения, поступающего в атмосферу Земли в период с 21 по 31 октября, можно рассматривать также всплески белого света (white-light flares). Это излучение включает в себя непрерывный спектр в широком диапазоне длин волн. Максимум излучения лежит в полосе 360-400 нм [Neidig, 1989], а по мощности в импульсе это излучение одного порядка по величине с излучением в полосе мягкого рентгена [Hudson, 1983] и способно проникать в нижнюю атмосферу. Вспышки белого света были зарегистрированы 23 октября при интенсивности X-лучей M2.4 (т.е. при умеренном импульсном всплеске) в 02:35.00 UT с продолжительной гладкой составляющей высокой интенсивности [Hudson et al.,2006]. 28 и 29 октября также была зарегистрирована вспышка белого света, но при существенно более высоких значениях интенсивности X-лучей (соответственно X17/4B, X10/2B). Более того, также наблюдалось усиление интенсивности излучения в инфракрасном «хвосте» спектра вспышки [Машгуа, 2009]. Не исключено, что эти всплески могли внести свой вклад в нарушение суточного хода температуры и влажности.

Особый интерес вызвало восстановление нормального суточного хода температуры и влажности воздуха 29 октября, когда скорость ветра понизилась до 2 м/с при отсутствии осадков, т.е. выполнялись условия «хорошей погоды». Это явление можно объяснить с учетом результатов регистрации плотности потоков излучения на КА SORCE, когда в видимом диапазоне волн (300 - 2000 нм) интенсивность уменьшилась из-за наличия пятен на диске Солнца [Solar irradiace ..., 2004].

Обращает на себя внимание еще и тот факт, что на вторые сутки после геомагнитной бури наблюдался отрицательный суточный перепад давления ~30 гПа.

Как видно на Рисунке 90, эффекты геомагнитных бурь 8 и 10 ноября 2004г. в вариациях напряженности электрического поля в приземной атмосфере развивались на фоне сильно изменившихся метеорологических величин (кривые 3, 4, 5), т.е. в отсутствие условий «хорошей погоды». Под действием серии мощных солнечных вспышек (кривая 7) произошедших в период 6 - 10 ноября 2004г., аномальные изменения суточного хода температуры и влажности привели к образованию облачности и осадков в виде снега, которые, в свою очередь, привели к понижению напряженности электрического поля и сильным вариациям ее величины (Рисунок 92). На этом фоне 8 ноября дополнительно произошли грозовые

процессы, также исказившие суточный ход напряженности поля (Рисунок 91) и не позволившие выделить в них эффект ГКЛ. Но это удалось сделать 10 ноября при относительно слабом влиянии метеорологических величин. Во временных вариациях электрического поля (Рисунок 91) наблюдалось значительное ослабление градиента потенциала по сравнению с предшествующим днем. Этот результат совпадает с результатами других исследований, в которых показано ослабление напряженности электрического поля в приземной атмосфере во время Форбуш – эффекта и усиление волн планетарного масштаба.

Для объяснения наблюдаемых эффектов во временных вариациях напряженности электрического поля рассмотрим действие глобальной электрической цепи в рамках модели сферического конденсатора. Рассмотрим более расширенную версию уравнения (13) для плотности тока из п. 4.1:

$$J = \lambda E + \rho V + D_t \nabla \rho + \sum J_s \,, \tag{19}$$

где λ - электропроводность атмосферы; E – напряженность электрического поля; р - плотность электрических зарядов; V - гидродинамическая скорость движения среды; D_t – коэффициент турбулентной диффузии; ΣJ_s - суммарная плотность токов S источников. Первое слагаемое – это ток проводимости в атмосфере, обусловленный глобальным грозовым генератором. Второе и третье слагаемые учитывают локальные токи в обменном слое атмосферы, вызванные конвективным генератором. А последнее слагаемое включает в себя возможные источники как локального, так и глобального масштаба. К первым из них можно отнести облачность, осадки, локальные молниевые разряды, подпочвенные радиоактивные газы (в ноябре из-за низких температур воздуха радиоактивные источники практически не влияют на проводимость в обменном слое). Дополнительным глобальным источником тока являются космические лучи. В средних широтах на высотах порядка 15 - 20 км, как показано в работе [Стожков и др., 2001], наблюдается линейная связь между плотностью тока и потоком КЛ. При спокойных геомагнитных условиях коэффициент корреляции между годовыми значениями этих параметров составляет величину 0.77 ± 0.10 . На высотах выше 35 км в высокоширотной атмосфере основной вклад в токи ГЭЦ вносят СКЛ. В рассматриваемый период, как следует из работы [Год спустя ..., 2005], 9 ноября 2004 потоки солнечных протонов в диапазоне энергии 1 - 5 МэВ возросли на три порядка по величине по сравнению с потоками 6 ноября. И граница их проникновения в атмосферу опустилась до инвариантных широт ~55-60°N [Год спустя ..., 2005]. Вторжение солнечных протонов на высоты стратосферы могло вызвать рост ионизации атмосферы и усиление токов в ГЭЦ. Это, в свою очередь, привелю к росту напряженности электрического поля в приземной атмосфере. При глубоком понижении потоков ГКЛ во время бури 10 ноября 2004 имел место обратный эффект (Рисунок 92). Образовавшийся аномально мощный грозовой процесс во время главной фазы магнитной бури 8 ноября подавил влияние Форбуш-эффекта в суточном ходе Еz (Рисунок 91), так и в спектрах мощности Еzкомпоненты поля (см. п. 5.2). На фазе восстановления потоков ГКЛ 10 - 15 ноября линейная связь Еz с потоками отсутствовала из-за сильного влияния метеорологических процессов на электрическое поле.

Наблюдаемые аномальные изменения суточных вариаций температуры и влажности воздуха произошли практически одновременно со вспышками на Солнце. При этом, как видно в Таблице 12, интенсивность ЭМИ излучения Солнца в оптическом диапазоне возрастала от слабой (SF) до аномально высокой (2В и 3В). Кроме того, известно, что при сильных вспышках полная выделяемая энергия в оптическом диапазоне соизмерима с энергией в мягком рентгене и УФ – излучении (см., например, [Физика космоса, 1986], с.191). Земная атмосфера почти полностью прозрачна только для оптического и радиоизлучения Солнца. Остальные компоненты электромагнитного излучения Солнца теряют свою энергию на различных высотах атмосферы на процессы ионизации, диссоциации и нагрев (см., [Физика космоса, 1986], с.39, 505). Даже при наличии облачности, которая наблюдалась с 6 ноября, поступающая в атмосферу тепловая энергия вспышек могла привести к существенному повышению температуры атмосферы в ноябре на Камчатке (ночью от минус 14°С до нуля градусов) и к

нарушению суточных вариаций температуры и влажности. Отсюда можно сделать вывод, что при высокой геомагнитной активности условия «хорошей погоды» в приземной атмосфере, по-видимому, будут нарушаться практически всегда.

Более того, как показано в цикле работ Пудовкина [Пудовкин, 1996], при Форбуш-понижении ГКЛ повышается прозрачность атмосферы, что приводит к еще большему дополнительному притоку тепла в атмосферу. Возможно, с этим эффектом связано развитие сильной конвективной неустойчивости атмосферы, породившей наблюдаемые грозовые процессы 8 и 11 ноября. К сожалению, отсутствие актинометрических измерений в обс. «Паратунка» не позволили проследить вариации прямой солнечной радиации в рассматриваемый период.

Вместе с тем в рассматриваемый период были обнаружены следующие изменения метеорологических величин:

- С момента начала активной фазы на Солнце 6 ноября появилась небольшая облачность с прояснениями как признак медленно восходящих потоков воздуха. По мере роста солнечной активности 7 ноября она переросла в сплошную облачность с зарождением конвективных облаков, породивших грозовые явления 8 ноября (выпал снег). Эти процессы происходили не непрерывно, сменяя облачность с прояснениями 9 ноября на сплошную конвективную облачность 11 ноября. Динамика развития облачности свидетельствует об усилении восходящих потоков теплого воздуха. Это, в свою очередь, указывает на поступление в атмосферу дополнительных притоков тепла.
- При наличии сплошной облачности аномальное повышение температуры воздуха в ночное местное время от минус 13 до минус 2 градусов с менее значительным повышением днем от нуля до плюс 5 градусов.
- Усиление ветра от 1 до 8 м/с, вызванное усилением турбулентного обмена между земной поверхностью и атмосферой и связанное с ним усиление волн планетарного масштаба.

Эти факты по времени совпали с началом активной фазы на Солнце и развивались на фоне усиления солнечной активности. Это наводит на мысль, что они вызваны поступлением в нижнюю атмосферу дополнительного притока тепла в результате тепловой вспышки на Солнце, на которую указывает также усиление яркости излучения в линии Нα от SF до 3В баллов. К сожалению, в литературе отсутствуют данные об усилении интенсивности излучения в инфракрасном диапазоне волн, которое должно возрастать, как и УФ-излучение, при тепловых вспышках [An observational overview ..., 2011].

Обнаруженный отрицательный суточный перепад давления ~ 20 гПа на второй день после обеих геомагнитных бурь согласуется с подобным эффектом, наблюдаемым в других работах, авторы которых связывают его с действием корпускулярных потоков от Солнца.

В развитии бури 5 апреля 2010 можно проследить три эффекта. Первый связан с уменьшением электропроводности воздуха (Рисунок 93с). Такое уменьшение могло быть обусловлено «выключением» одного из ионизаторов молекул воздуха. Ионизаторами на этом уровне являются радон и ГКЛ. 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 ГКЛ.

Второй эффект проявился в резких изменениях тока проводимости на начальных стадиях бури. По-видимому, он связан с индукционными явлениями электромагнитных процессов. Какие именно эти процессы, пока не ясно. Один из механизмов был предложен в работе [Nicoll, 2014]. Экспериментально было показано, что СКЛ способствуют дополнительной ионизации верхней атмосферы и, тем самым, увеличивают ток ГЭЦ. Это привело к изменению электрического поля у поверхности земли, однако никак не отразилось на показаниях neutron monitors.

Третий эффект показал положительное бухтообразное изменение коэффициента униполярности. Такой избыток мог быть вызван их очень сильным снегопадом в районе наблюдений. Но, поскольку осадкомер не зафиксировал какихлибо 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 вызвали усиление этого эффекта.

Поведение метеорологических параметров во время солнечной вспышки и магнитной бури с 1 по 13 апреля 2010 представлены на Рисунке 96. Кривая а показывает Ар-индекс магнитной активности, b – показывает температуру воздуха в приземном слое, с – влажность воздуха, d - поток солнечной энергии, е – атмосферное давление, f – сила ветра. 2 апреля была плохая погода, были осадки, что подтверждают кривые влажности (Рисунок 96с) и потока солнечной энергии (Рисунок 96d). Горизонтальные линии для 5 апреля означают отсутствие данных. На следующий день после вспышки, 4 апреля погода была хорошая, ясная и солнечная. Если подъем ночных температур 2 апреля можно объяснить плохой погодой, то в последующие дни, вплоть до 7 апреля, этот подъем, возможно, связан с последствиями солнечной вспышки. Подобный эффект наблюдался и во время магнитных бурь ноября 2004г. [Смирнов и др., 2013]. В обзоре [Danilov, 2001] приведены также возможные механизмы влияния геомагнитных бурь на троподинамический механизм, связанный с усилением акустикосферу: ЭТО гравитационных атмосферных волн и волн планетарного масштаба; это электрический механизм, связанный с глобальной электрической цепью и проникновением космических лучей в атмосферу; это оптический механизм, связанный с изменением прозрачности атмосферы и химического состава в стратосфере под действием коротковолнового излучения Солнца и галактических космических лучей. Изменение именно ночных температур указывает на процессы, замедляющие потери тепла.

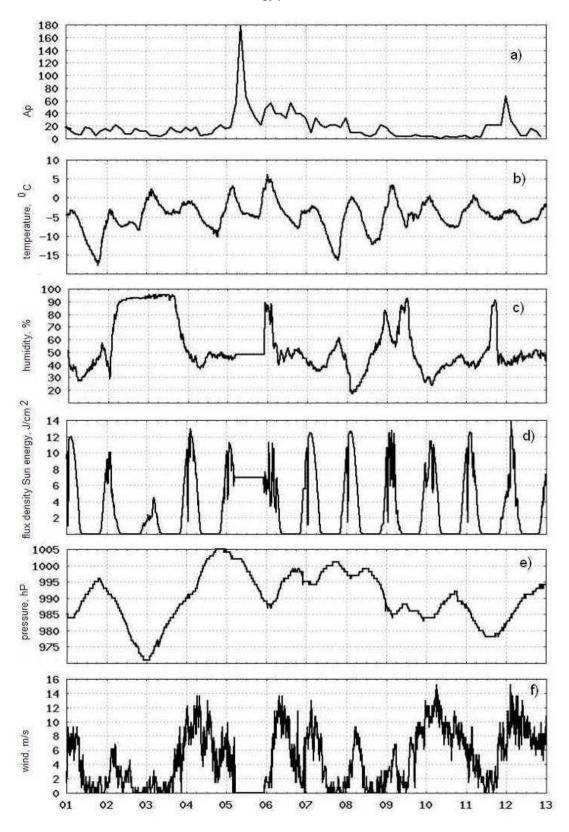


Рисунок 96 - Поведение метеорологических параметров во время магнитной бури в апреле 2010 г.

Таким образом, исследования суточных вариаций электропроводности воздуха, напряженности электрического поля и метеорологических величин в приземной атмосфере на Камчатке во время солнечных событий показали следующее:

- 1. Обнаружено увеличение электропроводности воздуха в течение двух суток накануне геомагнитной бури 29 30 октября 2003 г. в результате действия СКЛ и уменьшение ее во время Форбуш понижения ГКЛ с соответствующим ростом напряженности электрического поля.
- 2. Наблюдаемое аномальное повышение температуры и влажности в процессе развития солнечной активности октября 2003 г. привело к образованию облаков различной формы, включая кучево-дождевые, сопровождаемые ливнями и грозовыми процессами.
- 3. Совпадение по времени периодов нарушений регулярных метеорологических процессов с последовательностью сильных солнечных вспышек, сопровождаемых усилением излучения в полосе ближнего ультрафиолета, видимой и инфракрасной частей спектра, позволяет рассматривать их в качестве дополнительного притока тепловой энергии в нижнюю атмосферу.
- 4. Последовательность сильных солнечных вспышек, сопровождаемых усилением излучения в оптическом диапазоне ЭМИ Солнца, сопровождалась аномальным повышением температуры и влажности атмосферы, что привело к возбуждению аномально мощных грозовых процессов во время геомагнитной бури 8 ноября 2004 г.
- 5. Образование облачности и осадков с момента солнечной вспышки 6 ноября 2004 г. привело к понижению общего фонового уровня электрического поля по сравнению с условиями «хорошей погоды».
- 6. Обнаружен отрицательный суточный перепад атмосферного давления на второй день после геомагнитных бурь, причина которого неясна.
- 7. Совпадение по времени начала активной фазы на Солнце с нарушением регулярных метеорологических процессов в нижней атмосфере позволило пред-

положить, что эти эффекты обусловлены тепловыми вспышками в оптическом диапазоне волнового излучения Солнца.

- 8. Наблюдались большие осцилляции тока проводимости, совпадающие с внезапным началом магнитной бури. Такие возмущения, возможно, вызваны индукционными процессами. Длительность этого процесса была около 2 часов.
- 9. Увеличение коэффициента униполярности ионов в атмосфере была вызвана избытком положительно заряженных частиц. Эффект произошел через 8 часов после начала магнитной бури с внезапным началом 5 апреля 2010 г. и длился около 13 часов.

6.2 Эффекты геомагнитных возмущений в спектрах мощности атмосферных волн

В условиях «хорошей погоды» в рамках модели шарового конденсатора, образованного поверхностью Земли и нижней границей ионосферы, ток проводимости в глобальной электрической цепи (ГЭЦ) определяется удаленными грозовыми источниками, так называемым глобальным грозовым генератором. Кроме него, существуют и другие дополнительные генераторы глобального масштаба: это ионосферный генератор (в динамо-области на h ~ 100-120 км), магнитосферный генератор и СКЛ в верхней атмосфере полярных широт, а также ГКЛ в средней атмосфере (h ~ 15-25 км).

В приземной атмосфере средних широт как части ГЭЦ, кроме глобальных источников, включаются локальные источники тока: это конвективный генератор и генератор сейсмической природы, поставляющий в атмосферу радиоактивный газ, Rn. К локальным генераторам следует отнести и кучевые облака, отрицательно заряженные в нижней их части. Локальные генераторы, как известно, проявляют сильную зависимость от метеорологических величин (температуры, давления, влажности атмосферы и скорости ветра), которые, в свою очередь,

зависят от солнечной активности. Ионосферное динамо вносит несущественный вклад в атмосферные параметры (~5-10%) [Roble, 1985]. На средних широтах в приземной атмосфере в условиях «хорошей погоды» следует также пренебречь действием СКЛ и магнитосферного генератора. Даже в полярных широтах вклад магнитосферного генератора составляет ~ ± 20% относительно вклада грозового генератора [Roble, 1985].

