

ФАНО России

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт мониторинга климатических и экологических систем
Сибирского отделения Российской академии наук

ДОПУСТИТЬ К ПРЕДСТАВЛЕНИЮ ГЭК
Руководитель основной образовательной
программы, д.ф.-м.н., профессор
_____ П.М. Нагорский
« _____ » _____ 2017 г.

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах подготовленной научно – квалификационной работы

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СОСТОЯНИЕ ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ
ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ПРИРОДНЫХ ФАКТОРОВ
КОНВЕКТИВНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

по направлению подготовки высшего образования – подготовки кадров высшей квалификации
по программам аспирантуры
05.06.01 – Науки о земле

Пустовалов Константин Николаевич

Научный руководитель
д-р ф.-м. наук, профессор
_____ П.М. Нагорский
подпись
« _____ » _____ 2017 г.

Автор работы
аспирант
_____ К.Н. Пустовалов
подпись

Томск-2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
1. АТМОСФЕРНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ АТМОСФЕРНЫХ ФАКТОРОВ	12
1.1. Электродный слой под воздействием облачности и атмосферных явлений	13
1.2. Экспериментально-измерительный комплекс ИМКЭС СО РАН	20
1.3. Метеорологическое обеспечение мониторинга электрофизических процессов в приземной атмосфере.....	24
1.4. Данные спутникового зондирования о структуре и степени развития мощной конвективной облачности.....	26
1.5. Выводы по главе.....	28
2. ОЦЕНКА ИЗМЕНЧИВОСТИ $\nabla\varphi$ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ОБЛАКОВ ОСНОВНЫХ ФОРМ.....	30
2.1 Методика выделения интервалов наблюдений во время конкретных форм облачности	30
2.2. Оценки изменчивости $\nabla\varphi$ в приземном слое под воздействием облачности	35
2.3. Сравнительный анализ эффективности воздействия основных форм облачности на состояние электродного слоя	40
2.4. Метод выявления C_b , основанный на значениях $\nabla\varphi$ в приземном слое	42
2.5. Выводы по главе.....	45
3. АНАЛИЗ ДИНАМИКИ АТМОСФЕРНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ C_b	47
3.1. Анализ особенностей динамики $\nabla\varphi$ и λ_{\pm} при C_b и ливневых осадках	47
3.2. Методика оценки временной структуры динамики $\nabla\varphi$ под влиянием C_b	57
3.3. Структура вариаций $\nabla\varphi$ при прохождении C_b	59

3.4. Модельное описание вариаций $\nabla\varphi$, ρ и λ_{\pm} при <i>Cb</i> и ливневых осадках.....	65
3.5. Численные оценки динамики $\nabla\varphi$, ρ и λ_{\pm} при <i>Cb</i> и ливневых осадках.....	71
3.6. Выводы по главе.....	76
4. ФОРМАЛИЗАЦИЯ ОТКЛИКА АТМОСФЕРНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН НА ВОЗДЕЙСТВИЕ <i>Cb</i>	78
4.1. Методика выделения форм вариаций $\nabla\varphi$, связанных с <i>Cb</i> различного происхождения.....	78
4.2. Основные формы вариаций $\nabla\varphi$ при <i>Cb</i> и их связь с генезисом <i>Cb</i>	80
4.3. Формы вариаций $\nabla\varphi$ при изолированных внутримассовых <i>Cb</i> и их связь со стадиями развития <i>Cb</i>	86
4.4. Численные оценки отклика $\nabla\varphi$ на изолированное <i>Cb</i> с заданной электрической структурой.....	92
4.5. Отклик параметров электродного слоя на основные формы вариаций $\nabla\varphi$ при <i>Cb</i>	104
4.6. Классификация форм отклика $\nabla\varphi$, зарегистрированных при воздействии одиночных <i>Cb</i> на приземную атмосферу.....	110
4.7. Выводы по главе.....	113
Заключение.....	116
Список литературы.....	121

ВВЕДЕНИЕ

Согласно [*Мохов, Акперов 2006*], глобальное изменение климата ведёт к следующим физическим процессам: росту влажности и уменьшению статической устойчивости в атмосфере в регионах Северной Евразии, что может привести к интенсификации конвективных процессов. В [*Chernokulsky, Bulygina, Mokhov 2011*] показано, что во второй половине XX в. – начале XXI в. отмечалось увеличение доли конвективных и снижение доли слоистообразных форм облачности. Дальнейшее потепление климата приведёт к ещё большему увеличению повторяемости кучево-дождевых облаков и связанных с ними опасных явлений (грозы, град, интенсивные ливни, смерчи) [*Оценочный доклад 2008; Второй оценочный доклад 2014*].

При этом, до сих пор основным способом регистрации форм облачности с поверхности земли остаются визуальные и радиолокационные наблюдения [*WMO-№8 2012; BMO-№8 2014*], обладающие рядом недостатков. Для визуальных наблюдений наибольшую сложность составляет выявление «затопленной конвекции» в облачных системах атмосферных фронтов [*Hobbs 1978; Houze 1993; Шакина 1985; Шакина 1990; Шметер 1990; Bluestein 1993; Houze 2014*], повторяемость которой при дальнейшем потеплении климата будет только возрастать. Таким образом, возникает необходимость в дополнительных источниках информации о текущем состоянии облачности.

Локальное электрическое поле приземной атмосферы весьма чувствительно к метеорологическим условиям и существенно изменяется под влиянием облачности, особенно конвективных форм, и различных атмосферных явлений [*Тверской 1949; Chalmers 1967; Красногорская 1972; Филиппов 1974; Rakov, Uman 2003; Bennett, Harrison 2007; Попов 2008*]. Данная особенность может быть использована для решения обратной задачи – диагностирования и уточнения физических условий в атмосфере на основе данных об электрических характеристиках приземного слоя атмосферы. Однако, для решения такой задачи требуется накопление надёжных сведений об особенностях влияния различных

метеорологических факторов на приземное электрическое поле. Перечисленные факторы и определяют актуальность проведённых исследований.

Цели и задачи работы.

Цель работы – исследовать электрофизическое состояние приземного слоя атмосферы под воздействием внешних экстремальных природных факторов: конвективной облачности и связанных с ней атмосферных явлений.

Задачи:

1. разработать методологию автоматизированной обработки вариаций электрического поля при прохождении кучево-дождевого облака, позволяющую классифицировать форму отклика на прохождение *Cb* и внутренняя структура;
2. оценить изменчивость градиента потенциала электрического поля под воздействием облаков основных форм в тёплый и холодный сезоны года;
3. провести количественные оценки воздействия на электрическое поле приземной атмосферы кучево-дождевых облаков (*Cb*) и других форм облачности;
4. проанализировать динамику градиента потенциала электрического поля под воздействием *Cb* и ливневых осадков на основе натурных данных и данных моделирования;
5. проанализировать динамику концентрации лёгких ионов, плотности объёмного заряда и полярных электропроводностей под воздействием *Cb* и ливневых осадков на основе модельных расчётов.
6. классифицировать формы вариаций градиента потенциала при воздействии кучево-дождевых облаков и сопутствующих им явлений на приземный слой атмосферы (по данным мониторинга, метео, спутники);
7. оценить пространственное распределение электрического поля и вариации градиента потенциала электрического поля в пункте измерения под воздействием на приземный слой модельного кучево-дождевого облака с заданной электрической структурой;

8. систематизировать формы вариаций градиента потенциала электрического поля при воздействии на приземный слой атмосферы изолированных кучево-дождевых облаков.

Научная новизна результатов.

1. Установлены, на основании экспериментальных исследований вариаций градиента потенциала электрического поля, основные типы структуры вариаций под воздействием кучево-дождевой облачности, проведён статистический анализ структурных параметров вариаций и предложена систематизация форм отклика электрического поля на прохождение одиночных *Cb*, связывающая форму вариаций напряженности электрического поля как со стадией развития *Cb*, так и с особенностями наклона электрической структуры конвективной ячейки.
2. Показано, на основании экспериментальных данных и результатов модельного расчёта, что форма вариаций градиента потенциала электрического поля при прохождении кучево-дождевых облаков является индикатором структуры *Cb*, а в случае изолированных внутримассовых облаков ещё и индикатором стадии развития конвективной ячейки и наклона облачного диполя. Установлены количественные оценки структуры отклика приземного электрического поля на *Cb* в тёплый и холодный периоды года. Впервые установлено, что распределение длительности вариаций градиента потенциала электрического поля под воздействием *Cb* описывается составным распределением Леви-Парето, перелом которого приходится на длительность ~ 60 мин, а участки связаны с принципиально различными проявлениями кучево-дождевой облачности: одиночные *Cb* или их конгломераты.
3. На основе экспериментальных данных и результатов модельного расчёта показано, что выпадение интенсивного ливневого дождя приводит к быстрому росту легких ионов обеих полярностей, а ливневого снега – к их согласованному исчезновению.
4. Разработана методология автоматизированной обработки вариаций напряженности электрического поля при прохождении кучево-дождевого

облака, позволяющая оценить структуру этих вариаций и классифицировать форму отклика электрического поля на прохождение *Cb*.

Достоверность полученных результатов определяется использованием физически обоснованных методов экспериментальных измерений, анализом экспериментальных данных с необходимой статистической обеспеченностью, а также модельной проверкой фактов, полученных эмпирически. Основные результаты подтверждаются результатами экспериментальных наблюдений и модельных исследований других исследователей.

Основные результаты, выносимые на защиту.

1. Разработана методология автоматизированной обработки вариаций напряженности электрического поля при прохождении кучево-дождевого облака, позволяющая оценить структуру этих вариаций и классифицировать форму отклика электрического поля на прохождение *Cb*.
2. Установлены основные типы структуры вариаций градиента потенциала электрического поля под воздействием кучево-дождевой облачности и предложена систематизация форм отклика электрического поля на прохождение одиночных *Cb*, связывающая форму вариаций напряженности электрического поля как со стадией развития *Cb*, так и с особенностями наклона электрического диполя конвективной ячейки.
3. Показано, что форма вариаций градиента потенциала электрического поля при прохождении кучево-дождевых облаков является индикатором структуры *Cb*, а в случае изолированных внутримассовых облаков также индикатором стадии развития конвективной ячейки и наклона облачного диполя. Установлено, что распределение длительности вариаций градиента потенциала под воздействием *Cb* описывается составным распределением Леви-Парето, участки которого связаны с принципиально различными проявлениями кучево-дождевой облачности: одиночные *Cb* или их конгломераты.
4. Показано на основе экспериментальных данных и модельных расчётов, что выпадение интенсивного ливневого дождя приводит к быстрому росту легких

ионов обеих полярностей, а ливневого снега – к их согласованному исчезновению.

Практическая значимость работы.

На настоящее время практически отсутствуют эффективные методы оперативного автоматического выявления кучево-дождевых облаков, скрытых в слоистой облачности, и связанных с ними опасных явлений, что особенно важно в условиях меняющегося климата.

Использование разработанных в работе оценок связи отклика атмосферно-электрических параметров на различные формы облачности и связанные с ними атмосферные явления позволяет получать оперативную независимую информацию о состоянии приземного слоя атмосферы. В частности, метод выявления кучево-дождевых облаков на основе отклика в электрическом поле, работоспособность которого обосновывается в работе, может быть применён при создании автоматизированных систем выявления опасных метеорологических явлений конвективного происхождения, что позволит предотвратить угрозу здоровью людей и минимизировать экономические потери. Проведена валидация работы метода и оценка его эффективности.

Апробация работы.

Основные результаты и выводы докладывались на следующих научных конференциях: IV Всерос. научно-практ. конф. «Академические Жуковские чтения» (г. Воронеж, 2016), Межд. конф. по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды «ENVIROMIS-2016» (г. Томск, 2016), Всерос. научной конференции «Распространение радиоволн» (г. Томск, 2016), XXII Международном симпозиуме «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (г. Томск, 2016), 11th Intern. Conf. Problems of Geocosmos (St.-Petersburg, 2016), XIII Всероссийской конференции студенческих научно-исследовательских инкубаторов (г. Томск, 2016), VI Всероссийской конференции молодых ученых «Материаловедение, технологии и экология в третьем тысячелетии» (г. Томск, 2016), IV Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния

природной среды» (г. Санкт-Петербург, 2016), II Международной конференции «Климатология и гляциология Сибири» (г. Томск, 2015), II Всероссийской конференции «Глобальная электрическая цепь» (п. Борок, 2015), Всероссийской конференции «XI Сибирское совещание по климатологическому мониторингу» (г. Томск, 2015), XIV Международной конференции «Взаимодействие полей и излучения с веществом» (г. Иркутск, 2015), International symposium «Atmospheric Radiation and Dynamics (ISARD-2015)» (St. Petersburg, 2015), XXI Международном симпозиуме. «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (г. Томск, 2015), III Всероссийском семинар-совещание «Триггерные эффекты в геосистемах» (г. Москва, 2015), XIX Международной конференции «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы» (г. Туапсе, 2015), II Всероссийской конференции «Экология и космос» (г. Санкт-Петербург, 2015), Международной конференции «Изменение климата и окружающей среды Северной Евразии: анализ, прогноз, адаптация» (г. Кисловодск, 2014), XVIII Всероссийской конференции «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы» (п. Борок, 2014), International conference on Atmospheric Electricity (ICAЕ 2014) (Norman, 2014), Всероссийской конференции «Глобальная электрическая цепь» (п. Борок, 2013), Всероссийской конференции «X Сибирское совещание по климатологическому мониторингу» (г. Томск, 2013), Международной конференции «Климатология и гляциология Сибири» (г. Томск, 2012), Всероссийской конференции «Контроль окружающей среды и климата (КОСК-2012)» (г. Томск, 2012), VII Всероссийской конференции по Атмосферному электричеству (г. Санкт-Петербург, 2012).

Публикации.

Основные результаты опубликованы в 43 работах, из них 4 – в рецензируемых журналах из перечня ВАК.

Личный вклад автора.

Постановка изложенных в работе задач была проведена научным руководителем совместно с аспирантом. Разработка методики отбора

экспериментальных данных во время облачности основных форм и методики обработки вариаций градиента потенциала электрического поля под воздействием кучево-дождевых облаков осуществлялось аспирантом самостоятельно. Научным руководителем предложен подход к математическому моделированию электродного слоя, учитывающий воздействие мощной конвективной облачности, ливневых осадков и естественной радиоактивности. Автором осуществлена разработка математической модели электродного слоя с добавлением блоков, отвечающих за учёт влияния аэрозоля и измеренных вариаций электрического поля; выполнен расчёт динамики параметров электродного слоя под воздействием C_b и сопутствующих явлений; разработана модель расчёта пространственного распределения градиента потенциала и его вариаций в пункте измерения под воздействием кучево-дождевого облака с заданной электрической структурой; выполнен модельный расчёт под воздействием одиночного кучево-дождевого облака и конгломерата C_b ; с участием научного руководителя выполнена классификация вариаций приземного электрического поля под воздействием кучево-дождевых облаков, а также выполнено обобщение полученных результатов; совместно с научным руководителем разработана методика обнаружения кучево-дождевых облаков на основе отклика в электрическом поле.

Структура и объем работы.

Работа состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 147 страницах, включает в себя 53 рисунка, 22 таблицы, 246 библиографических ссылок.

Содержание работы.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, научная новизна, научная и практическая значимость, основные результаты, выносимые на защиту.

В начале первой главы дан краткий обзор литературы, посвященной исследованию вариаций градиента потенциала электрического поля и полярных электропроводностей воздуха в приземной атмосфере при воздействии облачности и атмосферных явлений. Далее описан экспериментально-измерительный комплекс ИМКЭС СО РАН, предназначенный

для исследования вариаций градиента потенциала электрического поля и полярных электропроводностей, а также метеорологическое обеспечение мониторинга электрофизических процессов в приземной атмосфере. Приведено описание данных спутникового зондирования атмосферы, используемых для оценки структуры и степени развития мощной конвективной облачности. Сформулированы цели и задачи исследований по теме диссертации.

Вторая глава посвящена вопросам, связанным с разработкой методик обработки той совокупности данных, которые были использованы в диссертационном исследовании. Представлена автоматизированная методика обработки вариаций градиента потенциала электрического поля. Получены оценки вариаций $\nabla\varphi$ при воздействии облаков основных форм. Разработан метод диагностики кучево-дождевых облаков, основанный на значениях $\nabla\varphi$ в приземном слое.

В третьей главе сформулирована методика отбора натуральных данных градиента потенциала электрического поля и полярных электрических проводимостей при прохождении кучево-дождевых облаков и ливневых осадков, а также представлены оценки временной структуры вариаций $\nabla\varphi$ и λ_{\pm} . Представлены основные уравнения, используемые при математическом моделировании вариаций $\nabla\varphi$, ρ и λ_{\pm} под воздействием Cb и ливневых осадков. Выявлены характерные особенности временной структуры вариаций $\nabla\varphi$ и λ_{\pm} при Cb , ливневых осадках и связанных с ними атмосферных явлений. Представлены результаты модельной оценки динамики $\nabla\varphi$, ρ и λ_{\pm} при Cb и ливневых осадках.

Четвёртая глава посвящена разработке методики классификации форм вариаций $\nabla\varphi$ при воздействии кучево-дождевых облаков различного генезиса и оценки их временной структуры. Сформулирована математическая модель отклика в приземном электрическом поле изолированного кучево-дождевого облака с заданной электрической структурой. Выявлены основные типы вариаций $\nabla\varphi$ при воздействии кучево-дождевых облаков и установлена их связь с генезисом Cb , а также с формами вариаций $\nabla\varphi$ (при изолированных внутримассовых Cb) и

со стадиями развития *Cb*. Представлены результаты модельной оценки отклика $\nabla\varphi$ на прохождение изолированного *Cb* с заданной электрической структурой, а также отклика параметров электродного слоя на основные формы вариаций $\nabla\varphi$ при *Cb*. Проведено обобщение форм вариаций $\nabla\varphi$, зарегистрированных на основе данных натурных измерений и модельных исследований, которые связаны с воздействием изолированного кучево-дождевого облака на различных стадиях его развития и с учётом наклона главного диполя.

В заключении приведены основные результаты диссертационного исследования.

1. АТМОСФЕРНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ АТМОСФЕРНЫХ ФАКТОРОВ

1.1. Электродный слой под воздействием облачности и атмосферных явлений

Фундаментальные основы исследования изменений градиента потенциала электрического поля в атмосфере ($\nabla\phi$) были заложены ещё во второй половине XIX в. У. Томсоном (лордом Кельвином), который показал необходимость непрерывной регистрации величины $\nabla\phi$ в различных метеорологических условиях, в том числе во время осадков и гроз [*Thomson 1872; Chalmers 1967; Чалмерс 1974*]. В начале XX в. Н. П. Тверской на основании регулярных измерений напряжённости электрического поля в ряде пунктов получил общие сведения по связи $\nabla\phi$ с радиоактивностью, запылённостью, происхождением воздушных масс и атмосферными явлениями, выявил, что облака нижнего яруса вызывают уменьшение величины $\nabla\phi$ и даже могут сопровождаться изменением его знака [*Тверской 1930; Тверской 1949; Тверской 1962; Морозов, Снегуров, Шварц 2001*]. В 50-60 гг. XX в. в Душети (Грузия) было исследовано изменение $\nabla\phi$ под влиянием различных форм облачности нижнего яруса (*Sc, St, Ns, Cb*), и показано, что во время облаков *Sc* и *St* в целом отмечается понижение значений $\nabla\phi$ характерных для условий хорошей погоды (примерно на 30 и 45% соответственно). При облаках *Ns* с выпадением дождя отмечается сильное искажение $\nabla\phi$ с частыми переходами её значений через ноль [*Двали 1961*].

А. Х. Филиппов в 60-70 гг. XX в. на основании продолжительных измерений напряжённости электрического поля в Восточной Сибири исследовал влияние облаков различных ярусов и показал, что наличие облаков верхнего и среднего яруса характеризуется понижением средних значений $\nabla\phi$ относительно условий безоблачного неба и составляет примерно 20 % в случае облаков *Сi, Cs* и примерно 40% при облаках *As, Ac*. Облака *Ns* в среднем вызывают понижение $\nabla\phi$ на 42%, однако во время выпадения дождя значения $\nabla\phi$ могут уходить в отрицательную

область. Во время прохождения облаков *Cb*, согласно Филиппову, отмечаются вариации двух типов: «медленные» и «быстрые», связанные с разрядами молний. «Медленные» вариации напряжённости электрического поля связаны с перемещением над датчиком заряженных областей в этих облаках [*Филиппов 1961; Филиппов 1971; Филиппов 1974*]. В 70-х гг. XX в. Красногорская Н. В. исследовала на Северном Кавказе влияние облаков *Sc*, *Cu*, *Cb* на электрическое поле приземной атмосферы и выявила, что развитие не дающих осадки конвективных облаков, как правило ведёт к уменьшению $\nabla\varphi$ вплоть до изменения знака. Красногорская показала, что при прохождении облаков *Cb* с сопутствующим выпадением ливневых осадков изменение электрического поля у земной поверхности является результатом наложения электрического поля объёмных зарядов в облаке и электрического поля объёмных зарядов, переносимых частицами осадков [*Красногорская 1972*].

D. R. MacGorman и W. D. Rust на основе измерений градиента потенциала электрического поля в США показали, что быстрые (порядка секунд) изменения напряжённости электрического поля у земли наблюдаемые во время грозы являются результатом перераспределения заряда между облаком и землей во время разряда молнии [*Mac Gorman, Rust 1998*]. В 90-х гг. XX в. M. Stolzenburg, T. C. Marshall, W. D. Rust и другими были проведены многочисленные измерения изменения градиента потенциала при пролёте через грозовые облака (небольшие горные облака, суперячейки, мезомасштабные конвективные системы), выполненные с помощью аэростатов. Анализ полученных данных и восстановление по ним объёмных зарядов в облаках показал, что трипольная модель грозового облака является чрезмерно упрощённой для многих ситуаций. Так, в области восходящего потока в грозовом облаке Штолценбергом и другими было выделено 4 объёмных заряда (дополнительный слой отрицательного заряда в верхней части облака), а в области нисходящего потока – 6 областей заряда по высоте [*Stolzenburg, Rust, Smull, Marshall 1998; Stolzenburg, Rust, Marshall 1998a; Stolzenburg, Rust, Marshall 1998b; Stolzenburg, Marshall 2008; Marshall 2009*].

На обсерватории университета Рединга (Великобритания) А. J. Bennett и R. G. Harrison и другими с 2005 г. проводятся детальные исследования изменения электрических характеристик во время «нарушенной погоды», под влиянием прохождения облачности, осадков, метелей, туманов, гроз. На основании регулярных измерений напряжённости электрического поля Bennett и Harrison выделили диапазоны характерных значений $\nabla\phi$ и их относительную изменчивость во время различных метеорологических условий, обуславливающих суб-суточную изменчивость приземного электрического поля. Ими было показано, что при прохождении облаков, дающих осадки, отклонение $\nabla\phi$, связанное с осадками, часто содержит высокочастотную изменчивость (порядка секунды) и, как правило, меньшую дисперсию величины $\nabla\phi$, по сравнению с гладкими, более последовательными изменениями $\nabla\phi$ под влиянием зарядов самого облака (порядка минут), которое в целом доминирует. Bennett и Harrison выявили также, что дождь и снег, обычно переносящие заряды противоположной полярности, приводят к противоположным изменениям напряжённости электрического поля [*Bennett 2007; Bennett, Harrison 2007; Bennett, Harrison 2008*].

В Флоридском университете V. A. Rakov, M. A. Uman и другие занимаются исследованием физики молний [*Uman 1987; Юман 1972*]. Для исследования вызывается искусственная (триггерная) молния с помощью ракеты, которую запускают в грозовое облако. При запуске ракеты, вдоль всей её траектории ионизируется воздух и создаётся проводящий канал между облаком и землей, по которому происходит разряд молнии. Параметры молниевых разрядов регистрируются приборами, установленными близи стартовой площадки.

В Главной геофизической обсерватории им. А. И. Воейкова (г. Санкт-Петербург) В. Н. Морозовым, Л. Г. Соколенко, И. Б. Поповым, Б. Г. Зайнетдиновым и др. осуществляется мониторинг электрического состояния атмосферы, включающий наблюдения за градиентом потенциала электрического поля ($\nabla\phi$) и полярными электрическими проводимостями (λ_{\pm}). Под руководством

ГГО в России существует атмосферно-электрическая сеть, включающая в себя 9 пунктов: Воейково (Ленинградская область), Верхнее Дуброво (Свердловская область), Иркутск, Южно-Сахалинск, Тикси (Якутия), Зашеек (Мурманская область), Архангельск, Диксон (Таймырский АО), Калининград. На основе большого объёма среднечасовых данных градиента потенциала электрического поля, измеренных с помощью электростатического флюксметра «Поле-2» на станции Воейково за период с 1966 по 2007 гг., получены статистические характеристики значений $\nabla\varphi$, характерные для различных метеорологических явлений и некоторых форм облачности нижнего яруса (*Сu*, *Сb*, *Sc*, *St*). Полученные им результаты показывают, что появление нижней облачности в среднем приводит к уменьшению величины $\nabla\varphi$, характерной для условий «хорошей погоды», усиливающейся с увеличением балла облачности. Наибольшее возмущение $\nabla\varphi$ характерно для облаков *Сb*. Различные метеорологические явления были сведены к определённым рангам по степени искажения нормальных значений напряжённости электрического поля, где максимальные ранги имеют ливневой дождь, гроза и град [*Понов 2008*].

Г.В. Куповых, В. Н. Морозовым проанализировано современное состояние теории электродного эффекта на основе анализа всех ранее выполненных работ по экспериментальному исследованию и моделированию электродного слоя, обобщены модельные исследования состояния электродного слоя в атмосфере под влиянием различных факторов, в том числе под воздействием электрически заряженной облачности, а также сформулированы общие уравнения, описывающие Глобальную электрическую цепь и электродный эффект в стационарной, нестационарной и турбулентной атмосфере [*Морозов 1984*; *Морозов 1986*; *Куповых 1995*; *Куповых 1998*; *Куповых, Морозов, Шварц 1998*; *Морозов 2001*; *Куповых, Морозов 2001*; *Морозов, Снегуров, Шварц 2001*; *Морозов 2002*; *Куповых, Болдырев, Литвинова, Марченко 2003*; *Куповых, Морозов 2003а*; *Куповых, Морозов 2003б*; *Куповых, Морозов 2003в*; *Куповых, Морозов 2003г*; *Куповых, Морозов 2003д*; *Морозов 2011*; *Морозов, Куповых 2012*].

На геофизической обсерватории «Михнево» в ИДГ РАН (г. Москва) исследованы возмущения электрического поля атмосферы под воздействием наземных и подземных взрывов, микробаромов и акустико-гравитационных волн, а также электрическое поле в условиях мегаполиса [*Адушкин, Соловьев 1989; Адушкин, Соловьев, Сурков 1990; Стивак, Адушкин, Овчинников, Соловьев, Феропонтова 1993; Адушкин, Соловьев 2004; Рыбнов, Попова, Соловьев, Харламов, Соловьев 2016; Стивак, Локтев, Рыбнов, Соловьев, Харламов 2016; Соловьев, Рыбнов, Харламов, Крашенинников 2017*].

В ИПФ РАН (г. Нижний Новгород) проведены работы по экспериментальному и модельному исследованию Глобальной электрической цепи, электрической структуры грозовых облаков и высотных разрядов в атмосфере [*Davydenko, Mareev, Marshall, Stolzenburg 2004; Davydenko, Marshall, Stolzenburg 2009; Mareev 2008; Евтушенко, Мареев 2009; Евтушенко, Мареев 2011; Клименко, Мареев, Шаталина, Шлюгаев, Соколов, Булатов, Денисов 2013; Мареев, Трахтенгерц 2007; Мареев, Стасенко 2009; Мареев 2010; Мареев, Стасенко, Булатов, Дементьева, Евтушенко, Ильин, Кутерин, Слюняев, Шаталина 2016; Мареева, Мареев, Калинин, Жидков 2012*].

На геофизической обсерватории "Борок" ИФЗ им. О. Ю. Шмидта РАН (Ярославская область, п. Борок) проводится непрерывное измерение электрических характеристик атмосферы в условиях низкого уровня искусственного электромагнитного и естественного сейсмического шума, вдали от источников промышленных загрязнений. На основе данных измерений С. В. Анисимовым, Э. М. Дмитриевым, Н. М. Шиховой, С. В. Галиченко, К. В. Афиногеновым и другими выполнены исследования электрического состояния атмосферы в условиях «хорошей погоды» [*Анисимов, Мареев, Шихова, Дмитриев 2001; Анисимов, Мареев, Шихова, Дмитриев 2001; Анисимов, Дмитриев 2008; Анисимов, Мареев 2008*].

В Высокогорном геофизическом институте (г. Нальчик) проведены исследования электричества приземного слоя атмосферы в высокогорных условиях, а также процессов электризации кучево-дождевых (градовых) облаков

и методов активных воздействий на электрическое состояние конвективной облачности [Аджиев, Шаповалов 1991; Аджиев, Куповых 2004; Ашабоков, Калажоков 1992; Ашабоков, Федченко, Шаповалов, Шоранов 1994; Ашабоков, Федченко, Шаповалов, Шоранов 1996; Ашабоков, Федченко, Тапасханов, Шаповалов, Шаповалов, Макуашев, Кагермазов, Созаева, Ташилова, Кешева 2013].

В ИКФИА СО РАН (г. Якутск) на основе длительных инструментальных измерений проведено исследования грозовой активности и характеристик молниевых разрядов в Якутии, а также проведена оценка пространственного распределения плотности молниевых разрядов на территории северной Азии на основе данных Всемирной сети гронопеленгации (World Wide Lightning Location Network, WWLLN) [Козлов, Муллаяров 1996; Козлов, Муллаяров, Лантев, Вальков, Громов 1996; Козлов, Муллаяров, Васильев 2003; Козлов, Муллаяров 2004; Торопов, Козлов, Mullayarov, Starodubtsev 2013; Козлов, Муллаяров, Григорьев, Тарабукина 2014; Тарабукина Козлов 2016; Тарабукина, Козлов, Каримов 2016].

В Томском политехническом университете (в НИИ ВН), а затем в Томском государственном университете осуществлено исследование пространственного распределения числа дней с грозой и плотности разрядов молнии в землю, характеристик интенсивности грозовой деятельности и особенностей фронтальных и внутримассовых гроз, а также влияния подстилающей поверхности и форм атмосферной циркуляции на грозовую активность [Дульзон, Раков 1986; Дульзон, Гиндуллин, Горбатенко 1996; Горбатенко, Дульзон 1997; Горбатенко, Дульзон, Решетько 1999; Горбатенко 2000а; Горбатенко 2000б; Горбатенко 2000в; Горбатенко 2000г; Горбатенко, Ипполитов, Кабанов, Логинов, Решетько, Таранюк 2002; Горбатенко, Дульзон 2006; Горбатенко, Константинова 2009; Горбатенко, Еришова 2011].

В ИМКЭС СО РАН (г. Томск) исследована связь электрических характеристик в атмосфере с явлениями нарушенной погоды, такими как туманы, прохождение атмосферных фронтов, прохождение мощной конвективной облачности, во время гроз и осадков, а также с влиянием дымов лесных пожаров

и естественной радиоактивности [*Пхалагов, Ипполитов, Нагорский, Одинцов, Панченко, Смирнов, Ужегов 2009; Яковлева, Нагорский, Зукау, Лужанчук 2010; Пхалагов, Ужегов, Польшкин, Козлов, Ипполитов, Нагорский 2011; Ипполитов, Кабанов, Нагорский, Смирнов 2012; Ипполитов, Кабанов, Нагорский, Пхалагов, Смирнов 2013*].

На геофизической обсерватории «Паратунка» ИКИР ДВО РАН совместно с ИВиС ДВО РАН исследовались атмосферно-электрические эффекты во время прохождения тайфунов, гроз, землетрясений, прохождения облаков вулканического пепла, Форбуш-понижений и эффектов терминатора, эффектов солнечной и геомагнитной активностей, а также проведены модельные расчёты отклика в приземном электрическом поле на прохождение системы объёмных зарядов простейшей конфигурации, переносимых ветром над идеально проводящей поверхностью [*Чернева, Пономарев, Фирстов, Бузевич 2007; Чернева 2010; Пономарев, Чернева, Фирстов 2011; Чернева, Фирстов 2013; Фирстов, Акбашев, Холзворт, Чернева, Шевцов 2017; Кузнецов, Чернева, Дружин 2007; Кузнецов, Чернева 2008; Смирнов, Михайлова, Капустина 2013; Смирнов 2014; Смирнов, Михайлова, Капустина 2014; Михайлова, Капустина, Смирнов 2014*].

В целом, на настоящее время проведены исследования влияния различных природных факторов на электродный слой во многих регионах земного шара, однако полученные результаты дают лишь общие представления об особенностях изменения атмосферно-электрических параметров под воздействием облачности и атмосферных явлений, поскольку рассчитаны на основе $\nabla\phi$ с низким временным разрешением или по недостаточно точным методикам привязки конкретных атмосферных условий. Недостаточно исследовано воздействие облаков *Cb* и сопутствующих атмосферных явлений на состояние электродного слоя, характеризующиеся наиболее сложным откликом.

1.2. Экспериментально-измерительный комплекс ИМКЭС СО РАН

Для решения поставленных задач требуется аппаратура, позволяющая измерять атмосферно-электрические и метеорологические параметры с высоким временным разрешением и в режиме непрерывного мониторинга.

Мониторинг метеорологических (температуры воздуха, атмосферного давления, относительной влажности, скорость и направление ветра, температуры поверхности почвы и на серии глубин), актинометрических (суммарной солнечной и фотосинтетически активной радиации) и атмосферно-электрических величин (градиента потенциала электрического поля и полярных электрических проводимостей), а также уровня гамма-фона на геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН проводится с помощью автоматизированной метеорологической информационно-измерительной системы (АМИИС), разработанной в лаборатории физики климатических систем ИМКЭС Ипполитовым И. И., Золотовым С. Ю, Смирновым С. В., Нагорским П.М. В качестве измерителя градиента потенциала электрического поля атмосферы ($\nabla\phi$) использовался датчик «Поле-2», полярных электропроводности воздуха (λ_{\pm}) – «Электропроводность-2». Атмосферное давление измерялось автоматическим датчиком Motorola MPX4115AP, а температура воздуха и относительная влажность – Vaisala HMP-45D. Скорость и направление ветра фиксировались с помощью анеморумбометра М-63М. Приходящая суммарная солнечная радиация измерялась пиранометром Kipp & Zonen CM-11, а фотосинтетически активная радиация – фотометром NILU-UV-6T. Мощность дозы γ -излучения регистрировалась детектором ИРФ-3Т, расположенным внутри помещения, которое находится непосредственно под измерительной площадкой. Такт съема данных до октября 2007 г. составлял 1 мин, а с октября 2007 г. уменьшен до 30 с.