Во время сильных солнечных вспышек и геомагнитных бурь, как глобальных процессов, их влияние проявляется, прежде всего, в вариациях глобальных источников тока в ГЭЦ. Результаты анализа этих эффектов на средних и высоких широтах, приведены в довольно многочисленных работах и последовательно отражены в обзорах [Roble, 1985; Recent advances ..., 2012], включая, в том числе, солнечное событие в августе 1972 г.

Подобные солнечные события произошли в сентябре - октябре 1999 г., октябре 2003 г. и ноябре 2004 г. Детальный анализ временных вариаций напряженности электрического поля и электропроводности атмосферы в приземной атмосфере на Камчатке во время этих событий выполнен в работах [Смирнов и др., 2013; Smirnov, 2014] и представлен в п. 6.1. При этом были рассмотрены одновременно наблюдаемые вариации локальных метеорологических величин (температура, давление, влажность атмосферы и скорость ветра), а также солнечных и геомагнитных параметров (потоки рентгеновского излучения как показателя уровня солнечной активности, потоки СКЛ и ГКЛ, Dst — вариации, Кр — индексы, горизонтальная компонента геомагнитного поля). Такой комплексный подход, впервые выполненный в исследованиях эффектов солнечных явлений в атмосферном электричестве приземной атмосферы, позволил отдельно выделить вклад глобальных и локальных источников во временных вариациях электропроводности атмосферы и напряженности электрического поля.

Временные вариации приведённых выше величин, естественно, связаны с динамикой атмосферы в этот период. В этой связи для обнаружения более четких причинно-следственных связей между рассматриваемыми величинами пред-

ставляло интерес исследовать их частотные вариации в широком диапазоне периодов атмосферных волн: тепловых приливных волн (ТПВ, T = 4 - 24 ч) и волн планетарного масштаба (ВПМ, T > 24 ч).

Рассмотрим суточные вариации горизонтальной компоненты (Н) геомагнитного поля, зарегистрированного на Камчатке (обс. «Паратунка», ИКИР ДВО РАН, $\varphi = 52.97^{0}$ N; $\lambda = 158.25^{0}$ E) и в полярной обс. Barrow ($\varphi = 71.32^{0}$ N; $\lambda =$ 203.38°E), с дискретностью по времени 1 мин. Для анализа выбран период наблюдений сентябрь-октябрь 1999 г. Состояние геомагнитной активности оценено через параметры Кр и ΣКр. Результирующий график ΣКр показан на Рисунке 97 (кривая 4). Видно, что в этот период наблюдалось четыре всплеска геомагнитной активности длительностью ~ 4 - 8 сут. Поэтому для оценки спектральной плотности мощности S^2 нTл 2 / Γ ц (далее для краткости, *спектры мощности*) исходных записей H(t) выбрано прямоугольное «окно» длительностью t_i =8 сут, которое смещалось на одни сутки вдоль двухмесячного временного ряда данных для этих обсерваторий в период сентябрь-октябрь 1999 г. Исходные значения поля с дискретностью в 1 мин усреднялись на интервале в 8 мин, и дополнялись нулями до 2048×8 точек для более детального представления спектров по частоте. Из полного набора последовательности спектров $S^2(f)$ для этих обсерваторий в период сентябрь-октябрь 1999 г. В качестве примера на Рисунке 98 (для обс. «Паратунка») и Рисунке 99 (для обс. Barrow) приведены два фрагмента. Спектры построены в линейном (по частоте) масштабе, метки на оси абсцисс указывают на частоты, соответствующие периодам T = 8, 12, 24, 48, 72 и 192 ч (гармоники с Т=4 ч по интенсивности значительно слабее выделенных, поэтому на рисунках не приведены). По осям ординат вертикальный отрезок прямой в начале координат на каждом фрагменте одинаковый для всех кривых и равен $1 \times 10^7 \ \mathrm{hT} \mathrm{n}^2 / \Gamma \mathrm{ц}$ для данных обс. «Паратунка» и 2×10^8 нТл²/ Γ ц для данных обс. Barrow.

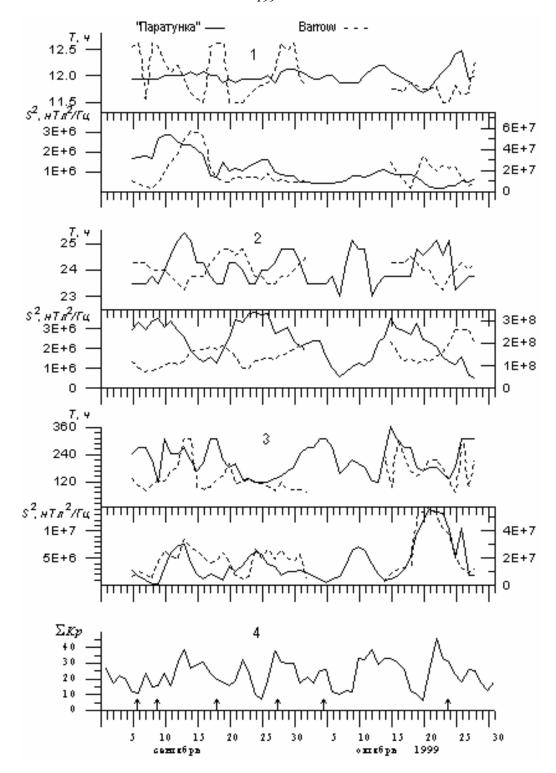


Рисунок 97 - Динамика интенсивности максимумов спектров и значений их периодов в суточных вариациях Н-компоненты магнитного поля в обс. «Паратунка» (сплошные кривые и левые ординаты) и обс. Ваггоw (штриховые кривые и правые ординаты). Кривые 1 для $T \sim 12$ ч, кривые 2 для $T \sim 24$ ч, кривые 3 для $T \sim (48 - 192)$ ч, кривые 4 — вариации Σ Кр-индекса

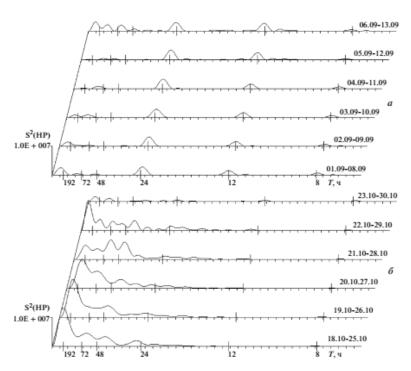


Рисунок 98 — Динамические спектры мощности Н-компоненты геомагнитного поля в обс. «Паратунка» в спокойных геомагнитных условиях (а) и при высокой геомагнитной активности (б)

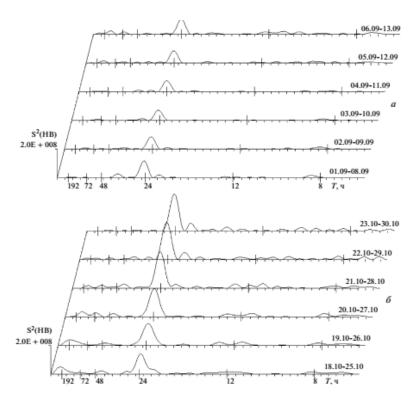


Рисунок 99 — Динамические спектры мощности Н-компоненты геомагнитного поля в обс. Ваггоw в спокойных геомагнитных условиях (а) и при высокой геомагнитной активности (б)

Рассмотрим Рисунок 98. Фрагмент 01.09-13.09 (а) представляет собой последовательность спектров мощности на интервале t_i=8 сут через одни сутки в спокойный период, когда Kp<4 и ΣKp<25. Четко выделяются устойчивые колебания с неизменными по величине периодами Т ~ 24, 12, 8 ч практически постоянной интенсивности. В отдельные дни (01.09-08.09 и 06.09-13.09) в спектрах мощности появляются колебания в полосе периодов (48-192) ч. Они соответствуют периодам двухдневных, трехдневных и восьмидневных гармоник планетарных атмосферных волн. Их интенсивность ниже интенсивностей колебаний с Т~24 ч (суточный тепловой прилив) и с Т~12 ч (полусуточный тепловой прилив). В этот период наблюдений в спектрах мощности H(t) в обс. Barrow (Рисунок 99a) преобладает гармоника с Т~24 ч с интенсивностью на порядок по величине выше интенсивности соответствующей гармоники H(t) в обс. «Паратунка». Все другие гармоники либо отсутствуют, либо сильно подавлены по сравнению с гармоникой на Т~24 ч. При высокой магнитной активности: Кр~7 и ΣКр~50 (Рисунок 98б и Рисунок 99б) спектры мощности H(t) в обеих обсерваториях сильно изменяются. В обс. «Паратунка» подавляются колебания с T~8, 12 ч, уменьшается интенсивность колебаний с Т~24 ч, но заметно усиливаются колебания в полосе периодов (48-192) ч, особенно на Т~192 ч (интенсивность этой гармоники в несколько раз превышает интенсивность на Т~24 ч). В этот же период наблюдений в обс. Barrow с усилением геомагнитной активности возрастает интенсивность гармоники с Т~24 ч, и усложняется спектр во всем диапазоне. В частности, появляются заметные максимумы в полосе (48-192) ч, но их интенсивность значительно меньше интенсивности основной гармоники. Подобная динамика спектров мощности H(t) наблюдалась и в другие дни усиленной геомагнитной активности: (07-19), (16-28) в сентябре и (10-15), (12-24) в октябре.

Более детальная картина вариаций интенсивности максимумов спектров и значений их периодов, наблюдаемых одновременно в обс. «Паратунка» и обс. Ваггоw в течение сентября-октября, показана на Рисунке 97. Здесь для каждого максимума в спектре мощности приведены величины спектральной плотности

мощности S^2 н $T\pi^2/\Gamma$ ц и их периоды: кривые 1 для $T\sim12$ ч; кривые 2 для $T\sim24$ ч, кривые 3 для полосы периодов Т~(48-192) ч. Сплошные линии соответствуют данным H(t) обс. «Паратунка», а штриховые – данным H(t) в обс. Ваггоw. Интервал со 2 по 14 октября на штриховых кривых пропущен из-за отсутствия первичных записей геомагнитного поля. Из анализа рисунка видно следующее: в обс. «Паратунка» интенсивность колебаний с T~24 ч изменяется с квазипериодичностью планетарных волн с Т~16 сут практически с мало меняющейся амплитудой. Подобная периодичность интенсивности наблюдается и в колебаниях с Т~12 ч, но её амплитуда последовательно уменьшается на протяжении всего периода наблюдений. На кривой ΣКр-индекса (кривая 4 на рисунке) также проявляется периодичность, но с $T\sim10$ и 12 сут. Максимумы S^2 кривых 1 и 2 опережают по времени максимумы изменения ΣKp -индекса. По-видимому, это связано с усилением потока УФ - излучения Солнца во время солнечных вспышек, которое примерно на двое суток опережает геомагнитные возмущения и связанные с ними усиления корпускулярных потоков. Несколько отлично от кривых 1 и 2 поведение интенсивности спектров в полосе периодов (48-192) ч. Во-первых, интенсивность максимумов (7×10^6 - 4×10^7) н $\text{Тл}^2/\Gamma$ ц существенно превышает максимум с $T \sim 24$ ч ($\sim 4 \times 10^6$) н $T \pi^2 / \Gamma$ ц. Во-вторых, интенсивность колебаний в этой полосе периодов изменяется с периодичностью в 10-12 сут, совпадающей с периодичностью изменений ΣКр-индекса. Анализ вариаций значений периодов спектральных максимумов в каждом фрагменте (1, 2, 3) показывает отклонения ΔТ в обе стороны относительно значений Т в спокойных геомагнитных условиях. При этом наибольшие отклонения ΔT совпадают с максимальными значениями Σ Кр-индекса. Например, для максимума с $T \sim 24$ ч $\Delta T \sim \pm 1$ ч.

В период наблюдений (сентябрь-октябрь 1999 г.) на Камчатке было зафиксировано несколько землетрясений с магнитудой $M \ge 5$, отмеченных на кривой 4 Рисунка 97 стрелками (параметры см. в Таблице 13). Как видно, землетрясения произошли на фоне высокой геомагнитной активности, которая, по-видимому,

оказала наибольшее по сравнению с сейсмической активностью влияние на динамические спектры волновых процессов в Е-области.

Таблица 13 - Землетрясения вблизи п-ова Камчатка, зарегистрированные в сентябре-октябре 1999 г.

Дата	Время	$\varphi^0 N$	$\lambda^0 E$	h, км	M	R, км
06.09.1999 г.	15:04:52	52.10	159.15	55	5.0	180
18.09.1999 г.	21:28:33	51.21	157.56	60	6.0	225
24.10.1999 г.	05:01:35	51.21	157.61	76	5.6	200
24.10.1999 г.	12:24:50	52.23	159.65	44	5.3	125

Примечание - h - глубина, K - класс 3T, M - магнитуда, R - расстояние от эпицентра до обс. «Паратунка».

Вернемся к Рисунку 97 и рассмотрим динамику интенсивности максимумов в спектрах и их периодов в вариациях H(t), наблюдаемых в обс. Ваггоw. В спокойные дни (01.09-08.09) в спектрах мощности присутствуют колебания только с T~24 ч. Их интенсивность с ростом геомагнитной активности существенно возрастает благодаря увеличению проводимости Е-слоя ионосферы в результате усиления потоков энергичных частиц. При этом в спектрах появляются дополнительные максимумы на T~8 и 12 ч и, что особенно важно, на T~(48-192) ч. Интенсивность этих максимумов заметно падает с ослаблением геомагнитной активности. Из-за отсутствия первичных записей H(t) в дни со 2 по 14 октября не удалось, подобно данным в обс. «Паратунка», обнаружить периодичность изменения спектральной интенсивности на T~24 ч. Но в отличие от данных в обс. «Паратунка» максимумы в спектрах мощности на всех периодах совпадают с максимумами изменения ΣКр-индекса.

Рассмотрим суточные вариации напряженности квазистатического электрического поля (Ez – компонента) в приземной атмосфере и атмосферного радиошума на частоте 5.3 кГц, измеренные одновременно в обсерватории с дискретностью по времени 1 мин в период наблюдений сентябрь-октябрь 1999 г. (Для Еz

– компоненты только сентябрь месяц). Состояние геомагнитной активности (ΣКр и Dst-вариации), а также поведение метеорологических параметров (осадки, давление) показаны на Рисунке 100 (нижние кривые). Видно, что в сентябре месяце с 10 по 30 наблюдались периоды высокой геомагнитной активности, на фоне которых имела место изолированная буря с Dst-вариацией ~180 нТл (22 сентября), а в октябре месяце с 10 по 20 и с 20 по 30 с Dst- вариацией ~100 и 250 нТл соответственно. Длительность периодов высокой геомагнитной активности составляла ~8 сут. На фоне этой активности имели место осадки, особенно мощные (~40 мм/м²) 25 - 26 сентября, сильное землетрясение 18 сентября, а также более слабые землетрясения 6 сентября и 24 октября. Параметры этих землетрясений представлены в Таблице 13.

На Рисунке 101 приведена динамика спектров мощности за сентябрь месяц. Спектры построены в линейном по частоте масштабе. Метки на оси абсцисс указывают частоты, совпадающие периодами Т=8, 12, 24, 48, 72, 192 ч. На осях ординат приведен одинаковый масштаб (2×10^8) $B^2/M^2\Gamma$ ц для фрагментов (a) и (б) и масштаб (8×10^8) $B^2/M^2\Gamma$ ц для фрагмента (в). Анализ рисунка показывает следующее. В спокойных геомагнитных условиях и при относительно слабых осадках (кривые 01 - 08 и 02 - 09) в фоновых спектрах мощности выделены преимущественно полусуточная гармоника (Т = 12 ч) теплового прилива и относительно слабые гармоники с Т ~ 48, 72 и 192 ч. С усилением геомагнитной активности во всех последующих восьмисуточных интервалах наблюдалось, во-первых, в полосе периодов 48 – 192 ч увеличение интенсивности спектров в несколько раз по сравнению с фоновым уровнем; во - вторых, смещение максимума компонента на Т ~12 ч в сторону больших значений с одновременным усилением его интенсивности; в-третьих, появление дополнительных максимумов на Т ~16 и 18 ч. В интервалах 10 - 17 и 11 - 19 характер спектров в полосе периодов 8 - 24 ч изменился незначительно, а в полосе 24 - 192 ч интенсивность заметно уменьшилась по сравнению с предыдущими и последующими графиками. В этих интервалах на фоне высокой геомагнитной активности произошло сильное землетрясение, которое привело к подавлению волновых возмущений в полосе периодов волн планетарного масштаба.

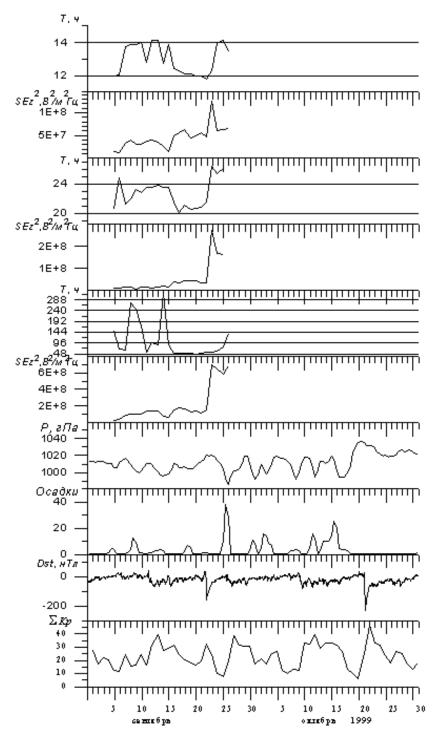


Рисунок 100 - Вариации интенсивности максимумов в спектре мощности (SEz²) и длительности периодов Т этих максимумов вблизи Т ~ 12, 24 ч и более (последовательность сверху вниз соответствующих кривых). На рисунке приведены кривые среднесуточных значений давления Р, гПа, осадков в мм/м², ежеминутные значения Dst — вариаций в нТл и суточные значения Σ Кр-индекса

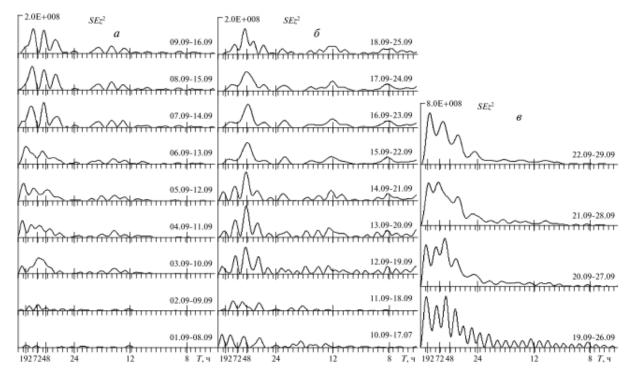


Рисунок 101 - Динамика спектральной плотности мощности суточных вариаций напряженности квазистатического электрического поля (SEz²) через одни сутки в сентябре 1999 г. Масштабы по оси ординат для фрагментов (а) и (б) одинаковы и равны $2 \times 10^8 \, \mathrm{B}^2/\mathrm{m}^2\Gamma$ ц, для фрагмента (в) $-8 \times 10^8 \, \mathrm{B}^2/\mathrm{m}^2\Gamma$ ц

С дальнейшим ростом геомагнитной активности (интервалы 12 - 19; 13 - 20; 14 - 21) наблюдалось усиление компонентов на $T \sim 8$, 12, 24 ч. А в периоды, включающие изолированную магнитную бурю 22 сентября (15 - 22; 16 - 23; 17 - 24; 18 - 25), в спектрах мощности возросла интенсивность компонентов с $T \sim 8$ и 12 ч и особенно ярко на $T \sim 248$ ч. Следующая последовательность спектров (19 - 26; 20 - 27; 21 - 28; 22 - 29) включает в себя, кроме высокой геомагнитной активности, мощный всплеск осадков. Их эффект проявился в подавлении колебаний на $T \sim 8$, 12, 24 ч и в усилении колебаний на $T \geq 48$ ч. Причем, интенсивность их почти на порядок по величине превышает соответствующую интенсивность при других геофизических условиях.

Более детально вариации интенсивностей максимумов в спектрах мощности SEz^2 и их периодов T показаны на Рисунке 100 отдельно для компонентов c пе-

риодами вблизи 12, 24 ч и более 24 ч. Каждое значение на графике приведено к середине интервала в 8 сут, на котором оценивается спектральная плотность мощности. На этом же рисунке для контроля геофизических условий эксперимента приведены среднесуточные значения давления, уровня осадков и ΣКриндекса, а также ежеминутные значения Dst-вариаций для сентября-октября 1999 г. Из анализа этих фрагментов можно сделать следующий вывод: вопервых, эффект высокой геомагнитной активности в поведении спектров проявляется прежде всего в существенном увеличении длительности периода с 12 до 14 ч и одновременно в незначительном уменьшении периода Т ~ 24 ч при слабом усилении их интенсивностей; во-вторых, в день с сильным землетрясением 18 сентября эффект проявляется в резком уменьшением периода максимума до 12 ч при незначительном усилении его интенсивности. В день со слабым землетрясением 6 сентября эффект практически отсутствует. Эффект магнитной бури 22 сентября проявляется в резком усилении интенсивности (в 2-3 раза по сравнению с фоновым уровнем) обоих компонентов и в увеличении скачком длительности периодов этих гармоник до 14 и 26 ч соответственно. С одной стороны, продолжительности существования аномалий максимумов в спектрах мощности (06.09–16.09), как видно из рисунка, совпадают с продолжительностью высокой геомагнитной активности. Несовпадение периодов 14 и 26 ч с параметрами тепловых приливных колебаний и их не кратность между собой, с другой стороны, указывают на их различные источники. Можно полагать, что этот эффект связан не с тепловым излучением от Солнца, а с воздействием на нижнюю атмосферу корпускулярных потоков, которое было обнаружено сравнительно давно. В частности, в работе [Mitra, 1974; Митра, 1977] были выделены полугодовые вариации плотности, давления и температуры в тропосфере в фазе с геомагнитными индексами, и во время сильных геомагнитных возмущений при этом было обнаружено увеличение давления. Мустель [Мустель, 1973; Мустель, 1974] методом наложения эпох относительно начала магнитной бури обнаружил суточный перепад давления по абсолютной величине разного знака в зависимости от региона

и времени года. Вслед за этими работами последовала серия работ, в которых исследовалось влияние солнечной активности на метеорологические параметры нижней атмосферы [Мустель и др., 1977; Мустель и др., 1979; Чертопруд и др., 1979; Пудовкин, 1990]. В них рассматривались преимущественно долговременные колебания, такие, как 22-летние, 11-летние, 5-летние. В данной работе приведены эффекты высокой геомагнитной активности в спектрах мощности квазистатического электрического поля, но в полосе более коротких периодов, включая периоды тепловых приливных волн и волн планетарного масштаба. Обнаружено усиление колебаний спектров мощности в широкой полосе периодов волн планетарного масштаба (от 48 до 288 ч). Этот результат подтверждает ранее полученный эффект усиления циркуляции в приземной атмосфере при высокой геомагнитной активности, который проявился в вариациях индекса площади завихренности [Михневич, 1970; Ластовичка, 1990] и связан с корпускулярными потоками от Солнца [Смирнов, 1984]. Вместе тем известно, что вариации напряженности Еz-компоненты квазистатического электрического поля косвенно через вариации объемного заряда связаны с вариациями атмосферного давления. Эта связь прослеживается в среднесуточных колебаниях этих параметров, приведенных в работах [Сезонные ..., 2000; Значительные..., 2003], а также в параметрах, измеренных непосредственно в сентябре-октябре 1999 г. и показанных на Рисунке 4 п. 4.1. Учитывая эту зависимость, следует ожидать подобных вариаций в спектрах мощности приземного давления в различных геофизических условиях.

При обильных осадках, как видно на Рисунке 100, эффект проявляется сильнее в полосе периодов 48—144 ч с подавлением колебаний в полосе периодов тепловых приливных волн и имеет, по-видимому, локальный характер.

Рассмотрим спектры мощности атмосферного радиошума на частоте 5.3 к Γ μ . На Рисунке 102 выборочно показана динамика спектров мощности суточных вариаций радиошумов (SV²) на тех же интервалах по времени 8 сут, но для двух месяцев: сентябрь — октябрь 1999 г. Обозначения на Рисунке 102 те же, что

и на Рисунке 101. Видно, что на всех графиках, независимо от геофизических и метеорологических условий, в спектрах мощности преобладает компонент с периодом Т ~ 24 ч, а также колебания с Т ~ 12 и 48ч, но с интенсивностью существенно ниже, чем на T ~ 24 ч. Более детальная картина вариаций параметров (SV²) и Т) в спектрах мощности приведена на Рисунке 103. Поскольку гармоника с периодом порядка 12 ч в спектрах мощности выделена значительно слабее, чем гармоника с периодом вблизи 24 ч, то в вариациях ее параметров отмеченные выше эффекты выражены слабо. Что касается гармоники с периодом Т ~24 ч, то его длительность сохраняется практически постоянной. Интенсивность же ее с ростом ΣКр-индекса в интервале (05 - 15.09) последовательно уменьшается (особенно ярко выражено для компонента с Т ~ 24 ч), в день с сильным землетрясением 18 сентября на этом фоне слабо возрастает и затем резко падает в день с магнитной бурей. В целом же интенсивность этого компонента на протяжении двухмесячного периода следует за вариациями Кр-индекса, т.е. с ростом его величины интенсивность радиошума последовательно падает. Этот эффект известен давно: а именно, высыпание корпускулярных частиц вызывает увеличение концентрации электронов в три-четыре раза в D-слое ионосферы и понижение его высоты [Lastovicka, 1996]. Это, в свою очередь, приводит к усилению затухания ОНЧ-электромагнитных волн, распространяющихся в приземном волноводе. Этот эффект отчетливо проявляется на Рисунке 102 и Рисунке 103 в падении интенсивности компонентов с периодами суточного и полусуточного приливов. Даже незначительное увеличение интенсивности в день с сильным землетрясением означает, что сейсмические и геомагнитные эффекты в Dобласти ионосферы проявляются в противофазе. Подобный эффект ранее был обнаружен в работе [Михайлов и др., 1997]. В полосе периодов более 24 ч в спектрах мощности атмосферного радиошума при усилении геомагнитной активности в интервале (05.09–15.09) наблюдается усиление колебаний с последующим ослаблением на протяжении всего периода наблюдений. Период этих колебаний составляет величину прядка 48 ч. Он совпадает с периодом квазидвухдневных волн планетарного масштаба, вызванных влиянием теплового излучения Солнца на атмосферную циркуляцию. Скачкообразное возрастание периода максимума ~ 120 ч, по-видимому, связано с очень слабой интенсивностью колебаний на временном интервале 10.10–14.10.

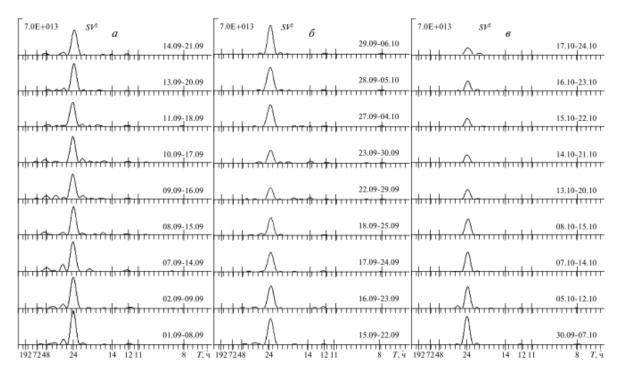


Рисунок 102 - Динамика выборочных спектров мощности суточных вариаций атмосферного радиошума на частоте $5.3 \ \mathrm{k\Gamma u} \ (\mathrm{SV^2}, \mathrm{произвольные}$ единицы) на тех же временных интервалах, что и на Рисунке 101

Далее был проведен сравнительный анализ спектров мощности Ez-компоненты электрического поля (SEz^2), атмосферного радиошума (SV^2) и горизонтальной компоненты геомагнитного поля, измеренных одновременно в обс. «Паратунка» (SHp^2) и Barrow (SHb^2) в сентябре 1999 г. Это сравнение показано на Рисунке 104 для наиболее интересных и одних и тех же интервалов по времени с 07–14 по 18–25 сентября, за исключением фоновых спектров (01 - 07 сентября). Из сравнения кривых Рисунка 104 видно, что в периоды высокой геомагнитной активности 07–16 сентября в спектрах мощности SEz^2 , SV^2 , SHp^2 и SHb^2 присутствует разной интенсивности компонент с $T \sim 24$ ч, совпадающий с периодом суточного теплового прилива. В спектре мощности SHp^2 к этому компо-

ненту добавляются гармоники с периодами T ~ 8 и 12 ч. Этот результат свидетельствует о том, что основным ионизующим агентом на высотах D- и динамообластей ионосферы даже при высокой геомагнитной активности является волновое излучение Солнца.

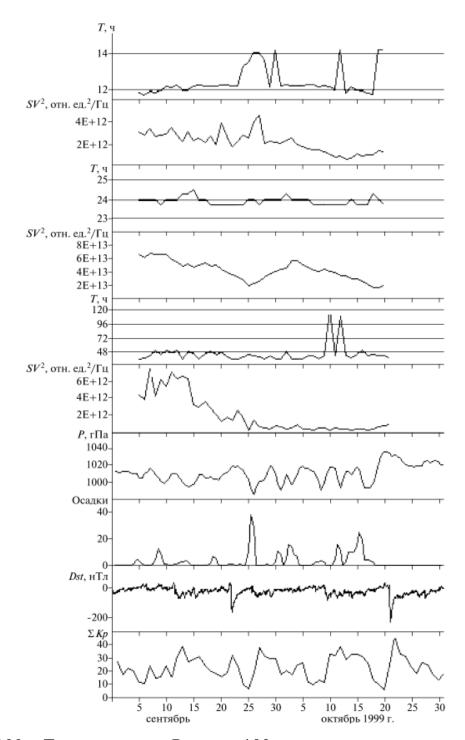


Рисунок 103 — То же, что и на Рисунке 100, но для спектров мощности атмосферного радиошума на частоте 5.3 к Γ ц и для периода наблюдений сентябрь—октябрь 1999 г.

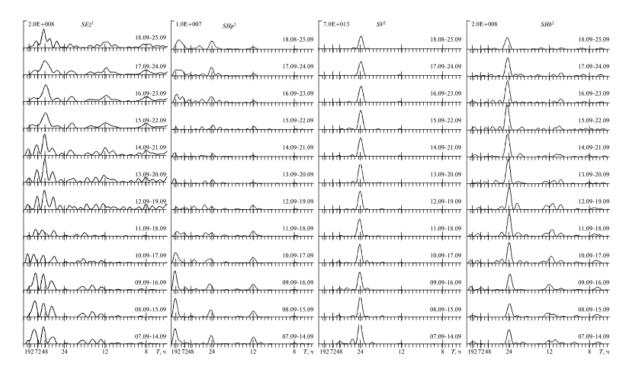


Рисунок 104 — Динамика спектров мощности квазистатического электрического поля (SEz²), атмосферного радиошума на частоте $5.3 \text{ к}\Gamma\text{ц} (\text{SV}^2)$, горизонтальной компоненты геомагнитного поля в обс. «Паратунка» (SHp²) и в обс. Ваггоw (SHb²) в период $07.09 \text{ по } 25.09 \text{ 1999 } \Gamma$.

Совершенно другая картина спектров мощности имеет место в приземной атмосфере. Как видно на Рисунках 100 и 101, в спектрах мощности компонент с периодом Т ~ 24 ч выражен слабее по сравнению с компонентом с Т ~ 12 ч. Это означает, что вариации Еz-компоненты поля непосредственно слабо связаны с волновым излучением Солнца и определяются другими источниками ионизации в приземной атмосфере.