Данные мониторинга, получаемые АМИИС, хранятся на сервере и могут быть визуализированы и извлечены за любой период с помощью специального программного обеспечения, разработанного в ИМКЭС СО РАН [[Золотов 2003](#); [Золотов, Додолин 2010](#)] (рис. 1.1).

а

Автоматизированная метеорологическая информационно-измерительная система

Выбор данных | Результаты | График | Сохранить результаты

Только текущие значения

3 июля 2016

3-июл-2016	Температ...	Давление ...	Относите...	Скорость ...	Направле...	Напряж. э...	Электроп...	Электроп...	Уровень р...	Плотност...
00:00:00	15.9	977.4	91.5	1.4	197	-100	-2.631e-15	1.296e-14	8.6	0
00:00:30	15.9	977.4	91.5	1.2	175	-100	-2.022e-15	1.274e-14	7.9	0
00:01:00	15.9	977.4	91.5	0.6	Штиль	-100	-2.770e-15	1.302e-14	9.3	0
00:01:30	15.9	977.4	91.5	0.8	Штиль	-100	-3.158e-15	1.346e-14	8.6	0
00:02:00	15.9	977.5	91.5	2.0	212	-94	-2.022e-15	1.310e-14	8.1	0
00:02:30	15.9	977.4	91.5	1.1	207	-88	-2.604e-15	1.296e-14	7.4	0
00:03:00	15.9	977.4	91.5	0.7	Штиль	-76	-2.908e-15	1.379e-14	6.7	0
00:03:30	15.9	977.2	91.5	0.9	Штиль	-76	-2.133e-15	1.241e-14	8.3	0
00:04:00	15.9	977.5	91.6	1.1	198	-71	-2.465e-15	1.296e-14	9.0	0
00:04:30	15.9	977.4	91.6	1.4	187	-76	-2.299e-15	1.294e-14	8.6	0
00:05:00	15.9	977.4	91.6	1.0	Штиль	-71	-1.745e-15	1.269e-14	8.6	0
00:05:30	15.9	977.4	91.6	1.4	186	-65	-1.745e-15	1.249e-14	6.9	0
00:06:00	15.9	977.4	91.6	1.1	187	-59	-1.579e-15	1.241e-14	8.1	0
00:06:30	15.9	977.4	91.6	1.3	210	-53	-1.911e-15	1.258e-14	8.3	0
00:07:00	15.9	977.5	91.6	1.0	198	-41	-1.413e-15	1.202e-14	7.6	0
00:07:30	15.9	977.5	91.6	1.3	204	-24	-1.690e-15	1.219e-14	6.5	0
00:08:00	15.9	977.4	91.6	1.3	189	-18	-2.798e-15	1.274e-14	7.6	0
00:08:30	15.9	977.4	91.6	1.1	188	-24	-1.800e-15	1.208e-14	8.8	0
00:09:00	15.9	977.4	91.6	1.7	205	-29	-1.967e-15	1.183e-14	7.4	0
00:09:30	15.9	977.3	91.6	0.4	Штиль	-24	-1.385e-15	1.186e-14	8.3	0
00:10:00	15.9	977.3	91.6	1.1	198	-24	-1.745e-15	1.244e-14	8.3	0
00:10:30	15.9	977.3	91.6	1.2	207	-12	-1.468e-15	1.150e-14	8.6	0
00:11:00	15.9	977.3	91.6	1.0	184	-12	-1.219e-15	1.208e-14	8.1	0
00:11:30	15.9	977.3	91.6	2.0	207	-6	-2.271e-15	1.246e-14	11.1	0
00:12:00	15.9	977.4	91.6	2.1	213	-6	-1.828e-15	1.202e-14	8.8	0
00:12:30	16.0	977.4	91.6	1.9	206	0	-2.188e-15	1.177e-14	7.4	0
00:13:00	15.9	977.3	91.6	2.1	196	0	-1.573e-15	1.157e-14	8.3	0

100%

Получить данные

б



Рисунок 1.1. – Графическая оболочка программы для визуализации и извлечения данных АИИС: *а* – вывод результатов в виде таблицы, *б* – визуализации данных в виде графика.

Типичный пример согласованных вариаций градиента потенциала электрического поля ($\nabla\phi$) и полярных электропроводностей (λ_{\pm}) под воздействием мощной конвективной облачности, измеренных АИИС, представлен на рис. 1.2.

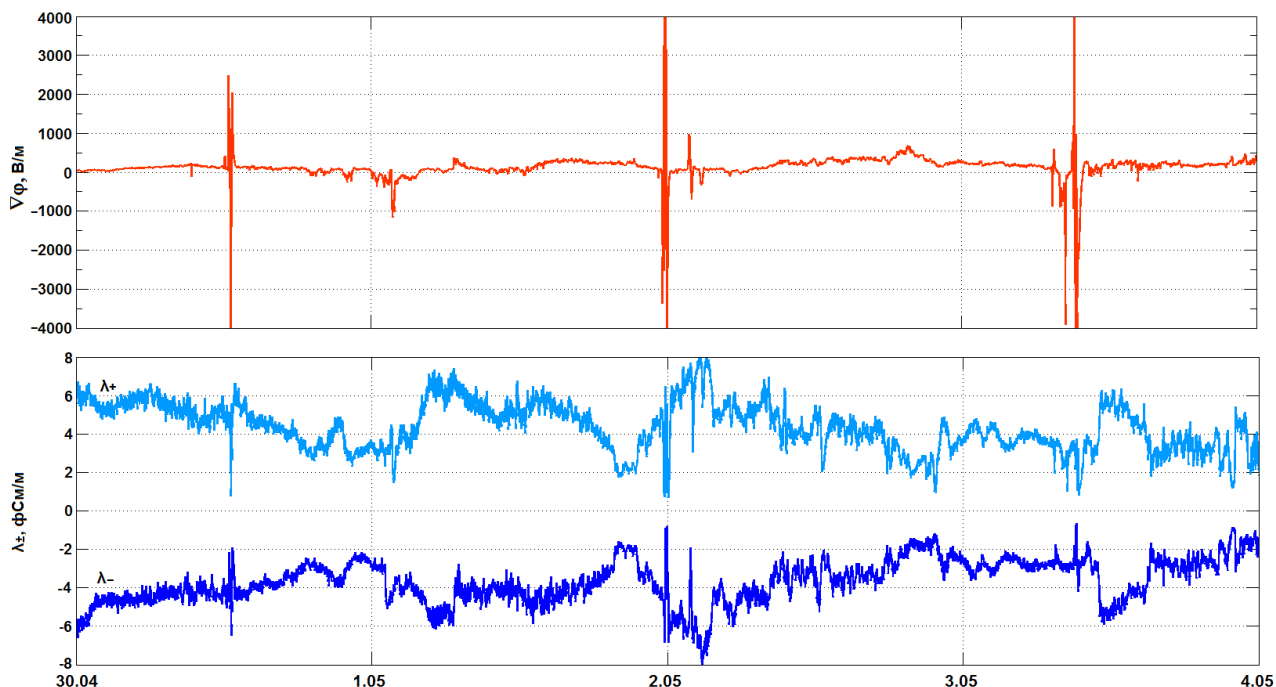


Рисунок 1.2. – Пример согласованных вариаций градиента потенциала электрического поля ($\nabla\phi$) и полярных электропроводностей (λ_{\pm}) под воздействием мощной конвективной облачности и сопутствующих явлений.

Параллельно, измерения основных метеопараметров и характеристик турбулентности с тактом в 1 минуту ведутся с помощью ультразвуковой метеостанции АМК-3, представляющей собой новое поколение метеорологических приборов (разработка ИМКЭС СО РАН, [Азбукин, Богушевич, Кобзев, Корольков, Тихомиров, Шелевой 2012]).

Учитывая, что одним из возможных видов воздействия мощной конвективной облачности на электрическое поле приземного слоя и состояние электродного слоя являются осадки в жидкой и твердой фазах, данные мониторинга были дополнены текущими данными о выпадающих осадках. Эти данные были получены с помощью двух типов осадкомеров: челночного типа, позволяющего определить интенсивность осадков, и оптического осадкомера,

позволяющего зарегистрировать не только интенсивность, но и распределение частиц осадков по размерам и их тип (разработка ИМКЭС СО РАН, [Кальчихин, Кобзев, Корольков, Тихомиров 2011; Кальчихин, Кобзев, Корольков, Тихомиров 2015; Кальчихин, Кобзев, Корольков, Тихомиров 2015; Kalchikhin, Kobzev, Korolkov, Tikhomirov 2016]).

Расположение приборов на геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН изображено на рис. 1.3.

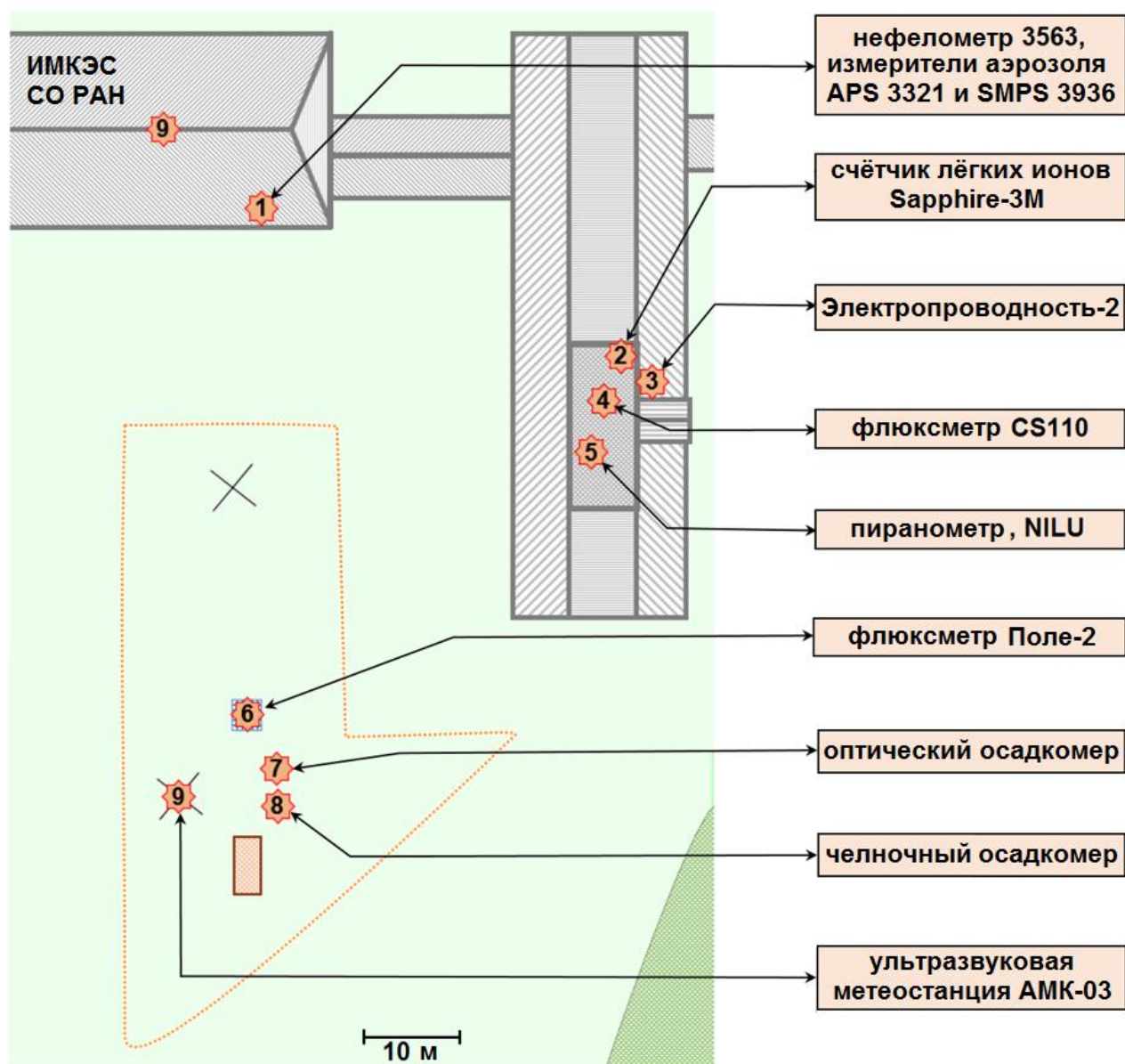


Рисунок 1.3. – Схема расположения измерительной аппаратуры ИМКЭС СО РАН

1.3. Метеорологическое обеспечение мониторинга электрофизических процессов в приземной атмосфере

Для детального описания метеорологических условий, соответствующих исследуемым электрофизическим процессам в приземной атмосфере, использовались данные, зафиксированные наблюдателями-метеорологами геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН.

Поскольку измерения, проводимые в одной точке, не могут дать исчерпывающей физической картины, протекающей в электродном слое под воздействием таких сложных природных явлений как прохождение мощной конвективной облачности, то данные мониторинга, зарегистрированные в геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН, были дополнены данными Томской гидрометеорологической станции [*ВНИИГМИ-МЦД*; *Расписание погоды. rp5.ru*]. Геофизическая обсерватория ИМКЭС СО РАН и ГМС Томск (29430), располагаются соответственно на восточной и южной окраинах г. Томск, расстояние между ними составляет ~ 6 км (рис. 1.3).

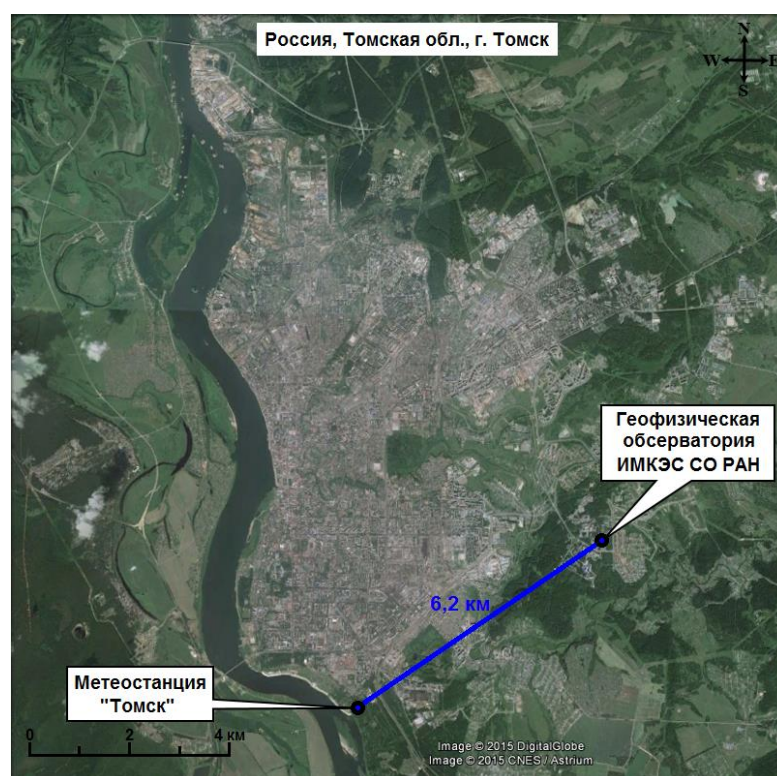


Рисунок 1.3 – Взаимное расположение ИМКЭС СО РАН и ГМС Томск.

Для оценки состояния атмосферы над всей территорией юга Западной Сибири использовались приземные синоптические карты с фронтальным анализом [ММФ ТГУ; Западно-Сибирское УГМС] (рис. 1.4).

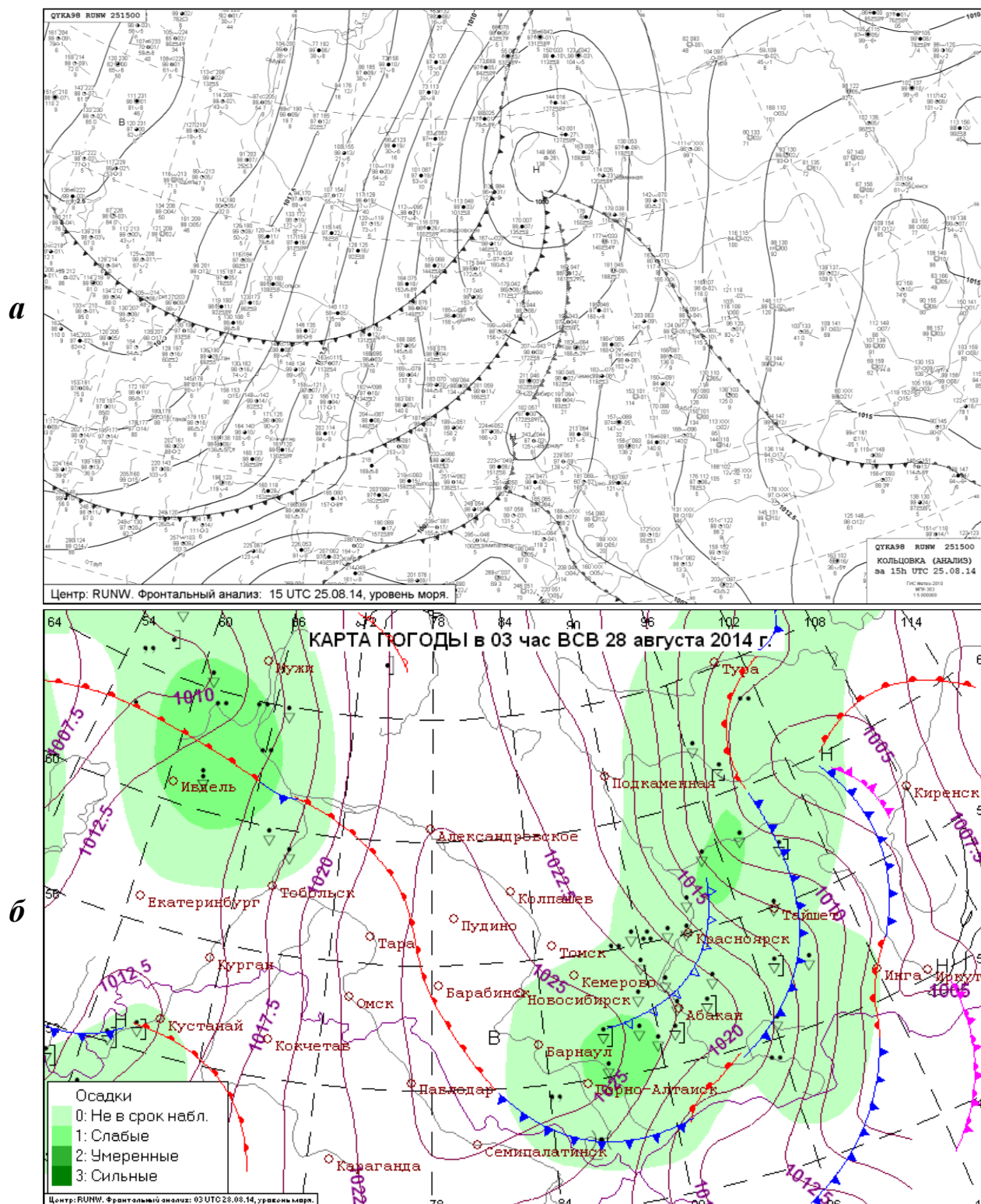


Рисунок 1.4. – Примеры синоптических карт с фронтальным анализом, полученные из:

а – [ММФ ТГУ], б – [Западно-Сибирское УГМС].

1.4. Данные спутникового зондирования о структуре и степени развития мощной конвективной облачности

Еще одним каналом, позволяющим получить необходимую дополнительную информацию для решения задач, связанных с поставленной проблемой, являются тематически обработанные данные дистанционного зондирования Земли.

Для оценки облачного покрова над исследуемой территорией использовались данные радиометра MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) [<https://earthdata.nasa.gov/labs/worldview/>], являющегося одним из ключевых приборов, установленных на борту американских спутников TERRA (на орбите с 1999 г.) и AQUA (с 2002 г.), которые осуществляют исследования Земли из космоса по программе EOS (Earth Observing System) национального аэрокосмического агентства (NASA) США. Сканирующий радиометр MODIS имеет 36 измерительных каналов в диапазоне длин волн от 0,415 и 14,235 мкм и с пространственным разрешением: 250 м (0.65 и 0.86 мкм), 500 м (0.47, 0.56, 1.24, 1.63 и 2.13 мкм) и 1000 м (29 каналов) [Qu, Gao, Kafatos, Murphy, Salomonson 2006].

На основе 1 (0.65 мкм), 4 (0.56 мкм) и 3 (0.47 мкм) каналов MODIS создаются RGB-композиции (True-color composite, Collection 06, Level-1B), представляющие собой псевдореальные изображения облачности и подстилающей поверхности с разрешением 250 м [Qu, Gao, Kafatos, Murphy, Salomonson 2006; MODIS Atmosphere; EOSDIS Worldview; LAADS Web]. RGB-изображения MODIS (рис. 1.5б) позволяют оценить расположение и форму облачных массивов.

По данным видимого и инфракрасных каналов MODIS изготавливаются облачные продукты (MODIS Cloud Products, Collection 06, Level-2): оптическая толщина облаков (Cloud Optical Thickness), эффективный радиус облачных частиц (Cloud Effective Radius), интегральное содержание облачной воды в столбе (Cloud Water Path), давление на вершине облаков (Cloud Top Pressure), температура на вершине облаков (Cloud Top Temperature), доля облаков (Cloud Fraction) и фазовое

состояние облачных частиц (Cloud Phase Infrared). Изображения оптической толщины облаков, эффективного радиуса облачных частиц и интегрального содержания облачной воды строятся по данным только дневных пролётов спутников Terra и Aqua и имеют пространственное разрешение 1×1 км, а изображения давления и температура на вершине облаков, доли облаков, и фазового состояния облачных частиц – по данным, как дневных, так и ночных пролётов спутников и имеют разрешение 5×5 км [Qu, Gao, Kafatos, Murphy, Salomonson 2006; Platnick, King, Ackerman, Menzel, Baum, Riedi, Frey 2003; MODIS Atmosphere; EOSDIS Worldview; LAADS Web].

Для исследуемой проблемы наиболее важна, из описанных выше продуктов, оптическая толщина облаков (рис. 1.5б), являющаяся мерой коротковолновой солнечной радиации, поглощённой и рассеянной при прохождении через облака, которая в свою очередь определяется вертикальной мощностью облачности. Таким образом, данный продукт позволяет оценивать пространственную структуру облачных массивов и выделить кучево-дождевую облачность, имеющую максимальную из всех форм облачности вертикальную мощность.

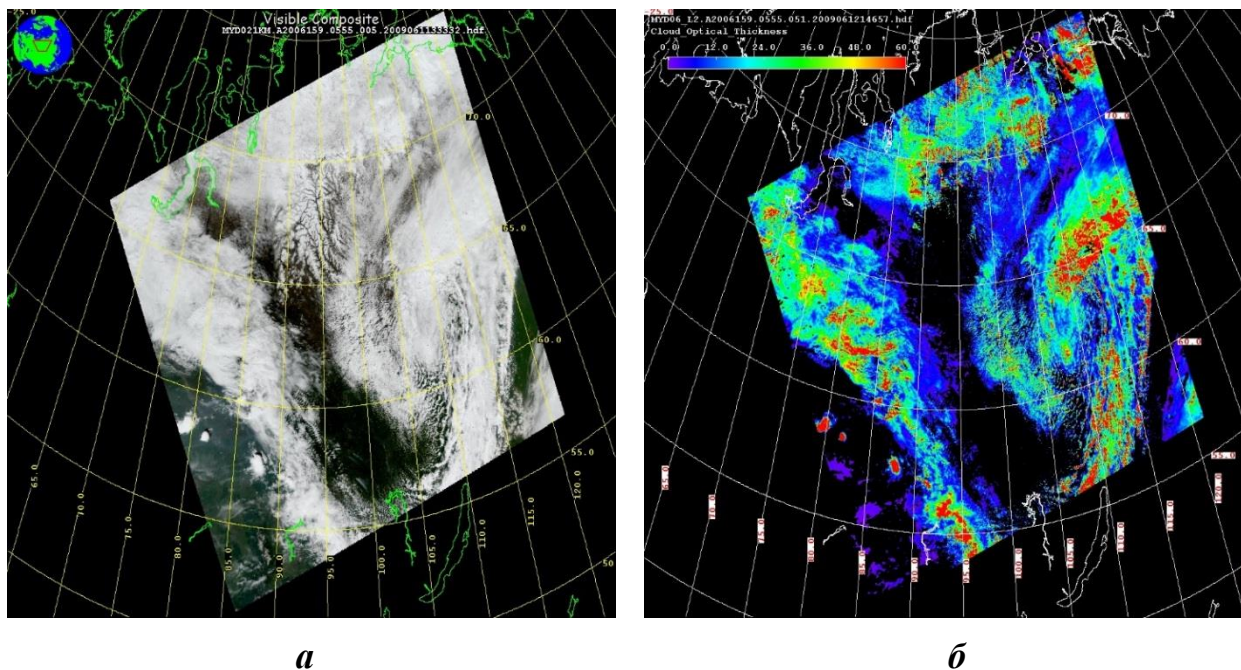


Рисунок 1.5. – Примеры RGB-изображения (а) и изображения оптической толщины (б) облачности по данным MODIS Terra за 5:55 UTC 8.06.2006.

1.5. ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ

В результате анализа было установлено, что к настоящему времени недостаточно исследованы электрофизические процессы в приземном слое под воздействием облаков, особенно кучево-дождевых (грозовых), и сопутствующих им атмосферных явлений. Результаты экспериментального исследования изменчивости $\nabla\varphi$ под воздействием облачности и атмосферных явлений [Дзали 1961; Понов 2008], описывают лишь средние значения и диапазон изменения $\nabla\varphi$, не говоря ни чего о его динамике. Выделенные форм вариаций электрического поля под воздействием *Cb* [Филунов 1961; Филунов 1974; Bennett, Harrison 2008; Toropov, Kozlov, Mullayarov, Starodubtsev 2013] проведено на основе небольшого числа случаев и имеет лишь качественный характер, не давая чётких количественных критериев. При моделировании отклика в электрическом поле от кучево-дождевых облаков в пункте регистрации при близком прохождении *Cb* не был учтен наклон электрической структуры *Cb*, как правило, наблюдаемый в реальности, и (или) влияние нижнего положительного заряда [Тверской 1949; Красногорская 1972; Rakov, Uman 2003; Чернева, Пономарев, Фирстов, Бузевич 2007; Bennett, Harrison 2008].

Таким образом, для детального понимания динамики атмосферно-электрических параметров в электродном слое атмосферы необходимо постановка и решение следующих задач:

- разработать методологию автоматизированной обработки вариаций $\nabla\varphi$ при прохождении кучево-дождевого облака, позволяющую оценить структуру вариаций $\nabla\varphi$ и классифицировать форму отклика на прохождение *Cb*.
- оценить изменчивость $\nabla\varphi$ электрического поля под воздействием облаков основных форм в тёплый и холодный сезоны года и сравнить воздействие на электрическое поле приземной атмосферы различных форм облачности;

- проанализировать экспериментально наблюдаемую динамику $\nabla\varphi$ и полярных электропроводностей под воздействием *Cb* и сопутствующих атмосферных явлений (по метеоданным и данным спутникового зондирования);
- оценить временную структуру $\nabla\varphi$ при прохождении *Cb* и сопутствующих атмосферных явлений, а также исследовать распределение значений её численных параметров;
- проанализировать на основе модельных расчётов динамику концентрации лёгких ионов, плотности объёмного заряда и полярных электропроводностей под воздействием *Cb* и ливневых осадков;
- классифицировать формы вариаций $\nabla\varphi$ при воздействии кучево-дождевых облаков и сопутствующих им явлений на приземный слой атмосферы на основе натурных измерений;
- оценить на основе математического моделирования пространственное распределение электрического поля и вариации $\nabla\varphi$ в пункте наблюдения под воздействием на приземный слой модельного кучево-дождевого облака, с учётом современных знаний об электрической структуре *Cb*;
- провести обобщение и систематизацию форм вариаций $\nabla\varphi$ электрического поля при воздействии на приземный слой изолированных кучево-дождевых облаков в зависимости от стадии развития конвективной ячейки и наклона облачного диполя.

2. ОЦЕНКА ИЗМЕНЧИВОСТИ $\nabla\varphi$ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ОБЛАКОВ ОСНОВНЫХ ФОРМ

Основными вопросами, рассмотренными в этой главе, являются: разработка методики привязки вариаций градиента потенциала электрического поля к воздействию конкретных форм облачности, оценки изменчивости $\nabla\varphi$ в приземном слое облаков основных форм, результаты сравнительного анализа эффективности воздействия облаков на состояние электродного слоя, а также формулирование методики выявления кучево-дождевых (грозовых) облаков на основе значений $\nabla\varphi$ в приземном слое. Основные результаты опубликованы в [Нагорский, Морозов, Смирнов, Пустовалов 2013; Пустовалов, Нагорский // *Оптика атмосферы и океана*, 2016].

2.1. Методика выделения интервалов наблюдений во время конкретных форм облачности

Для исследования электрофизических процессов под влиянием облачности и атмосферных явлений необходима точная временная привязка измеренных вариаций градиента потенциала приземного электрического поля ($\nabla\varphi$) к конкретным атмосферным условиям.

Для выявления характерных черт временной изменчивости $\nabla\varphi$ при безоблачной погоде, а также при прохождении перистых (*Сi*), перисто-кучевых (*Сс*), перисто-слоистых (*Сs*), высококучевых (*Ac*), высокослоистых (*As*), кучевых (*Сu*), слоисто-кучевых (*Sc*), слоистых (*St*) и слоисто-дождевых (*Ns*) облаков (кроме *Cb*) были использованы данные, полученные в 2006–2017 гг. на геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН, а также данные об облачности и атмосферных явлениях в стандартные метеорологические сроки на ГМС «Томск». Для этого из данных метеостанции «Томск» за исследуемый период были отобраны

метеорологические сроки отдельно за тёплый (май-сентябрь) и холодный (ноябрь–март) сезоны года, характеризующиеся:

а) отсутствие облачности (ясно) или наличие облаков: Ci , Cc , Cs , Ac , As , Cu , Sc , St и Ns для соответствующих категорий отбора;

б) наличие морозящего дождя в случае St и обложного дождя/снега в случае Ns ;

в) отсутствие Cb , ливневых осадков и гроз;

г) отсутствие тумана, дымки, мглы и дыма.

Общее количество отобранных случаев с интервалами изменения $\nabla\varphi$ по каждой из категорий отбора представлено в табл. 2.1.

Таблица 2.1. – Количество отобранных случаев с изменением $\nabla\varphi$ во время ясной погоды и при прохождении облаков: Ci , Cc , Cs , Ac , As , Cu , Sc , St и Ns

Формы облаков	Ясно	Ci	Cc	Cs	Ac	As	Cu	Sc	St	Ns
Теплый сезон	852	937	17	47	383	52	448	714	65	61
Холодный сезон	899	645	9	81	49	18	–	178	88	343

Для дальнейшего анализа изменчивости значений градиента потенциала приземного электрического поля при прохождении облаков отмеченных выше форм в отобранные сроки выделялись участки данных $\nabla\varphi$ в интервалах времени ± 30 минут относительно срока. Дополнительно, чтобы исключить влияние на статистические оценки изменчивости $\nabla\varphi$ во время случаев каждой из категорий не учтённого прохождения Cb (например, «затопленной» конвекции), отобранные случаи проходили фильтрацию, в ходе которой выбраковывались случаи с $СКО > 1000$ В/м.

Во время оценки изменчивости $\nabla\varphi$ при прохождении кучево-дождевых облаков дополнительно были использованы следующие данные:

- кольцевые карты погоды с фронтальным анализом;
- данные спектрорадиометра MODIS спутников Aqua и Terra для случаев прохождения различных *Cb* вблизи местного полудня.

Критерии отбора при прохождении кучево-дождевых облаков из данных метеостанции «Томск» за исследуемый период были отобраны значения $\nabla\varphi$ в метеорологические сроки отдельно за тёплый (май-сентябрь) и холодный (ноябрь–март) сезоны года были следующие:

- а) наличие кучево-дождевых облаков;
- б) наличие ливневых осадков;
- в) отсутствие слоисто-дождевых (*Ns*), высокослоистых (*As*) и слоистых (*St*) облаков;
- г) отсутствие обложных, морозящих, жидких и смешанных ливневых осадков;
- д) отсутствие дымки, тумана и смога.

Допускалось наличие облаков *Cu*, *Sc*, *Ac* и *Cc*, сопутствующих кучево-дождевым облакам и являющихся их предвестниками, а также *Ci* и *Cs*, формирующих «наковальню» *Cb*. Эти формы облачности, как правило, не дают осадков, а объёмные заряды в облаках этих форм на несколько порядков меньше чем в кучево-дождевых [Имянитов, Чубарина 1965; Имянитов, Чубарина, Шварц 1971]. Поэтому искажающее влияние облаков этих форм (по сравнению с кучево-дождевыми) на вариации $\nabla\varphi$ у поверхности земли предполагалось несущественным.

В исходных данных градиента потенциала приземного электрического поля в отобранные сроки с кучево-дождевой облачностью определялись участки с интенсивными изменениями величины и знака $\nabla\varphi$, связанные с прохождением *Cb*. При этом учитывалось, что интервал времени между отдельными событиями должен составлять не менее 30 минут. Всего отобрано 463 и 210 случаев вариаций $\nabla\varphi$ при прохождении *Cb* в тёплый и холодный сезоны года.

Отобранные случаи с наличием кучево-дождевых облаков в теплое полугодие дополнительно делились на сроки с кучево-дождевыми облаками в ливневой и грозовой стадии. Критерием для разделения являлось наличие или отсутствие зарегистрированной грозы на станции или вблизи неё. Всего отобран 401 случай ливневых *Cb* и 62 случая грозowych *Cb*.