Для более детального сравнения характера волновых возмущений в широком диапазоне периодов атмосферных волн представляло интерес по данным Рисунка 104 построить кривые спектров мощности SHp^2 , аналогичные кривым SEz^2 и SV^2 и показанные на Рисунке 100 и Рисунке 103. Эти кривые приведены на Рисунке 105. Видно, что действие корпускулярных потоков от Солнца проявляется в следующем:

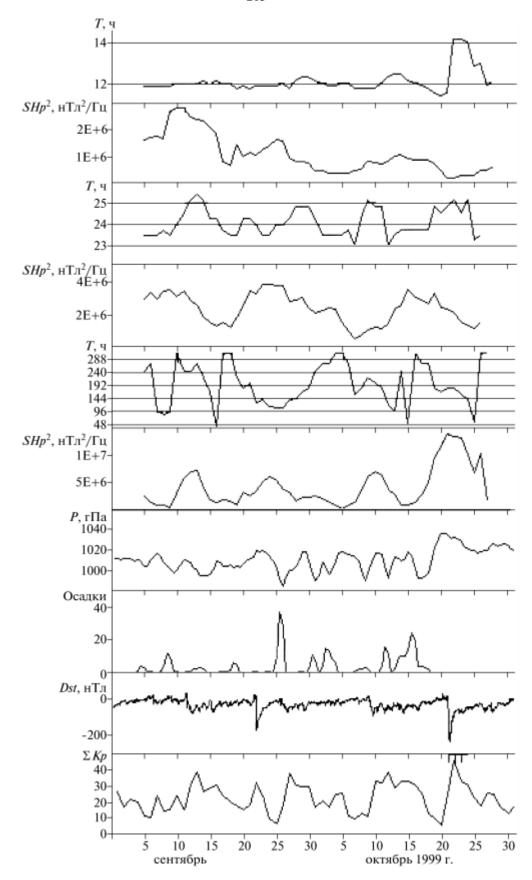


Рисунок 105 — То же, что и на Рисунке 100, но для спектров мощности горизонтальной компоненты геомагнитного поля (SHp², нTл²/Гц), наблюдаемого в обс. «Паратунка» в сентябре—октябре 1999 г.

- увеличение периодов суточного и полусуточного приливов совпадает по фазе с максимумами значений ΣКр–индекса;
- увеличение интенсивности максимальных компонентов в спектре и ее модуляция колебаниями с периодом Т ~ 15 20 суток, близко совпадающим с периодом волн планетарного масштаба ~ 18 суток. Присутствие этих колебаний на высотах Е-области ионосферы ранее было обнаружено и в других работах, например, [Хантадзе, 1980; Forbes, 1999]. Периодичность изменения Кр-индекса, как видно на нижней кривой рисунка, составляет 10–12 суток, которая не совпадает с периодом модуляции интенсивности колебаний суточного прилива. Несовпадение периодов изменчивости интенсивности суточного прилива с его собственным периодом указывает на различные источники этих колебаний.

В полосе периодов выше 24 ч при высокой геомагнитной активности наблюдается усиление интенсивности колебаний в широкой полосе от 48 до 288 ч синхронно с максимумами ΣКр–индекса. В спектрах мощности горизонтальной компоненты геомагнитного поля эффекты сильного землетрясения не были обнаружены.

На Рисунке 106 показаны детально вариации периода колебаний суточной гармоники и ее интенсивности в спектрах мощности этих трех параметров. Видна существенная разница в эффектах сейсмической и высокой геомагнитной активностей в поведении этих параметров, обсужденная выше.

Следующий Рисунок 107 показывает вариации величины периодов и интенсивностей в максимумах спектров мощности в полосе 48 – 240 ч. Как видно на рисунке, эффекты сейсмической и высокой геомагнитной активностей проявляются в спектрах мощности совершенно по-разному как в вариациях длительности периодов максимумов, так и в вариациях их интенсивностей.

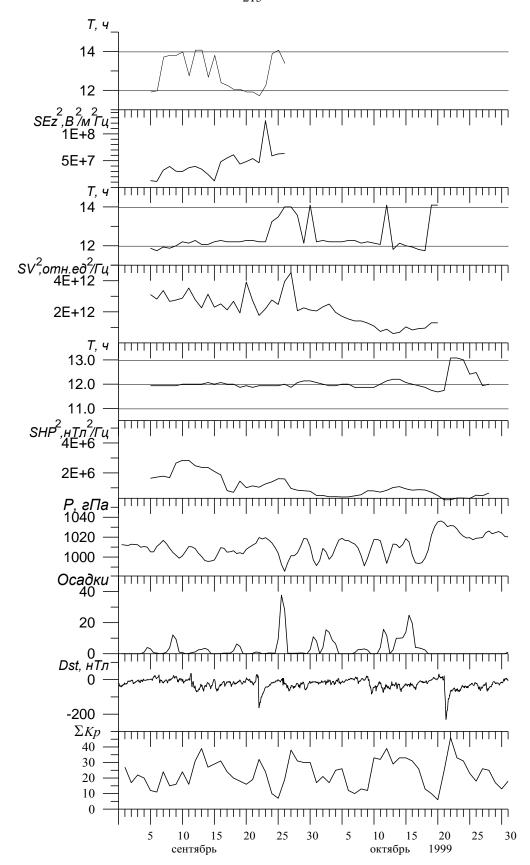


Рисунок 106 — Вариации интенсивностей колебаний и длительности периодов вблизи $T \sim 24$ ч в спектрах мощности трех геофизических параметров: квазистатического электрического поля (SEz²), атмосферного радиошума на частоте $5.3 \text{ к}\Gamma\text{ц} (\text{SV}^2)$ и горизонтальной компоненты геомагнитного поля (SHp²)

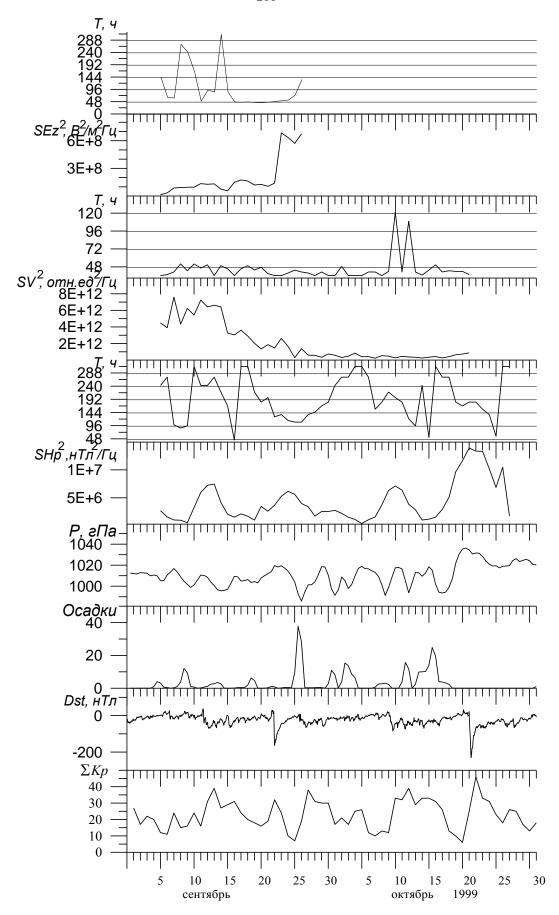


Рисунок 107 — То же, что и на Рисунке 106, но для колебаний в спектрах мощности с периодами T > 24 ч.

Представляло интерес рассмотреть природу этих различий. Для этой цели выполнен спектральный анализ трехчасового Кр-индекса за сентябрь-октябрь 1999 г. (Рисунок 108а). Квадрат спектральной плотности показан на Рисунке 108 в полосе периодов 3-960 ч (б) и 3-96 ч (в). Наиболее интенсивный максимум в спектре приходится на период Т ~ 330 ч, предыдущие и последующий максимумы меньшей интенсивности – на Т ~ 680, 250, 150, 120 ч. Периоды этих колебаний близко совпадают со средними значениями собственных колебаний Солнца $(T1 \sim 27 \text{ суток } (648 \text{ ч}), T2 \sim 13 - 14 \text{ суток } (312-336 \text{ ч}), T3 \sim 9 - 10 \text{ суток } (216-240 \text{ г})$ ч), Т4 ~ 7 суток (168 ч), Т5 ~ 5 - 5.5 суток (120–132 ч). Не исключено, что первая резонансная гармоника в спектре на Рисунке 108б оказалась слабо выделенной по интенсивности из-за ограниченной длительности исходного ряда значений Кр-индекса (всего 61 сутки). Интенсивность колебаний на периодах Т менее 96 ч значительно ниже по сравнению с колебаниями более длительных периодов, и спектр имеет более сложный характер. Сравнение Рисунка 108 и Рисунка 100 показывает, что при высокой геомагнитной активности как в спектрах Криндекса, так и в спектрах мощности Еz-компоненты поля присутствуют волны с периодами от 48 до 288 ч. Это позволяет полагать, что эти колебания вызваны корпускулярными потоками от Солнца. Возбуждение широкого спектра колебаний в динамо-области ионосферы в полосе от 48 до 288 ч (см. Рисунок 105) и модуляция их интенсивности с периодом 10-12 суток наводит на мысль, что эти колебания также вызваны корпускулярными потоками от Солнца.

Несовпадение спектров мощности волновых возмущений в приземной атмосфере и на высотах D- и динамо-областей ионосферы, по-видимому, может быть связано как с различными источниками этих волн, так и с особенностями их распространения в атмосфере [Charney, 1961]. Не исключено, что усиление планетарных волн в приземной атмосфере связано с усилением глобальной циркуляции в тропосфере во время геомагнитных возмущений, а в динамо-области — с локальной неустойчивостью, вызванной высыпанием корпускулярных потоков и нарушением ветрового режима.

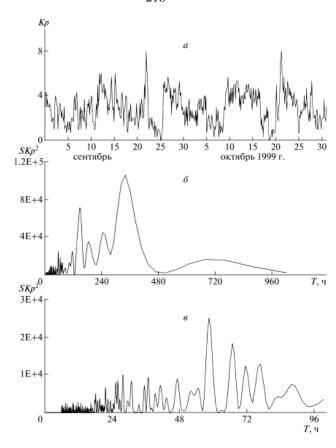


Рисунок 108 — Временные вариации трехчасового Кр-индекса в сентябре— октябре 1999 г. (а) и спектральная плотность в полосе периодов 3–960 ч (б) и 3–96 ч (в)

В п. 6.1 на Рисунке 87 приведены данные измерений электрических, метеорологических, геофизических и солнечных параметров в период 21 - 31 октября 2003 г. В дополнение к этому рисунку в Таблице 11 приведена более детальная хронологическая последовательность этих событий, подробно описанная в статье [Солнечные и гелиосферные ..., 2004], а на Рисунке 88 показана в увеличенном масштабе последовательность нескольких, наиболее интересных фрагментов записей электропроводности и напряженности электрического поля в зависимости от времени UT (в обсерватории местный полдень наступает в 01.45 UT, а полночь – в 10.55 UT). Детальный анализ временных вариаций записей, показанных на Рисунке 87, выполнен в работе [Смирнов и др., 2014] и представлен в п. 6.1. Далее приводятся результаты их спектрального анализа.

Для оценки спектральной плотности мощности (далее, спектра мощности) использован классический метод периодограмм. Выбор длительности Т временного «окна» (T = 2 сут) обусловлен продолжительностью периодов аномальных всплесков солнечной (22 - 23; 26 - 27; 28 - 29; 29 - 30 октября) и соответственно, геомагнитной (24 - 25; 29 - 30; 30 - 31 октября) активностей. Далее использован метод наложенных эпох, в котором в качестве опорных дней для сравнения выбраны дни «хорошей погоды» 21 - 22 октября до момента появления сильной солнечной вспышки 23 октября. В этот период действительно сохранялись условия «хорошей погоды»: слабый ветер < 4 м/с; отсутствие осадков; наличие высоких слоистых облаков; спокойная солнечная активность, проявившаяся в регулярных суточных вариациях температуры и влажности; относительно спокойная геомагнитная активность (Кр ~ 4); типичные для этих условий суточные вариации электропроводности и Еz-компоненты поля (Рисунок 88а) п. 6.1 [Смирнов, 2013]. Поскольку метеорологические величины оцифрованы с дискретностью по времени $\Delta t = 10$ мин, все, использованные в спектральной обработке данные, оцифрованные с $\Delta t = 1$ мин, были сведены к шагу по времени $\Delta t = 10$ мин. Рассчитанные спектры мощности S всего комплекса анализируемых величин на рисунках 109 и 110 представлены в линейном масштабе, за исключением Х-лучей, изменяющихся в очень широких пределах (10^{-3} - 10^{-5} Bт/м²). Их спектры SX приводятся на графиках в логарифмическом масштабе.

На Рисунках 109 и 110 приведены спектры мощности показанных на Рисунке 87 величин в выделенные временные интервалы: 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 (Кр ~ 6) геомагнитной активности с появлением сильной грозовой активности; 28 - 29 октября — сложный период, когда произошли две солнечные вспышки с одновременно высокой геомагнитной активностью (Кр ~ 9); 29 - 30 октября — одна, но достаточно мощная (~ 10⁻³ Вт/м²) солнечная вспышка с продолжительным периодом высокой геомагнитной активности и Форбуш-понижением ГКЛ;

30 - 31 октября — период высокой геомагнитной активности с появлением крат-ковременной грозовой активности.

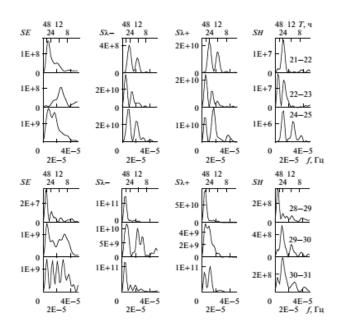


Рисунок 109 — Последовательность кривых спектральной плотности мощности параметров, приведенных на Рисунке 87, для событий, выделенных на Рисунке 88. На нижней оси абсцисс показана частота f, Гц, а на верхней - соответствующие периоды Т

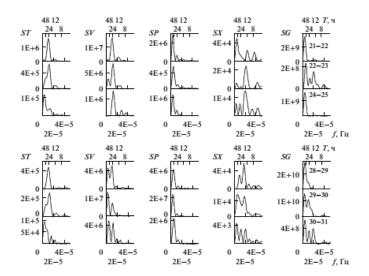


Рисунок 110 — Последовательность кривых спектральной плотности мощности параметров, приведенных на Рисунке 87, для событий, выделенных на Рисунке 88. На нижней оси абсцисс показана частота f, Гц, а на верхней - соответствующие периоды Т

Рисунки 109 и 110 позволяют проследить вариации спектров мощности рассматриваемых параметров в период с 21 по 31 октября (разрезы по вертикали), а также взаимосвязь этих параметров в отдельные периоды времени (разрезы по горизонтали).

Рассмотрим вариации спектров мощности метеорологических величин: температуры и влажности воздуха (ST и SV). В условиях «хорошей погоды» 21 - 22 октября до сильной солнечной вспышки тепловая радиация с известными суточными вариациями поступает на землю через, так называемое, окно «прозрачности» (инфракрасное и видимое излучение, а также крайнее УФ-излучение) и определяет спектр мощности температуры и влажности воздуха. В результате в их спектрах (ST и SV) присутствуют компоненты тепловых приливных волн: S_{max} на $T \approx 24$ ч и слабые дополнительные максимумы на $T \sim 12$ и 48 ч.

С усилением солнечной активности 22 - 23 октября в спектре температуры ST появляется неразрешённый по частоте компонент с T ~ 48 ч, который в дальнейшем во время магнитной бури 24 - 25 октября становится преобладающим, а интенсивность компонентов с T ~ 12 и 24 ч заметно уменьшается. Далее с развитием солнечной и геомагнитной активностей оба компонента с T ~ 24 и 48 ч то усиливаются, то ослабляются, но при этом постоянно присутствуют в спектре ST. Такие же сложные изменения испытывают спектры мощности влажности воздуха (SV). Их характер дополнительно изменяется за счет выпадения осадков во время грозовых процессов 24, 30 и 31 октября. Совершенно другой характер спектров наблюдается в вариациях давления воздуха (SP) на протяжении всего периода развития солнечных и геомагнитных процессов: присутствует преобладающий компонент с T ~ 48 ч со слабо выраженным компонентом на T ~ 24 ч. При этом интенсивность этого максимума изменяется незначительно, за исключением периода 29 - 30 октября, когда наблюдается возрастание спектральной плотности почти на порядок по величине.

Далее рассмотрим спектры мощности рентгеновского излучения Солнца (SX) и галактических космических лучей (SG). Известно [The signature ..., 2004; Solar irradiace ..., 2004], что наличие активной области на диске Солнца увеличивает поток излучения во всем диапазоне ЭМИ. Для оценки волновых процессов на Солнце воспользуемся записями интенсивности рентгеновского излучения, характеризующего интенсивность вспышек. (В нашем случае это довольно грубый подход к оценке процессов в приземной атмосфере). Анализ спектров SX показывает следующее: в условиях «хорошей погоды» 21 - 22 октября в спектре SX присутствует широкий набор компонентов и тепловых приливных волн (24, 12, 8 ч), и волн планетарного масштаба (Т ~ 48 ч). С развитием солнечной и геомагнитной активностей спектральный состав сохраняется, но интенсивность различных компонентов сильно изменяется. Можно предположить, что подобный характер спектра сохраняется и в полосе «окна прозрачности» атмосферы, через которое к земле поступает дополнительный приток тепла, влияющий на температуру и влажность воздуха.