В результате предварительного отбора были выявлены случаи прохождения над пунктом мониторинга облаков конкретной формы:

- в виде изолированных одноячейковых и мультячейковых облаков; ;
- в виде организованных скоплений кучево-дождевых облаков (линий шквалов, гряд кучево-дождевых облаков, мезомасштабных конвективных комплексов и др. [*Hobbs 1978; Maddox 1980; Вельтищев 1988; Houze 1993; Вельтищев 2006; Bluestein 2013; Houze 2014*]).

Однако не учитывались случаи прохождения *Cb* в системе облаков *Ns–As* («затопленная конвекция»), поскольку в таких ситуациях имело место наложение «откликов» напряжённости электрического поля от различных типов облаков. Такие условия наблюдались при прохождении холодных фронтов I рода и фронтов окклюзии, а иногда и при прохождении тёплых фронтов в тёплый период года [*Шакина 1985; Шметер 1987; Bluestein 1992; Bluestein 1993; Houze 1993; Шакина 1990; Шметер 1990*].

На следующем этапе обработки проводились задание временных границ отрезков данных $\nabla\varphi$, используемых в статистическом анализе, во время отобранных событий с *Cb*. Для этой цели из данных $\nabla\varphi$ во время *Cb*, выделялись отдельные «структурные элементы» вариаций – возмущения (d_n), имеющие как положительную, так и отрицательную полярности, в качестве которых принимались временные отрезки, со значениями $\nabla\varphi < B_1$ и $\nabla\varphi > B_2$ (рис. 2.1).

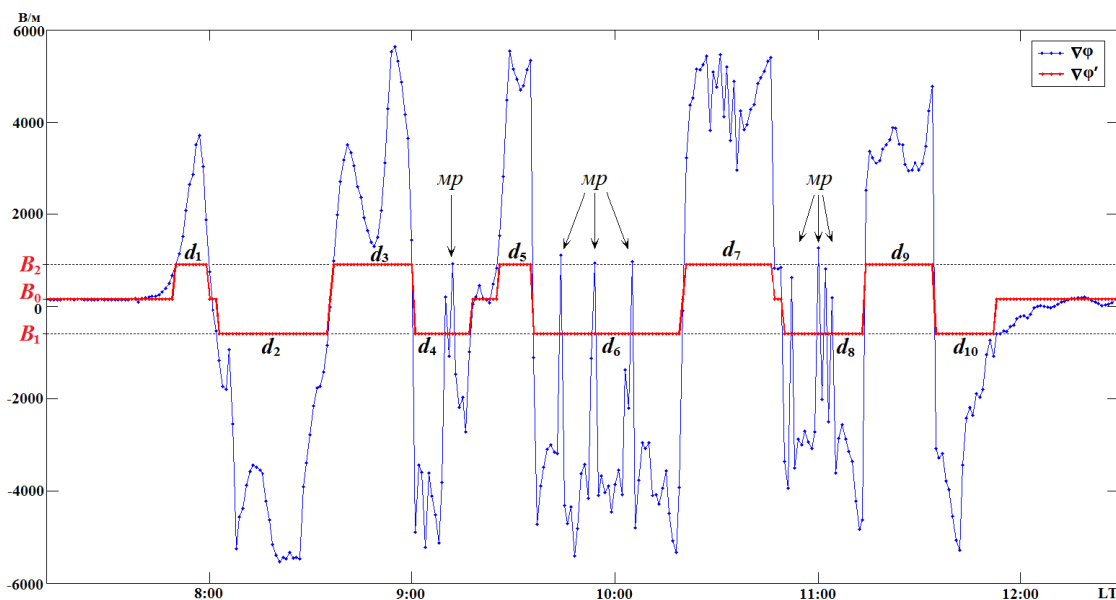


Рисунок 2.1. – Визуализация методики обработки данных $\nabla\varphi$ при прохождении Cb ($\nabla\varphi$ и $\nabla\varphi'$ – исходные и модифицированные значения; d_1, d_2, d_n – возмущения $\nabla\varphi$)

Граничные значения B_1, B_2 определялись как отклонения от значений $\nabla\varphi$ характерных для невозмущённой атмосферы ($B_0 \approx 150$ В/м) на величину s равную 450 В/м для холодного сезона и 750 В/м для тёплого, как $B_1 = B_0 - s, B_2 = B_0 + s$, где s – эмпирический коэффициент, позволяющей отделиться вариации $\nabla\varphi$, обусловленные Cb , от влияния других сопутствующих форм облачности.

В ходе обработки (рис. 2.1) исходные значения $\nabla\varphi$ заменялись модифицированными значениями $\nabla\varphi'$, равными B_1, B_0 или B_2 (B_1 при $\nabla\varphi \leq B_1, B_0$ при $B_1 \leq \nabla\varphi \leq B_2$ и B_2 при $\nabla\varphi \geq B_2$, соответственно). Одиночные выбросы $\nabla\varphi$, обусловленные откликом на близкие молниевые разряды, восстанавливались до соседних значений $\nabla\varphi$ и из дальнейшей обработки исключались. Предложенная методика позволила стандартизировать процедуру выявления и разграничения структурных элементов вариаций $\nabla\varphi$.

Для статистического анализа изменчивости значений градиента потенциала приземного электрического поля при прохождении кучево-дождевых облаков отбирались данные $\nabla\varphi$ в интервалах времени между началом первого (d_1) и окончанием последнего возмущения (d_n , где n – количество возмущений).

2.2. Оценки изменчивости $\nabla\varphi$ под воздействием облачности

Для грубой оценки изменчивости $\nabla\varphi$ под воздействием основных форм облаков и сопутствующих явлений проведён статистический анализ значений градиента потенциала электрического поля во время ясной погоды и при прохождении следующих видов облаков: Ci , Cc , Cs , Ac , As , Cu , Sc , St , Ns и Cb (табл. 2.2).

Таблица 2.2. – Средние значения градиента потенциала электрического поля во время случаев безоблачной погоды и случаев прохождения облаков основных форм

сезон \ форма облаков		Ясно	Ci	Cc	Cs	Ac	As	Cu	Sc	St	Ns
Тёплый сезон	среднее	232	246	393	238	280	321	255	230	189	-42
	СКО	257	269	514	211	302	285	346	451	422	886
Холодный сезон	среднее	293	312	240	340	346	287	–	239	182	171
	СКО	238	299	243	286	265	219	–	227	184	318

Поскольку, согласно [Шакина 1985; Шметер 1987; Bluestein 1993; Houze 1993; Шакина 1990; Шметер 1990], кучево-дождевые облака могут развиваться в системах слоистообразной и волнистообразной облачности и быть «замаскированными» для наблюдений с земли, имеется вероятность не обнаружения наблюдателем ГМС кучево-дождевых облаков в фоновой облачности. Кроме того, в связи с небольшим пространственно-временным масштабом Cb , данная форма облачности может пройти незамеченной между стандартными сроками, даже при безоблачной погоде в последующий срок. Для исключения случаев вариаций $\nabla\varphi$ под воздействием неучтённой «затопленной конвекции» в фоновых слоистообразных и волнистообразных облаках осуществлялась фильтрация отобранных случаев с конкретными формами

облаков, в ходе которой исключались случаи при которых СКО значений $\nabla\varphi$ превышало 1000 В/м.

Выполнен статистический анализ значений градиента потенциала электрического поля во время отфильтрованных (СКО случая <1000 В/м) случаев ясной погоды и случаев прохождения *Ci*, *Cc*, *Cs*, *Ac*, *As*, *Cu*, *Sc*, *St*, *Ns* и *Cb* облаков (табл. 2.3). Данные оценки являются более адекватными, поскольку в них практически исключено влияние неотмеченного в ходе стандартных метеорологических измерений на метеостанции в срок и между сроками близкого прохождения кучево-дождевых облаков на фоне облачности анализируемых форм.

Таблица 2.3 – Средние значения градиента потенциала электрического поля во время просеянных случаев (СКО случая <1000 В/м) безоблачной погоды и случаев прохождения облаков основных форм

сезон \ форма облаков		Ясно	<i>Ci</i>	<i>Cc</i>	<i>Cs</i>	<i>Ac</i>	<i>As</i>	<i>Cu</i>	<i>Sc</i>	<i>St</i>	<i>Ns</i>
Тёплый сезон	среднее	232	246	354	238	284	321	259	226	216	-46
	СКО	257	256	222	211	270	285	279	246	292	425
Холодный сезон	среднее	293	312	240	340	346	287	–	244	182	169
	СКО	240	299	243	286	265	219	–	201	184	311

При сравнений статистических оценок для данных $\nabla\varphi$ во время нефильтрованных (табл. 2.2) и фильтрованных (табл. 2.3), отмечено сильное завышение средних значений $\nabla\varphi$ при прохождении облаков *Ns*, *St* и *Cc* и сильное завышение СКО значений $\nabla\varphi$ при прохождении облаков *Ns*, *St*, *Sc*, *Cu*, *Ac* и *Cc*.

Анализ результатов позволил сделать следующие выводы:

– средние значения $\nabla\varphi$ при безоблачной погоде в тёплый и холодный сезоны года для территории юга Западной Сибири составляют 230 и 290 В/м, соответственно.

– среднеквадратичные отклонения значений $\nabla\varphi$ во время облаков нижнего и среднего яруса, и вертикального развития в тёплый сезон существенно превосходят аналогичные значения для холодного сезона, в то время как для облаков верхнего яруса отмечается обратный эффект.

Перейдем к анализу данных, полученных при воздействии *Cb* на состояние электродного слоя. Рассмотрим статистические характеристики (табл. 2.4) и гистограмму распределения (рис. 2.2) значений $\nabla\varphi$ при прохождении кучево-дождевых облаков и сопутствующих им атмосферных явлений в тёплый и холодный и сезоны года.

Таблица 2.4 – Статистические характеристики значений $\nabla\varphi$ при прохождении *Cb* в тёплый и холодный и сезоны года

Сезон	Среднее	Медиана	Мода	СКО	Макс.	Мин.
Тёплый	-300	-659	-736	2416	10147	-12206
Холодный	458	624	-706	1346	10159	-10588

Среднее значение $\nabla\varphi$ (табл. 2.4) при прохождении *Cb* и сопутствующих им явлений в холодный сезон составляет ~ 450 В/м, а их среднее квадратическое отклонение (СКО) – 1350 В/м. Отмечено, что в холодный сезон среднее значение $\nabla\varphi$ превышает на ~ 750 В/м аналогичное значение для тёплого сезона и имеет противоположный знак. СКО значений $\nabla\varphi$ в холодный сезон в 1,8 раза меньше, чем в тёплый.

Максимум повторяемости значений $\nabla\varphi$ приходится явлений на интервал 600 – 1000 В/м (рис. 2.2). Кроме того, отмечена вторичная мода в интервале -200 – -600 В/м. При сравнение распределения значений $\nabla\varphi$ в холодный сезон с их распределением в тёплый, выявлено смещение основного моды из области отрицательных значений $\nabla\varphi$ в область положительных.

Во время прохождения кучево-дождевых облаков наблюдаются, как правило, знакопеременные вариации $\nabla\varphi$ средние и медианные значения в целом для облаков *Cb* составляет -300 и -660 В/м соответственно (табл. 2.4).

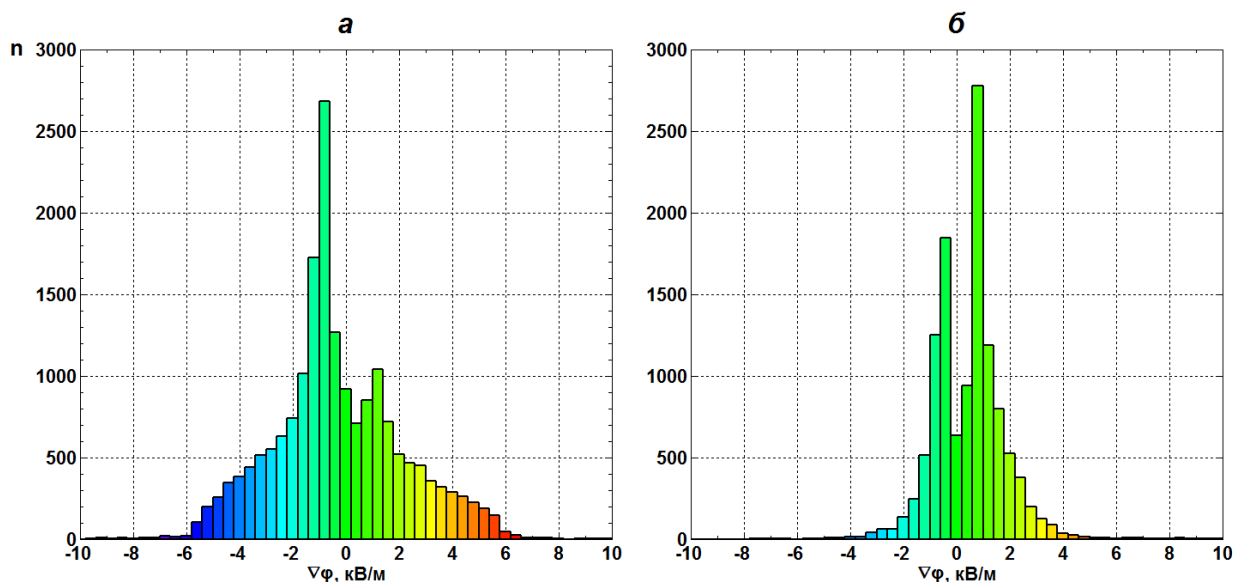


Рис. 2.2. – Гистограмма распределения значений $\nabla\varphi$ при прохождении кучево-дождевых облаков и связанных с ними явлений в тёплый (а) и холодный (б) периоды года.

Для теплого периода года проведён статистический анализ вариаций $\nabla\varphi$ вод воздействием отдельно ливневых и грозовых кучево-дождевых облаков, в ходе которого получена основные статистические характеристики (табл. 2.5) и гистограмма распределения (рис. 2.3) значений $\nabla\varphi$.

Таблица 2.5 – Статистические характеристики значений $\nabla\varphi$ при прохождении кучево-дождевых облаков в целом

Типы <i>Cb</i>	среднее, В/м	медиана, В/м	мода, В/м	СКО, В/м	макс., В/м	мин., В/м
Ливневые <i>Cb</i>	-358	-683	-736	2178	7794	-9338
Грозовые <i>Cb</i>	-136	-224	971	2978	10147	-12206
<i>Cb</i> в целом	-300	-659	-736	2416	10147	-12206

Среднее отклонение значений градиента потенциала во время наличия кучево-дождевых облаков от значений $\nabla\varphi$ в условиях «хорошей погоды» ($\Delta_{Cb} = \nabla\varphi_{(Cb)} - \nabla\varphi_0$) составляет -450 В/м, в то время как максимальные Δ_{Cb} обоих знаков превышают среднее более чем в 20 раз. При кучево-дождевых облаках в ливневой стадии среднее Δ_{Cb} в 1,8 раза больше чем при *Cb* в грозовой стадии, однако

максимальные его значения обоих знаков во время грозовых *Cb* в 1,3 раза больше чем при ливневых.

Согласно рисунку 2.3, в распределениях абсолютных значений $\nabla\varphi$ во время кучево-дождевых облаков в различных стадиях и *Cb* в целом отмечаются две моды, приходящиеся на диапазоны значений от -600 до -1000 и от +1000 до +1400 В/м. Для облаков в ливневой стадии и *Cb* в целом абсолютно доминирует первый максимум распределения (рис. 2.3б), в то время как в случае кучево-дождевых облаков в грозовой стадии обе моды сопоставимы по повторяемости значений и второй максимум распределения даже несколько превосходит первый (рис. 2.3в).

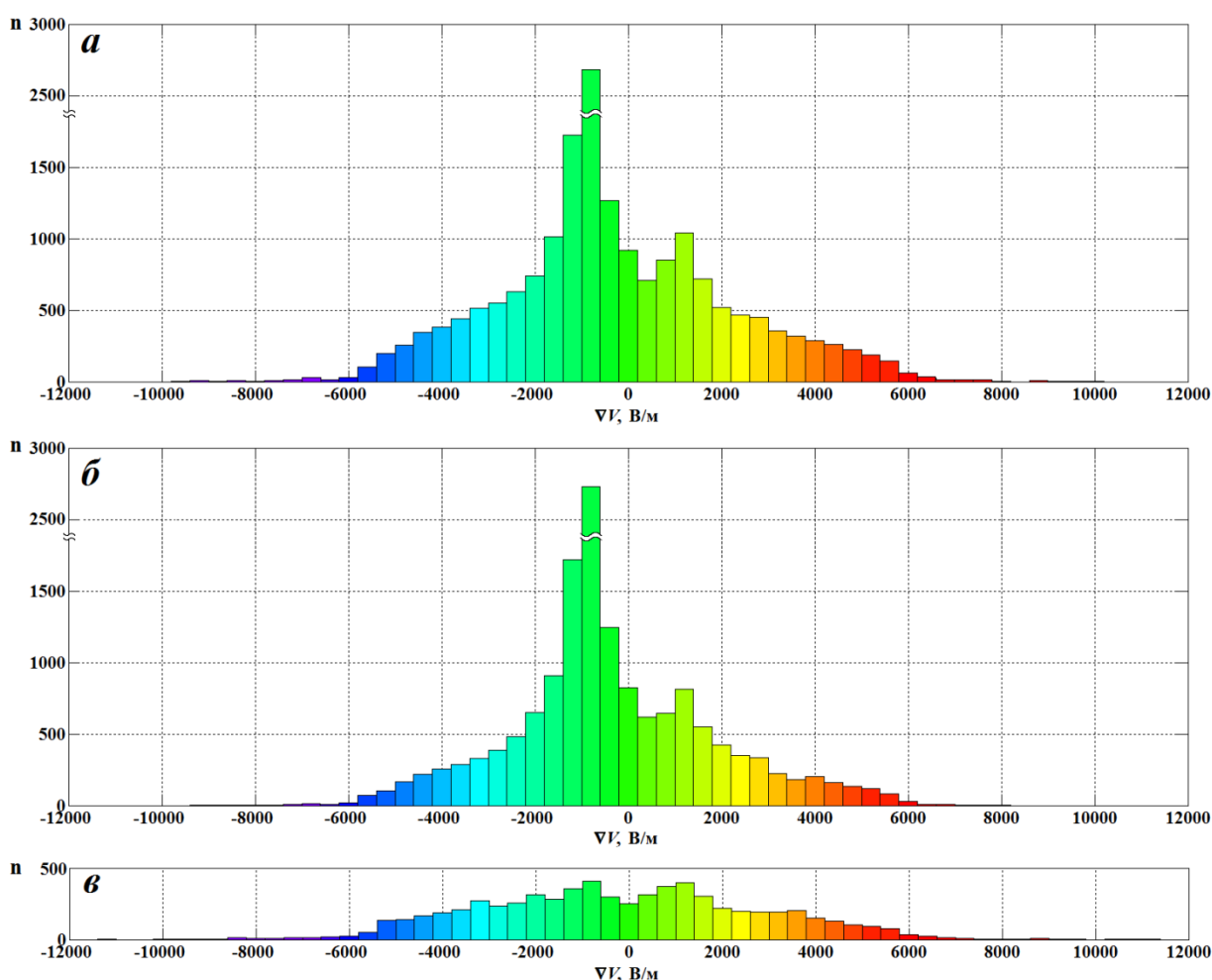


Рис. 2.3. Гистограмма распределения значений $\nabla\varphi$ во время прохождения кучево-дождевых облаков в целом (*a*) и отдельно в ливневой (*б*) и грозовой (*в*) стадиях.

2.3. Сравнительный анализ эффективности воздействия основных форм облачности на состояние электродного слоя

Среднеквадратичные отклонения значений $\nabla\varphi$ при прохождении *Cb* превышают аналогичные значения при других формах облачности в холодный сезон более чем в 4 раза, а тёплый сезон более чем в 5 раз (рис.2.4).

Среднеквадратичные отклонения значений $\nabla\varphi$ во время облаков нижнего и среднего яруса, и вертикального развития в тёплый сезон существенно превосходят аналогичные значения для холодного сезона, в то время как для облаков верхнего яруса отмечается обратный эффект;

Среднее значение $\nabla\varphi$ при прохождении *Cb* в холодный сезон на 750 В/м больше, а СКО в 1,8 раза меньше аналогичных значений для тёплого сезона.

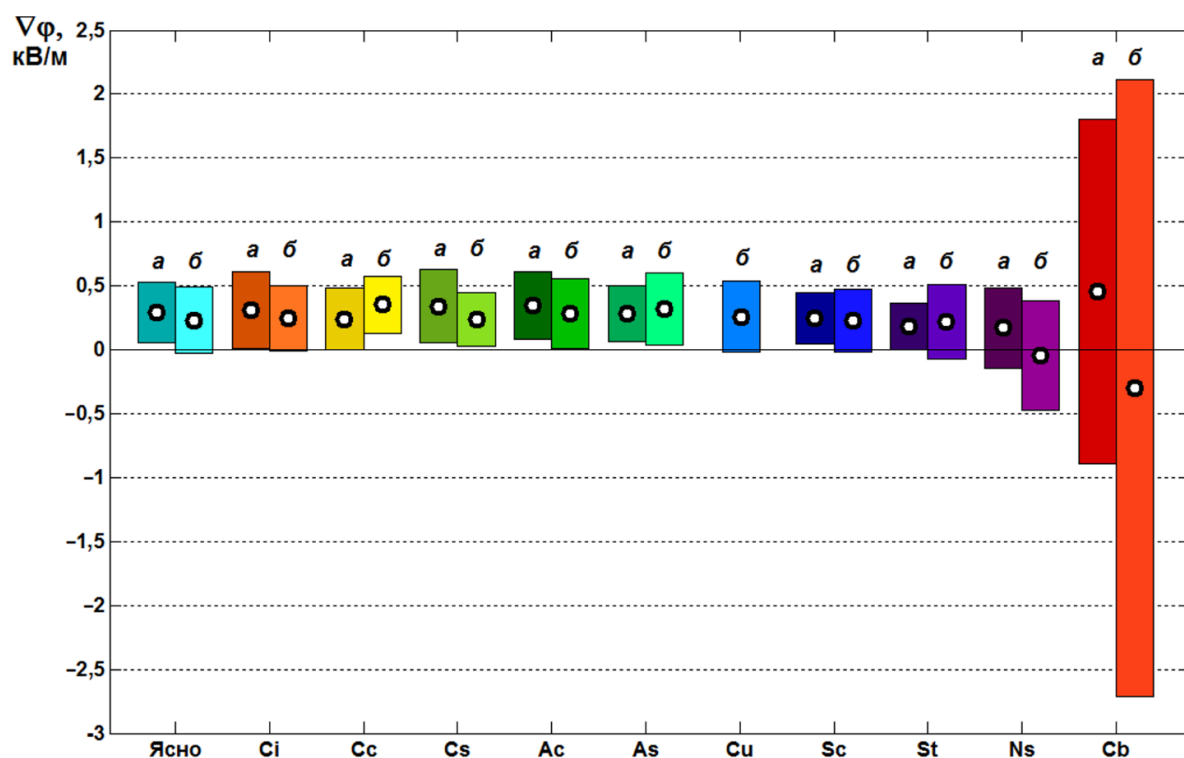


Рисунок 2.4. – Средние значения (кружки) и размах – \pm СКО (столбики) значений $\nabla\varphi$ при прохождении различных форм облачности в холодный (а) и теплый (б) сезоны года. Из случаев прохождения всех форм облачности кроме *Cb* исключены те, во время которых СКО >1000 В/м, что позволило исключить влияние на результаты «затопленной конвекции».

Сравним полученные оценки изменчивости $\nabla\varphi$ во время основных форм облачности с аналогичными оценками, проведёнными на обсерватории университета Рединга (Великобритания) [Bennett 2007; Bennett, Harrison 2007; Bennett 2008] и на станции Воейково атмосферно-электрической сети станций Росгидромета (п. Воейково, Ленинградская область) [Понов 2008].

Сравнение полученных средних значений градиента потенциала электрического поля и их среднеквадратичных отклонений во время слоистообразных и волнистообразных облаков и сопутствующих им явлений, рассчитанных по средниминутным данным $\nabla\varphi$, со средними значениями $\nabla\varphi$ и их СКО в сходных условиях, полученными на основе среднечасовых данных $\nabla\varphi$ на станции Воейково атмосферно-электрической сети станций Росгидромета [Понов 2008], показывает хорошее согласие значений по знаку и абсолютной величины $\nabla\varphi$ в работе относительно результатов текущего исследования. При этом, в случае кучево-дождевых облаков среднее значение и СКО $\nabla\varphi$, полученные в данном исследовании, в несколько раз выше полученных в [Понов 2008]. Отмеченное различие по всей видимости связано с различным периодом осреднения исходных данных. При этом, поскольку среднее время жизни одиночного *Cb* составляет 30–45 минут, период осреднения 1 час является чрезмерно грубым для исследования вариаций $\nabla\varphi$ под воздействием *Cb*.

При сравнении полученных средних и медианных значений и размаха градиента потенциала электрического поля во время безоблачных условий, слоисто-дождевых (обложной дождь/снег) и кучевых облаков *Cb* хорошо согласуются с приближёнными оценками диапазона типичных значений $\nabla\varphi$ и их изменчивости (в %) во время безоблачных континентальных условий, при обложном дожде, обложном снеге и не дающих осадков конвективных облаках, полученными на обсерватории университета Рединга [Bennett 2008]. При этом, среднее значение и медианные $\nabla\varphi$ во время кучево-дождевых облаков, полученные в данном исследовании в несколько раз меньше характерных значений $\nabla\varphi$ во время сильного ливня/грозы, полученных в [Bennett 2008], а

величина изменчивости (в процентах от среднего) значений $\nabla\varphi$ под воздействием *Cb* по результатам текущего исследования в несколько раз больше, полученной на обсерватории университета Рединга.

2.4. Метод выявления *Cb*, основанный на значениях $\nabla\varphi$ в приземном слое

Поскольку среднеквадратичное отклонение $\nabla\varphi$ под воздействием кучево-дождевых облаков существенно (более чем в 4 раза) выше аналогичной величины для других форм облачности, данный факт может быть использован для решения обратной задачи – обнаружения по данным $\nabla\varphi$ кучево-дождевых облаков, в том числе очагов «затопленной конвекции», и сопутствующих им неблагоприятных и опасных метеорологических явлений конвективного происхождения.

Предложен метод обнаружения кучево-дождевых (грозовых) облаков основанный на эффекте искажения приземного электрического поля в точке наблюдения при приближении к ней *Cb*, вызывающих существенные отклонения значений $\nabla\varphi$ по сравнению со значением при невозмущённом состоянии атмосферы.

Реализация данного метода заключается в измерении средниминутных значения $\nabla\varphi$ и сопоставляют их с соответствующими пороговыми значениями B_1 и B_2 , характерными для кучево-дождевых облаков и не наблюдающимися во время облачности других форм. При этом, наличие кучево-дождевых облаков в окрестностях диагностируется при выполнении одного из условий:

$$\nabla\varphi \leq B_1 \text{ или } \nabla\varphi \geq B_2,$$

где B_1 , B_2 – пороговые значения для отрицательных и положительных значений $\nabla\varphi$ соответственно, указывающие на наличие кучево-дождевых облаков на фоне облаков других форм.

Пороговые значения $\nabla\varphi$ при *Cb* рассчитываются как:

$$B_1 = B_0 - s \text{ и } B_2 = B_0 + s,$$

где B_0 – невозмущённое значение электрического поля, испытывающее суточные и сезонные изменения, но в среднем за год для континентальных районов примерно равно 150 В/м, s – эмпирический коэффициент, равный минимальной величине искажения приземного электрического поля, обусловленной влиянием кучево-дождевых облаков, которая бы не отмечалась под влиянием облачности других форм.

Как показал статистический анализ среднeminутных значений $\nabla\varphi$ (рис. 2.4), наибольшее после кучево-дождевых облаков искажение $\nabla\varphi$ относительно B_0 , вызывают слоисто-дождевые облака (Ns), то величина s для конкретного физико-географического района может быть приближённо рассчитано как:

$$s = 2 \cdot \sigma_{Ns},$$

где σ_{Ns} – среднеквадратическое отклонение значений $\nabla\varphi$ во время прохождения слоисто-дождевых облаков, но без учёта случаев с наличием «затопленной конвекции» на фоне Ns .

Для реализации данного способа предлагается использование датчика напряжённости электрического поля – электростатического флюксметра («field mill»), работающего на индукционном динамическом методе измерения напряжённости электрического поля, основанном на измерении поверхностной плотности заряда (σ), индуцированного внешним электрическим полем на металлической пластине, и расчёте величины напряжённости (E) по уравнению $E = 4\pi\sigma$. Датчики напряжённости электрического поля, основанные на этом методе, позволяют производить продолжительные измерения в автоматическом режиме с необходимой для описываемого способа дискретностью измерений (1 мин). Таким условиям удовлетворяют серийно выпускаемые датчики напряжённости электрического поля иностранного (EFM-100, EFM550, CS110) и отечественного (EFS-2/50, ЭФ-4) производства.

Измерения напряжённости электрического поля проводят с дискретностью 1 минута или 1 секунда, но с последующим осреднением до среднeminутных значений. Получаемые значения напряжённости электрического поля атмосферы

(E) преобразуются в значения градиента потенциала электрического поля ($\nabla\varphi$) в соответствии с уравнением $E = -\nabla\varphi$.

Полученные оценки средних значений и СКО $\nabla\varphi$ (табл. 2.3, табл. 2.4, рис. 2.4) для различных форм облачности можно в целом распространить на всю территорию Сибири.

Произведена оценка оправдываемости (рис. 2.5а) предлагаемого метода при различных s на основе стандартных метеорологической данных гидрометеорологической станции г. Томск, располагающейся примерно в 6 км от пункта измерения $\nabla\varphi$. Отмечена оправдываемость выше 75% при $s > 1000$ В/м.

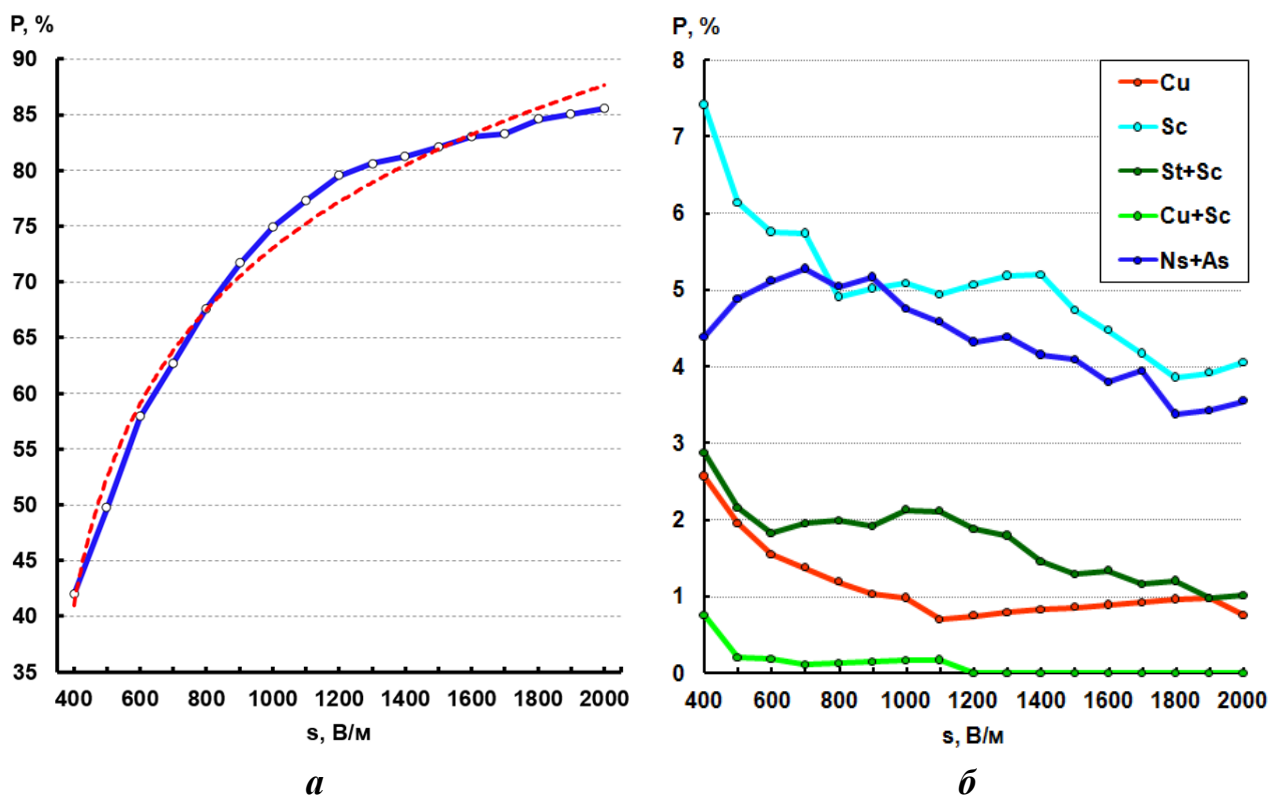


Рисунок 2.5. – Оправдываемость метода выделения Cb при различных пороговых значениях s (а) и повторяемость регистрации на ГМС других форм облачности (не Cb) при различных значениях s (б).

Кроме того, на основе данных ГМС «Томск» осуществлена оценка форм облачности, при которых описанный метод выдавал «ложную тревогу» (рис. 2.5б). Метод наиболее часто выдавал ошибку при различных значениях s во время слоисто-кучевых (Sc) и высокослоистых/слоисто-дождевых ($Ns+As$) облаков. При

этом, согласно [*Шметер 1990*], ввремя этих форм облачности наиболее часто наблюдается «затопленная конвекция», которую сложно обнаружить визуально с земли визуальными. Из вышесказанного можно предположить, что расхождение результатов работы метода и данных ГМС может быть в значительной степени связано с неточность последних.

Описываемый способ может быть применён для любой территории при условии уточнения величины B_0 и s .

2.5. Выводы по главе

Рассмотрены основные данные, использованные в диссертационном исследовании и описана методика обработки вариаций градиента потенциала электрического поля под воздействием облаков основных форм. Приведен статистический анализ значений $\nabla\varphi$ под воздействием облаков основных форм.

Основные результаты:

1. Оценены статистические характеристики значений градиента потенциала электрического поля ($\nabla\varphi$) во время ясной погоды и при прохождении облаков: Ci , Cc , Cs , Ac , As , Cu , Sc , St , Ns и Cb .
2. Отмечено, что средние значения $\nabla\varphi$ при безоблачной погоде в тёплый и холодный сезоны года для территории юга Западной Сибири составляют 230 и 290 В/м соответственно.
3. Установлено, что СКО значений $\nabla\varphi$ при прохождении Cb превышает аналогичные значения при других формах облачности в холодный сезон более чем в 4 раза, а тёплый сезон более чем в 5 раз.
4. Показано, среднее значение $\nabla\varphi$ при прохождении Cb в холодный сезон на 750 В/м больше, а СКО в 1,8 раза меньше аналогичных значений для тёплого сезона.
5. Выявлено, что главная мода в распределении $\nabla\varphi$ при прохождении Cb в тёплый сезон приходится на отрицательные значения $\nabla\varphi \sim 1$ кВ/м, в то время как в холодной – на равные по величине положительные значения.

6. Предложен метод выявления кучево-дождевых облаков на основе пороговых значений $\nabla\varphi$, оправдываемость которого составляет более 75%.

3. АНАЛИЗ ДИНАМИКИ АТМОСФЕРНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ Cb

Существует достаточное количество исследований, описывающих состояние электродного слоя атмосферы в квазистационарных условиях. Менее изученными остаются процессы электризации и изменчивости атмосферно-электрических величин в приземном слое при нарушении условий «хорошей» погоды (при грозах, осадках и т. п.), которые относятся к экстремальным погодным условиям. В этом разделе представлены результаты исследований динамики согласованных изменений градиента потенциала электрического поля ($\nabla\varphi$) и полярных электрических проводимостей (λ_{\pm}), а также и поиска взаимных связей между $\nabla\varphi$ и λ_{\pm} , с одной стороны, и гидрометеорами, ветром и аэрозолем с другой при различных метеорологических условиях. Основные результаты опубликованы в 3 статьях в рецензируемых журналах [*Нагорский, Морозов, Смирнов, Пустовалов // Известия вузов. Радиофизика 2013; Кобранова, Морозов, Нагорский, Пустовалов // Известия вузов. Физика 2015; Нагорский, Кобранова, Ланская, Морозов, Пустовалов // Известия вузов. Физика 2016*].

3.1. Анализ особенностей динамики $\nabla\varphi$ и λ_{\pm} при Cb и ливневых осадках

Электрические характеристики приземной атмосферы, а именно градиент потенциала электрического поля ($\nabla\varphi$), концентрация лёгких ионов (n_{\pm}) и полярные электрические проводимости (λ_{\pm}) имеют тесную связь с локальными метеорологическими условиями. При этом, наиболее интенсивные изменения локальных метеорологических условий отмечаются при прохождении кучево-дождевых (грозовых) облаков и сопутствующих им атмосферных явлений (грозы, ливневых осадков, шквалов и т.д.). Как отмечалось выше, в кучево-дождевых облаках сосредоточены большие (10 – 40 Кл) объёмные заряды, которые искажают приземное электрическое поле, и при перемещении Cb вызывают

«медленные» вариации $\nabla\phi$, что должно неминуемо отражаться в динамике атмосферно электрических параметров. Вариации $\nabla\phi$ под воздействием Cb в свою очередь должны вызывать согласованные изменения n_{\pm} и λ_{\pm} . Кроме того, процессы при выпадении ливневых осадков, сопутствующих Cb , могут выступать в качестве дополнительных источников и стоков лёгких ионов.

Таким образом, при прохождении кучево-дождевых облаков и сопутствующих явлений динамика параметров электродного слоя должна существенно отличаться от той, что наблюдается в условиях «хорошей погоды».

Для анализа особенностей экспериментально наблюдаемой динамики ($\nabla\phi$) и полярных электропроводностей (λ_{\pm}) в приземном слое атмосферы выполнялся отбор данных мониторинга отдельно для следующих типов событий:

- 1) близкое прохождение Cb без значимых осадков в пункте мониторинга;
- 2) близкое прохождение Cb с выпадением интенсивного ливневого дождя;
- 3) близкое прохождение Cb с выпадением интенсивного ливневого снега.

Алгоритм отбора данных мониторинга для каждого из типов событий представлен на рис. 3.1.

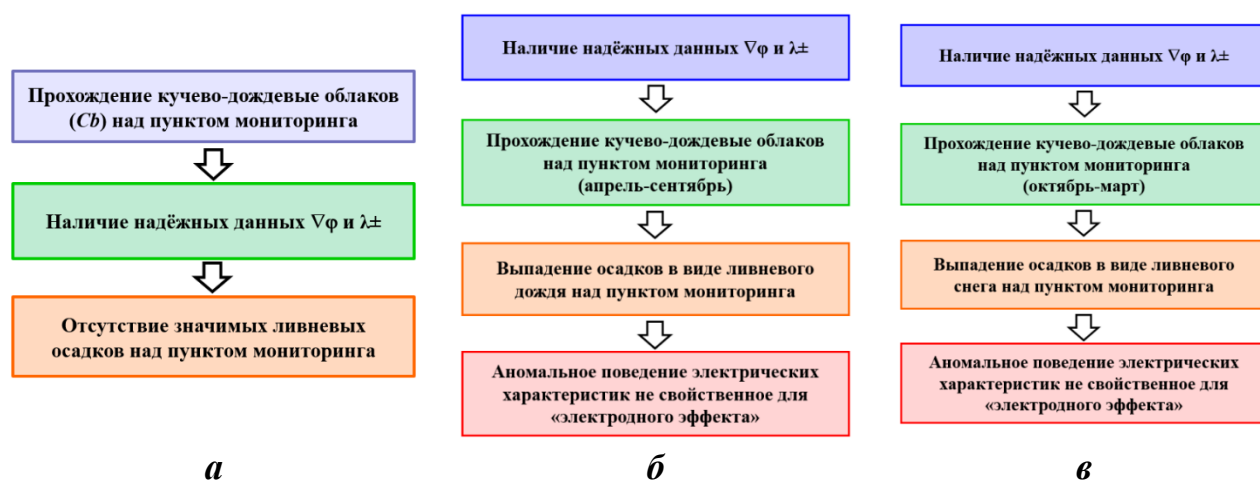


Рисунок 3.1. – Алгоритм отбора случаев прохождения Cb : а – без значимых осадков; б – выпадение интенсивного ливневого дождя; в – выпадение ливневого снега.

Общее число проанализированных случаев прохождения Cb составило более 450. Из этого числа количество случаев с аномальным поведением E и λ_{\pm} во время выпадения интенсивных осадков равнялось 97, а число случаев с аномальным поведением $\nabla\varphi$ и λ_{\pm} во время ливневого снега – 29.

Анализ экспериментально измеренных вариаций градиента потенциала электрического поля и полярных электропроводностей во время отобранных событий позволил выявить характерную динамику электродного слоя во время экстремальных погодных условий, связанных с прохождением мощной конвективной облачности и выпадении ливневых осадков. Перейдем к комплексному анализу каждого из исследованных типов событий.

При прохождении кучево-дождевых облаков без выпадения ливневых осадков в пункте мониторинга отмечаются согласованные изменения $\nabla\varphi$ и λ_{\pm} . Положительному возмущению $\nabla\varphi$ относительно невозмущённого состояния (~ 150 В/м) соответствует падение концентрации λ_{-} , при этом λ_{+} не испытывает существенных изменений, а отрицательному возмущению $\nabla\varphi$ – падение концентрации λ_{+} при неизменном λ_{-} . Отмеченные особенности хорошо согласуются с теоретическими представлениями об изменении λ_{\pm} при изменении $\nabla\varphi$ без дополнительных источников и стоков.

Ближкие молниевые разряды, отмечаемые при прохождении грозовых Cb вызывают «быстрые» изменения $\nabla\varphi$, накладывающиеся на динамики «медленных вариаций» при прохождении Cb , при этом существенных изменений в динамике λ_{\pm} не отмечается.

На рисунке 3.2 представлены примеры динамики вариаций $\nabla\varphi$ и λ_{\pm} под воздействием кучево-дождевых облаков в ливневой (рис. 3.5а) и грозовой (рис. 3.5б) стадиях без осадков в пункте наблюдений.

При прохождении кучево-дождевых облаков с сопутствующим выпадением интенсивных осадков в виде ливневого дождя в пункте мониторинга отмечается динамика $\nabla\varphi$ и λ_{\pm} отличная от той, что наблюдается в первой группе рассмотренных случаев.

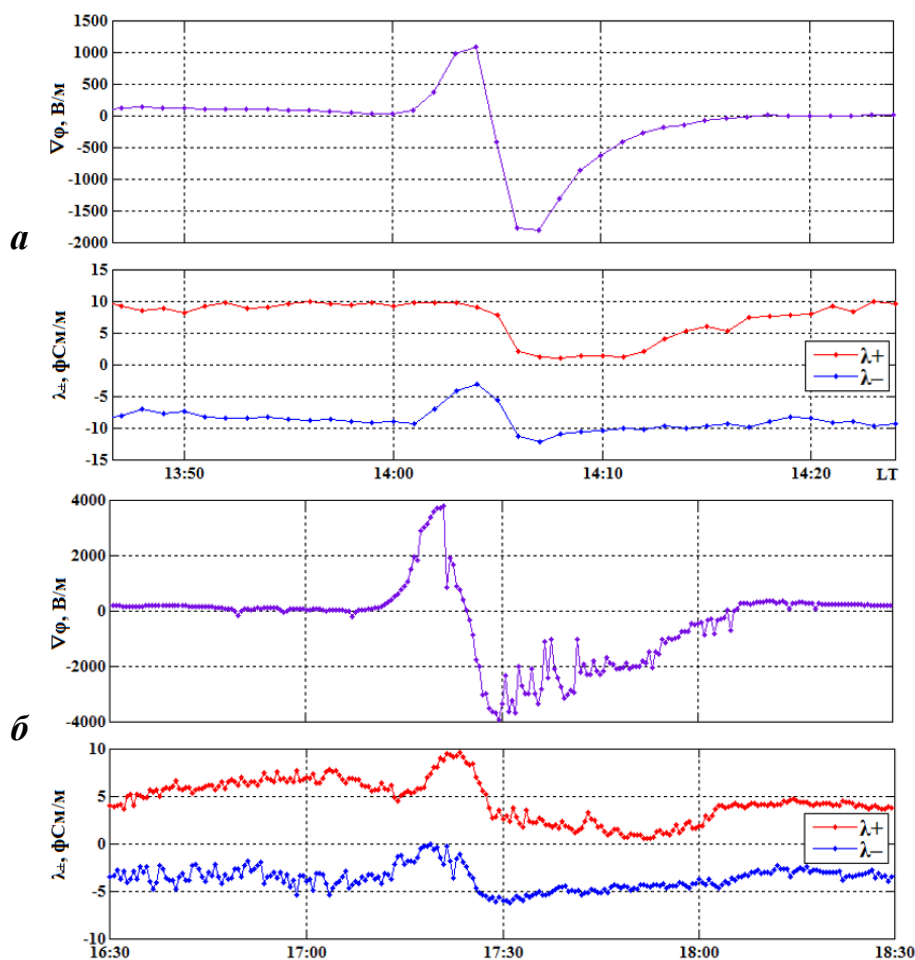


Рисунок 3.2. – Пример динамики $\nabla\varphi$ и λ_{\pm} при отсутствии значимых осадков во время прохождения одиночного кучево-дождевого облака в ливневой (сверху) и грозовой (снизу) стадиях

В моменты усиления интенсивности осадков (рис. 3.3) во время положительных возмущений $\nabla\varphi$, обусловленных Cb , отмечается «аномальное» снижение, а во время отрицательных возмущений $\nabla\varphi$ – «аномальный» рост абсолютной величины $\nabla\varphi$. В отмеченные моменты времени отмечался «аномальный» рост (более чем в 2 раза) отрицательной электропроводности λ_{-} , не зависящий от величины и знака $\nabla\varphi$. В динамике λ_{+} этот эффект также проявлялся, но значительно слабее чем в λ_{-} . Кроме того, после окончания выпадения осадков отмечался синхронный рост электропроводность сразу обеих полярностей.

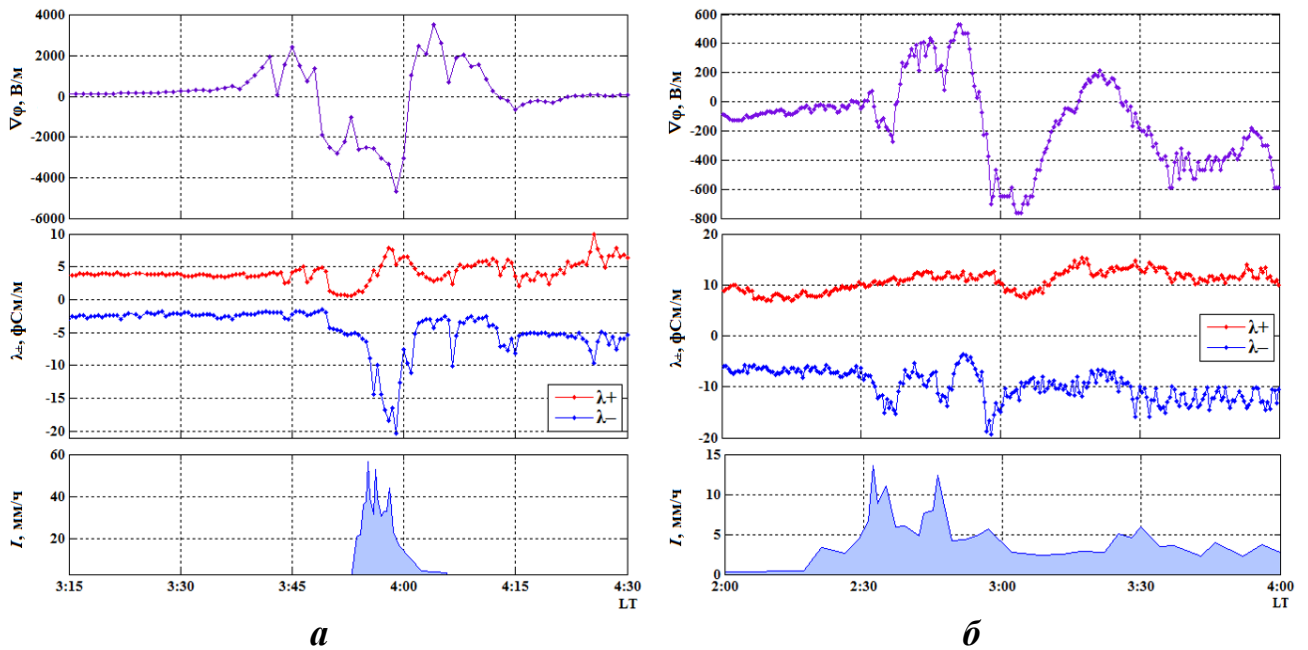


Рисунок 3.3. – Вариации $\nabla\varphi$, λ_{\pm} и интенсивности осадков при прохождении *Cb* со слабым (а; 17.08.2014) и сильным (б; 27.08.2014) ливневым дождём.

Примеры вариации $\nabla\varphi$ и λ_{\pm} под воздействием кучево-дождевых облаков и осадков виде ливневого дождя в пункте наблюдений для случая внутримассового грозового и фронтального ливневого *Cb* представлены на рисунке 3.3. На рисунке 3.4 показаны синоптические ситуации, в которых развивались *Cb*, обусловившие измеренные вариации $\nabla\varphi$ и λ_{\pm} на рис. 3.3.

Отмеченные особенности в динамике $\nabla\varphi$ предположительно можно объяснить преимущественно отрицательным зарядом осадков, отмечаемым в [Bennett, Harrison 2008]. Эффекты роста λ_{\pm} могут быть связаны с одной стороны с появлением дополнительного источника лёгких ионов, а с другой стороны с уменьшением их стока. Рассмотрим детально обе гипотезы.

Для объяснения эффектов в динамике λ_{\pm} проанализируем динамику параметров естественного радиационного фона для случая представленного на рисунке 3.3а. Во время исследуемого случая наблюдается рост α , β и γ -радиоактивности (рис. 3.5), отмечаемый ранее в [Yakovleva, Nagorsky, Cherepnev, Kondratyeva, Ryabkina 2016], начало которого совпадает с началом выпадения осадков. При этом, максимум α , β и γ -радиоактивности отмечается уже после окончания осадков.

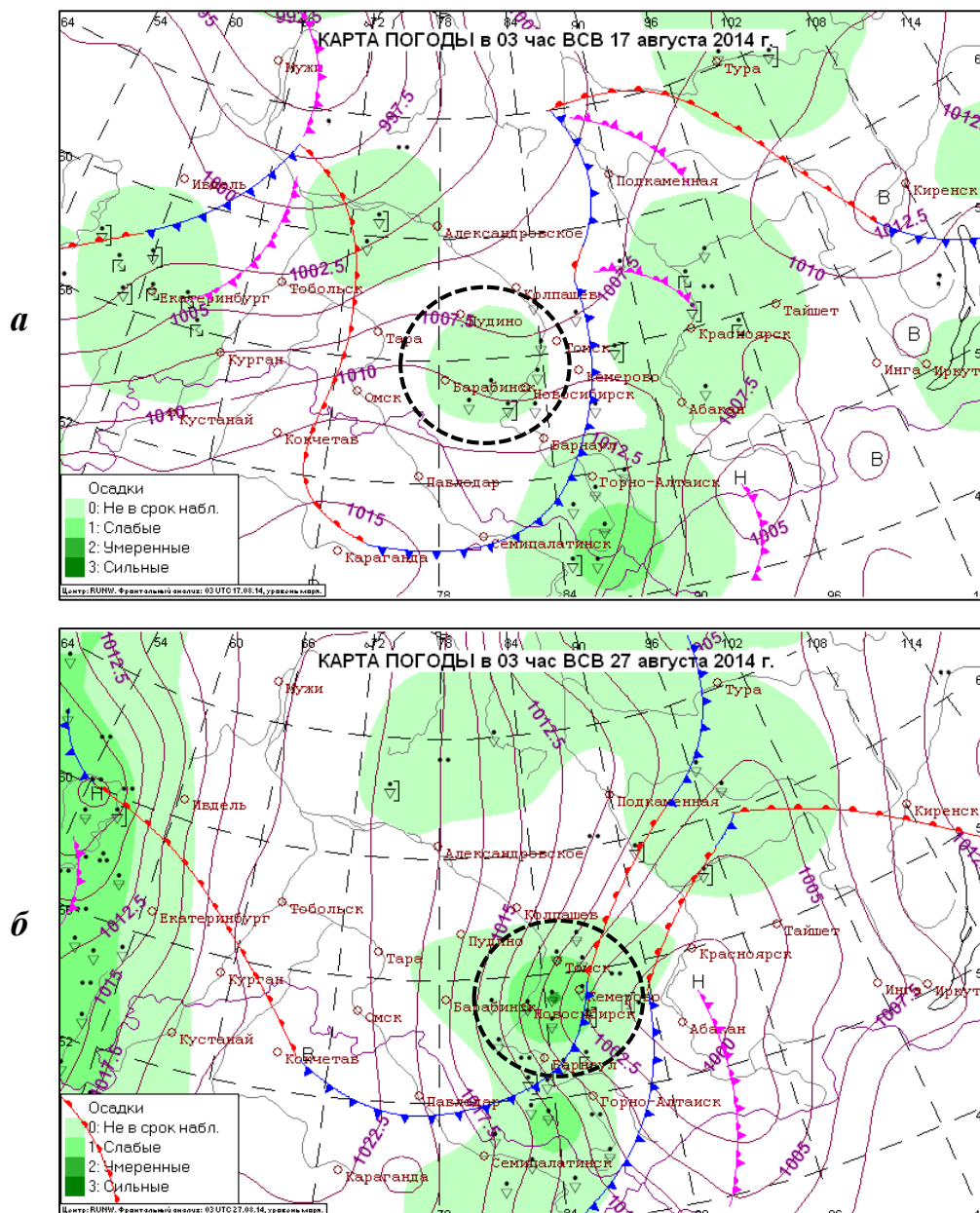


Рисунок 3.4. – Синоптическая ситуация над югом Западной Сибири 17.08.2014 (а) и 27.08.2014 (б). Пунктирной линией отмечены атмосферные условия, обусловившие вариации $\nabla\varphi$ и λ_{\pm} на рис. 3.3а и 3.3б соответственно.

Таким образом, синхронный рост λ_{\pm} после окончания осадков по-видимому может быть связан с ионизацией воздуха под воздействием α , β и γ -радиоактивности. Однако, данный эффект не может объяснить резкий рост λ (преимущественно λ_{-}) в моменты усиления осадков.

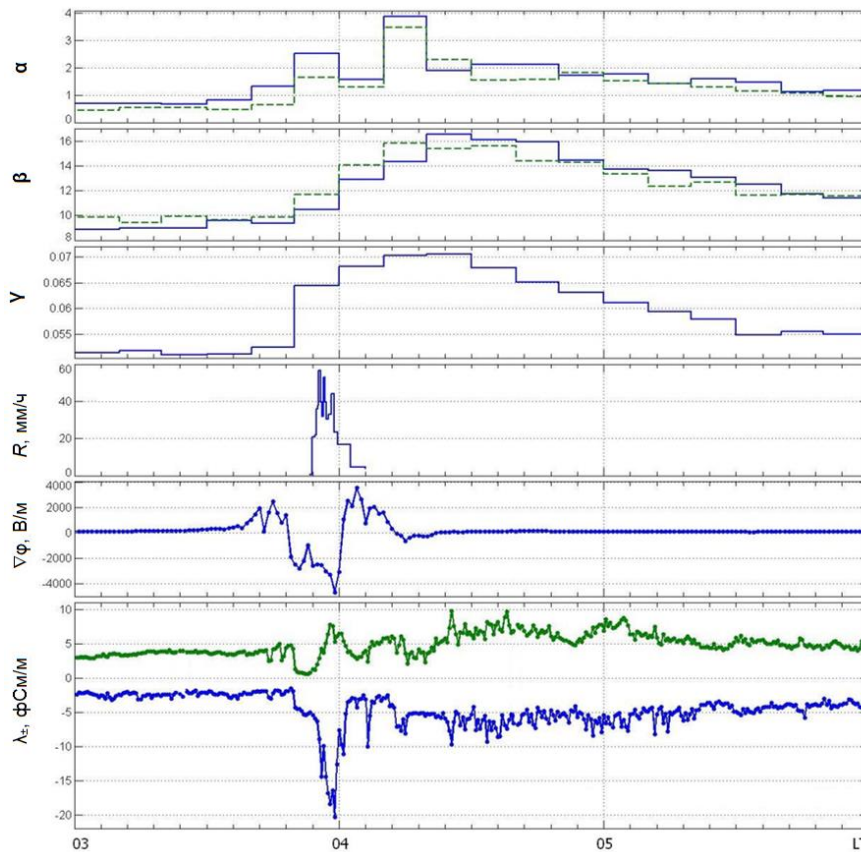


Рисунок 3.5. – Вариации уровней α -, β -, γ - радиоактивности (высоты 35 и 25 м), интенсивности осадков, $\nabla\varphi$ и λ_{\pm} при выпадении интенсивного ливневого дождя 17.08.2014.

Рассмотрим другой пример прохождения фронтальных *Cb* (рис. 3.6) с сопутствующим выпадением интенсивного ливневого дождя, во время которого проводились детальные измерения характеристик осадков и аэрозоля.

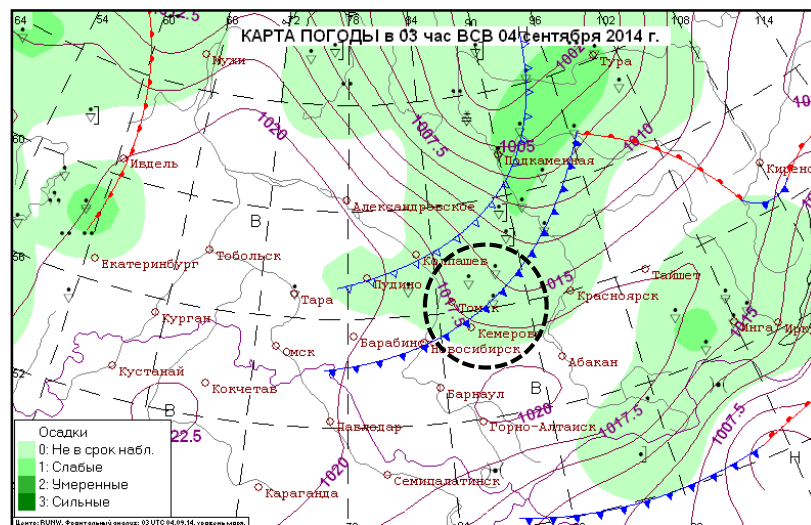


Рисунок 3.6. – Синоптическая ситуация над югом Западной Сибири 4.09.2014.

Пунктирной линией отмечены исследуемые атмосферные условия.

В облачной системе холодного фронта при этом чётко прослеживалась передняя полоса кучево-дождевых облаков, состоящая из сильноразвитых конвективных ячеек выстроенных в ряды, и тыловой полосы, представленной очагами «затопленной конвекцией» (рис. 3.7).

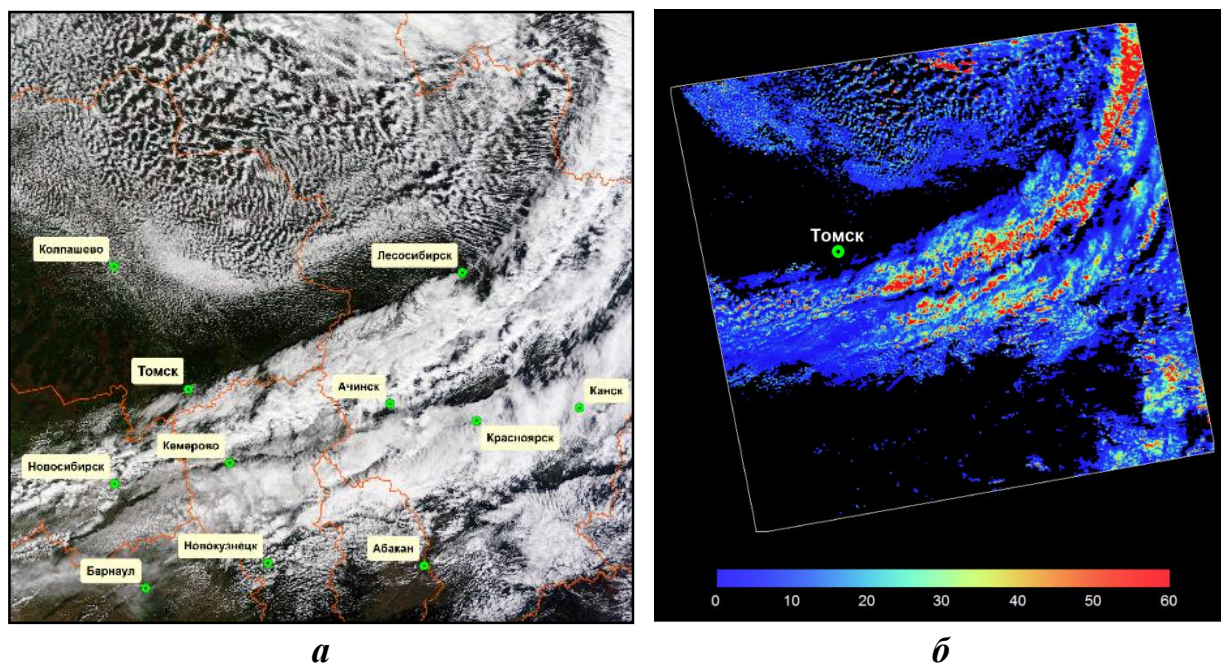


Рисунок 3.7. – Видимое композитное изображение Terra MODIS (RGB 1:4:3) за 4.09.2014 5:35 UTC (а) и оптическая толщина облаков (Aqua MODIS) за 4.09.2014 7:20 UTC (б).

Анализ динамики атмосферно-электрических параметров, а также характеристик осадков, аэрозоля и ветра (рис. 3.8) во время данного случая показал следующее. Во время выпадения осадков отмечается синхронное падение концентрации аэрозоля и рост электропроводности воздуха. Исходя из этого можно сделать вывод о том, что выпадение интенсивных осадков приводит к вымыванию из атмосферы аэрозоля (ядра конденсации), снижая сток легких ионов на аэрозоль, что ведёт к росту электропроводностей. Кроме того, в начале отмеченного события отмечается противоположный эффект – краткосрочный рост концентрации аэрозоля и падение электропроводности, совпадающий по времени со шквалистым усилением ветра и предположительно обусловленный поднятием и перемешиванием ветром аэрозольных частиц с поверхности земли.

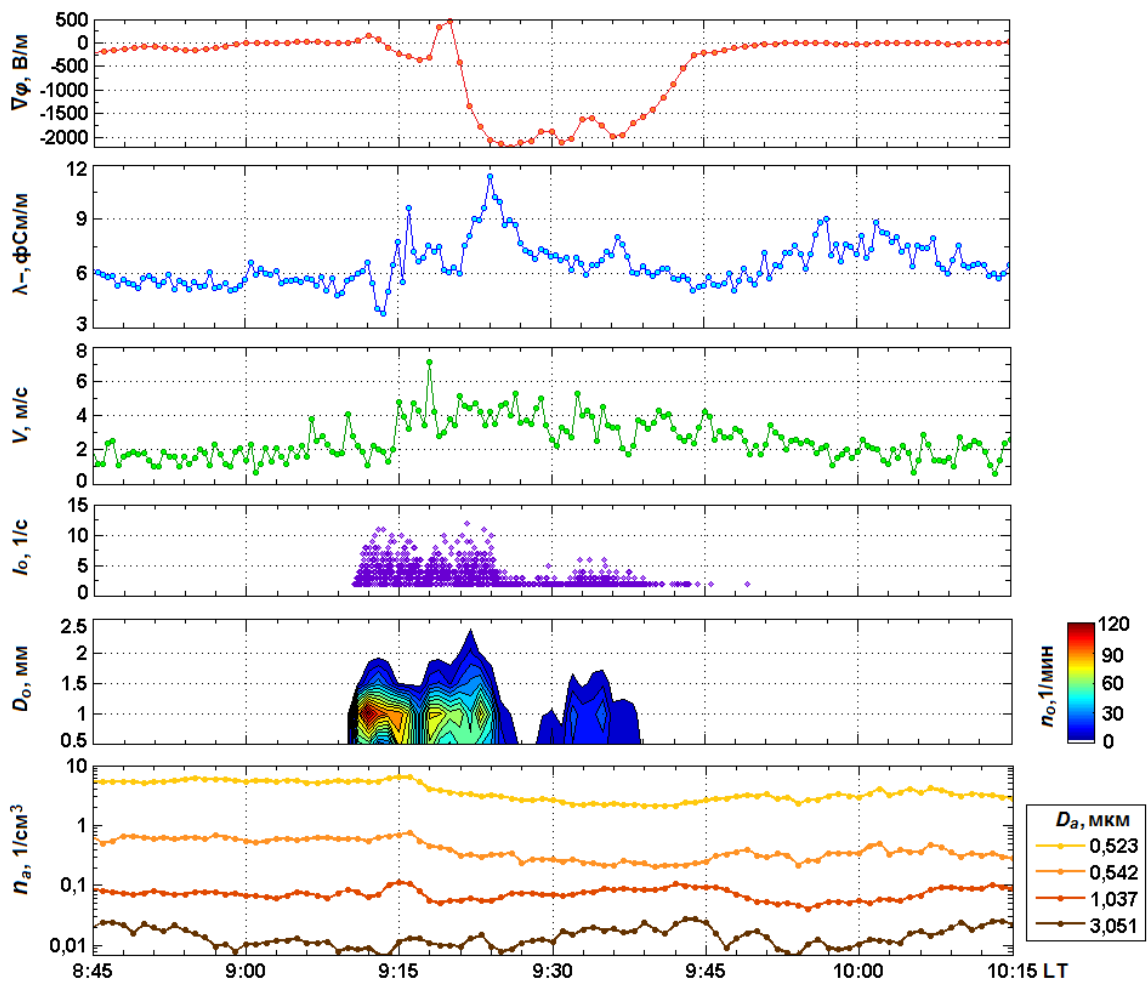


Рисунок 3.8. – Динамика градиента потенциала электрического поля ($\nabla\varphi$), отрицательной электрической проводимости воздуха (λ_-), количества капель осадков в секунду (I_0) и их размеров (D_0), скорости ветра (V) и концентрации аэрозольных частиц (n_a) различного диаметра (D_a) за период 8:45–10:15 LT 4.09.2014

При прохождении кучево-дождевых облаков с сопутствующим выпадением интенсивных осадков в виде ливневого снега в пункте мониторинга динамика градиента потенциала электрического поля и полярных электропроводностей существенно отличается от той, что наблюдается при выпадении ливневого дождя. В моменты выпадения интенсивного ливневого снега наблюдается синхронное падение λ сразу обеих полярностей, а в динамике градиента потенциала в ряде случаев отмечается рост абсолютной величины при положительных возмущениях $\nabla\varphi$ и падение с последующей сменой знака при отрицательных возмущениях $\nabla\varphi$.