В этот период наблюдался столь же сложный характер спектров мощности галактических космических лучей (SG). В условиях «хорошей погоды» 21 - 22 октября во временной вариации ГКЛ (Рисунок 87 кривая 10) видно относительно слабое понижение потока ГКЛ, вызванное предшествующей солнечной вспышкой 20 октября (отсутствует на рисунке, но см. [Солнечные и гелиосферные ..., 2004]. Следующий момент понижения потока ГКЛ сопровождал вспышку 23 октября, что также отразилось в спектре усилением компонента с Т ~ 48 ч. При сильном понижении потока 29 октября интенсивность этого компонента возросла на порядок по величине по сравнению с периодом 21 - 22 октября. В восстановительный период в спектрах мощности SG к преобладающему компоненту с Т ~ 48 ч добавились компоненты с Т ~ 12, 24 ч. Поскольку понижение интенсивности потоков ГКЛ связано с усилением солнечного ветра, блокирующего эти потоки, можно предположить, что спектральный состав ГКЛ определяется пе-

риодичностью процессов на Солнце, которая также проявляется в спектральном составе рентгеновских лучей.

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 $24\ v < T < 48\ v$ и более слабый максимум с $T\sim 12\ v$. При солнечной активности $22\ u$ 23 октября спектр изменился таким образом, что почти вся мощность оказалась сосредоточенной в полосе периодов $12\ - 24\ v$. Вместе с тем во время солнечных вспышек $28\ - 29$ октября спектр мощности обогатился компонентом в широком диапазоне периодов $12\ - 48\ v$. Во время магнитных бурь $24\ - 25\ u$ $29\ - 30$ октября в спектре преобладают компоненты с $T\sim 48\ v$, по интенсивности превышающие на порядок по величине соответствующий компонент $21\ - 22$ октября. Сложный характер спектра $SE\ 24\ - 25\ u$ $30\ - 31$ октября связан с влиянием грозовой активности, наблюдаемой в эти дни.

Столь же сложный характер спектров мощности S λ . и S λ_+ 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 ~ 48 ч на фоне компонентов с T ~ 24, 12, 8 ч. Во время магнитной бури и соответствующим понижением потоков ГКЛ спектры мощности S λ_- и S λ_+ расширяются в область более высоких периодов (T ~ 48 ч). Появление грозовых процессов, сопровождаемых осадками, несущими дополнительные объёмные заряды, в спектрах появляются компоненты с T ~ 12 ч, но более слабой интенсивности по сравнению с компонентом с T ~ 48 ч.

В рамках модели шарового конденсатора плотность тока в атмосфере определяется выражением (19) из п. 6.1: $J = \lambda E + \rho V + D_i \nabla \rho + \sum J_s$, где электропроводность определяется формулой (2): $\lambda = e \sum (n_{i+} u_{i+} + n_{i-} u_{i-})$, $n_{i\pm}$ — концентрация положительных и отрицательных ионов, преобладающих в нижней атмосфере; $u_{i\pm}$ -

подвижность ионов: λE - ток проводимости, определяемый грозовым генератором; ρ - объёмный заряд; V - скорость движения среды; D_t - коэффициент турбулентности диффузии. Последний член выражения включает в себя токи различных источников, в том числе токи осадков ($J = \Sigma q_m n_m v_m$, где, соответственно, q_m - заряд, n_m - концентрация, v_m - скорость падения частиц при осадках); а также токи глобальных источников (СКЛ и ГКЛ), вносящих свой вклад в ток глобальной электрической цепи.

В условиях «хорошей погоды» влияние солнечной активности на плотность тока Ј и соответственно на напряженность электрического поля проявляется несколькими путями. Во-первых, через изменение проводимости воздуха, которая определяется концентрацией ионов и их подвижностью. Из-за низких температур в октябре (кривая 5, Рисунка 87) при наличии снежного покрова и выпадающих осадков (кривая 7, Рисунка 87) выход подпочвенного воздуха, содержащего радон, задерживается [Moses et al., 1960]. А вклад галактических космических лучей в нижнюю тропосферу незначительный, так что проводимость воздуха при слабо изменяющейся концентрации ионов определяется их подвижностью, которая зависит от температуры воздуха [Брикар, 1969]. Кроме того, связь с солнечной активностью проявляется в эффектах восхода и захода Солнца через действие локального конвективного генератора [Смирнов, 2013], когда с повышением температуры усиливаются конвективные и турбулентные потоки тепла, вносящие свой вклад в плотность тока (члены ρV и $D_t \nabla \rho$). Эта связь с солнечной активностью проявилась в совпадающих вариациях спектров мощности температуры (ST), влажности (SV), электропроводностей (S λ_+), и частично в SE, в которых присутствуют компоненты тепловых приливных волн. Дополнительно влияние солнечной активности проявилось через действие облачности и осадков, которые наблюдались в обс. «Паратунка» в рассматриваемый период скорее эпизодически, чем периодически. Их вклад проявился в вариациях электропроводности (кривые 2 и 3, Рисунка 87).

В возмущенных условиях при сильных солнечных вспышках вступают в действие в ГЭЦ глобальные ионизаторы атмосферы: солнечные (СКЛ) и галактические (ГКЛ) космические лучи. В период 21 - 31 октября, как видно на Рисунке 22 в работе [Солнечные и гелиосферные ..., 2004], после сильной солнечной вспышки 26 октября поток ядер СКЛ в северном полушарии 27 октября возросло с 1 до $\sim 10^2$, а 28 - 29 октября до $\sim 10^3$ ч/см².с.ср при относительно спокойных вариациях ГКЛ (кривая 9, Рисунка 97). При этом, как известно, снижается граница жесткого обрезания потоков СКЛ. Это не могло не привести к росту концентрации ионов в тропосфере и соответственно проводимости в ГЭЦ. Повидимому, этим процессом качественно можно объяснить высокий постоянный уровень электропроводности в течение суток 27 и 28 октября и присутствие в спектрах $S\lambda_{\pm}$ и SE преобладающего компонента с $T\sim48$ ч. Но с началом геомагнитной бури и вступлением сильного эффекта Форбуш-понижения ГКЛ в 16.00 UT (кривая 10, Рисунка 87), который подавил действие СКЛ и расширил спектр мощности $S\lambda_{+}$ и SE в область более коротких периодов (T ~ 48 ч). В итоге глобальные источники ионизации атмосферы в этот аномальный период солнечной активности подавили действие локальных источников: и конвективного генератора, и облаков, и осадков.

В последовательности событий 4 - 15 ноября 2004 г. в вариациях напряженности электрического поля четко выделяются явления с индивидуальными особенностями: это дни «хорошей погоды» (4 - 5 ноября); дни с аномальным суточным ходом температуры и влажности атмосферы (6 - 7 ноября); период главной фазы бури 8 ноября с наложенными грозовыми процессами в атмосфере (12:00 UT 7 ноября – 12:00 UT 8 ноября); период бури 10 ноября; период развития грозовых процессов в атмосфере (11 ноября).

Представляло интерес исследовать волновые процессы в приземной атмосфере в эти периоды. Для этой цели был выполнен спектральный анализ суточных вариаций напряженности электрического поля по следующей схеме. Для оценки спектральной плотности мощности (для краткости, спектров мощности)

в полосе периодов тепловых приливных волн с Т = 4 - 24 ч (ТПВ) использован метод периодограмм с прямоугольным временным «окном» длительностью t = 24 ч. Для выделения компонент в полосе периодов внутренних гравитационных волн с Т = 5 мин - 3 ч (ВГВ) в предварительно отфильтрованных данных использован метод модифицированных периодограмм [Welch, 1967] со следующими параметрами: длительность сегмента $t_i = 8$ ч с перекрытием сегментов в 4 ч, так что суммарное число сегментов на интервале 24 ч равно пяти. Для оценки спектра каждого сегмента использовано косинусное временное «окно». Для выделения компонент спектров мощности в полосе периодов волн планетарного масштаба с Т > 24 ч (ВПМ) использован метод периодограмм с прямоугольным временным «окном» длительностью $t_i = 2$ сут, смещающимся на одни сутки вдоль временного ряда данных в период 4 - 15 ноября. Выбор такой длительности «окна» обусловлен двумя моментами: во-первых, условие «хорошей погоды» сохранилось 4 и 5 ноября; во-вторых, как видно на Рисунке 90 (кривая 8), продолжительность периодов высокой геомагнитной активности составляла приблизительно двое суток.

Результирующие спектры мощности Ez – компоненты поля для кривых, приведенных на Рисунке 91, показаны на Рисунке 111. Они построены отдельно в полосе ТПВ (4 - 24 ч), ВГВ (0.5 – 3 ч и 6 - 30 мин) и ВПМ (4 – 48 ч). Первая цифра на кривых ВПМ соответствует первой дате временного «окна» в двое суток. Как видно на рисунке, 4 ноября в спектре ТПВ выделяется основная компонента с Т ~ 24 ч и ее гармоники с Т ~ 12, 8 и 4 ч, а в спектре ВГВ – компоненты с Т ~ 1.5 и 2.5 ч., интенсивность которых почти на два порядка по величине ниже компонент ТПВ. В полосе периодов ВПМ преобладает компонента с периодом Т ~ 48ч. Подобный характер спектров мощности электрического поля в условиях «хорошей погоды» наблюдался на Камчатке, например, в сентябре 1999 г. [Спектры мощности тепловых ..., 2009].

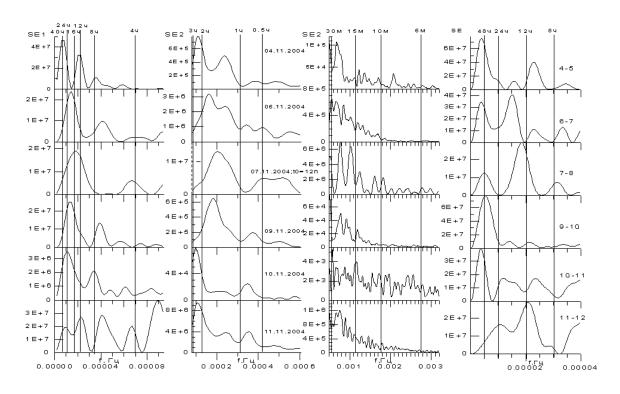


Рисунок 111 — Вариации спектральной плотности мощности тепловых приливных волн ($T \sim 4 - 24$ ч), внутренних гравитационных волн ($T \sim 30$ мин — 3 ч; 5 - 30 мин) и волн планетарного масштаба ($T \sim 4 - 48$ ч) в суточных вариациях напряженности электрического поля, приведенных на Рисунке 91. Вертикальными сплошными линиями выделены периоды спектральных компонент

Шестого ноября в результате мощной солнечной вспышки, сопровождаемой аномалией в суточных вариациях температуры и влажности атмосферы, про-изошли такие изменения спектров мощности: нарушилась периодичность компонент с Т = 8 и 12 ч, а интенсивность компоненты с Т ~ 24 ч уменьшилась почти в два раза, в то время как почти на порядок по величине возросла интенсивность спектра в полосе ВГВ. Усложнился также спектр ВПМ за счет усиления компоненты с Т = 24 ч. В период с 12:00 UT 7 ноября по 12:00 UT 8 ноября, включающий в себя главную фазу бури 8 ноября и сильные грозовые процессы, в полосе ТПВ компоненты с Т ~ 8, 12 и 24 ч слились в один широкий максимум с дальнейшим их ослаблением по сравнению с условиями «хорошей погоды». Усилились практически на два порядка по величине компоненты спектра в полосе ВГВ. В полосе ВПМ преобладает компонента с периодом Т ~ 12 ч и сильно

подавлена компонента с Т ~ 48 ч. В паузе между двумя бурями 9 ноября характер спектров и по форме и по интенсивности максимумов близко совпадает со спектрами в условиях «хорошей погоды». 10 ноября во время второй бури характер спектров в полосе ТПВ и ВГВ по форме близко совпадает со спектрами 9 ноября, но по интенсивности максимумов на порядок по величине ниже. В спектре ВПМ преобладает компонента с периодом Т = 48 ч. И, наконец, 11 ноября в день с грозовой активностью, но более слабой, чем 8 ноября, в спектре ТПВ выделен полный спектр компонент практически одинаковой интенсивности и совпадающей по величине со спектрами 4 ноября. Но при этом в полосе ВГВ интенсивность спектров возросла на порядок по величине по сравнению со спектрами 4 ноября. Подобный характер спектров наблюдался также при грозах на Камчатке в сентябре 1999 г. [Эффекты грозовой активности ..., 2010]. Сравнивая спектры мощности в полосе периодов ТПВ и ВГВ 7 - 8 ноября и 10 - 11 ноября, можно сделать вывод, что основной вклад в спектр электрического поля во время главной фазы бури 8 ноября внесли грозовые процессы, наблюдаемые одновременно.

Для анализа взаимосвязи различных процессов в приземной атмосфере с солнечными и геомагнитными явлениями на Рисунке 112 приведена последовательность спектров мощности всех рассмотренных нами параметров в полосе периодов 4 - 48 ч. Обозначения спектральных кривых соответствуют обозначениям параметров на Рисунке 90. Для дальнейшего анализа спектров мощности исключим дни с грозовой активностью и будем рассматривать только периоды 4 - 5 ноября дни с «хорошей погодой» и 9 - 10 ноября с бурей 10 ноября. Как видно на рисунке, 4 - 5 ноября в спектре мощности электрического поля выделяются компоненты на периодах Т ~ 8, 12, 48 ч с преобладающей интенсивностью на Т ~ 48 ч. При этом во всех спектрах (SP, SN, SD), кроме спектров температуры (ST), влажности (SV) и горизонтальной компоненты геомагнитного поля (SH), также преобладают компоненты с Т ~ 48 ч. В период 9 - 10 ноября в спектре мощности электрического поля преобладает только компонента с Т ~ 48 ч, а в

спектрах влажности, давления и ГКЛ интенсивность этой компоненты возросла почти на два порядка по величине по сравнению с условиями «хорошей погоды». Начиная с 9 ноября, на порядок по величине уменьшилась максимальная интенсивность компоненты спектра температуры (ST) на периоде Т ~ 48 ч. Подобный характер спектра мощности электрического поля в этой полосе периодов наблюдался на Камчатке во время геомагнитной бури 22 сентября 1999 г. [Спектры мощности тепловых ..., 2009].

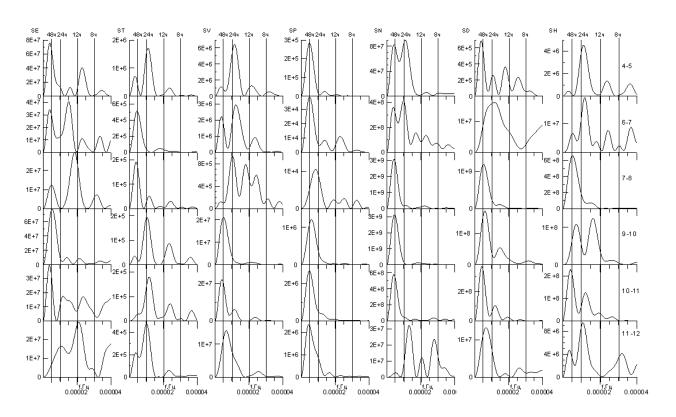


Рисунок 112 — Последовательность кривых спектральной плотности мощности электрического поля и параметров, приведенных на Рисунке 90, для событий в дни, выделенные на Рисунке 91

Сильное различие по составу компонент и их интенсивности в спектрах мощности электрического поля (SE) и горизонтальной компоненты геомагнитного поля (SH) как в условиях «хорошей погоды», так и в геомагнитную бурю 10 ноября свидетельствует об отсутствии причинно-следственных связей между этими параметрами. Влияние ГКЛ на электрическое поле в приземной атмосфе-

ре проявляется только на периодах Т ~ 48 ч, когда интенсивность этой компоненты возрастает на два порядка по величине и проявляется в усилении интенсивности этой компоненты на два порядка по величине по сравнению с условиями «хорошей погоды». В отсутствие грозовых явлений и при слабой геомагнитной активности, но при высокой солнечной активности в оптической области спектра (кривые 6-7) наибольшее влияние на электрическое поле оказывают вариации влажности воздуха, усиливая компоненту с периодом Т ~ 24 ч в спектре поля.

Во временных вариациях напряженности поля (Рисунок 90), и в вариациях спектра мощности 10 ноября (Рисунок 111 и Рисунок 112) наблюдалось значительное ослабление напряженности поля по сравнению с предшествующим днем с одновременным усилением волн планетарного масштаба с Т ~ 48 ч.

При глубоком понижении потоков ГКЛ во время бури 10 ноября имел место обратный эффект. Образовавшийся аномально мощный грозовой процесс во время главной фазы магнитной бури 8 ноября подавил эффект Форбушпонижения ГКЛ как в суточном ходе (Рисунок 90), так и в спектрах мощности Ех-компоненты поля (Рисунок 111 и Рисунок 112). На фазе восстановления потоков ГКЛ 10 - 15 ноября линейная связь напряженности электрического поля с потоками отсутствовала из-за сильного влияния метеорологических процессов.

Усиление интенсивности спектральных компонент с периодами Т ~ 48 ч в спектрах мощности электрического поля 9 и 10 ноября с подавлением компонент с периодами тепловых приливных и внутренних гравитационных волн свидетельствует о нарушении волновых процессов в приземной атмосфере. Этот вывод согласуется с ранее полученными результатами в работе [Спектры мощности тепловых ..., 2009], а также с выводами об изменчивости индекса завихренности атмосферы при усилении геомагнитной активности [Авдюшин, 2000].

Сопоставление спектров мощности электрического поля в полосе периодов 4 - 48 ч со спектрами рассмотренных в работе метеорологических и геофизических параметров показало следующее: сильное различие по составу компонент и

их интенсивностей в спектрах мощности электрического поля и горизонтальной компоненты геомагнитного поля как в условиях «хорошей погоды», так и во время бури 10 ноября свидетельствует об отсутствии причинно-следственных связей между этими параметрами и указывает на различную их природу. Влияние ГКЛ на электрическое поле проявляется на периоде волн планетарного масштаба, когда интенсивность компоненты с Т ~ 48 ч в спектре космических лучей возрастает на два порядка по величине по сравнению с условиями «хорошей погоды». Вместе с тем при низкой геомагнитной активности наибольшее влияние на электрическое поле приземной атмосферы оказывают вариации влажности атмосферы, усиливая компоненты в спектре поля с периодами Т ~ 24 ч.

Экспериментальный факт резкого изменения температуры атмосферы в период 6 - 8 ноября при спокойных вариациях интенсивности ГКЛ, т.е. до момента появления Форбуш-эффекта, позволяет усомниться в их взаимосвязи. Этот вывод согласуется с результатами работы [О природе корреляции ..., 2009]. Более того, во время бури 10 ноября в спектре мощности температуры преобладают компоненты с максимальной интенсивностью на периоде Т ~ 24 ч, в то время как в спектре ГКЛ - компонента на Т ~ 48 ч.

Таким образом, анализ эффектов солнечных событий в ноябре 2004 г. в вариациях напряженности квазистатического электрического поля и метеорологических параметров показал возможное одновременное действие различных физических механизмов, о которых упоминается в литературе. Но каков относительный вклад этих механизмов в рамках одного эксперимента, естественно, определить невозможно.

Таким образом, исследования вариаций напряженности и спектров мощности квазистатического электрического поля и метеорологических величин в приземной атмосфере на Камчатке во время солнечных событий в октябре 2003 г. и ноябре 2004 г. показали следующее:

- в условиях «хорошей погоды» в спектрах мощности температуры и влажности атмосферы наблюдались колебания с периодами тепловых приливных ат-

мосферных волн (T ~ 12, 24 ч), обусловленные притоком теплового излучения Солнца;

- во время сильных солнечных вспышек, сопровождаемых поступлением в нижнюю тропосферу дополнительного притока тепла, нарушается суточный ход и обратная связь между температурой и влажностью атмосферы. При наличии преобладающего компонента с Т ~ 24 ч в спектре влажности появился дополнительный компонент с Т ~ 48 ч (период атмосферных волн планетарного масштаба);
- в спектрах мощности атмосферного давления в условиях «хорошей погоды» наблюдался широкий спектр колебаний 12, 24, 48ч, но преобладал компонент с Т ~ 48 ч. С развитием солнечной активности сохранялся такой характер спектра, но во время геомагнитной бури интенсивность компонента с Т ~ 48 ч возросла на порядок по величине по сравнению с условиями «хорошей погоды»;
- в спектрах мощности электропроводности атмосферы в условиях «хорошей погоды» присутствовали компоненты с Т ~ 12 и 24 ч. Вместе с тем в спектре мощности электрического поля, кроме слабо выраженных этих компонентов, преобладал компонент с Т ~ 48 ч;
- при сильных солнечных вспышках и магнитной буре в спектрах мощности электропроводности отчетливо проявились компоненты почти равной интенсивности на T ~ 24 и 48 ч. Спектр электрического поля был более сложный (за счет влияния грозовых процессов), но с преобладающим компонентом с T ~ 48 ч, интенсивность которого возросла на порядок по величине по сравнению с условиями «хорошей погоды».
- в спектрах мощности потоков галактических космических лучей, сопровождающих сильные солнечные вспышки, преобладал компонент с Т ~ 48 ч, который усилился на порядок по величине во время Форбуш-понижения. Одновременное усиление компонентов с Т ~ 48 ч в спектрах мощности электропроводности воздуха и напряженности электрического поля указывает на тот факт, что во время сильных солнечных вспышек и магнитных бурь действующим ионизато-

ром нижней тропосферы являются преимущественно галактические космические лучи;

- выделенный период колебаний с T ~ 48 ч в спектрах галактических космических лучей, а также в спектрах рентгеновского излучения Солнца, повидимому, вызван динамикой солнечной и геомагнитной активностей с этим временным масштабом;
- показано, что во время Форбуш-понижения влияние ГКЛ на электрическое поле дополнительно проявляется на периоде атмосферных волн планетарного масштаба (Т ~ 48 ч): наблюдается одновременное усиление интенсивности этой спектральной компоненты в их спектрах мощности;
- показано, что в спокойных геомагнитных условиях наибольшее влияние на электрическое поле в приземной атмосфере оказывают вариации влажности атмосферы, усиливая компоненту в его спектре с периодом Т ~ 24 ч.

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. При прохождении утреннего терминатора в приземной атмосфере происходит усиление колебаний в полосе периодов внутренних гравитационных волн. Однако энергия этих волн недостаточна для прохождения на высоты динамообласти 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.
- 3. Получены статистические характеристики отрицательных аномалий градиента потенциала электрического поля. Наиболее вероятные значения бухт понижения градиента потенциала электрического поля составляют величины (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, 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.

- 4. Обнаружено усиление интенсивности спектральной плотности мощности электрического поля в диапазоне периодов внутренних гравитационных волн, что подтверждает «поршневой» механизм воздействия в канале литосфераатмосфера-ионосфера. В дни с землетрясениями с аномалией в суточном ходе электрического поля интенсивность спектров в полосе периодов Т=0.5 3ч 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.
- 5. 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.
- 6. Обнаружен эффект воздействия солнечного события на электрическое поле приземной атмосферы среднеширотной обсерватории. Магнитная буря с внезапным началом вызывает индукционный эффект в электрическом поле приземной атмосферы. В спектральной области электрических параметрах приземной атмосферы происходит усиление волн планетарного масштаба, которое является следствием изменения волновых характеристик потока галактических космических лучей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авдюшин, С.И. Солнце, погода и климат: сегодняшний взгляд на проблему (обзор) / С.И. Авдюшин, А.Д. Данилов // Геомагнетизм и аэрономия.
 2000. Т. 40. № 5. С. 3-14.
- 2. Алексеев, А.С. Об электрическом поле в очаговой зоне землетрясений / А.С. Алексеев, В.В. Аксенов // ДАН. 2003. Т. 392, № 1. С. 106-110.
- 3. 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.
- Анисимов, С.В. Механизмы связи аэроэлектрического и температурного полей нижней атмосферы / С.В. Анисимов, Е.А. Мареев, Н.М. Шихова // Радиофизика. – 2006. – Т. 49, № 1 – С. 35-52.
- 5. Анисимов, С.В. Геофизические аспекты исследования глобальной электрической цепи / С.В. Анисимов // Российская конференция по атмосферному электричеству: сб. трудов, 1-7 октября 2007 г., Нижний Новгород. Нижний Новгород: ИПФАН, 2007. С. 7-10.
- 6. Анисимов, С.В. Вариабельность электрического поля невозмущенной атмосферы средних широт / С.В. Анисимов, Н.М. Шихова // Геофизические исследования. 2008. Т. 9, № 3. С. 25-38.
- 7. 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.
- 8. Атмосфера. Справочник. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 395 с.
- 9. Атмосферное электрическое поле как источник переменчивости ионосферы / С.А. Пулинец, В.В. Хегай, К.А. Боярчук и др. // УФН. — 1998. — Т. 168, № 5. — С. 582-589.

- 10. Бендат, Дж. Прикладной анализа случайных данных / Дж. Бендат, А. Пирсол М.: Мир, 1989. 540 с.
- Бончковский, В.Ф. Изменения градиента электрического потенциала атмосферы как один из возможных предвестников землетрясений / В.Ф. Бончковский // Труды геофизического института. 1954. № 25(152). С. 192-206.
- 12. Брикар, Дж. Влияние радиоактивности и загрязнений на элементы атмосферного электричества / Дж. Брикар // Проблемы электричества атмосферы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1969. – С. 68-105.
- 13. Бузевич, А.В. Метод прогноза камчатских землетрясений по вариациям геомагнитного и атмосферного электрического полей Земли на фоне гелиомагнитосферных процессов / А.В. Бузевич, С.Э. Смирнов // Проблемы геодинамики и прогноза землетрясений. І Российско-Японский семинар: сб. науч. тр., 26-29 сентября 2000 г., Хабаровск. Хабаровск: ИТиГ ДВО РАН, 2001. С. 179-186.
- 14. 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.
- 15. 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.
- 16. Влияние процессов переноса в приземном слое на обмен зарядом между атмосферой и землей / А.И. Петров, Г.Г. Петрова, И.Н. Панчишкина и др. // Российская конференция по атмосферному электричеству: сб. трудов, 1-7 октября 2007 г., Нижний Новгород. Нижний Новгород: ИПФАН, 2007. С. 85-87.

- 17. Возбуждение колебаний атмосферы сейсмогравитационными колебаниями Земли / С.В. Гармаш, Е.М. Линьков, Л.Н. Петрова и др. // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1989. Т. 25, № 12. С. 1290-1299.
- 18. Воздействие мощных электромагнитных импульсов на сейсмичность Средней Азии и Казахстана / Н.Т. Тарасов, Н.В. Тарасова, А.А. Авагимов и др. // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4/5. С. 152-160.
- 19. Войтов, Г.И. Мониторинг радона атмосферы подпочв сейсмически активной Средней Азии / Г.И. Войтов // Физика Земли. 1998. № 1. С. 27-38.
- 20. Гелиогеофизические эффекты, предварявшие Кроноцкое землетрясение 5 декабря 1997г. М=7.7 / А.В. Бузевич, Г.И. Дружин, П.П. Фирстов и др. // Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997г. Предвестники, особенности, последствия. Петропавловск-Камчатский: Изд-во Камчатской Гос.академии рыбопромыслового флота, 1998. С. 177-188.
- 21. Год спустя: солнечные, гелиосферные и магнитосферные возмущения в ноябре 2004г. / Ю.И. Ермолаев, Л.М. Зеленый, Г.Н. Застенкер и др. // Геомагнетизм и аэрономия. 2005. Т. 45, № 6. С. 723-763.
- 22. Голицын, Г.С. О временном спектре микропульсаций атмосферного давления / Г.С. Голицын // Изв. АН СССР. Сер. геофиз. 1964. № 8. С. 1253-1258.
- 23. Грачев, А.И. Квазипериодические флуктуации атмосферного давления с периодами 20–180 мин / А.И. Грачев, С.Н. Куличков, А.К. Матвеев // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1988. Т. 24, № 2. С. 152-158.
- 24. Грунская, Л.В. Оценка параметров электрического поля приземного слоя атмосферы на основе метода корреляционного приема: монография / Л.В.Грунская Владимир: изд-во Владим. гос. Ун-та, 2010. 123 с.
- 25. Данилов, С.Д. ВГВ, генерируемые при прохождении гроз / С.Д. Данилов,
 А.И. Свертилов // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1991. Т.
 27, № 3. С. 234-242.

- 26. Действующие вулканы Камчатки и Северных Курил в январе-июне 2007 г. / О.А. Гирина, Н.А. Малик, А.Г. Маневич и др. // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России: в 2 томах: труды региональной научно-технической конференции, 11-17 ноября 2007 г., Петропавловск–Камчатский. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2008. Т. 1. С. 68-72.
- 27. Динамика грозовой активности во время тропических циклонов / Ю.М. Михайлов, Г.И. Дружин, Г.А. Михайлова и др. // Геомагнетизм и аэрономия. -2006. Т. 46, № 6. С. 825-838.
- 28. Добровольский, И.П. Математическая теория подготовки и прогнозза тектонического землетрясения / И.П. Добровольский. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 240 с.
- 29. 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.
- 30. Значительные изменения градиента потенциала электрического поля атмосферы у Земли и метеотропные реакции у кардиологических больных / Е.П. Борисенков, Е.Н. Кобзарева, И.А. Крушатина и др. // Пятая Российская конф. по атмосферному электричеству: сб. тр. в двух томах, 22-26 сентября 2003 г., Владимир. Владимир: Изд-во Транзит ИКС, 2003. Т.1. С. 136-138.
- 31. Имянитов, И.М. Приборы и методы для изучения электричества атмосферы / И.М. Имянитов. М.: Гостехиздат, 1957. 483 с.
- 32. Имянитов, И.М. Современное состояние исследований атмосферного электричества / И.М. Имянитов, К.С. Шифрин // УФН. 1962. Т. 76, Вып. 4. С. 593-642.
- 33. Имянитов, И.М. Электричество свободной атмосферы / И.М. Имянитов, Е.В. Чубарина. – Л.: Гидрометеоиздат, 1965. – 240 с.

- 34. Информационные технологии в системе мониторинга аэроэлектрических полей геофизической обсерватории "Борок" РАН / С.В. Анисимов, Э.М. Дмитриев, Е.Б. Анисимова и др. // Пятая Российская конф. по атмосферному электричеству: сб. тр. в двух томах, 22–26 сентября 2003 г., Владимир. Владимир: Изд-во Транзит ИКС, 2003. Т. 1. С. 115-118.
- 35. К вопросу о взаимосвязи между напряженностью электрического поля атмосферы и УФ освещенностью / В.В. Пак, З.С. Теодорович, Ю.И. Кулаков и др. // Пятая Российская конф. по атмосферному электричеству: сб. тр. в двух томах, 22-26 сентября 2003 г., Владимир. Владимир: Изд-во Транзит ИКС, 2003. Т.1. С. 90 92.
- 36. Колебания переменного магнитного поля Земли с периодом около 1,5 ч. / A.В. Александров, В.С. Бычков, И.А. Ларин и др. // Геомагнетизм и аэрономия. 1992. Т. 32., № 3. С. 119-124.
- 37. Комплексное экспериментальное исследование волн в атмосфере, генерируемых солнечным терминатором / В.П. Антонова, Ш.Ш. Гусейнов, В.И. Дробжев и др. // Изв. АН СССР. 1988. Т. 24, № 2. С. 134-143.
- 38. Кондратюк, В.И. Климат Петропавловска—Камчатского / В.И. Кондратюк. Л.: Гидрометеоиздат, 1983. 150 с.
- 39. Кречетов, А.А. Электрическое поле атмосферы и интенсивность космических лучей / А.А. Кречетов, А.Х. Филиппов // Электрическое взаимодействие геосферных оболочек. М.: ОИФЗ РАН, 2000. С. 30-32.
- 40. Кузнецов, В.В. Исследование Форбуш-понижений и эффектов терминатора в атмосферном электрическом поле на обсерватории «Паратунка» (Камчатка) / В.В. Кузнецов, Н.В. Чернева // Вест. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2008. Вып. 11. № 1. С. 89-97.
- 41. Купцов, А.В. Изменения характера геоакустической эмиссии, соответствующие заключительной стадии развития сейсмических событий / А.В. Купцов // Физика Земли. 2005. № 10. С. 825-831.

- 42. Купцов, А.В. Особенности геоакустической эмиссии при подготовке камчатских землетрясений / А.В. Купцов, И.А. Ларионов, Б.М. Шевцов // Вулканология и сейсмология. – 2005. – № 5. – С. 45-59.
- 43. Ластовичка, Я. Отклик нижней ионосферы, стратосферы и индекса площади завихренности в тропосфере / Я. Ластовичка // Геомагнетизм и аэрономия. 1990. Т. 32, № 3. С. 452-456.
- 44. Лизунов, Г.В. Планетарное распределение среднемасштабных атмосферных гравитационных волн по данным спутниковых измерений / Г.В. Лизунов, Т.В. Скороходов // Космічна наука і технологія. 2010. Т. 16, № 1. С. 40-45.
- 45. Линьков, Е.М. Сейсмогравитационные пульсации Земли и возмущения атмосферы как возможные предвестники сильных землетрясений / Е.М. Линьков, Л.Н. Петрова, К.С. Осипов // ДАН СССР. 1990. Т. 313, № 5. С. 1095-1098.
- 46. Магнитосферные эффекты в атмосферном электричестве / А.Г. Апсен, Х.Д. Канониди, С.П. Чернышева и др. – М.: Наука, 1988. – 150с.
- 47. 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. Раздел физические науки 2008. № 6. С. 49-51.
- 48. 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.
- 49. Марксон, Р. Атмосферное электричество и проблемы связи между солнечной активностью и погодой / Р. Марксон // Солнечно-земные связи, погода и климат. М.: Мир, 1982. С. 242-264.
- 50. Матвеев, Л.Т. Физика атмосферы / Л.Т. Матвеев. Л.: Гидрометеоиздат, 1965. 876 с.