Примеры вариаций $\nabla\varphi$ и λ_{\pm} под воздействием *Cb* и интенсивного ливневого снега представлены на рисунке 3.9

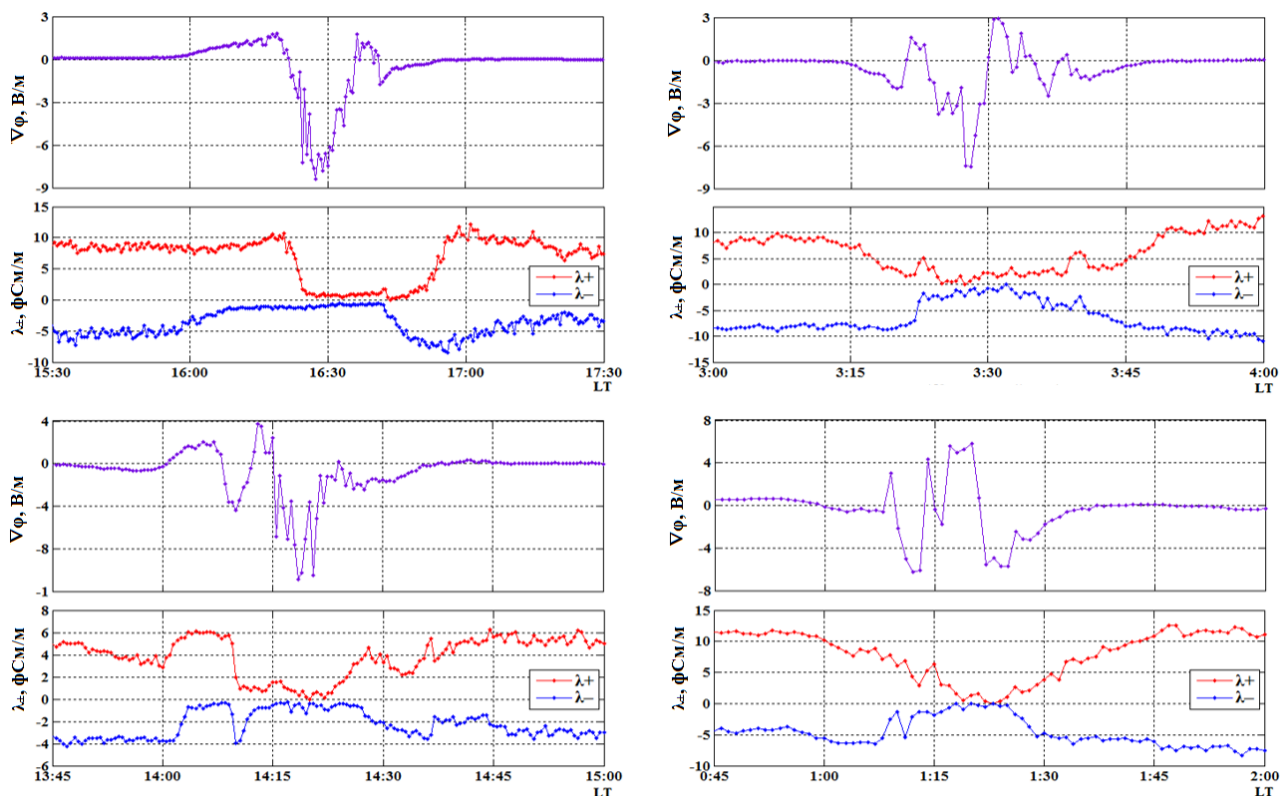


Рисунок 3.9. – Вариации $\nabla\varphi$ и λ_{\pm} при выпадение ливневого снега

Отмеченный эффект в динамике λ_{\pm} предположительно связан с оседанием лёгких ионов на снежинках и последующим выносом их из электродного слоя. Рост положительных значений $\nabla\varphi$ и падение отрицательных по-видимому связан с преобладающим положительным зарядом на снежинках (согласно [Bennett, Harrison 2008]), приносимым в электродный слой во время ливневого снега.

3.2. Методика оценки временной структуры динамики $\nabla\varphi$ при прохождении Cb

В предыдущем разделе был произведён статистический анализ вариаций градиента потенциала под воздействием кучево-дождевых облаков различного происхождения. Однако, полученные статистические оценки дают лишь общие представления об изменчивости значений $\nabla\varphi$ при прохождении Cb , но ничего не говорят об их динамике.

Для оценки особенностей динамики вариаций $\nabla\varphi$ при прохождении Sb требуется расчёт численных параметров, описывающих временную структуру вариаций $\nabla\varphi$.

Были выбраны следующие численные параметры вариаций $\nabla\varphi$, обусловленных воздействием кучево-дождевых облаков и не связанных с грозовыми разрядами (рис. 3.3):

D_v – общая длительность вариаций $\nabla\varphi$;

A_v – амплитуда вариаций $\nabla\varphi$;

N_{d+} – количество положительных возмущений (d_+);

D_{d+} – длительность положительных возмущений (d_+);

V_{d+} – среднее значение положительного возмущения (d_+);

N_{d-} – количество отрицательных возмущений (d_-);

D_{d-} – длительность отрицательных возмущений (d_-);

V_{d-} – среднее значение отрицательного возмущения (d_-);

Общая длительность вариаций (D_v) представляет собой промежуток времени от начала первого возмущения до окончания последнего (рис. 3.10). Амплитуда вариаций (A_v) – размах вариаций $\nabla\varphi$ за период D_v . Расчёт A_v осуществлялся по исходным значениям градиента потенциала ($\nabla\varphi$) в выделенных временных границах.

Количество положительных/отрицательных возмущений (N_{d+}/N_{d-}) – количество проявлений возмущений $\nabla\varphi$ соответствующих полярностей в течение D_v . Длительность положительных и отрицательных возмущений (D_{d+} и D_{d-}) – периоды времени между началом и окончанием возмущений соответствующей полярности. Среднее значение положительного и отрицательного возмущения (V_{d+} и V_{d-}) – среднее значение $\nabla\varphi$ за период D_{d+} и D_{d-} соответственно. Расчёт V_{d+} и V_{d-} осуществлялся по исходным значениям градиента потенциала ($\nabla\varphi$) в выделенных временных границах. Суть введенных величин представлена на рис. 3.3.

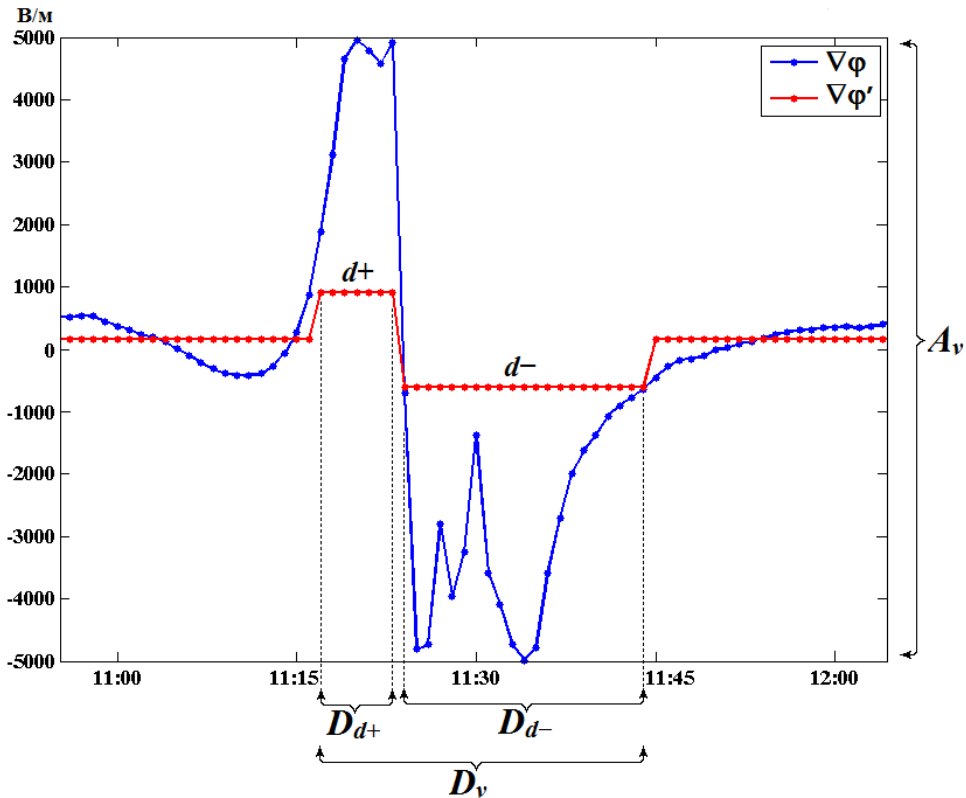


Рисунок 3.10. – Параметры общих особенностей и временной структуры медленных вариаций градиента потенциала, определяемые при воздействии Cb ($\nabla\varphi$ и $\nabla\varphi'$ – исходные и модифицированные значения градиента потенциала).

Таким образом, использование описанных выше параметров позволяет оценить внутреннюю структуру вариаций $\nabla\varphi$ под воздействием кучево-дождевых облаков и выявить общие особенности исследуемых вариаций.

3.3. Структура вариаций $\nabla\varphi$ при прохождении Cb

Для исследования структуры вариаций $\nabla\varphi$ под воздействием Cb были использованы численные параметры, описанные в разделе 3.2. Выполнен расчёт значений данных параметров и статистический анализ их значений.

Средняя по всем случаям Cb длительность вариаций градиента потенциала (D_v), обусловленных прохождением над пунктом мониторинга кучево-дождевых

облаков, составляет ~53 минуты (табл. 3.3), то есть наблюдается прохождение в среднем двух конвективных ячеек (~ 30 мин).

Таблица 3.3. – Статистические характеристики параметров вариаций $\nabla\varphi$ при прохождении кучево-дождевых облаков в ливневой и грозовой стадиях, и Cb в целом

Исследуемые параметры		D_v , мин	A_v , В/м
Ливневые Cb	Среднее	43,5	5177
	Медиана	33	4030
	Мода	3	1756
	СКО	42,3	3613
	Максимальное	331	16809
	Минимальное	1	765
Грозовые Cb	Среднее	117,3	10772
	Медиана	93	10266
	Мода	79	3070
	СКО	74,1	3696
	Максимальное	422	22353
	Минимальное	15	3070
Cb в целом	Среднее	53,4	5770
	Медиана	38	4664
	Мода	3	1756
	СКО	53,9	4007
	Максимальное	422	22353
	Минимальное	1	765

При этом, средняя длительность вариаций $\nabla\varphi$ при прохождении ливневых и грозовых Cb значительно отличается. Так, согласно табл. 2, в случае кучево-дождевых облаков в грозовой стадии в 2,7 раза больше чем в ливневой стадии. Данное отличие, по-видимому обусловлено не столько отличием в размерах кучево-дождевых облаков в ливневой и грозовой стадиях, сколько в их преимущественном происхождении. Ливневыми облака чаще всего являются

одиноким внутримассовым Cb , в то время как грозовые облака это как правило фронтальные мультитячейковые Cb и их конгломераты.

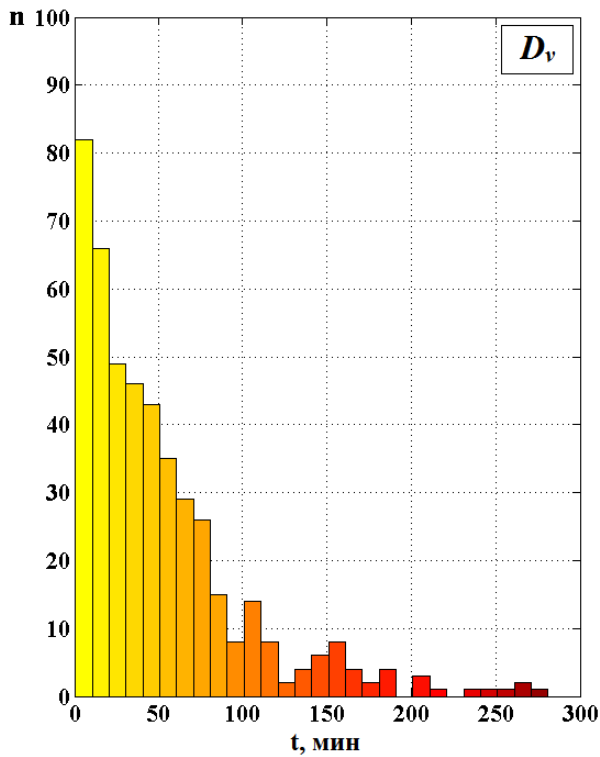
Амплитуда вариаций градиента потенциала (A_v), рассчитанная на основе среднeminутных значений $\nabla\phi$, согласно табл. 2, в среднем составляет ~ 5800 В/м. Среднее значение размаха $\nabla\phi$ при Cb в грозовой стадии превышает аналогичное значение в ливневой стадии более чем в 2,1 раза. Отмеченная особенность объясняется значительно большими зарядами в грозовых Cb по сравнению с ливневыми.

В распределении значений амплитуды вариаций градиента потенциала (A_v) в случаях прохождения кучево-дождевых облаков, наблюдаются два максимума, приходящиеся на 1500 и 10500 В/м, связанные, по-видимому, с внутримассовыми ливневыми Cb и с развитыми грозовыми Cb фронтального происхождения соответственно (рис. 3.11б).

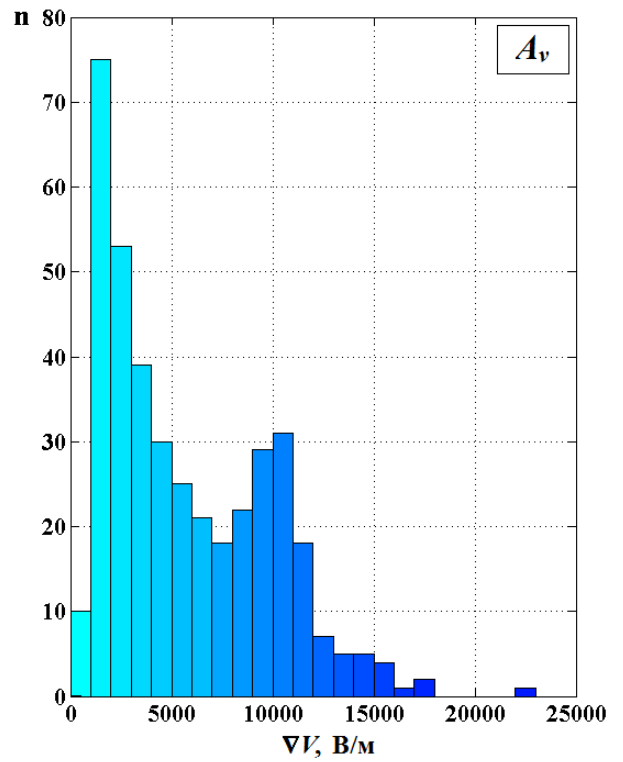
Распределение общей длительности вариаций градиента потенциала (D_v), обусловленных прохождением кучево-дождевых облаков, согласно полученным данным, представленным на рис. 3.11 (б), не соответствует нормальному закону распределения.

Представим распределение D_v в двойном логарифмическом масштабе (рис. 3.12). Рис. 3.12 наглядно иллюстрирует, что это распределение является степенным распределением и при больших значениях аргумента дает вероятности, значительно превышающие оценки по нормальному закону распределения: обладает так называемым «тяжелым хвостом».

В распределении на рисунке 3.12 существует излом, поэтому аппроксимируем D_v распределением Леви-Парето, состоящим из двух частей. Параметры составного распределения для общей длительности вариаций D_v представлены в табл. 3.4.



a



б

Рисунок 3.11. – Гистограммы распределения общей длительности (*a*) и амплитуды (*б*) вариаций, обусловленных прохождением *Cb*

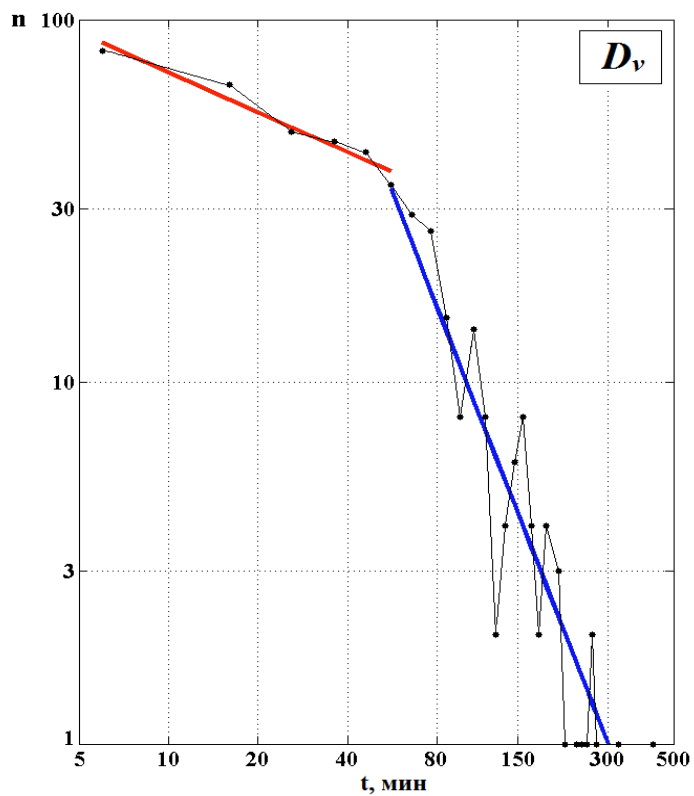


Рисунок 3.12. – Распределение D_v в двойной логарифмической системе координат. Линейные тренды (D_{v1} , D_{v2}) – аппроксимация составного распределения Леви-Парето

Таблица 3.4. – Параметры распределения Леви-Парето общей длительности вариаций $\nabla\varphi$

$f_{\xi}(t) = \frac{\alpha}{c_0} \left(\frac{c_0}{t}\right)^{\alpha+1}$	Параметры распределения		
	c_0 , мин	t , мин	α
1) D_{v1}	5	$5 \leq t \leq 56$	-0,37
2) D_{v2}	56	$t \geq 56$	-2,10

Перелом в данном распределении приходится на длительности ~ 60 мин. Из этой оценки следует вывод о том, что два различных участка распределения связаны с принципиально различными проявлениями кучево-дождевой облачности: одиночные кучево-дождевые облака или конгломераты *Cb*.

Во «временной структуре» вариаций $\nabla\varphi$ регистрируется в среднем 3-4 возмущения различной полярности, их длительность в среднем составляет ~ 10 мин. Количество отрицательных возмущений, как правило, больше и они в 1,3 раза более продолжительные, чем положительные (табл. 3.5).

В целом, экспериментальные распределения параметров, сведенных в таблицу 3.5 и представленные на рис. 3.13 близки к экспоненциальному закону.

В случае грозových *Cb* количество положительных в 3, а отрицательных возмущений в 2,2 раза больше чем в случае ливневых *Cb*. В 1,2 и 1,1 раза, соответственно, возрастает длительность возмущений при грозových *Cb*. Средние значения E в случае положительных возмущений превышают в 1,4 раза соответствующие значения отрицательных возмущений. Средние значение $\nabla\varphi$ во время возмущений составляют ~ 2300 В/м. Для грозových *Cb* средние значения $\nabla\varphi$ положительных и отрицательных возмущений больше в 1,2 и 1,5 раза, чем в ливневых.

Отметим, что закономерности аналогичные тем, что были выделены в распределение общей длительности вариаций (рис. 3.12) были выявлены и для распределений средних значений положительных (V_{d+}) и отрицательных возмущений (V_{d-}) (рис. 3.14). Перелом в распределениях V_{d+} и V_{d-} приходится на значения $\sim \pm 3700$ В/м.

Представленные особенности изменения средних значений $\nabla\phi$, следует связать с различным происхождением кучево-дождевых облаков, развивающимися под влиянием внутримассовой конвекции и формирующихся под влиянием динамической конвекции на холодных фронтах.

Таблица 3.5. – Статистические характеристики предложенных параметров вариаций при прохождении кучево-дождевых облаков в ливневой и грозовой стадиях и Cb в целом

Исследуемые параметры		N_{d+}	D_{d+} , мин	V_{d+} , В/м	N_{d-}	D_{d-} , мин	V_{d-} , В/м
Ливневые Cb	Среднее	1,4	8,4	2296	2	10,9	-1778
	Медиана	1	6	2147	1	8	-1453
	Мода	0	2	941	1	1	-632
	СКО	1,7	8,1	1010	1,8	9,8	1036
	Максимальное	15	55	5529	17	64	-618
	Минимальное	0	1	913	0	1	-6594
Грозовые Cb	Среднее	4,2	10,1	2719	4,4	12	-2605
	Медиана	4	5	2492	4	8	-2514
	Мода	3	1	1912	2	1	-6477
	СКО	2,9	11,3	1259	2,8	12,5	1137
	Максимальное	17	80	7059	17	83	-614
	Минимальное	0	1	941	1	1	-6477
Cb в целом	Среднее	1,7	8,9	2428	2,3	11,2	-1969
	Медиана	1	6	2233	2	8	-1706
	Мода	0	1	941	1	1	-632
	СКО	2,2	9,3	1110	2,1	10,5	1115
	Максимальное	17	80	7059	17	83	-614
	Минимальное	0	1	913	0	1	-6594

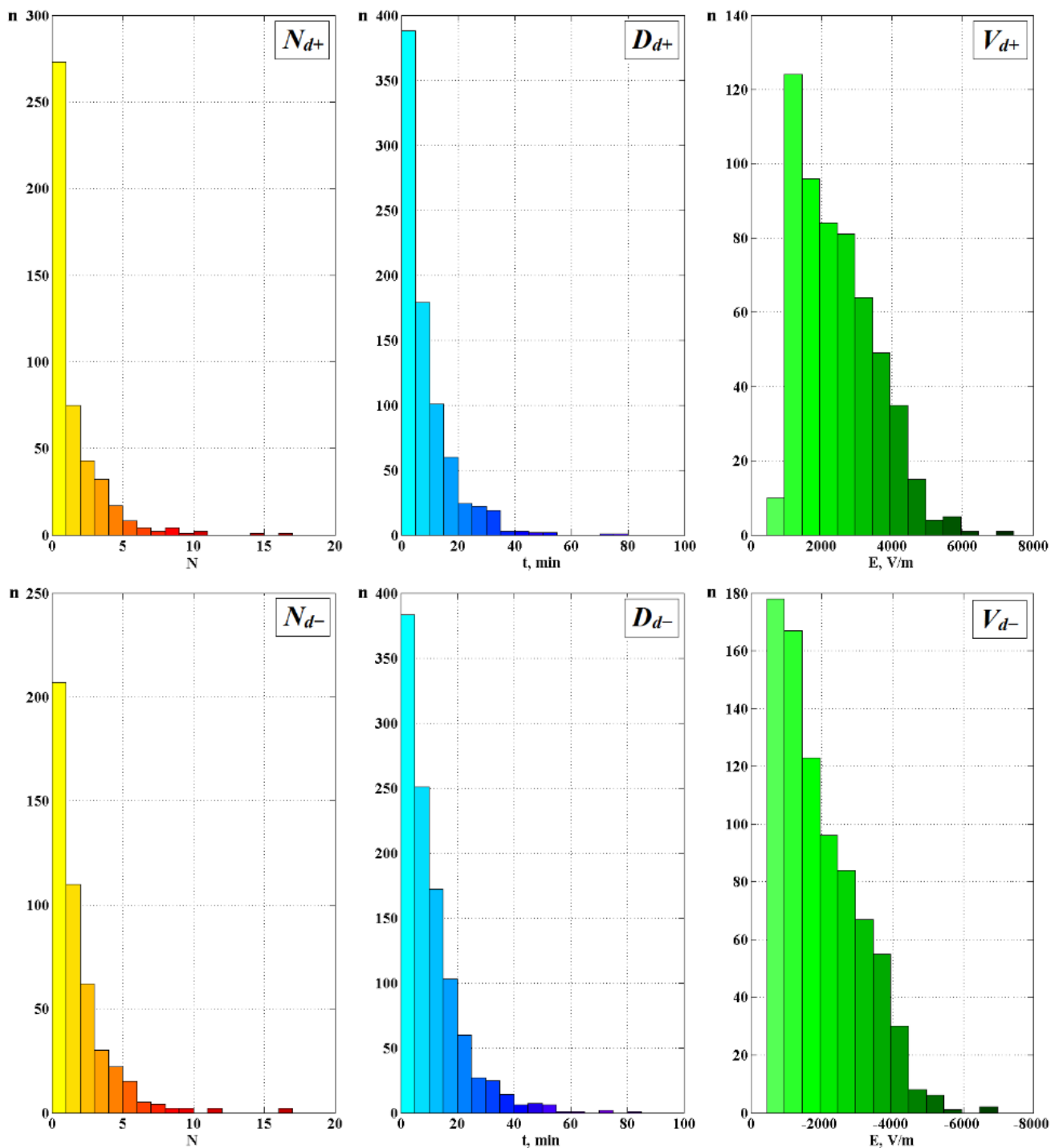


Рисунок 3.13. – Гистограммы распределения количества положительных (N_{d+}) и отрицательных возмущений (N_{d-}), длительности положительных (D_{d+}) и отрицательных (D_{d-}) возмущений, и средних значений положительных (V_{d+}) и отрицательных возмущений (V_{d-}) во время вариаций, обусловленных прохождением Cb

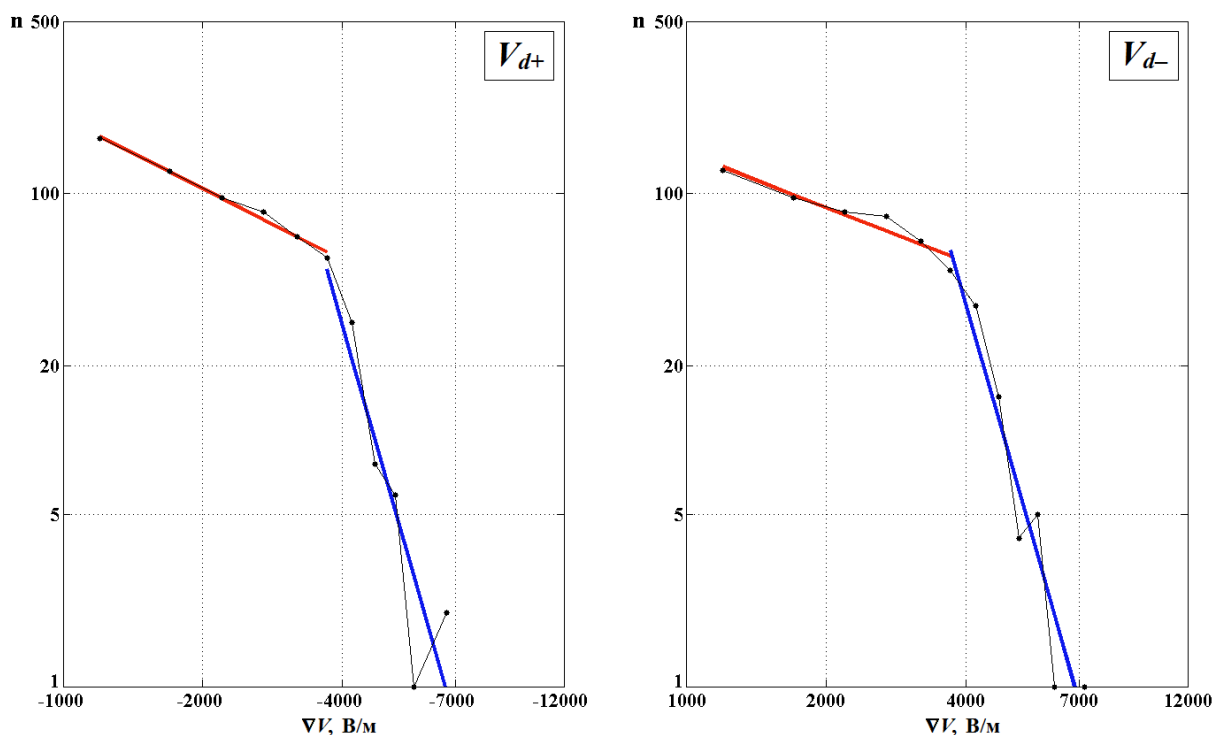


Рисунок 3.14. – Распределение V_{d+} в двойной логарифмической системе координат. Линейные тренды (D_{v1} , D_{v2}) – аппроксимация составного распределения Леви-Парето

3.4. Модельное описание вариаций $\nabla\phi$, ρ и λ_{\pm} при Cb и ливневых осадках

Как было отмечено в разделе 3.1, при прохождении кучево-дождевых облаков и сопутствующих явлений состояние электродного слоя существенно изменяется, как под влиянием интенсивных вариаций $\nabla\phi$ при прохождении электрически заряженных облаков, так и под воздействием дополнительных источников и стоков, связанных с ливневыми осадками. Для детального исследования динамики параметров электродного слоя при прохождении Cb и ливневых осадков проведём численное моделирование.

Для численного расчёта концентраций положительных (n_+) и отрицательных (n_-) лёгких ионов использовалась модель динамики электродного слоя в условиях мощной конвективной облачности, описанная в [Нагорский, Морозов, Смирнов, Пустовалов 2013]. Как показано в [Нагорский, Морозов, Смирнов, Пустовалов 2013], для условий нестационарного электродного эффекта перенос аэроионов в атмосфере осуществляется, наряду с турбулентными

потоками воздуха, электрическими силами, вклад которых при высоких (> 500 В/м) значениях напряжённости электрического поля ($E = -\nabla\phi$) превалирует.

Основное уравнение, используемое при моделировании нестационарной задачи, имеет следующий вид [*Hoppel 1967; Hoppel 1969; Куновых, Морозов, Шварц 1998; Морозов 2011*]:

$$\frac{\partial n_{1,2}}{\partial t} \pm b_{1,2} \frac{\partial}{\partial z} (E(t)n_{1,2}) - \frac{\partial}{\partial z} \left((D_T(z) + D_{mol}) \frac{\partial n_{1,2}}{\partial z} \right) = q(z) - \alpha n_1 n_2 - \beta n_1 n_2 N_a - \eta n_1 n_2 N_p,$$

где n_1, n_2 – концентрация положительных и отрицательных легких ионов; b_1, b_2 – подвижность положительных и отрицательных ионов; D_T – коэффициент турбулентной диффузии; D_{mol} – коэффициент молекулярной диффузии ($D_T = (K \cdot z + \gamma)/(z + \delta)$, K – коэффициент обмена; $\gamma = 5 \cdot 10^{-5}$ м³/с; $\delta = 10$ м); $q(z)$ – интенсивность ионообразования ($q(z, t) = q_s(z) + q_v(z, t)$); $q_s(z), q_v(z, t)$ – стационарная и вариативная составляющие ионизации; $\alpha(z)$ – коэффициент рекомбинации; $\beta_{1,2}$ – коэффициент присоединения легких ионов к аэрозольным частицам; N_a – концентрация нейтральных твердых аэрозольных частиц; η – коэффициент взаимодействия легких ионов с гидрометеорами; N_p – концентрация гидрометеоров в выпадающих осадках.

Согласно экспериментальным исследованиям [*Атмосфера. Справочник 1991*], наибольшее влияние на значение величин атмосферного электричества оказывают аэрозольные частицы (ядра конденсации) с диаметром 0,01–0,2 мкм. Для условий города в тёплый сезон года концентрация аэрозолей данной фракции у поверхности земли принималась равной $N = 3 \cdot 10^{10}$ м⁻³ [*Атмосфера. Справочник 1991*]. Вертикальное распределение аэрозолей в данной модели описывалось экспоненциальной функцией [*Селезнева, Юдин 1960*]:

$$N_a(z) = N_a(z_0) \cdot e^{-\frac{z}{h}}$$

где $N_a(z)$ и $N_a(z_0)$ – концентрации аэрозольных частиц в см³ на расчётной высоте и у поверхности земли; h – некоторый коэффициент, определяемый эмпирическим путём для конкретных условий в атмосфере.

Для исследования использовалось значение $h = 1300$ м, полученное на основе самолетного зондирования атмосферы в летние дни при развитии конвективных облаков различной мощности [*Селезнева, Юдин 1960*]. В качестве β_1 и β_2 были приняты средние для данного диапазона размеров аэрозольных частиц значения $\beta_1 = 2,445 \cdot 10^{-12}$ и $\beta_2 = 2,465 \cdot 10^{-12}$ м³/с [*Hoppel, Frick 1986*].

При отсутствии осадков в пункте наблюдения, последнее слагаемое равнялось нулю, а в расчёте вводилось допущение, что основной источник поступления легких ионов в атмосферу постоянен и не зависит от высоты, то есть $q(z, t) = q_s(z)$.

Стационарную часть ионизации $q_s(z)$ обусловленная почвенным радоном и тороном имеет вид:

$$q_s(z) = q_0 + C_a \cdot e^{-\frac{z}{\Delta z_a}} + C_b \cdot e^{-\frac{z}{\Delta z_b}},$$

где $C_a = 5q_0$; $C_b = 3q_0$; $\Delta z_a, \Delta z_b$ – полутолщина области воздействия торона и радона.

В случае наличие осадков в пункте наблюдения в правую часть уравнения расчёта концентрации положительных и отрицательных лёгких ионов добавлялось слагаемое $-\eta n_1 n_2 N_p$. Добавленное слагаемое описывает сток легких ионов на гидрометеоры, отмеченный в разделе 3.1 на примере случаев выпадения ливневого снега.

Выпадение осадков в виде ливневого дождя и снега приводит к эффективному нестационарному стоку легких ионов на гидрометеоры. Поскольку частицы осадков являются проводящими, то силы электростатической индукции будут способствовать коагуляции. Величина $\eta = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2$, называемая коэффициентом захвата или коэффициентом коагуляции, определяется произведением вероятности столкновения $\varepsilon_1 = 1$ на вероятность их слияния ε_2 . Из-за конечности размеров частицы возможно зацепление мелкой частицы за крупную.

Эффект зацепления при этом играет основную роль при вымывании осадками легких ионов, когда броуновская диффузия уже неэффективна, а влияние инерции на осаждение мало. При относительной влажности, близкой к 100%, величина вероятности слияния в такой ситуации $\varepsilon_2 \sim 1$. Таким образом

коэффициент взаимодействия легких ионов с гидрометеорами (коагуляции) равнялся 1.

Концентрация выпадающих осадков определялась по соотношению:

$$N_p(z, t) = \begin{cases} N_{p, \max} \cdot \left[\frac{1 - (z - (z_p - V_p t))^2}{\Delta z_p^2} \right]^2, & \frac{z - (z_p - V_p t)}{\Delta z_p} < 1, \\ 0, & \frac{z - (z_p - V_p t)}{\Delta z_p} > 1, \end{cases}$$

где $N_{p, \max} = 10^2 \text{ м}^{-3}$ – максимальная концентрация гидрометеоров в центре области осадков; z_p – высота первоначального расположения центра области осадков; Δz_p – полутолщина области осадков; V_p – скорость падения гидрометеоров.