- 51. Матвеев, Л.Т. Основы общей метеорологии. Физика атмосферы / Л.Т. Матвеев. С.-Петербург: Гидрометеоиздат, 2000. 777 с.
- 52. Митра, А. Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли / А. Митра. М.: Мир, 1977. 370 с.
- 53. Михайлов, Ю.М. КНЧ– и ОНЧ–электромагнитный фон во внешней ионосфере над сейсмоактивными регионами (ИСЗ "Интеркосмос-24") / Ю.М. Михайлов, Г.А. Михайлова, О.В. Капустина // Геомагнетизм и аэрономия. – 1997. – Т. 37, № 4. – С. 78-84.
- 54. Михайлов, Ю.М. Спектры атмосферных волн в динамо—области ионосферы на Камчатке / Ю.М. Михайлов, Г.А. Михайлова, О.В. Капустина // Геомагнетизм и аэрономия. — 2008. — Т. 48, No. 1. — С. 122-128.
- 55. Михайлова, Г.А. К вопросу о природе эффекта восхода солнца в суточных вариациях электрического поля атмосферы на Камчатке. 2. Частотные вариации электрического поля / Г.А. Михайлова, О.В. Капустина, С.Э. Смирнов // Геомагнетизм и аэрономия. − 2013. − Т. 53, № 2. − С. 247-255.
- 56. Михневич, В.В. Явления в атмосфере в период магнитных бурь / В.В. Михневич // Исследование атмосферы и ионосферы в период повышенной солнечной активности. Л.: Гидрометеоиздат, 1970. С. 5-14.
- 57. Моргунов, В.А. К природе литосферно–ионосферных связей / В.А. Моргунов // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1988. № 5. С. 80-87.
- 58. Моргунов, В.А. Пространственные неоднородности электрического поля как фактор лито-ионосферных связей / В.А. Моргунов // Электрическое взаимодействие геосферных оболочек. М.: ОИФЗ РАН, 2000. С. 106-113.
- 59. Моргунов, В.А. Модель квазистационарного электрического поля литосферной природы / В.А. Моргунов, С.А. Мальцев // Пятая Российская конф. по атмосферному электричеству: сб. тр. в двух томах, 22-26 сентября 2003 г., Владимир. — Владимир: Изд-во Транзит ИКС, 2003. Т. 2. — С. 59-61.

- 60. Морозов, В.Н. Атмосферное электричество / В.Н. Морозов // Атмосфера. Справочник. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. С. 395-408.
- 61. Мустель, Э.Р. О взаимодействии солнечных корпускулярных потоков с нижним слоем земной атмосферы / Э.Р. Мустель // Тр. Симпозиума по солнечно–корпускулярным эффектам в тропосфере и стратосфере. Л.: Гидрометеоиздат, 1973. С.4-13.
- 62. Мустель, Э.Р. Солнечно–атмосферные связи в теории климата и прогноза погоды / Э.Р. Мустель. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 79 с.
- 63. Мустель, Э.Р. Сравнение изменений поля приземного атмосферного давления в период высокой и низкой геомагнитной активности / Э.Р. Мустель, В.Е. Чертопруд, В.А. Хведолиане // Астроном. журн. 1977. Т. 54, Вып. 2. С. 682-697.
- 64. Мустель, Э.Р. Связь между корпускулярной активностью Солнца и ростом нестабильности нижней атмосферы / Э.Р. Мустель, В.Е. Чертопруд, Н.Б. Мулюкова // Астрон. Журн. 1979. Т. 56, В. 4. С. 876-880.
- 65. Необычные вариации атмосферного электрического поля во время главной фазы сильной магнитной бури 30 октября 2003 г. на Польской среднеширотной обсерватории Свидер / Н.Н. Никифорова, Н.Г. Клеймёнова, О.В. Козырева и др. // Геомагнетизм и аэрономия. − 2005. − Т. 45, № 1. − С. 148-152.
- 66. О возможности прогнозирования землетрясений по измерениям напряженности электрического поля атмосферы / А.Ч. Иманкулов, В.И. Струминский, С.П. Татаринов и др. // Электрическое взаимодействие геосферных оболочек. М.: ОИФЗ РАН, 2000. С.119-121.
- 67. О природе корреляции между интенсивностью космических лучей и облачностью / А. Вольфендейл, Д. Дялаи, А.Д. Ерлыкин и др.// Изв. РАН. Сер.физ. 2009. Т. 73, № 3. С. 408-411.

- 68. Обнаружение атмосферных волн в спектрах мощности атмосферных помех на Камчатке / Ю.М. Михайлов, Г.А. Михайлова, Г.И. Дружин, и др. // Геомагнетизм и аэрономия. 2004. Т. 44, № 2. С. 245-253.
- 69. 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.
- 70. Петрова, Л.Н. Сейсмический процесс в интервале частот 0,05–0,5 мГц: закономерности и особенности / Л.Н. Петрова // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4-5. С. 116-124.
- 71. Попов, И.Б. Статистические оценки влияния различных метеорологических явлений на градиент электрического потенциала атмосферы / И.Б. Попов // Труд. ГГО. 2008. Вып. 558. С. 152-161.
- 72. Прохождение внутренних гравитационных волн на высоты D- и динамообластей 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.
- 73. Пудовкин, М.И. Влияние солнечной активности на состояние нижней атмосферы и погоды / М.И. Пудовкин // Соровский образов. журн. 1996. № 10. С. 106-113.
- 74. Пудовкин, М.И. Эффекты солнечных вспышек в вариациях приземного давления / М.И. Пудовкин, С.В. Бабушкина // Геомагнетизм и аэрономия. 1990. Т. 30, № 3. С. 469-473.
- 75. Руководящий документ РД 52.04.168–2001 Методические указания. Наблюдения за электрическим полем / ред. А.К. Орлова. – С.-Петербург: Гидрометеоиздат, 2002. – 58 с.
- 76. Руленко, О.П. Краткосрочный атмосферно–электрический предвестник Камчатского землетрясения 6 марта 1992 г. М=6.1 / О.П. Руленко, А.В. Иванов, А.В. Шумейко // ДАН. 1992. Т. 326, № 6. С.980-982.

- 77. Руленко, О.П. Измерения атмосферного электрического поля и естественного электромагнитного излучения перед камчатским землетрясением 13.11.1993 М = 7.0 / О.П. Руленко, Г.И. Дружин, Е.Ф. Вершинин // ДАН. 1996. Т. 348, № 6. С. 814-816.
- 78. Руленко, О.П. Оперативные предвестники землетрясений в электричестве приземной атмосферы / О.П. Руленко // Вулканология и сейсмология. 2000. № 4. С.57-68.
- 79. Руленко О.П. Тензочувствительность предсейсмических отрицательных аномалий электрического поля в приземном воздухе / О.П. Руленко // Пятая Российская конф. по атмосферному электричеству: сб. тр. в двух томах, 22-26 сентября 2003 г., Владимир. Владимир: Изд-во Транзит ИКС, 2003. Т. 2. С. 82-85.
- 80. Рыбнов, Ю.С. Исследование возмущений электрического и акустико—гравитационного полей при прохождении атмосферного фронта / Ю.С. Рыбнов, С.П. Соловьев // Российская конференция по атмосферному электричеству: сб. трудов, 1-7 октября 2007 г., Нижний Новгород. Нижний Новгород: ИПФАН, 2007. С. 233-234.
- 81. Связь вариаций геомагнитного и атмосферного электрического полей с сейсмичностью на фоне гелиомагнитосферных и атмосферных процессов / А.В. Бузевич, Н.В. Чернева, И.Ю. Бабаханов и др. // Пятая Российская конф. по атмосферному электричеству: сб. тр. в двух томах, 22–26 сентября 2003 г., Владимир. Владимир: Изд-во Транзит ИКС, 2003. Т. 2. С. 72-75.
- 82. Северный, А.Б. Гелиосейсмология / А.Б. Северный // Земля и Вселенная.
 1983. № 3. С. 9-14.
- 83. Сезонные особенности связи между атмосферно электрическими факторами и метеотропными реакциями у кардиологических больных / Е.П. Борисенков, Е.Н. Кобзарева, И.А. Крушатина и др. // Изв. РГО. 2000. Т. 132, Вып. 3. С. 76-85.

- 84. Сидорин, А.Я. Зависимость времени проявления предвестников землетрясений от эпицентрального расстояния / А.Я. Сидорин // ДАН СССР. 1979. Т. 245, № 4. С. 825-828.
- 85. Система многоканального синхронного мониторинга электромагнитных полей КНЧ диапазона приземного слоя / Л.В. Грунская, В.А. Ефимов, В.В. Исакевич и др. // Пятая Российская конф. по атмосферному электричеству: сб. тр. в двух томах, 22-26 сентября 2003 г., Владимир. Владимир: Изд-во Транзит ИКС, 2003. Т. 1. С. 119-121.
- 86. Смирнов, Р.В. Частотные характеристики связей между изменением индекса завихренности атмосферы и гелиогеомагнитной активностью / Р.В. Смирнов, Э.В. Кононивич // Солнечно–атмосферные связи и геомагнитная активность М.: Гидрометеоиздат, 1984. С. 80-92.
- 87. Смирнов, С.Э. Создание аппаратно—программного комплекса сбора геофизической информации магнитной обсерватории «Паратунка» / С.Э. Смирнов, В.И. Филимонов // Научно—техническая конференция профессорско-преподавательского состава и сотрудников ПКВМУ: Тез. докл. Петропавловск-Камчатский: ПКВМУ, 1997. С. 17-18.
- 88. Смирнов, С.Э. Аномалии поведения напряженности электрического поля перед землетрясениями по наблюдениям магнитной обсерватории Паратунка за 1997-2000 гг. / С.Э. Смирнов // Солнечно-земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений: Тез. докл. II международного совещания, 14-19 августа 2001 г., село Паратунка, Камчатский край, Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2001. С. 48-49.
- 89. Смирнов, С.Э. Специализированный программно—аппаратный комплекс геофизической обс. Паратунка / С.Э. Смирнов // Метрологические основы магнитных наблюдений Сибири и Дальнего Востока: Сб. докл. школы—семинара, 11-16 авг. 2003г. Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 2003а. С. 7-10.

- 90. Смирнов, С.Э. Аномалии поведения напряженности электрического поля перед землетрясениями по наблюдениям магнитной обс. Паратунка за 1997-2002 гг./ С.Э. Смирнов // Пятая Российская конф. по атмосферному электричеству: сб. тр. в двух томах, 22-26 сентября 2003 г., Владимир. Владимир: Изд-во Транзит ИКС, 2003б. Т. 2. С. 72-75.
- 91. Смирнов, С.Э. Особенности отрицательных аномалий квазистатического электрического поля в приземной атмосфере на Камчатке / С.Э. Смирнов // Геомагнетизм и аэрономия. 2005а. Т. 45, № 2. С. 282-287.
- 92. Смирнов, С.Э. Основные классы С++ информационного комплекса геофизической обсерватории Паратунка / С.Э. Смирнов // Судовое оборудование, судовождение, безопасность мореплавания и жизнедеятельности. Петропавловск-Камчатский: КамчатГТУ, 2005б. С. 81-86.
- 93. Смирнов, С.Э. Программы мониторинга обсерваторских геофизических измерений / С.Э. Смирнов // Информатика и системы управления. 2005в. № 2(10) С. 195-198.
- 94. Смирнов, С.Э. Исследование положительных аномалий квазистатического электрического поля в приземной атмосфере и активность вулкана Шивелуч. / С.Э. Смирнов // Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога, 27-29 марта 2008 г., Петропавловск-Камчатский. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2008. С. 269-273.
- 95. Смирнов, С.Э. К вопросу о природе эффекта восхода Солнца в суточных вариациях электрического поля атмосферы на Камчатке: І. Временные вариации электрического поля / С.Э. Смирнов, Г.А. Михайлова, О.В. Капустина // Геомагнетизм и аэрономия. − 2012. − Т. 52, № 4. − С. 535-540.
- 96. 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.

- 97. 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.
- 98. 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.
- 99. 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.
- 100. 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.
- 101. Смирнов, С.Э. 20 лет обсерваторских наблюдений электрического поля на Камчатке / С.Э. Смирнов // История науки и техники. 2017. № 8. С. 28-35
- 102. Соболев, Г.А. Локальные возмущения электрического поля на Камчатке и их связь с землетрясениями / Г.А. Соболев, В.Н. Морозов // Физические основы поисков методов прогноза землетрясений. М.: Наука, 1970. С. 110-121.
- 103. Соболев, Г.А. Основы прогноза землетрясений / Г.А. Соболев. М.: Наука, 1993. 313 с.
- 104. Соболев, Г.А. Физика предвестников землетрясений / Г.А. Соболев, А.В. Пономарев. М.: Наука, 2003. 270 с.
- 105. Солнечные и гелиосферные явления в октябре-ноябре 2003 г.: причины и следствия / И.С. Веселовский, М.И. Панасюк, С.И. Авдюшин и др. // Космич. исслед. 2004. Т. 42, № 5. С. 453-508.

- 106. Сомсиков, В.М. Волны в атмосфере, обусловленные солнечным терминатором (обзор) / В.М. Сомсиков // Геомагнетизм и аэрономия. 1991. Т. 31, № 1. С. 1-12.
- 107. Сомсиков, В.М. Солнечный терминатор и динамические явления в атмосфере / В.М. Сомсиков // Геомагнетизм и аэрономия. 2011. Т. 51, № 6. С. 723-735.
- 108. Сорокин, В.М. Обзор моделей литосферно—ионосферных связей в периоды подготовки землетрясений / В.М. Сорокин, В.М. Чмырев, О.А. Похотелов // Краткосрочный прогноз катастрофических землетрясений с помощью радиофизических наземно—космических методов. М.: ОИФЗ РАН, 1999. С. 75-98.
- 109. 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.
- 110. Специализированный аппаратно—программный комплекс (АПК) сбора и обработки геофизической информации обс. Паратунка / А.В. Бузевич, С.Э. Смирнов, В.И. Филимонов и др. // Солнечно—земные связи и электромагнитные предвестники землетрясений: тез. докл. международного совещания, 18-21 августа 1998г., с. Паратунка Камчатской обл. Петропавловск-Камчатский: ИКИР ДВО РАН, 1998. С. 36-38.
- 111. Стожков, Ю.И. Космические лучи и атмосферные процессы / Ю.И. Стожков, В.И. Ермаков, П.Е. Покревский // Изв. АН. Сер. физ. 2001. Т. 65, № 3. С. 406-410.
- 112. Тарасов, Н.Т. Изменение сейсмичности коры при электрическом воздействии / Н.Т. Тарасов // Доклады АН. 1997. Т. 353, № 4. С. 542-545.
- 113. Тверской П.Н. Атмосферное электричество / П.Н. Тверской. Л.: Гидрометеоиздат, 1949. 252 с.

- 114. Физика космоса. Маленькая энциклопедия. М.: Советская энциклопедия, 1986. 783 с.
- 115. Хантадзе, А.Г. Ионосферные эффекты планетарных волн / А.Г. Хантадзе, З.С. Шарадзе // Волновые возмущения в атмосфере. Алма–Ата: Наука, 1980. С. 143-158.
- 116. Харкевич, А.А. Спектры и анализ / А.А. Харкевич. М.: Госизд-во технико- теоретической литературы, 1957. 236 с.
- 117. Чалмерс, Дж.А. Атмосферное электричество / Дж.А. Чалмерс. Л.: Гидрометеоиздат, 1974. 421 с.
- 118. Чернявский, Е.А. Атмосферно—электрические предвестники землетрясений / Е.А. Чернявский // Метеорология и гидрология в Узбекистане. Ташкент: Изд-во АН УзССР, 1955. С. 317-327.
- 119. Чертопруд, В.Е. О нестабильности тропосферы, связанной с солнечной активностью / В.Е. Чертопруд, Э.Р. Мустель, Н.Б. Мулюкова // Астрон. журн. 1979. Т. 56, Вып. 1. С. 106-117.
- 120. Шереметьева, О.В. Приливные компоненты геомагнитных вариаций / О.В. Шереметьева, С.Э. Смирнов // Геомагнетизм и аэрономия. 2007. Т. 47, № 5. С. 624-633.
- 121. Шефтель, В.М. Эффекты солнечных вспышек в атмосферном электричестве высоких и средних широт / В.М. Шефтель, А.К. Чернышов // Геомагнетизм и аэрономия. 1991. Т. 31, № 3. С. 500-505.
- 122. Шефтель, В.М. Реакция атмосферного электричества на изолированную вспышку и на серию вспышек / В.М. Шефтель, А.К. Чернышев // Геомагнетизм и аэрономия. 1992. Т. 32, № 1. С. 111-117.
- 123. Шефтель, В.М. Эффекты планетарных магнитных бурь в атмосферном электричестве вблизи поверхности Земли / В.М. Шефтель, О.М. Бандилет, А.К. Чернышев // Геомагнетизм и аэрономия. 1992. Т. 32, № 1. С. 186-188.