Как было отмечено в разделе 3.1, выпадение ливневых осадков обуславливает появление дополнительного источника ионизации. В связи с этим полагалось, что ионизация в атмосфере не однородна по высоте и имеет стационарный (эманации радона и торона из почвы) и вариативный источник (поток ДПР радона при осадках). Таким образом ионизация рассчитывалась как:

$$q(z, t) = q_s(z) + q_v(z, t).$$

Вариативная часть ионизации $q_s(z)$ обусловленная радионуклеидами определялась как:

$$q_v(z, t) = \begin{cases} C_0 \cdot \left[\frac{1 - (z - (z_q - V_q t))^2}{\Delta z_q^2} \right]^2, & \frac{z - (z_q - V_q t)}{\Delta z_q} < 1, \\ 0, & \frac{z - (z_q - V_q t)}{\Delta z_q} > 1, \end{cases}$$

где $C_0 = 2q_0$; Δz_q – полутолщина области влияния ДПР радона; z_q – высота центра области влияния ДПР радона; V_q – скорость осаждения ДПР радона.

Значения основных параметров системы уравнений, используемых при расчёте, сведены в таблицу 3.6.

Таблица 3.6 – Основные параметры системы уравнений

Параметр	Название	Значения
b_1	Подвижность положительных легких ионов	$1,36 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$
b_2	Подвижность отрицательных легких ионов	$1,56 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$
K	Коэффициент обмена	5
D_{mol}	Коэффициент молекулярной диффузии	$10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$
q_0	Интенсивность ионообразования на верхней границе	$6 \cdot 10^7 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$
α	Коэффициент рекомбинации ионов	$1,6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$
β_1	Коэффициент присоединения положительных ионов к частицам аэрозоля	$2,445 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3/\text{с}$
β_2	Коэффициент присоединения отрицательных ионов к частицам аэрозоля	$2,465 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3/\text{с}$
η	Коэффициент взаимодействия легких ионов с гидрометеорами (коагуляции)	1
Δz_a	Полутолщина области воздействия торона	20 м;
Δz_b	Полутолщина области воздействия радона	200 м
Z_p	Высота первоначального расположения центра области осадков	1500 м
ΔZ_p	Полутолщина области осадков	500 м
V_p	Скорость падения гидрометеоров	60 м/мин
η	Коэффициент взаимодействия легких ионов с гидрометеорами (коагуляции)	1
Z_q	Высота центра области влияния ДПР радона	1500 м
ΔZ_q	Полутолщина области влияния ДПР радона	500 м
V_q	Скорость осаждения ДПР радона	60 м/мин

Для задания динамики напряжённости электрического поля ($E = -\nabla\phi$), используемой в расчёте n_1 и n_2 , а также ρ , λ_1 и λ_2 на их основе, и последующей проверки результатов расчёта из экспериментальных данных градиента потенциала электрического поля и полярных электрических проводимостей на

интервале 2006-2017 гг. отбирались участки с интенсивными их изменениями, обусловленными прохождением кучево-дождевых облаков.

При этом рассматривались только случаи прохождения в окрестностях пункта мониторинга отдельных одноячейковых кучево-дождевых облаков. Ввод данного условия связан с тем, что исследовалась изменчивость электродного слоя под влиянием изолированной конвективной ячейки. Только в этом случае можно судить о конкретном источнике, воздействующим на электродный слой. Отбираемые случаи были представлены, главным образом, внутримассовыми облаками, развивающимися в тылу циклона. Общее количество отобранных случаев с наличием надёжных данных по $\nabla\varphi$ и λ_{\pm} составило 67.

Для численного расчёта в модель «загружались» отрезки с интенсивными изменениями значений $\nabla\varphi$ во время прохождения Cb . При этом исходные данные проходили предобработку, назначением которой являлось получение очищенного от флуктуационной составляющей отклика электрической структуры облака без прямого или косвенного (путём воздействия на λ_{\pm} в приземном слое) влияния сопутствующих атмосферных явлений (жидких и твёрдых осадков, близких молниевых разрядов, шквала) и перераспределения аэрозоля у поверхности земли.

В качестве примера рассмотрим предварительную обработку вариаций $\nabla\varphi$ на примере двух контрастных случаев прохождения одиночных одноячейковых облаков во время тёплого и холодного сезонов года (23 мая и 19 декабря 2015 гг.), которым сопутствовали осадки в виде ливневого дождя и ливневого снега соответственно.

Предобработка заключалась в определении в вариациях $\nabla\varphi$ ряда критических точек (K_n) в местах основных изгибов кривой и на границах отрезков данных (рис. 3.15). Полученная последовательность K интерполировалась с шагом 1 минута. Использовалась кусочно-кубическая интерполяция Эрмита, хорошо передающая геометрию исходных данных.

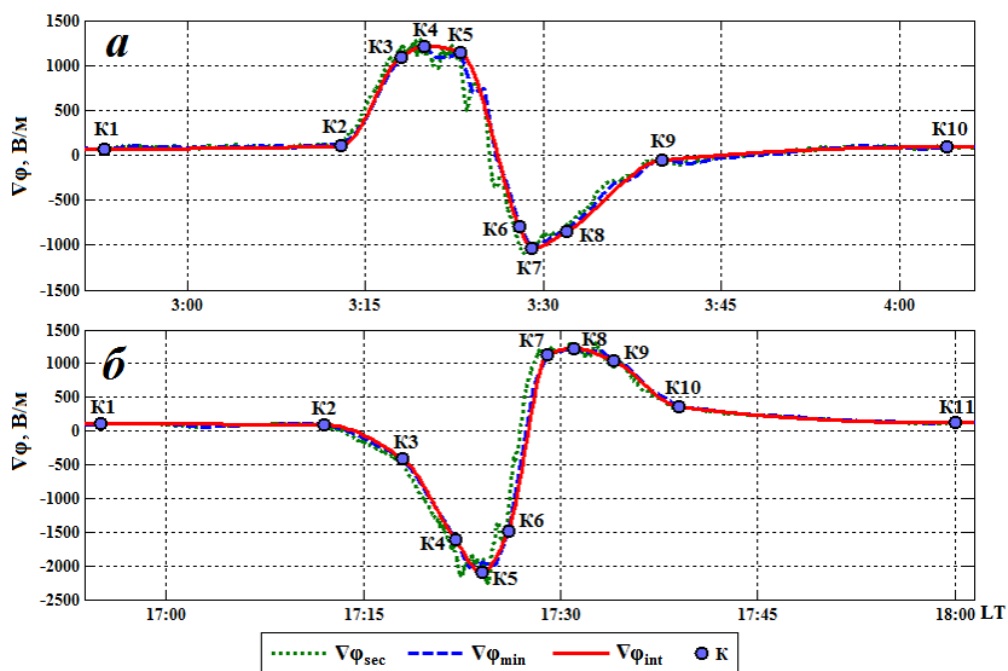


Рисунок 3.15. – Исходные данные градиента потенциала с секундной ($\nabla\varphi_{\text{sec}}$) и минутной ($\nabla\varphi_{\text{min}}$) дискретизацией, а также выделенные на их основе критические точки (K_n) и полученные интерполированные значения данных ($\nabla\varphi_{\text{int}}$) во время прохождения одиночного *Cb* в тёплый (23 мая, *a*) и холодный (19 декабря, *б*) сезоны 2015 г.

На основе полученных значений n_1 и n_2 осуществлялся расчёт плотности объёмного заряда, положительной и отрицательной электропроводностей как $\rho = n_1 - n_2$, $\lambda_1 = eb_1n_1$ и $\lambda_2 = eb_2n_2$ соответственно.

3.5. Численные оценки динамики $\nabla\varphi$, ρ и λ_{\pm} при *Cb* и ливневых осадках

На основе системы уравнений и по методике описанной в разделе 3.4, выполнен численный расчёт динамики параметров электродного слоя под воздействием одиночных кучево-дождевых облаков и ливневых осадков.

Рассмотрим результаты моделирования на примере двух случаев прохождения *Cb* и ливневых осадков, репрезентативных для тёплого и холодного периодов года. В обоих рассмотренных случаях прохождения кучево-дождевых облаков в динамике $\nabla\varphi$ отмечались два возмущения противоположной полярности. Электрическая структура данных облаков, предположительно,

характеризовалась дипольной структурой основных объёмных зарядов и некоторым наклоном к поверхности земли (23 мая – вперёд, 19 декабря – назад).

В ходе численного расчёта отмечено согласованное изменение E с одной стороны и концентрации положительных и отрицательных ионов во время прохождения одиночных кучево-дождевых облаков. Во время положительного возмущения напряжённости электрического поля E (отрицательного возмущения $\nabla\varphi$) отмечается падение n_+ и как следствие падение λ_+ , в то время как в n_- и λ_- наблюдается некоторый рост. При отрицательном возмущении E , наоборот, отмечается падение λ_- и рост λ_+ (рис. 3.16).

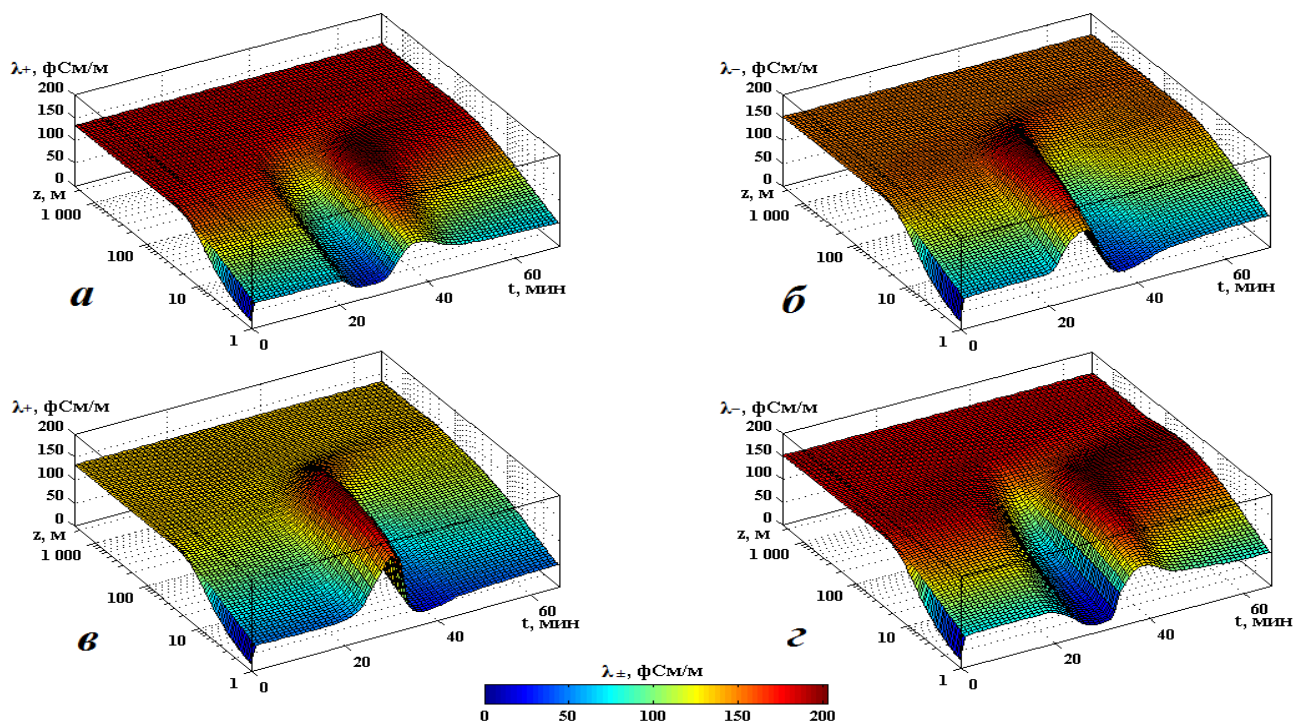


Рисунок 3.16 – Рассчитанное (без учёта аэрозоля) изменение с высотой и временем модельных положительной (а, в) и отрицательной (б, г) электропроводностей 23 мая (а, б) и 19 декабря (б, г) 2015 г.

Особенностью пространственно-временного распределения n_+ и n_- является затухание колебаний, обусловленных вариациями E , с высотой и их временная задержка, увеличивающаяся с высотой. В пространственном распределении наблюдается быстрое «опустошение» электродного слоя под воздействием сильного электрического поля и сравнительно медленное его восстановление.

Размах изменений n_{\pm} , а следовательно и λ_{\pm} , обусловленный вариациями $\nabla\phi$ при прохождении Cb максимален в приземном слое уменьшается по мере удаления от поверхности и достигает нуля на высотах больших высоты электродного слоя (~ 100 м).

Сопоставление численно рассчитанных значений λ_{\pm} с экспериментальными данными (рис. 3.16) показывает удовлетворительное согласие во временной динамике. Хорошо согласуется падение электрической проводимости во время возмущения E той же полярности, при этом плохо согласуется рост в электрической проводимости противоположного знака. Кроме того, отмечается сильное различие (\sim на порядок) в абсолютной величине λ_{\pm} . Выявленные расхождения в численно рассчитанных и экспериментальных данных, связано с тем что в модели в качестве стока учитывается только рекомбинация лёгких ионов.

Учёт влияния твёрдого атмосферного аэрозоля (ядер конденсации) на электрические параметры приземной атмосферы показывает более лучшее согласия результатов численного расчёта с натурными данными.

На рисунке 3.17 представлен пример экспериментально наблюдаемой и численно рассчитанной динамики λ_{\pm} для двух случаев прохождения Cb 23 мая и 19 декабря 2015 года. Модельный расчёт выполнялся как без учёта влияния аэрозоля (ядер конденсации), так и при различной его концентрации (N_{\min} , N_{mean} и N_{\max}) теоретически возможной в городских условиях в тёплый и холодный период. Для тёплого периода значения N_{\min} , N_{mean} и N_{\max} принимались равными 5, 7 и $10 \cdot 10^{10}$, а для холодного – 1, 3 и $5 \cdot 10^{10}$ соответственно.

Наблюдается хорошее согласие формы временного изменения численно рассчитанных и экспериментально наблюдаемых электрических проводимостей. Хорошо проявляется падение электрических проводимостей во время возмущений электрического поля и в тоже время не происходит настолько сильного возрастания электропроводностей, наблюдаемые на рис 3.17б и 3.17д), и практически не проявляющихся в эмпирических данных (рис. 3.17в, 3.17е).

Кроме того, абсолютные значения полярных электрических проводимостей практически совпадают с экспериментально наблюдаемыми.

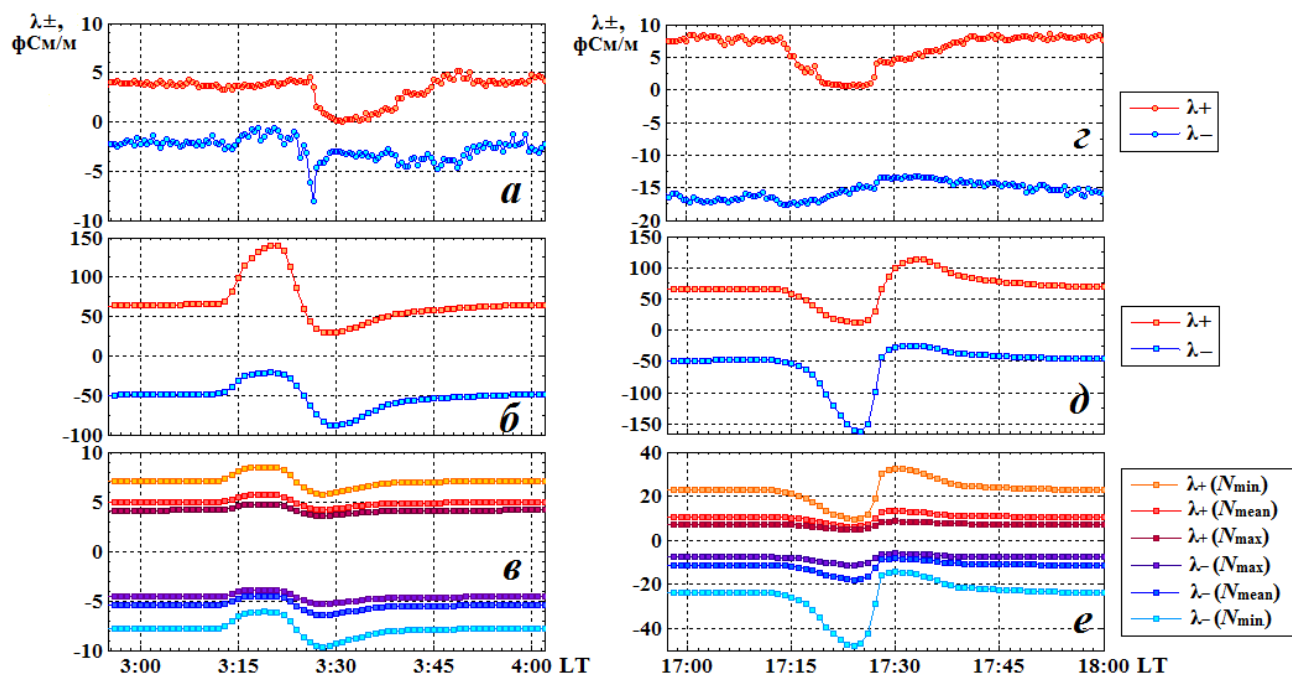


Рисунок 3.17 – Изменение со временем экспериментально измеренных (*a, г*) и численно рассчитанных (*б, в и д, e*) значений положительной (λ_+) и отрицательной (λ_-) электропроводностей по данным за 23 мая (*a, б*) и 19 декабря (*в, г*) 2015 г. На рисунке: *б, д* – результаты расчёта без учёта аэрозоля, *в, e* – с учётом аэрозоля.

Наконец, рассмотрим модельную динамику параметров электродного слоя под воздействием интенсивных вариаций электрического поля, обусловленных прохождением *Sb*, и выпадения ливневых осадков на примере ливневого снега. Как видно из рисунка 3.18, по мере выпадения осадков в виде ливневого снега в слое через который проходят осадки отмечается эффективный нестационарный сток легких ионов на снежинки из-за чего плотность объёмного заряда на этих высотах падает до нуля.

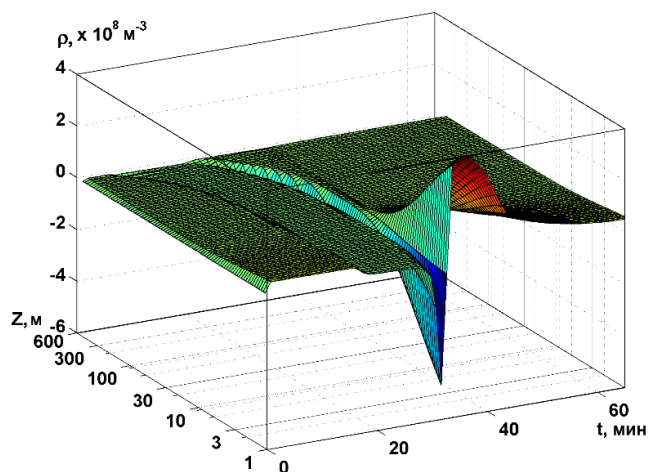


Рис. 3.18 – Модельная динамика плотности объемного заряда (ρ) при прохождении зимнего *Cb* и выпадении интенсивного ливневого снега.

При опускание области осадков до земной поверхности в приземном слое отмечается быстрое синхронное падение полярных электропроводной обеих значков практически до нуля (рис. 3.19). Восстановление значений электропроводностей отмечается уже после окончания осадков и имеет более плавный характер. Рисунки 3.18 и 3.19 свидетельствуют о важной роли твердых ливневых осадков, являющихся, по сути, стоком легких ионов обеих полярностей.

Эффект «выметания» лёгких ионов гидрометеорами имеет место и при выпадение ливневого дождя, но поскольку размеры капель дождя в несколько раз меньше снежинок той же массы он значительно слабее чем при снеге.

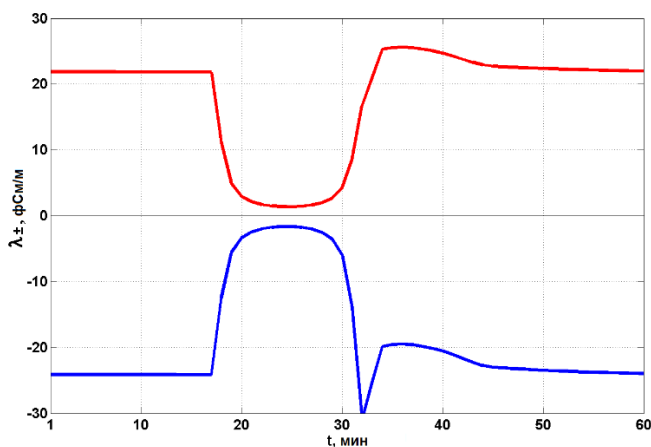


Рис. 3.19 – Модельная динамика плотности объемного заряда (ρ) при прохождении зимнего *Cb* и выпадении интенсивного ливневого снега.

3.6. Выводы по главе

Описана методика отбора натуральных данных градиента потенциала электрического поля и полярных электрических проводимостей при прохождении кучево-дождевых облаков и ливневых осадков, а также оценки временной структуры вариаций $\nabla\varphi$ и λ_{\pm} . Описаны основные уравнения, используемые для математического моделирования вариаций $\nabla\varphi$, ρ и λ_{\pm} под воздействием Cb и ливневых осадков. Отмечены характерные особенности динамики $\nabla\varphi$ и λ_{\pm} при Cb и ливневых осадках. Показаны особенности временной структуры вариаций $\nabla\varphi$ при воздействии кучево-дождевых облаков и связанных с ними атмосферных явлений. Представлены результаты модельной оценки динамики $\nabla\varphi$, ρ и λ_{\pm} при Cb и ливневых осадках.

В ходе работы были получены следующие основные результаты.

1. Получено, что длительность «медленных» вариаций $\nabla\varphi$ в среднем по всем случаям прохождения кучево-дождевой облачности составляет 53 минуты, то есть наблюдается прохождение в среднем двух конвективных ячеек (~ 30 мин).
2. Отмечено, что среднее значение размаха $\nabla\varphi$ при Cb в грозовой стадии превышает аналогичное значение в ливневой стадии более чем в 2,1 раза.
3. Рассчитано, что длительность отдельных структурных элементов вариаций $\nabla\varphi$ (возмущений) при прохождении Cb составляет ~ 10 мин.
4. Выявлено, что распределения общей длительной «медленных» вариаций $\nabla\varphi$ под воздействием Cb и средних значений положительных и отрицательных возмущений $\nabla\varphi$ близки к составному распределению Леви-Парето.
5. Отмечено, что перелом распределении общей длительной «медленных» вариаций $\nabla\varphi$ под воздействием Cb приходится на длительность ~ 60 мин, а два различных участка распределения предположительно связаны с принципиально различными проявлениями кучево-дождевой облачности: одиночные кучево-дождевые облака или конгломераты Cb .

6. Показано, что под влиянием вариаций $\nabla\phi$, обусловленных прохождением Cb происходят противофазные изменения в концентрации положительных (n_+) и отрицательных (n_-) лёгких ионов.
7. Замечено, что падение электропроводности (λ) одной из полярностей и рост λ противоположной полярности при прочих равных условиях тем сильнее, чем выше абсолютные значения $\nabla\phi$ во время возмущений электрического поля.
8. Показано, что амплитуда колебаний λ_{\pm} при сходных значениях $\nabla\phi$ тем больше, чем меньше содержание аэрозоля (ядер конденсации) на данном уровне.
9. Выявлено, что выпадение интенсивного ливневого дождя приводит к быстрому росту (особенно n_-), а ливневого снега – к согласованному исчезновению лёгких ионов обеих полярностей.
10. Отмечено, что перенос и распад в атмосфере дочерних продуктов распада радона приводит к монотонному росту n_{\pm} после выпадения интенсивных ливневых осадков.

4. ФОРМАЛИЗАЦИЯ ОТКЛИКА АТМОСФЕРНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН НА ВОЗДЕЙСТВИЕ *Cb*

Анализ динамики градиента потенциала электрического поля приземной атмосферы показал, что при прохождении кучево-дождевых облаков и сопутствующих атмосферных явлений отмечаются интенсивные изменения как абсолютной величины, так и знака градиента потенциала. При этом форма временной динамики $\nabla\varphi$ существенно различна для *Cb*, развивающихся в разных синоптических ситуациях и имеющих различную конфигурацию. Ниже рассмотрены вопросы, связанные с типизацией «медленных» вариаций $\nabla\varphi$ и выявлением их наиболее распространённых типов, а так же поиском связи наиболее встречающихся форм вариаций с особенностями генезиса и электрической структуры *Cb*. Дополнительно представлены результаты модельной оценки вариаций $\nabla\varphi$ под воздействием *Cb* с заданной электрической структурой и динамики параметров электродного слоя при воздействии вариаций $\nabla\varphi$ основных типов. В качестве заключения обобщены результаты экспериментальных и модельных исследований вариаций $\nabla\varphi$ при прохождении кучево-дождевых облаков. Основные результаты опубликованы в статье в рецензируемом журнале [[Пустовалов, Нагорский // Оптика атмосферы и океана, 2016](#); [Пустовалов, Нагорский 2016](#); [Пустовалов, Нагорский 2016](#)].

4.1. Методика выделения форм вариаций $\nabla\varphi$, связанных с *Cb* различного происхождения

Анализ экспериментальных данных показал, что при прохождении кучево-дождевых облаков отмечаются интенсивные изменения как величины, так и знака $\nabla\varphi$ в приземном слое атмосферы, а особенности вариаций $\nabla\varphi$ и их временная структура во время прохождения различных проявлений *Cb* существенно различаются. Поэтому необходим анализ наиболее часто встречающихся форм

вариаций $\nabla\varphi$, зарегистрированных во время воздействия на приземный слой атмосферы мониторинга кучево-дождевой облачности, и выявление связей между формами «медленных» вариаций $\nabla\varphi$ с одной стороны и генезисом *Cb* и их степенью развития с другой.

Для выявления наиболее распространённых типов «медленных» вариаций $\nabla\varphi$ под воздействием *Cb* различного происхождения осуществлялась типизация формы динамики $\nabla\varphi$ во время отрезков данных, отобранных по методике описанной в главе X.X. Критериями типизации явились количество и последовательность смены возмущений положительной и отрицательной полярности (d_{\pm}) (рис. 4.1).

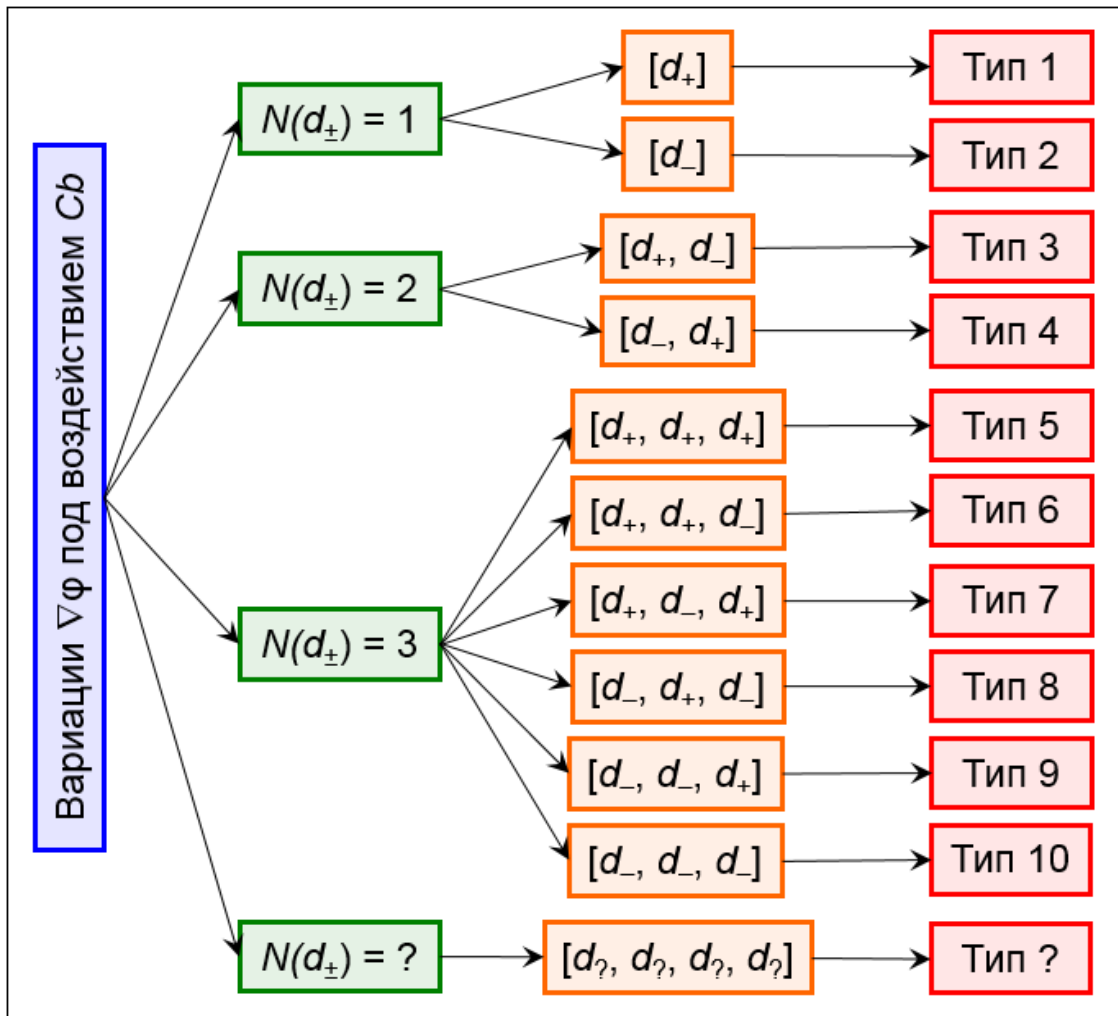


Рисунок 4.1 – Схема алгоритма типизации форм «медленных» вариаций $\nabla\varphi$ под воздействием *Cb*.

4.2. Основные формы вариаций $\nabla\varphi$ при Cb и их связь с генезисом Cb

В ходе типизации было выделено более 100 типов вариаций $\nabla\varphi$, связанных с прохождением в окрестностях пункта измерения кучево-дождевых облаков различного происхождения и отличающиеся количеством и последовательностью смены знака «медленных» возмущений.

Анализ результатов показал, что вариации $\nabla\varphi$ во время 2/3 случаев прохождения Cb относятся к 10 основным типам, повторяемость которых составляет не менее 1 % от общего количества случаев (рис. 4.2). Качественно форма вариаций $\nabla\varphi$ выделенных типов иллюстрируется рис. 4.3.

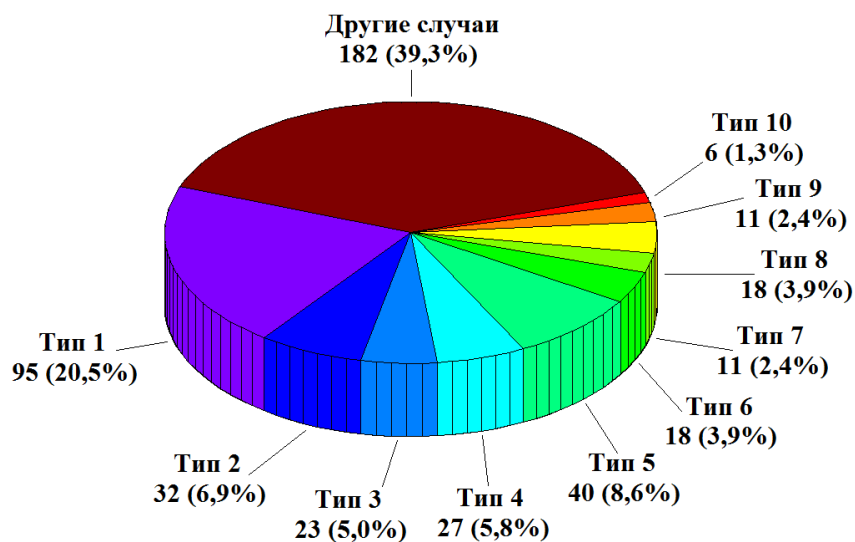


Рисунок 4.2. – Повторяемость типов вариаций $\nabla\varphi$ при прохождении Cb различного генезиса

Формы вариаций $\nabla\varphi$ для остальных случаев прохождения Cb (182 случая, 39,3 %) характеризуются значительно более сложным видом, большим количеством возмущений и имеют существенно более низкую повторяемость. Форма вариаций $\nabla\varphi$ во время этих случаев обусловлена влиянием на приземное электрическое поле множества последовательно проходящих кучево-дождевых облаков или сложного конгломерата Cb .

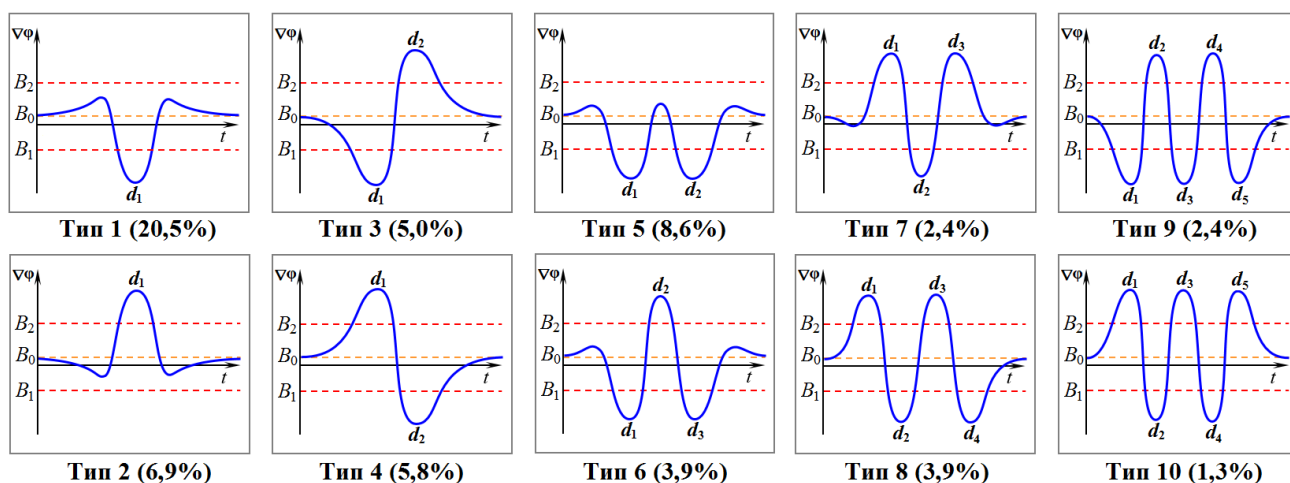


Рисунок 4.3. – Идеализированные схемы основных типов вариаций $\nabla\varphi$ при прохождении Cb различного генезиса

Перейдем к изучению временной структуры выявленных основных типов вариаций $\nabla\varphi$. Средние значения D_v и A_v для каждого из выделенных типов вариаций $\nabla\varphi$ представлены в таблицах 4.2 и 4.3. Общая длительность выделенных типов вариаций $\nabla\varphi$ изменяется в пределах $D_v \sim 10 - 70$ мин, а амплитуда вариаций $\nabla\varphi$ лежит в диапазоне $A_v \sim 2,3-10,4$ кВ/м.

Таблица 4.2. – Средние значения длительности вариаций (D_v) градиента потенциала при прохождении Cb различного генезиса.

Тип вариаций	D_v , мин					
	Среднее	Медиана	Мода	СКО	Макс.	Мин.
1	13,7	11,0	3,0	10,8	53,0	1,0
2	9,6	5,0	1,0	11,5	55,0	1,0
3	32,3	31,0	16,0	21,5	112,0	6,0
4	30,0	25,0	27,0	16,6	71,0	11,0
5	38,1	32,5	30,0	20,0	89,0	10,0
6	36,9	35,5	38,0	14,3	66,0	15,0
7	29,2	35,0	35,0	16,6	55,0	8,0
8	50,4	45,0	71,0	24,0	93,0	15,0
9	66,8	44,0	36,0	44,3	176,0	27,0
10	59,3	55,0	38,0	18,1	83,0	38,0

Таблица 4.3. – Средние значения размаха вариаций (A_v) градиента потенциала при прохождении Cb различного генезиса.

Тип вариаций	A_v , В/м					
	Среднее	Медиана	Мода	СКО	Макс.	Мин.
1	2531	2054	2054	1450	9124	777
2	2267	1905	799	1062	5221	799
3	6298	5382	2527	2570	11853	2527
4	6190	6410	2782	2515	10132	2782
5	2713	2425	765	1400	6382	765
6	8371	7877	14236	2791	14236	4588
7	8160	7739	2912	3744	13412	2912
8	9992	10174	6485	2266	14588	6485
9	8826	8632	3618	3089	14530	3618
10	10372	10200	9676	719	11434	9676

Длительность отдельных структурных элементов (D_{dn}) составляет в среднем ~ 10 мин и изменяется в диапазоне от 6 до 15 мин. Средние абсолютные значения $\nabla\varphi$ отдельных возмущений (V_{dn}) составляют в среднем $\sim 2,4$ кВ/м и изменяются в диапазоне 1,2–3,7 кВ/м. Следует подчеркнуть, что для крайних (первого и последнего) возмущений 3-10 типов D_d в целом выше, а V_d ниже, чем для промежуточных возмущений. Эту особенность можно объяснить постепенным возрастанием/убыванием (обратно пропорционально квадрату расстояния) значения $\nabla\varphi$ при подходе/отходе конвективной ячейки или конгломерата ячеек к пункту наблюдения. Непосредственно под облаком при смене знака доминирующего объёмного заряда изменение величины и знака $\nabla\varphi$ приземного электрического поля происходит сравнительно быстро ($\sim 1-3$ мин). Средние значения D_{dn} и V_{dn} выделенных типов вариаций $\nabla\varphi$ суммированы в табл. 4.4.

На основе D_{dn} и V_{dn} для каждого из основных типов вариаций $\nabla\varphi$ получены осредненные профили временной динамика, $\nabla\varphi$ описывающие характерные

особенности отклика в приземном электрическом поле при прохождении *Cb* различного генезиса.

Таблица 4.4. – Средние значения D_{dn} и V_{dn} отдельных структурных элементов d_n для выделенных типов вариаций градиента потенциала.

Тип вариаций	D_{dn} , мин					V_{dn} , В/м				
	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5
1	13,5	–	–	–	–	-1400	–	–	–	–
2	9,5	–	–	–	–	1550	–	–	–	–
3	14,0	11,5	–	–	–	-2450	2250	–	–	–
4	11,5	15	–	–	–	2850	-1850	–	–	–
5	14,5	12,6	–	–	–	-1350	-1150	–	–	–
6	12,5	6	11,0	–	–	-2550	3350	-1750	–	–
7	4,5	9,5	9,5	–	–	2250	-2900	1950	–	–
8	9	9	12	10,5	–	2700	-2950	3400	-1800	–
9	16,5	11,5	5,5	9	9,5	-2300	2750	-2800	2250	-1550
10	12	4,0	9	10,5	14,0	2750	-3150	3700	-3200	2150

Совместный анализ данных $\nabla\varphi$, и синоптических карт и данных MODIS (для случаев дневных наблюдений) позволил связать выявленные типы вариаций с конкретными метеорологическими условиями.

Прохождение одиночных внутримассовых *Cb* характеризуется (рис. 4.4) сравнительно плавным изменением величины $\nabla\varphi$ с 1-3 последовательными возмущения $\nabla\varphi$, общая длительность которых не превышает 1 часа. Кроме того, согласно [Ahrens 2012; Горбатенко, Ершова 2011; Houze 2014], время жизни отдельной конвективной ячейки составляет ~30-45 мин. Таким образом можно предположить, что типы 1–7 предположительно связаны с одиночными одноячейковыми кучево-дождевыми облаками (рис. 4.4), находящимися на различных стадиях развития. Однако, подобная форма отклика в $\nabla\varphi$ также возможна и под влиянием суперпозиции электрических полей двух смежных *Cb*,

например 1 и 2 типа. В случае одиночного источника, согласно значениям A_v , 3-7 типы предположительно связаны с конвективными ячейками на различных этапах стадии зрелости, в то время как типы 1 и 2 – с ячейкой в стадии развития или диссипации.

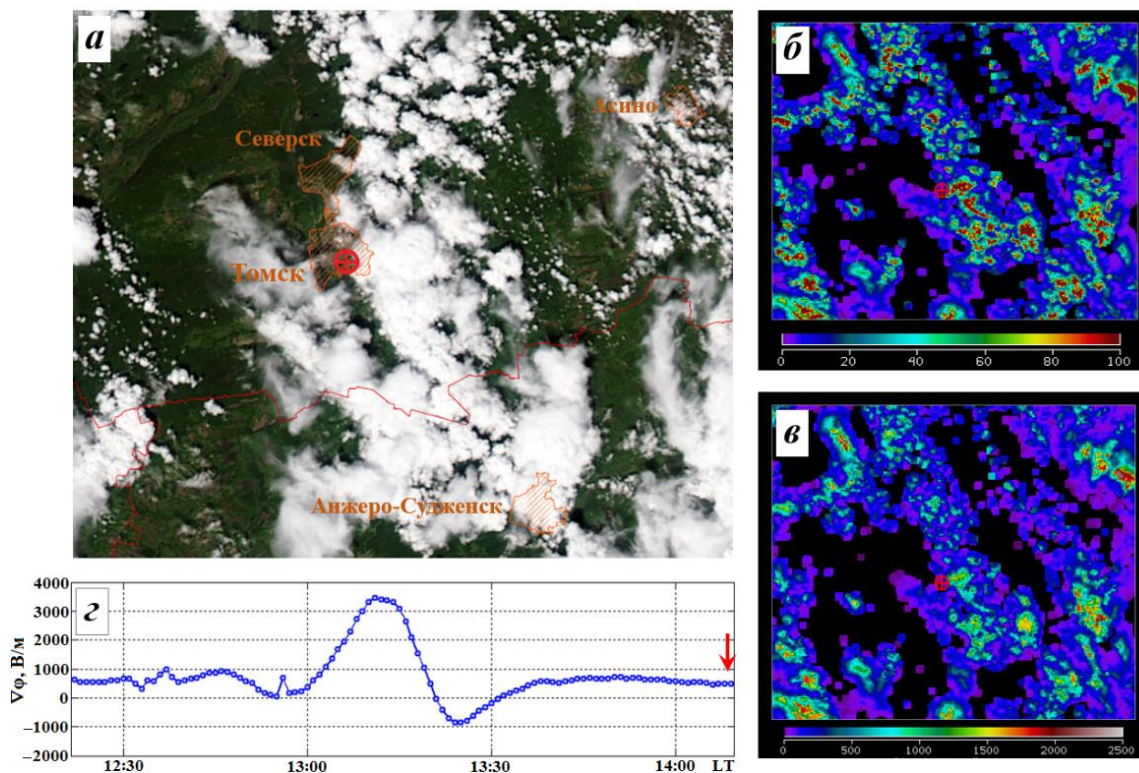


Рисунок 4.4. – RGB-изображение (а), оптическая толщина (б) и водозапас (в, г/м³) облачности за 14:10 LT 15.06.2007 (Aqua MODIS), а также динамика $\nabla\varphi$ в пункте мониторинга (z) в соответствующий период времени (стрелка обозначает момент времени, для которого получены данные MODIS).

Во время прохождения через пункт мониторинга нескольких близко расположенных кучево-дождевых облаков внутримассового скопления наблюдаются сложные вариации $\nabla\varphi$, связанные с суперпозицией электрических полей, а, следовательно, и возмущений, обусловленных каждым из *Cb*. Таким образом, с некоторой вероятностью, 3-7 типы могут быть связаны с суперпозицией близко расположенных *Cb* внутримассового скопления, создающих вариации 1 и 2 типов.

Кучево-дождевые облака, распространяющиеся в облачной системе атмосферного фронта (рис. 4.5) и представляющие собой конгломераты (гряды, скопления) мультитячейковых облаков, характеризуются резкими изменениями величины $\nabla\varphi$ и целой серией непродолжительных возмущений $\nabla\varphi$, общая длительность которых составляет, как правило, несколько часов. Прохождение фронтальных мультитячейковых кучево-дождевых облаков, приводящее к суперпозиции электрических полей смежных конвективных ячеек, формирует в отклике $\nabla\varphi$ 8-10 типы или более сложный отклик не вошедший в 10 основных форм.

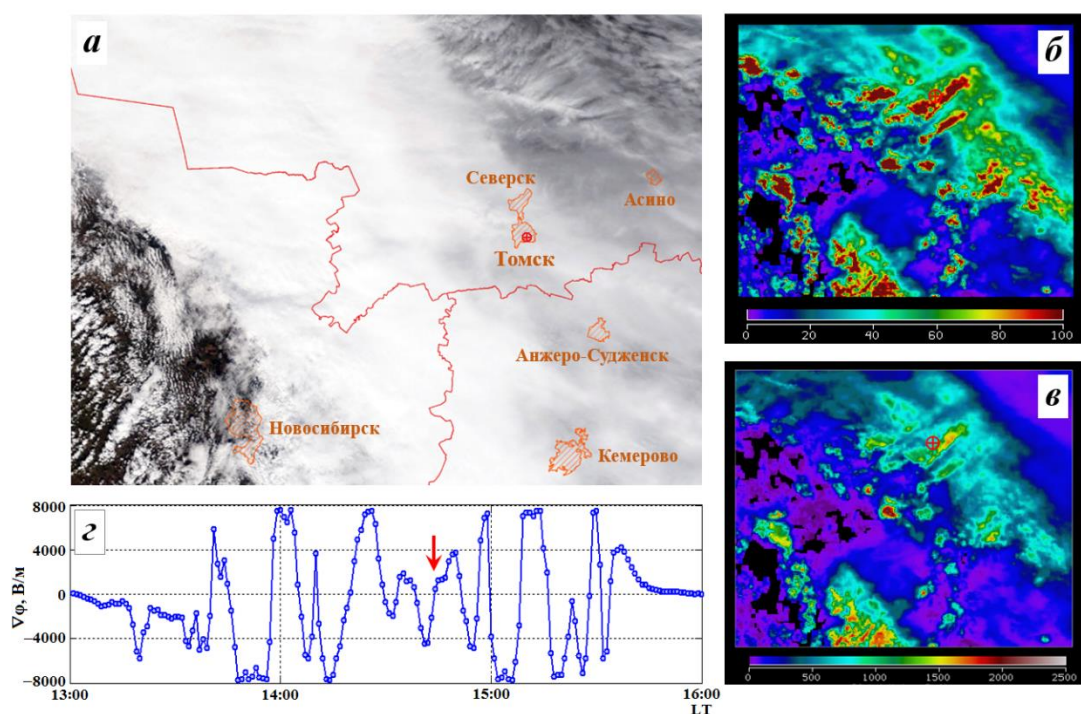


Рисунок 4.5. – RGB-изображение (а), оптическая толщина (б) и водозапас (в, г/м^3) облачности за 14:45 LT 8.05.2007 (Terra MODIS), а также динамика $\nabla\varphi$ в пункте мониторинга (z) в соответствующий период времени (стрелка обозначает момент времени для которого получены данные MODIS).

Прохождение мезомасштабных конвективных комплексов (рис. 4.6) характеризуется длительным сохранением высоких значений $\nabla\varphi$ ($\nabla\varphi > 1\text{кВ/м}$) и приводит, как правило, к регистрации 1-2 возмущений противоположной полярности. Длительность каждого из них может превышать 1 час. Поскольку

число случаев прохождения Cb в составе МКК и их скоплений существенно меньше чем внутримассовых и фронтальных мультитячейковых кучево-дождевых облаков, то вариации $\nabla\varphi$, связанные с МКК, в отдельный тип не выделялись.

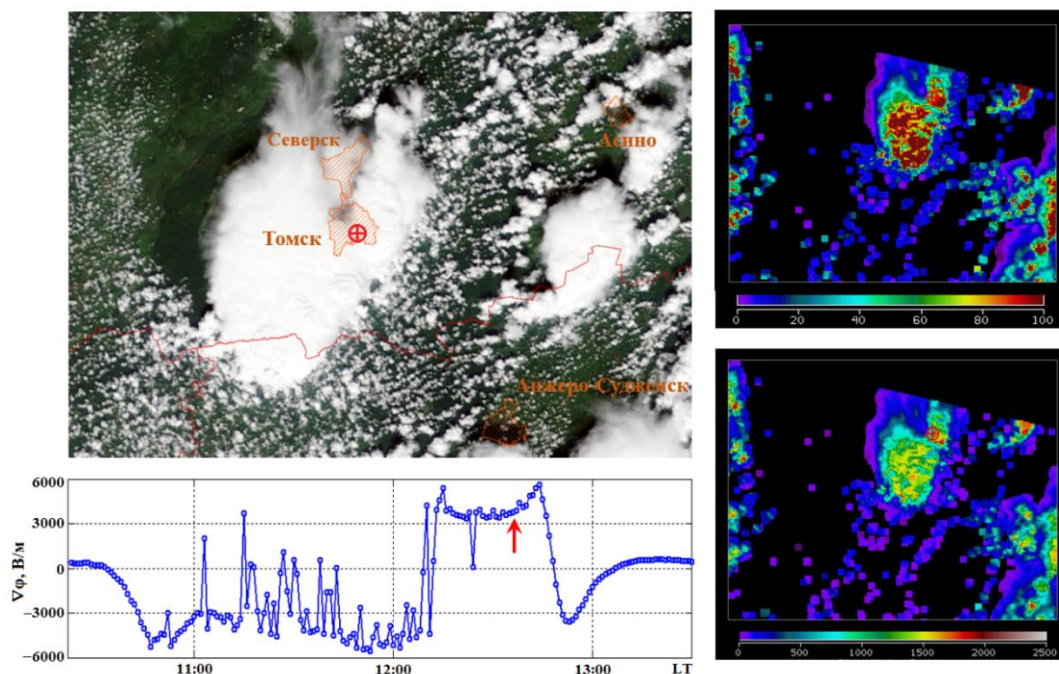


Рисунок 4.6. – RGB-изображение (а), оптическая толщина (б) и водозапас (в, г/м³) облачности за 12:35 LT 20.07.2009 (Terra MODIS), а также динамика $\nabla\varphi$ в пункте мониторинга (г) в соответствующий период времени (стрелка обозначает момент времени для которого получены данные MODIS).

4.3. Формы вариаций $\nabla\varphi$ при изолированных внутримассовых Cb и их связь со стадиями развития Cb

Как было отмечено в разделе 4.2 вариации $\nabla\varphi$ обусловленные прохождением кучево-дождевых зависят от происхождения и структуры облаков данной формы. В связи с этим большую важность имеет исследование основных форм вариаций $\nabla\varphi$ под воздействием изолированных Cb внутримассового происхождения, представленных одной конвективной ячейкой, как наиболее простого проявления кучево-дождевых облаков в природе.

Была проведена типизация форм вариаций $\nabla\varphi$ под воздействием только одиночных *Cb* внутримассового происхождения. В результате обработки выделено все 9 типов формы медленных вариаций $\nabla\varphi$, обусловленных порождением изолированных кучево-дождевых облаков внутримассового происхождения (рис. 4.7). При этом 97% случаев прохождения изолированных одноячейковых *Cb* представлены 6-ю основными типами вариаций (рис. 4.8).

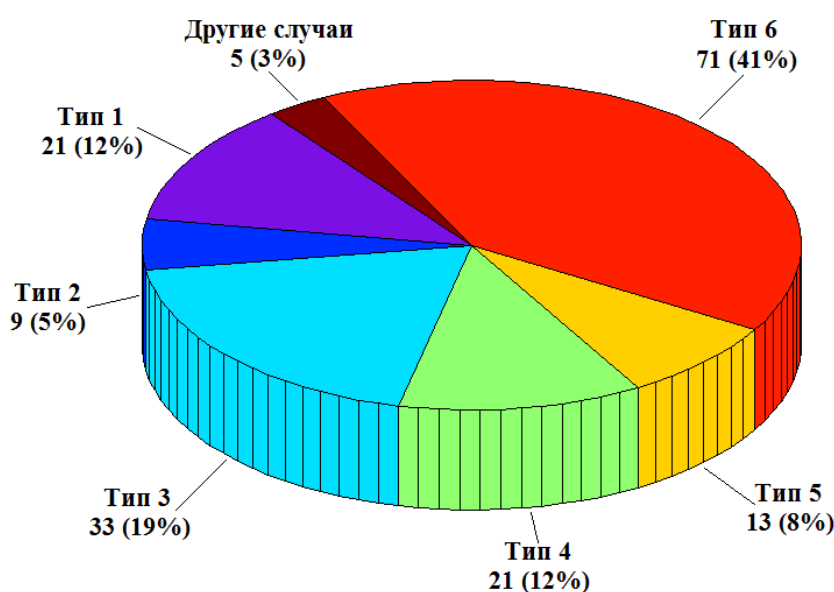


Рисунок 4.7. – Повторяемость различных типов вариаций $\nabla\varphi$ во время изолированных *Cb* внутримассового происхождения

Основные типы вариаций представлены 1-3 последовательными возмущениями и по-видимому связаны с различными стадиями жизни конвективной ячейки в момент её прохождения в окрестностях пункта наблюдения. Оставшиеся 3 типа вариаций (3%), имеющие 3-4 возмущения, связаны с относительно редкими условиями: интенсивной грозой и (или) непосредственным прохождением зрелого облака над пунктом измерения $\nabla\varphi$. Они предположительно обусловлены дополнительным влиянием на электрическое поле у земной поверхности относительно слабого, положительного объёмного заряда, находящегося в основании конвективной ячейки.

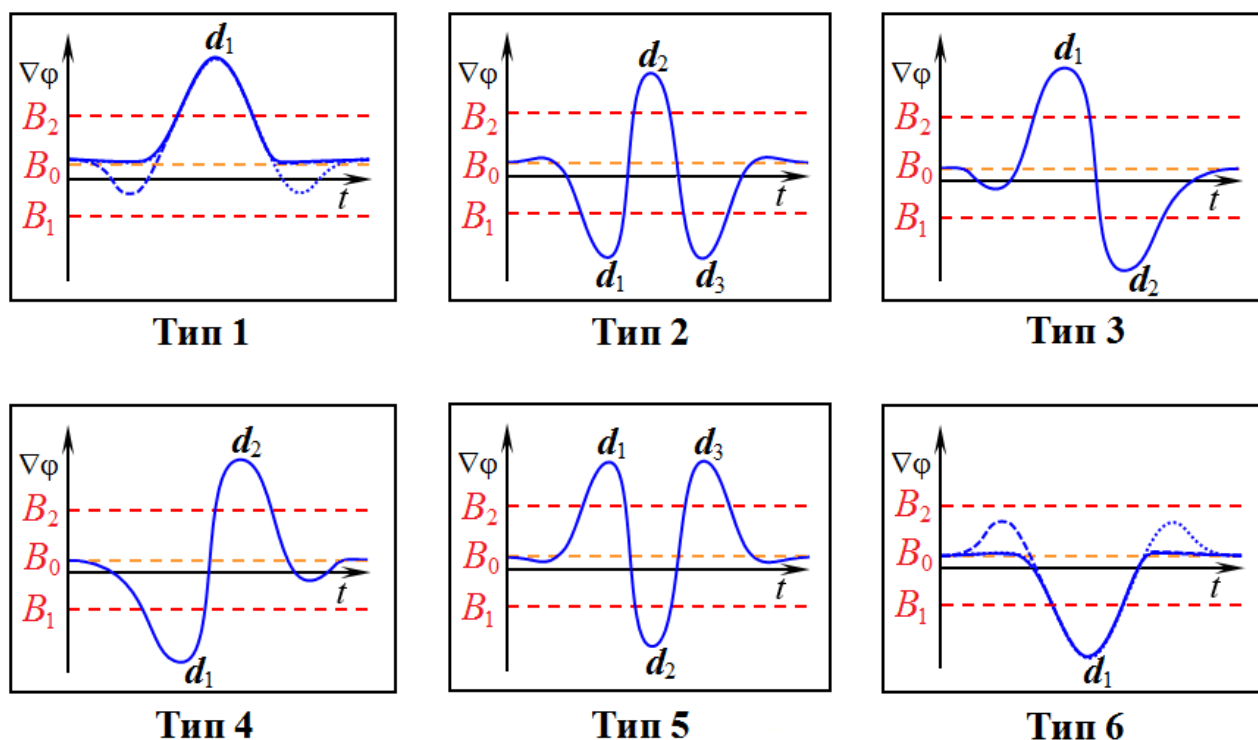


Рисунок 4.8. – Идеализированная форма основных типов вариаций $\nabla\varphi$ во время изолированных *Cb* внутримассового происхождения

Анализ значений D_v и A_v показал, что средняя длительность таких вариаций составляет ~ 23 мин., а размах ~ 1770 В/м (табл. 4.5).

Таблица 4.5 – Средние значения D_v и A_v для основных типов вариаций

Тип вариаций	D_v , мин	A_v , В/м
1	12,7	1470
2	10,9	1670
3	29,6	1740
4	23,8	1410
5	35,3	1890
6	35,6	2440

Поскольку среднее время жизни кучево-дождевого облака от момента перехода *Cu cong* – *Cb* и до полного распада его основной части (за исключением

наковальни) составляет ~ 1 часа, а средняя длительность интенсивных вариаций $\nabla\varphi$ при его прохождении в окрестностях пункта измерения составляет в среднем ~23 минуты, то далее будем считать, что электрическая структура облака за время его прохождения не претерпевает значительных изменений и отклик в электрическом поле можно приближённо связать с одной из стадий развития *Cb*.

Анализ значений параметров структурных элементов вариаций $\nabla\varphi$ (D_{dn} и V_{dn}) и их отношений для последовательных возмущений d_n (R_{Dd} и R_{Vd}) показал (табл. 4.6), что средняя длительность отдельных возмущений составляет 11 мин, а среднее абсолютное значение $\nabla\varphi$ для возмущений – 1850 В/м.

Таблица 4.6 – Средние абсолютные значения V_{dn} и D_{dn} для основных типов вариаций

Тип вариаций	D_{dn} , мин			V_{dn} , В/м		
	d_1	d_2	d_3	d_1	d_2	d_3
1	12,7	–	–	1010	–	–
2	10,9	–	–	1540	–	–
3	12,5	13,5	–	2000	1730	–
4	10,2	11,2	–	1960	1360	–
5	10,2	7,6	11,3	2050	2840	1170
6	13,3	8,2	10,5	1780	2830	1950

Для третьего и четвертого типов вариаций $\nabla\varphi$ значения D_d и V_d для первого возмущения (d_1) превышают аналогичные значения для второго возмущения (d_2). В вариациях $\nabla\varphi$ 2 и 5 типов длительность крайних (первого и последнего) возмущений выше значения промежуточного ($D_{d1}, D_{d3} > D_{d2}$). Эту особенность можно объяснить постепенным возрастанием/убыванием (обратно пропорционально квадрату расстояния) $\nabla\varphi$ при подходе/отходе конвективной ячейки к пункту наблюдения, в то время как непосредственно под облаком при смене знака доминирующего объёмного заряда изменение величины и знака $\nabla\varphi$ приземного электрического поля происходит сравнительно быстро (~1-3 мин).

Для второго и пятого типов вариаций $\nabla\varphi$ характерно доминирование среднего абсолютного значения $\nabla\varphi$ во время второго возмущения относительно значений крайних ($|V_{d2}| > |V_{d1}|, |V_{d3}|$). Поскольку вариации $\nabla\varphi$ в большей степени зависят от расстояния до заряда, чем от его величины, то можно предположить, что при вариациях $\nabla\varphi$ 2 типа центр масс главного положительного заряда лежит ниже главного отрицательного, а при вариациях $\nabla\varphi$ 5 типа, наоборот, центр масс главного отрицательного заряда располагается ниже главного положительного. Кроме того, для 3-4 типов распределение отношения V_{d1}/V_{d2} имеет две моды (табл. 4.7).

Таблица 4.7. Средние значения отношений длительности последовательных возмущений (R_{Dd}) и отношений абсолютных значений $\nabla\varphi$ (R_{Vd}) для 3-6 типов вариаций.

Тип вариаций	R_{Dd}			R_{Vd}		
	d_1/d_2	d_2/d_3	d_3/d_1	d_1/d_2	d_2/d_3	d_3/d_1
3	1,69	–	–	1,28	–	–
4	1,17	–	–	2,09	–	–
5	1,47	0,89	0,90	0,95	3,07	0,31
6	2,15	1,06	0,60	0,77	1,17	0,59

Данная особенность позволяет судить о наличии случаев вариаций $\nabla\varphi$ с преобладанием как положительного ($V_{d+} > V_{d-}$) так и отрицательного возмущений ($V_{d-} > V_{d+}$), а также случаев с сопоставимой их величиной ($V_{d+} \sim V_{d-}$). Аналогичная особенность отмечается в распределении отношения V_{d1}/V_{d3} для 2 и 5 типов. На её основе можно предположить, что мы имеем дело со случаями наклона «главного диполя» Cb вперёд ($|V_{d1}| > |V_{d3}|$) или назад ($|V_{d1}| < |V_{d3}|$) относительно направления движения.

Совместный анализ длительности и размаха вариаций $\nabla\varphi$, параметров временной структуры (табл. 4.5, табл. 4.6), и их отношений (табл. 4.7), а также атмосферных явлений во время основных типов форм отклика (табл. 4.8) показал следующее.

Вариации 1 типа предположительно связаны с кучево-дождевыми облаками в стадии роста, когда осадки из облака либо не выпадают вообще, либо имеют низкую интенсивность [Шметер 1987; Bluestein 2013; Houze 2014], а также имеет место отрицательная поляризация облака (вверху основной отрицательный объёмный заряд, внизу – положительный [Камалдина 1968; Михайловский 2002; Михайловский, Кашлева 2012]).

Таблица 4.8. – Повторяемость (%) различных атмосферных явлений во время основных типов вариаций $\nabla\phi$ под воздействием изолированных внутримассовых *Cb*.

Атмосферные явления / тип вариаций	Ливневых осадков не наблюдалось	Ливневой слабый дождь	Ливневой умеренный или сильный дождь	Гроза	Данные об осадках отсутствуют
1	43	38	10	0	9
2	11	45	33	0	11
3	21	40	15	6	18
4	19	14	14	34	19
5	8	31	0	38	23
6	28	41	7	6	18

Вариации 2-5 типов представляют собой отклик в электрическом поле зрелых *Cb* на различных этапах стадии зрелости. Для 2-5 типов распределение отношения V_{d1}/V_{d2} имеет две моды по обе стороны от единицы. На основе этой особенности можно отнести данные типы к этапам, описывающим отклик в электрическом поле во время «раннего», «промежуточного» и «позднего» этапов стадии зрелости конвективной ячейки.

Четвёртый тип можно предположительно отнести к так называемой «раннему этапу» стадии зрелости, когда выпадают интенсивные осадки, однако грозовые явления отсутствуют [Шметер 1987; Bluestein 2013; Houze 2014] и электрическая структура сохраняет отрицательную поляризацию [Камалдина 1968; Михайловский 2002; Михайловский, Кашлева 2012]. Пятый тип можно предположительно связать с «поздним этапом» стадии зрелости, когда

интенсивность осадков снижается, интенсифицируются грозовые явления [Шметер 1987; Bluestein 2013; Houze 2014], а электрическая структура приобретает классическую положительную поляризацию [Камалдина 1968; Stolzenburg 1998; Mac Gorman 1998; Wang 2013; Михайловский 2002; Михайловский, Кашлева 2012].

Второй и Третий типы могут быть связаны как с «ранним» и (или) «поздним» этапами, так и с «промежуточным» этапом, во время которого происходит «переворот» электрической структуры [Камалдина 1968; Михайловский 2002; Михайловский, Кашлева 2012].

Шестой тип вариаций однозначно связан с *Cb* в стадии диссипации, когда возможны ливневые осадки и грозы слабой интенсивности [Шметер 1987; Bluestein 2013; Houze 2014], облако положительно поляризовано (вверху положительный основной объёмный заряд, внизу – отрицательный [Камалдина 1968; Stolzenburg 1998; Mac Gorman 1998; Wang 2013; Михайловский 2002; Михайловский, Кашлева 2012]), а отрицательный объёмный заряд занимает всю нижнюю часть облака, полностью охваченную нисходящим потоком, и доминирует над положительным.

4.4. Численные оценки отклика $\nabla\varphi$ на изолированное *Cb* с заданной электрической структурой

В разделе 4.3 были выделены основные типы формы вариаций при прохождении изолированной конвективной ячейки и выдвинуто предложение о их связи с конкретными стадиями жизни кучево-дождевого облака. Для проверки полученных результатов и оценки влияния электрической структуры кучево-дождевого облака на отклик в приземном электрическом поле и форму вариаций $\nabla\varphi$ в пункте наблюдения при прохождении *Cb* было проведено простейшее математическое моделирование. Перейдем к описанию методике проведения математического и его основных результатов.

Электрическая структура кучево-дождевого облака, согласно [Имянитов 1981; Williams 1989; Mac Gorman, Rust 1998; Stolzenburg, Rust, Marshall 1998; Rakov, Uman 2003; Stolzenburg, Marshall 2008; Михайловский, Кашлева 2012; Wang 2013], представлена по меньшей мере 4 основными объёмными зарядами (рис. 4.9):

- 1) основным положительным зарядом (MPC);
- 2) основным отрицательным зарядом (MNC);
- 3) нижним положительным зарядом (LPC);
- 4) верхним (экранирующим) отрицательным зарядом (UNC).

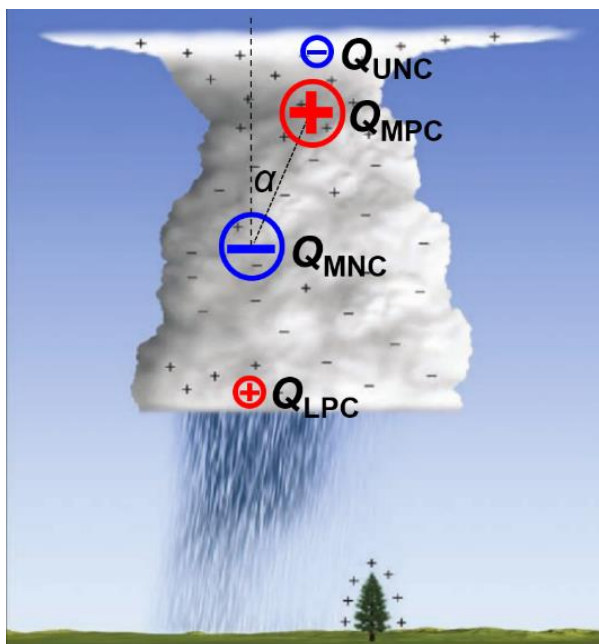


Рисунок 4.9. – Схема электрической структуры зрелого *Cb*.

Основное влияние на приземное электрическое поле оказывает «главный диполь», представленный зарядами MPC и MNC, достигающими величины 20–40 Кл (табл. 4.9) и существующими на протяжении всей жизни *Cb*. При это, согласно [Mac Gorman, Rust 1998; Михайловский 2002; Rakov, Uman 2003; Stolzenburg, Marshall 2008; Marshall 2009; Михайловский, Кашлева 2012], в зрелом *Cb* заряд MPC, как правило, превышает по абсолютной величине MNC. Таким образом, значения зарядов «главного диполя» в таблице 4.9 представляют собой некоторое среднее значение от величины обоих зарядов, а отношение абсолютной величины

зарядов MPC/MNC может варьироваться в некоторых пределах, например: 2/1, 3/2, 4/3 и т.д.

Расстояние между зарядами «основного диполя» при этом изменяется в широких пределах – от 1,5 до 6 км, а сам диполь, согласно [*Имянитов, Шифрин 1962; Mac Gorman, Rust 1998; Rakov, Uman 2003; Михайловский, Кашлева 2012*], не является строго вертикальным и обычно имеет некоторый наклон (α).

Таблица 4.9. – Средние характеристики Cb в стадии зрелости, по данным [*Barnard 1951; Wilson 1956; Имянитов, Шифрин 1962; Chalmers 1967; Имянитов, Чубарина, Шварц 1971; Williams 1989; Stolzenburg, Rust, Marshall 1998; Mac Gorman, Rust 1998; Михайловский 2002; Rakov, Uman 2003; Stolzenburg, Marshall 2008; Marshall 2009; Михайловский, Кашлева 2012*].