- 124. Шулейкин, В.Н. Вариации элементов приземного атмосферного электричества перед сейсмическими событиями причины, формы и масштабы проявления / В.Н. Шулейкин // Геофизика XXI столетия: 2002 г. М.: Научный мир, 2003. С. 396-404.
- 125. 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.
- 126. 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.
- 127. Электромагнитные предвестники землетрясений / Под ред. М.А. Садовского. М.: Наука, 1982. 89 с.
- 128. Эффект магнитных бурь в вариациях атмосферного электрического поля в средних широтах / Н.Г. Клеймёнова, О.В. Козырева, С. Михновски и др. // Геомагнетизм и аэрономия. 2008. Т. 48., № 5. С. 650-659.
- 129. 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.
- 130. 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.
- 131. A study of enhanced fair—weather electric fields occurring soon after sunrise / T.C. Marshall, W.D. Rust, M. Stolzenburg et al. // J. Geophys. Res. 1999. V. 104, N. D20. P. 24455-24469.

- 132. Acoustic emission response of rocks to electric power action as seismicelectric effect manifestation / L.M. Bogomolov, P.V. Il'ichev, V.A. Novikov et al. // Annals of Geophysics. 2004. V. 47, N. 1. P. 65-72.
- 133. An observational overview of solar flares / L. Fletcher, B.R. Dennis, H.S. Hudson et al. // Space Science Reviews. 2011. V. 159, P. 19-106.
- 134. Anisimov, S.V. Electrodynamic properties and height of atmospheric convective boundary layer / S.V. Anisimov, S.V. Galichenko, E.A. Mareev // Atmospheric Research. 2017. V. 194. P. 119-129.
- 135. Balachandran, N.K. Gravity waves from thunderstorms / N.K. Balachandran // Monthly Weather Review. 1980. V. 108, N. 6. P. 804-1160.
- 136. Brown, J.G. The effect of wind upon the Earth's electric field at the surface / J.G. Brown // Journal of Geophysical Research. 1936. V. 41, N. 3. P. 279-285.
- 137. Brune, J.N. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves earthquakes / J.N. Brune // Journal of Geophysical Research. 1970. V. 75, N. 26. P. 4997-5009.
- 138. Bucha, V. Mechanism of the relations between the changes of the geomagnetic field, solar corpuscular radiation, atmospheric circulation / V. Bucha // J. Geomag. Geoelectr. 1980. V. 32, N. 4. P. 217-264.
- 139. Buzevich, A.V. Specialized Hardware-Software Complex of Geophysical Observatory Paratunka / A.V. Buzevich, S.E. Smirnov // 23 General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics: Abstr., 30 June-11 July 2003. Japan, Sapporo, 2003. P. 81.
- 140. Candidate precursors: pulse–like geoelectric signals possibly related to recent seismic activity in Japan / Y. Enomoto, A. Tsutsumi, Y. Fujinawa et al. // Geophysical Journal International 1997. V. 131, N. 3. P. 485-494.
- 141. Charney, J.G. Propagation of planetary–scale disturbances from the lower into the upper atmosphere / J.G. Charney, P.G. Drazin // J. Geophys. Res. 1961. V. 66, N. 1. P. 83-109.

- 142. Convective Generator in the Global Electric Circuit: Analytical Approach and Numerical Consideration / O.V. Mareeva, E.A. Mareev, A.V. Kalinin et al. // XIV International Conference on Atmospheric Electricity: Book Abstracts, August 07-12, 2011, Rio de Janeiro, Brazil. Rio de Janeiro, 2011. P. 246.
- 143. Danilov, A.D. Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere / A.D. Danilov, J. Lastovicka // Internal. J.Geomag. Aeronomy. 2001. V. 2, N. 3. P. 209-224.
- 144. Davydenko, S.S. Modeling the electric structures of two thunderstorms and their contributions to the global circuit / S.S. Davydenko, T.C. Marshall, M. Stolzenburg. // Atmospheric Research. 2009. V. 91, Issue 2. P. 165-177.
- 145. Deformation and acoustic precursors of earthquakes / G.I. Dolgikh, A.V. Kuptsov, I.A. Larionov et al. // Doklady Earth Sciences. 2007. V. 413, N. 1. P. 281-285.
- 146. Diurnal and seasonal variations of space charge, electric field and cloud condensation nuclei in the lowest layer of the atmosphere / A.M. Selvam, G.K. Manohar, S.S. Khandalgaonkar et al. // Tellus. 1980. V. 32, N. 3. P. 232-244.
- 147. Dobrovolsky, I.R. Estimation of the size of earthquake preparation zones / I.R. Dobrovolsky, S.I. Zubkov, V.I. Myachkin // Pageoph. 1979. V. 117, N. 5. P. 1025-1044.
- 148. Experimental Evidence of the Correlation between Possible Precursors of Earthquakes in Near Surface Quasistatic Electric Fields and in the Ionosphere / L.P. Korsunova, Yu.M. Mikhailov, V.V. Khegai et al. // Geomagnetism and Aeronomy. 2010. V. 50, N. 7, (Special Issue 1). P. 920-926.
- 149. Fair—weather atmospheric electric potential gradient and space charge over central Illinois, Summer 1960 / C.B. Moore, B. Vennegut, R.G. Semonin et al. // J. Geophys. Res. 1962. V. 67, N. 3. P. 1061-1071.

- 150. Fair—weather atmospheric electricity study at Maitri (Antarctica) / D. Siingh, R.P. Singh, V. Gopalakrishnan et al. // Earth Planets Space. 2013. V. 65, N. 12. P. 1541-1553. doi:10.5047/eps.2013.09.011
- 151. Feynman, R.P. The Feynman Lectures on Physics: Physics of Continuous Media / R.P. Feynman, R.B. Leighton, M. Sands London: Addison-Wesley, 1964. 293 p.
- 152. Forbes, J.M. Quasi 16-day oscillation in the ionosphere / J.M. Forbes, S. Leveron // Geophys. Res. Lett. 1999. V. 19, N. 10. P. 981-984.
- 153. Hao, J.G. A kind of information on short–term and imminent earthquake precursors: research on atmospheric electric field anomalies before earthquakes / J.G. Hao, T.M. Tang, D.R. Li // Acta Seismologica Sinica. 1998. V. 11, N. 1. P. 121-131.
- 154. Hudson, H.S. Upper limits on the total radiated energy of solar flares / H.S. Hudson // Sol. Phys. 1983. V. 86, N. 1/2. P. 123-130.
- 155. Hudson, H.S. White–Light Flares: A TRACE/RHESSI Overview / H.S. Hudson, C.J. Wolfson, T.R. Metcalf // Sol. Phys. 2006. V. 234, P. 79-93.
- 156. Israel, H. The atmospheric electric field and its meteorological causes / H. Israel // Thunderstorm Electricity. Chicago: Univ. Chicago Press, 1953. P. 4-23.
- 157. Kachakhidze, N. Electrical field potential gradient of atmosphere as a possible precursor of earthquakes / N. Kachakhidze // Bulletin of Georgian Academy of Sciences. 2000. V. 161, N. 3. P. 32-43.
- 158. Kamra, A.K. Effect of wind on diurnal and seasonal variations of atmospheric electric field / A.K. Kamra // Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics.
 1969. V. 31, N. 10. P. 1281-1286.
- 159. Kasemir, H.W. Zur stromungstheorie des luftelektrischen feldes III: der austauschgenerator. Archives for meteorology / H.W. Kasemir // Geophys. Bioclimat. Ser.A. 1956. V. 9, N. 3. P. 357-370.

- 160. Kondo, G. The variation of the atmospheric electric field at the time of earth-quake / G. Kondo // Kakioka Magnet. Observ.Mem. 1968. V. 13, N. 1. P. 11-23.
- 161. Krehbill, P.R. The electrical structure of thunderstorms / P.R. Krehbill // The Earth's electrical environment. Washington: National Academy Press, 1986. P. 90-113. doi: 10.17226/898
- 162. Larsen, M.F. Gravity– wave generation by thunderstorm observed with a vertically– pointing 430 MHz radar / M.F. Larsen // Geophys. Res. Lett. 1982. V. 9, N. 5. P. 571-574.
- 163. Lastovicka, J. Effects of geomagnetic storms in the lower ionosphere, middle atmosphere and troposphere / J. Lastovicka // J.Atmos.Terr.Phys. 1996. V. 58, N. 7. P. 831-843.
- 164. Making, M. Responses of atmospheric electric field and air—earth current to variations of conductivity profiles / M. Making, T. Ogawa // J.Atmos.Terr.Phys. 1984. V. 46, N. 5. P. 431-445. doi: 10.1016/0021–9169(84)90087–4.
- 165. Marcz, F. Short–term changes in atmospheric electricity associated with Forbush decreases / F. Marcz // J.Atmos. and Solar-Terr.Phys. 1997. V. 59, N. 9. P. 975-982.
- 166. Markson, R. Modulation of the Earth's electric field by cosmic radiation / R. Markson // Nature. 1981. V. 291. P. 304-308.
- 167. Maurya, R.A. Transient magnetic and Doppler features related to the white–light flares in NOAA 10486 / R.A. Maurya, A. Ambastha // Solar.Phys. 2009.
 V. 258. P. 31-52. doi: 10.1007/s11207–009–9397–7.
- 168. Mitra, A.P. Ionospheric Effects of Solar Flares / A.P. Mitra Dordrecht: Springer, 1974. 305 p. doi: 10.1007/978–94–010–2231–6.
- 169. Moses, H. The effect of meteorological variables upon the vertical and temporal distributions of atmospheric radon / H. Moses, A.F. Stehnly, H.F. Lucas // J. Geophys.Res. 1960. V. 65, N. 4. P. 1223-1238.

- 170. Muhleisen, R. The influence of water on the atmospheric electrical field / R. Muhleisen // Recent Advances in Atmospheric Electricity. London: Pergamon press, 1958. P. 213-222.
- 171. Neidig, D.F. The importance of solar white light flares / D.F. Neidig // Sol.Phys. 1989. V. 121, N. 1/2. P.261-269.
- 172. Nicoll, K.A. Detection of lower tropospheric responses to solar energetic particles at mid–latitudes / K.A. Nicoll, R.G. Harrison // Physical Review Letters. 2014. V. 112, N. 22. P. 5001. doi: 10.1103/physrevlett.112.225001
- 173. Nichols, E.H. Investigation of atmospheric electrical variations at sunrise and sunset / E.H. Nichols // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1916. V. 92, N. 642. P. 401-408.
- 174. Radon behavior in connection with rock bumps (shocks) in deep mines and tectonic earthquakes / V.I. Outkin, A.K. Yurkov, S.V. Krivasheev et al. Yekaterindurg: RAS Ural's Branch. Institute of Geophysics, 1997. 17 p.
- 175. Pierce, A.D. A mechanism for the generation of acoustic–gravity waves during thunderstorm formation / A.D. Pierce, S.C. Coroniti // Nature. 1966. N. 5042. P. 1209–1210.
- 176. Pierce, E.T. Atmospheric electricity and earthquake prediction / E.T. Pierce // Geophys.Res.Lett. 1976. V. 3, N. 3. P. 185–188.
- 177. 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. V. 47, N. 1. P. 237-245.
- 178. Rakov, V.A. Lightning: physics and effects / V.A. Rakov, M.A. Uman Cambridge, 2003 687 p.
- 179. Recent advances in global electric circuit coupling between the space environment and the troposphere / M.J. Rycroft, K.A. Nicoll, K.L. Alpin et al. // J.Atmos.Sol.Terr.Phys. 2012. V. 90–91. P. 198-211. doi: 10.1016/j.jastp.2012.03.015.

- 180. Reiter R. Phenomena in atmospheric and environmental electricity / R. Reiter
 Elsevier, 1992. 541 p.
- 181. Roble, R.G. On solar-terrestrial relationships in atmospheric electricity / Roble R.G. // J. Geophys.Res. 1985. V. 90, N. D4. P. 6000–6012.
- 182. Smirnov, S. Association of the negative anomalies of the quasistatic electric field in atmosphere with Kamchatka seismicity / S. Smirnov // Nat. Hazards Earth Syst. 2008. N. 8. P. 745-749
- 183. Smirnov, S.E. Positive anomalies of the quasistatic electrical field in the near ground atmosphere and volcanic activity / S.E. Smirnov // XIV International Conference on Atmospheric Electricity: Book Abstracts, August 07-12, 2011, Rio de Janeiro, Brazil. Rio de Janeiro, 2011. P. 296.
- 184. 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.
- 185. 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. N. 66. P. 154. doi: 10.1186/s40623–014–0154–2.
- 186. Smirnov, S. Variations of atmospheric electric field and meteorological parameters in Kamchatka in 1997-2016 / S. Smirnov // E3S Web Conference. 2017. V. 20. P. 01012. doi: 10.1051/e3sconf/20172001012.
- 187. Solar irradiace variability during the October 2003 solar storm period / T.N. Woods, F.G. Eparvier, J. Fontenla et al. // Geophysical Research Letters. 2004. V. 31, N. 10. P. L10802. doi:10.1029/2004gl019571.
- 188. Specific variations of the atmospheric electric field potential gradient as a possible precursor of Caucasus earthquakes / N. Kachakhidze, M. Kachakhidze,
 Z. Kereselidze et al. // Natural Hazards and Earth System Science. 2009. V.
 9, N. 4. P. 1221-1226.

- 189. Tarasov, N.T. Spatial–temporal structure of seismisity of the North Tien Shan and its change under the effect of hight energy electromagnetic pulses manifestation / N.T. Tarasov, N.V. Tarasova // Annals of Geophysics. 2004. V. 47, N. 1. P. 199-212.
- 190. The signature of solar activity in the infrared spectral irradiance / J.M. Fontenla, J. Harder, G. Rottman et al. // The Astrophysical Journal. 2004. V. 605, N. 1. P. L85-L88.
- 191. Vershinin, E.F. Correlations of seismic activity with electromagnetic emissions and variations in Kamchatka Region / E.F. Vershinin, A.V. Buzevich, K. Yamoto // Atmospheric and ionospheric electromagnetic phenomena associated with earthquakes. Tokyo: Terra Scientific Publishing Company, 1999. P. 513-517. doi: 10.1016/s1364–6826(99)00110–8.
- 192. Welch, P.D. The use of Fast Fourier Transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short, modified periodograms / P.D. Welch // IEEE Transactions on audio and electroacoustics. 1967. V. 15, N. 2. P. 70-73.
- 193. Woods, T.N. Contributions of the solar ultraviolet irradiance to the total solar irradiance during large flares / T.N. Woods, G. Kopp, P.C. Chamberlin // Journal of Geophysical Research. 2006. V. 111, N. A10 P. S14. doi:10.1029/2005ja011507.
- 194. Zacupin, A.S. Responses of acoustic emission in geomaterials to action of electric pulses under various value of the compressive load action / A.S. Zacupin, A.A. Avagimov, L.M. Bogomolov // Izvestiya, Physics of the Solid Earth (Fizika Zemli). 2006. N. 10. P. 43–50.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АГВ – акустико-гравитационные волны;

АЦП – аналого-цифровое преобразование;

БПФ – быстрое преобразование Фурье;

ГГГ – глобальный грозовой генератор;

ГКЛ – галактические космические лучи;

ГО – геофизическая обсерватория;

ГЭЦ – глобальная электрическая цепь атмосферы

ВГВ – внутренние гравитационные волны;

ВПМ – волны планетарного масштаба;

3Т – землетрясение;

ИК – информационный комплекс;

ММП – метод модифицированных периодограмм;

СКЛ – солнечные космические лучи;

СКО – среднеквадратичное отклонение;

ТПВ – тепловые приливные волны;

KVERT - Камчатская группа реагирования на вулканические извержения;

SPIDR – The Space Physics Interactive Data Resource.