Широта (град.)	Толщина Cb (км)	Величина Q_{MNC} и Q_{MPC} (Кл)	Расстояние между Q_{MNC} и Q_{MPC} (ΔH , км)	Величина заряда Q_{LPC} (Кл)
60 с.ш.	6-9	23	1,5	1-3
50 с.ш.	9-12	24	3	1-3
35 с.ш.	9-15	39	6	3

Нижний положительный и верхний экранирующий отрицательный заряды проявляется главным образом в стадии зрелости и как правило не отмечаются в стадии роста и диссипации, а их величина на порядок ниже чем у зарядов «главного диполя» (табл. 4.8.). При этом поскольку электрическое поле, создаваемое зарядом в некоторой точке зависит не только от его величины, но и от расстояния до него, причём последнее в квадрате, то заряд LPC должен оказывать существенное влияние на приземное электрическое поле и его стоит учитывать в расчёте, а влиянием UNC можно пренебречь. Поскольку LPC наблюдается в зоне интенсивных осадков вблизи основания Cb , то приближённо примем, что он располагается на высоте 1 км непосредственно под зарядом MNC, который формируется в области формирования осадков [*Имянитов 1981; Williams 1989; Stolzenburg, Rust, Marshall 1998; Михайловский 2002; Stolzenburg, Marshall 2008; Михайловский, Кашлева 2012*].

Описанные выше особенности электрической структуры характерны, главным образом, для *Cb* стадии зрелости и в некоторой мере для стадии диссипации. При этом согласно [Камалдина 1968; Stolzenburg, Marshall 2008; Михайловский, Каишева 2012], электрическая структура *Cb* на стадии роста имеет противоположную, отрицательную поляризацию, то есть MNC располагается выше MPC, а величина зарядов существенно ниже чем стадии зрелости.

Для математического моделирования задавались характеристики электрической структуры *Cb*, характерные для умеренных широт Северного полушария, в качестве которых были использованы данные для широты 50° с. ш. из таблицы 4.8. При этом форма объёмных зарядов MPC, MNC и LPC для простоты расчёта предполагалась сферической.

Основное уравнение для расчёта изменения $\nabla\varphi$ под влияние объёмных зарядов в кучево-дождевых облаках (*Cb*) имело вид:

$$\nabla\varphi = \frac{2}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \left[\frac{Q_{MPC} \cdot h_{MPC}}{(l_{MPC}^2 + h_{MPC}^2)^{\frac{3}{2}}} + \frac{Q_{MNC} \cdot h_{MNC}}{(l_{MNC}^2 + h_{MNC}^2)^{\frac{3}{2}}} + \frac{Q_{LPC} \cdot h_{LPC}}{(l_{LPC}^2 + h_{LPC}^2)^{\frac{3}{2}}} + \frac{Q_{UNC} \cdot h_{UNC}}{(l_{UNC}^2 + h_{UNC}^2)^{\frac{3}{2}}} \right],$$

где Q – величина заряда сферического объёма, h – высота центра объёма от поверхности земли, l – горизонтальное расстояние от проекции центра объёмного заряда до точки расчёта.

Модельный расчёт выполнялся в три этапа. На первом этапе рассчитывались вариации $\nabla\varphi$ в пункте измерения при перемещении относительно него одиночного кучево-дождевого облака на расстоянии L (рис. 4.10).

На втором этапе рассчитывался отклик в электрическом поле приземной атмосферы вокруг неподвижного одиночного *Cb* с заданной электрической структурой или конгломерата из нескольких таких *Cb*.

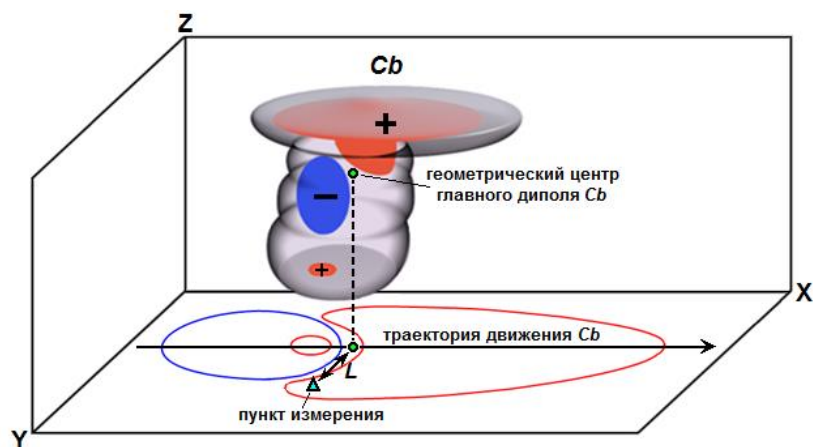


Рисунок 4.10. – Схема расчёта изменения $\nabla\varphi$ при прохождении кучево-дождевого облака (Cb) в пункте измерения, удаленном на расстояние L от траектории движения Cb

На третьем этапе осуществлялся расчёт дальности обнаружения Cb (L_d), представляющей собой максимальное расстояние от центра Cb на котором измеренные значения $\nabla\varphi$ остаются большими или равными (в зависимости от знака $\nabla\varphi$) пороговым значениям B_1 и B_2 , описанным ранее в разделах 2.1 и 2.4, то есть $\nabla\varphi \leq B_1$ или $\nabla\varphi \geq B_2$. При этом, поскольку электрическая структура Cb задавалась несколькими зарядами дальность обнаружения зависела также от направления, поэтому осуществлялся расчёт отдельно дальности обнаружения по отношению вперёд ($L_{d(1)}$), вбок ($L_{d(2)}$) и назад ($L_{d(3)}$) относительно направления перемещения Cb . (рис. 4.11).

Перейдём к описанию основных результатов математического моделирования. Анализ результатов модельного расчёта вариаций $\nabla\varphi$ при прохождении зрелого Cb , в котором $MPC = 30$, $MNC = -15$ Кл, $\Delta H = 3$ км, $LPC = 1$ Кл, показал что в зависимости от величины угла наклона главного диполя (α) изменяется форма вариаций $\nabla\varphi$ в пункте измерения ($L = 2000$ м). Так, при $\alpha = 0-15^\circ$ отмечаются вариации подобные типам 5 и 6 (табл. 4.8), а при $\alpha = 15-40^\circ$ близкие типам 2 (при наклоне назад) и 3 (при наклоне вперёд).

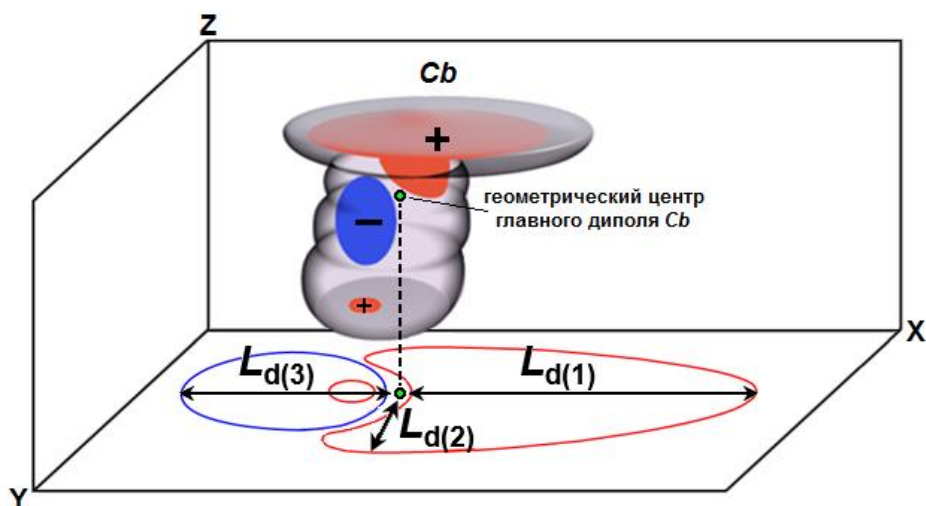


Рисунок 4.11. – Схема расчёта дальности обнаружения Cb в трёх основных направлениях $L_{d(1)}$, $L_{d(2)}$, $L_{d(3)}$.

Поскольку, как было сказано выше, электрическая структура Cb при его эволюции претерпевает существенные изменения, был проведён модельный расчёт при различных сочетаниях величины основных зарядов и поляризации облака (рис. 4.13). Анализ результатов показал, что при различном сочетании величины MPC, MNC и LPC, их расположения, а также угла наклона, наблюдаются вариации всех 6 типов, отмеченных в разделе 4.3.

Анализ результатов модельного расчёта (рис. 4.14) влияния высоты расположения зарядов «главного диполя» при фиксированной величине зарядов, расстояния между ними ($\Delta H = 3$ км) и характеристиках LPC ($Q_{LPC} = 1$ Кл, $H_{LPC} = 1$ км) показал, что с увеличением высоты зарядов MPC и MNC над поверхностью земли размах вариаций $\nabla\varphi$ в пункте измерения быстро снижается. При этом увеличивает отклик заряда LPC, в следствии меньшего его экранирования зарядами «основного диполя».

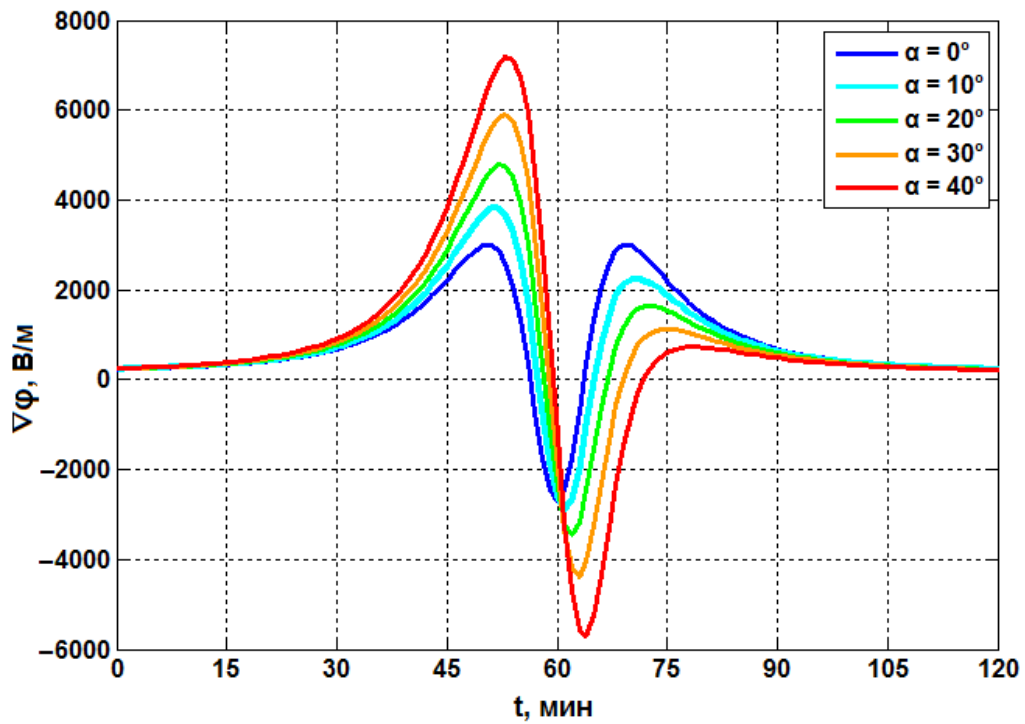


Рисунок 4.12 – Зависимость формы вариаций $\nabla\phi$ при прохождении Cb от угла наклона главного диполя (α), при $L = 2000$ м.

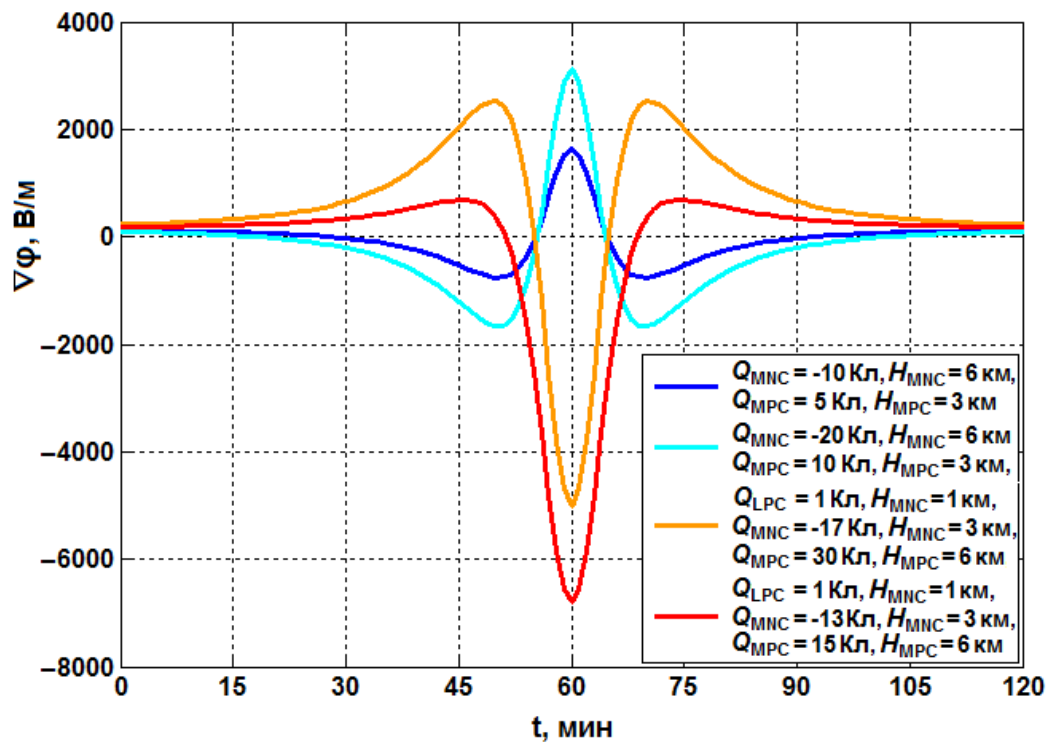


Рисунок 4.13 – Зависимость формы вариаций $\nabla\phi$ при прохождении Cb от величины зарядов и их расположения, при $\alpha = 0^\circ$, $L = 2000$ м

Модельный расчёт вариаций $\nabla\varphi$ (рис. 4.15) в зависимости в пункте измерения при различном удалении до проекции центра модельного Cb (L) и фиксированных характеристиках электрической структуры облака показал, что с увеличением расстояния размах вариаций снижается, причём отклик МНС ослабевает быстрее чем МРС и не проявляется на расстоянии более 5 км.

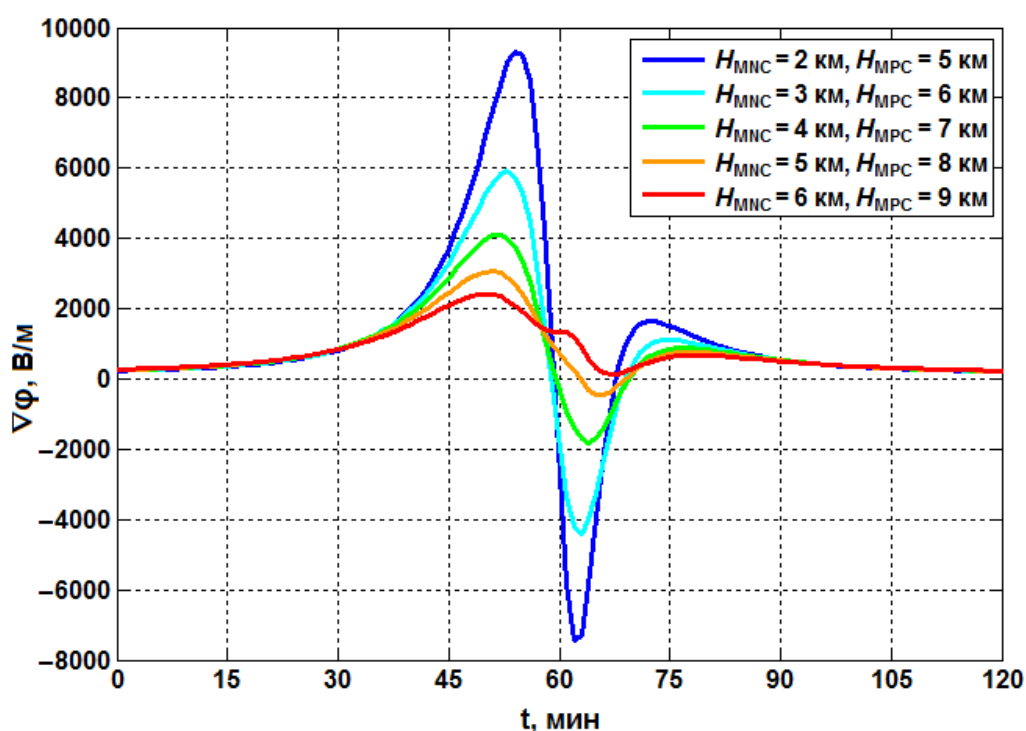


Рисунок 4.14 – Зависимость формы вариаций $\nabla\varphi$ при прохождении Cb от высоты основных зарядов в облаке, при $L = 2000$ м

Анализ пространственного распределения $\nabla\varphi$, обусловленного объёмными зарядами однозначного кучево-дождевого облака (рис. 4.16) и конгломерата Cb (рис. 4.17) показал, что значения $\nabla\varphi > 1$ кВ/м могут распространяться от точки проекции центра главного диполя изолированного зрелого Cb на расстояние до ~ 15 км, а в случае конгломерата Cb – до 20 км и более. При этом значения $> 0,5$ кВм даже в случае изолированного Cb распространяются на расстояние до 20 км.

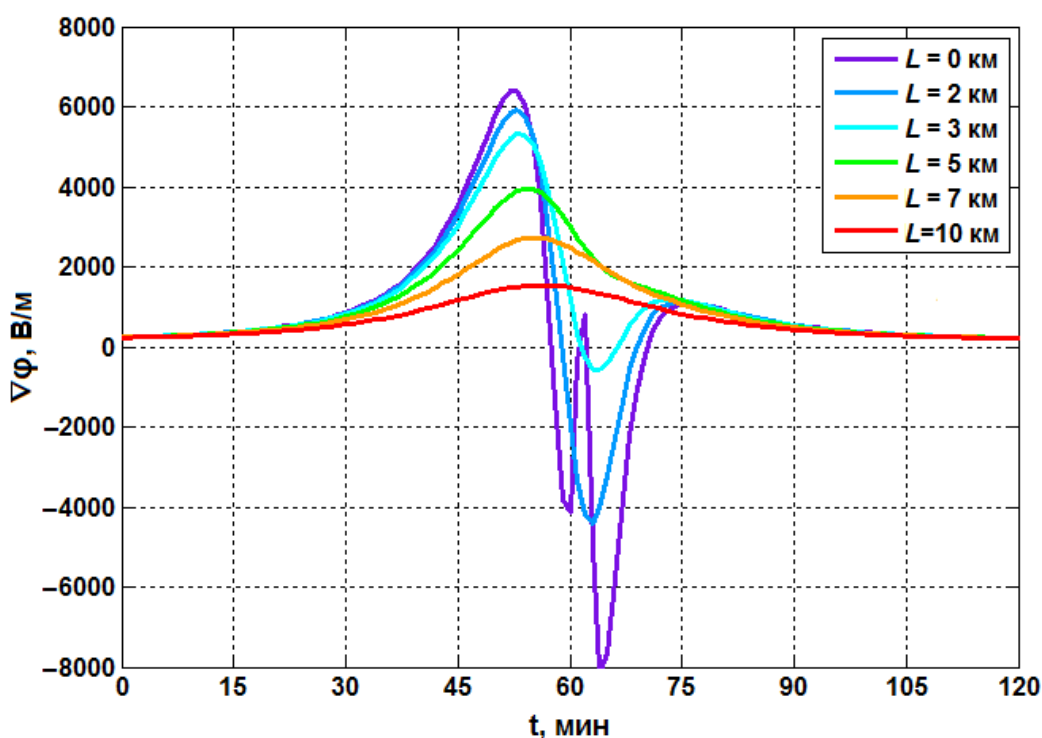


Рисунок 4.15 – Зависимость формы вариаций $\nabla\phi$ при прохождении Cb от расстояния до пункта измерения (L)

Расчёт дальности обнаружения Cb (табл. 4.10) при определённых пороговых значениях, рассчитанных на основе величины порогового сдвига $s = 800\text{--}1200$ В/м, показал, что в среднем по всем направлениям L_d составляет 10 км и изменяется в пределах от 5 до 15 км в зависимости от направления расчёта, и величины и расположения зарядов Cb . При этом дальность обнаружения по отношению вперёд ($L_{d(1)}$), вбок ($L_{d(2)}$) и назад ($L_{d(3)}$) относительно направления перемещения облака соотносятся как 1: 0,84 : 0,45.

Полученные результаты показывают, что метод обнаружения Cb , описанный в разделе 2.4, повалит выявлять подходящие одиночные кучево-дождевые облака (при $s = 800, 1000$ и 1200 В/м) на расстоянии $\sim 13, 12$ и 11 км соответственно. При этом дальность обнаружения конгломератов Cb может существенно превосходить отмеченную величину, поскольку как следует из рис. 4.17 при близком расположении нескольких конвективных ячеек наблюдается суперпозиция их электрических полей, из-за которой их суммарная дальность обнаружения увеличивается.

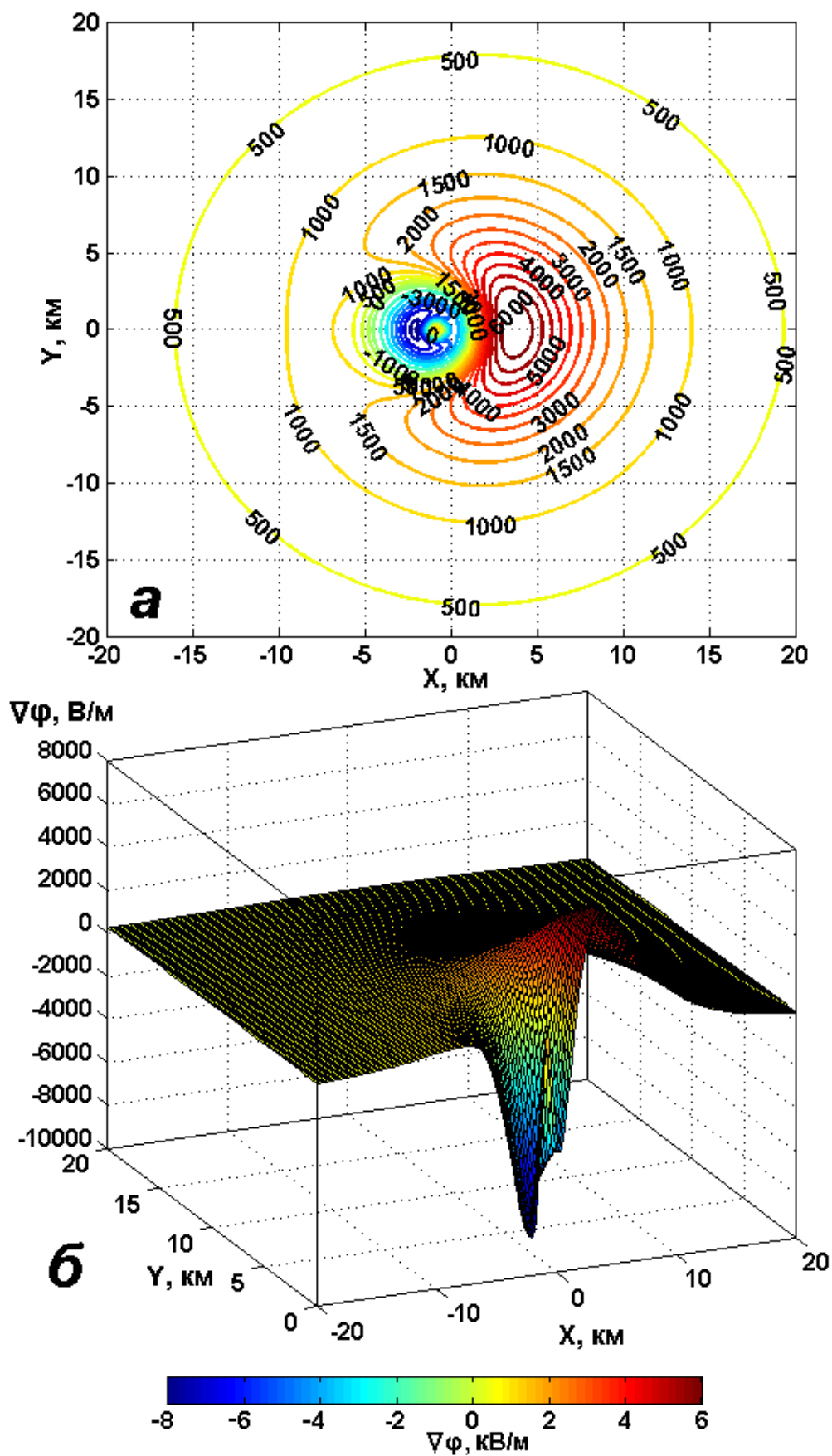


Рисунок 4.16 – Контурный график (а) и 3D-поверхности (б) распределения значений $\nabla\phi$ под влиянием изолированного кучево-дождевого облака

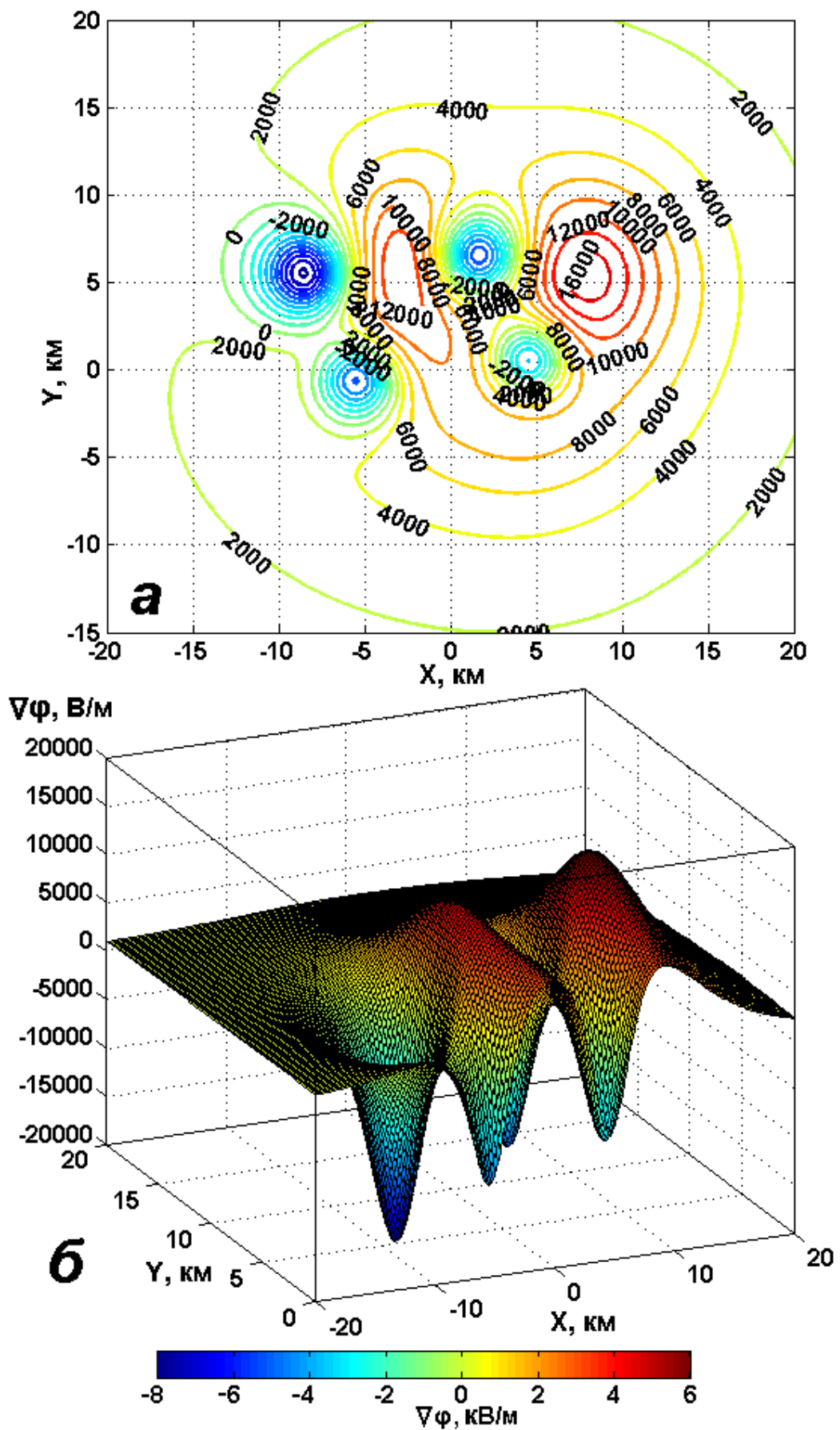


Рисунок 4.17 – Контурный график (а) и 3D-поверхности (б) распределения значений $\nabla\phi$ под влиянием гряды Sb

Таблица 4.10. – Рассчитанные значения L_{d1} , L_{d2} , L_{d3} (в км) при $\alpha = 30^\circ$, $Q_{LP} = 2$ Кл,

$$H_{LP} = 1 \text{ км}$$

№	Основные входные параметры	Значение s		
		800	1000	1200
1	$Q_{MN} = -20$ Кл, $H_{MN} = 2$ км, $Q_{MP} = 25$ Кл, $H_{MP} = 5$ км	12,7 / 10,9 / 5,6	11,7 / 9,8 / 5,5	10,9 / 9,0 / 5,4
2	$Q_{MN} = -20$ Кл, $H_{MN} = 3$ км, $Q_{MP} = 25$ Кл, $H_{MP} = 6$ км	12,5 / 9,9 / 6,5	11,4 / 8,3 / 6,3	10,5 / 3,9 / 6,1
3	$Q_{MN} = -20$ Кл, $H_{MN} = 4$ км, $Q_{MP} = 25$ Кл, $H_{MP} = 7$ км	12,1 / 4,5 / 7,0	10,8 / 4,3 / 6,7	9,8 / 4,2 / 6,5
4	$Q_{MN} = -15$ Кл, $H_{MN} = 2$ км, $Q_{MP} = 25$ Кл, $H_{MP} = 5$ км	13,1 / 11,6 / 4,7	12,0 / 10,6 / 4,6	11,2 / 9,7 / 4,5
5	$Q_{MN} = -15$ Кл, $H_{MN} = 3$ км, $Q_{MP} = 25$ Кл, $H_{MP} = 6$ км	13,1 / 11,3 / 5,2	12,0 / 10,1 / 5,0	11,1 / 9,1 / 4,9
6	$Q_{MN} = -15$ Кл, $H_{MN} = 4$ км, $Q_{MP} = 25$ Кл, $H_{MP} = 7$ км	13,0 / 10,8 / 5,3	11,8 / 9,3 / 5,1	10,8 / 7,8 / 4,9
7	$Q_{MN} = -20$ Кл, $H_{MN} = 2$ км, $Q_{MP} = 30$ Кл, $H_{MP} = 5$ км	13,8 / 12,3 / 9,4	12,7 / 11,2 / 5,1	11,9 / 10,3 / 4,9
8	$Q_{MN} = -20$ Кл, $H_{MN} = 3$ км, $Q_{MP} = 30$ Кл, $H_{MP} = 6$ км	13,8 / 11,9 / 5,8	12,7 / 10,7 / 5,7	11,8 / 9,6 / 5,5
9	$Q_{MN} = -20$ Кл, $H_{MN} = 4$ км, $Q_{MP} = 30$ Кл, $H_{MP} = 7$ км	13,7 / 11,3 / 6,2	12,5 / 9,7 / 6,0	11,5 / 8,0 / 5,8
10	$Q_{MN} = -15$ Кл, $H_{MN} = 2$ км, $Q_{MP} = 30$ Кл, $H_{MP} = 5$ км	14,1 / 12,8 / 11,1	13,0 / 11,7 / 9,8	12,2 / 10,9 / 8,7
11	$Q_{MN} = -15$ Кл, $H_{MN} = 3$ км, $Q_{MP} = 30$ Кл, $H_{MP} = 6$ км	14,3 / 12,8 / 10,3	13,2 / 11,6 / 4,4	12,3 / 10,7 / 4,3
12	$Q_{MN} = -15$ Кл, $H_{MN} = 4$ км, $Q_{MP} = 30$ Кл, $H_{MP} = 7$ км	14,4 / 12,7 / 4,3	13,2 / 11,3 / 4,1	12,2 / 10,2 / 3,9
Среднее по всем расчётам		$L_{d1} = 13,4 \pm 0,2$ $L_{d2} = 11,1 \pm 0,7$ $L_{d3} = 6,8 \pm 0,7$	$L_{d1} = 12,4 \pm 0,2$ $L_{d2} = 10,4 \pm 0,6$ $L_{d3} = 5,6 \pm 0,5$	$L_{d1} = 11,4 \pm 0,2$ $L_{d2} = 8,6 \pm 0,7$ $L_{d3} = 5,5 \pm 0,4$

4.5. Отклик параметров электродного слоя на основные формы вариаций $\nabla\varphi$ при Cb

В разделе и 3.5 были результаты модельного расчёта параметров электродного слоя прохождении одиночного кучево-дождевого облака и сопутствующих ливневых осадков, однако эти результаты характерны лишь для конкретных событий прохождения Cb и не отражают всего многообразия изменения атмосферно-электрических параметров под воздействием кучево-дождевых облаков.

Чтобы оценить наиболее вероятные формы отклика электродного слоя на прохождение одиночных кучево-дождевых облаков необходимо провести модельный расчёт динамики параметров электродного слоя под воздействием основных типов вариаций $\nabla\varphi$, выявленных при прохождении изолированных внутримассовых Cb .

Для этой цели на основе полученных средних значений длительности (D_{dn}) и среднего значения (V_{dn}) возмущений для каждого из основных типов вариаций (табл. 4.6) было получены шесть типов характерного изменения градиента потенциала (рис. 4.18), которое было использовано в численном расчёте, на основе системы уравнений и по методике, описанной в главе 3.4, для задания динамики напряженности электрического поля ($E = -\nabla\varphi$).

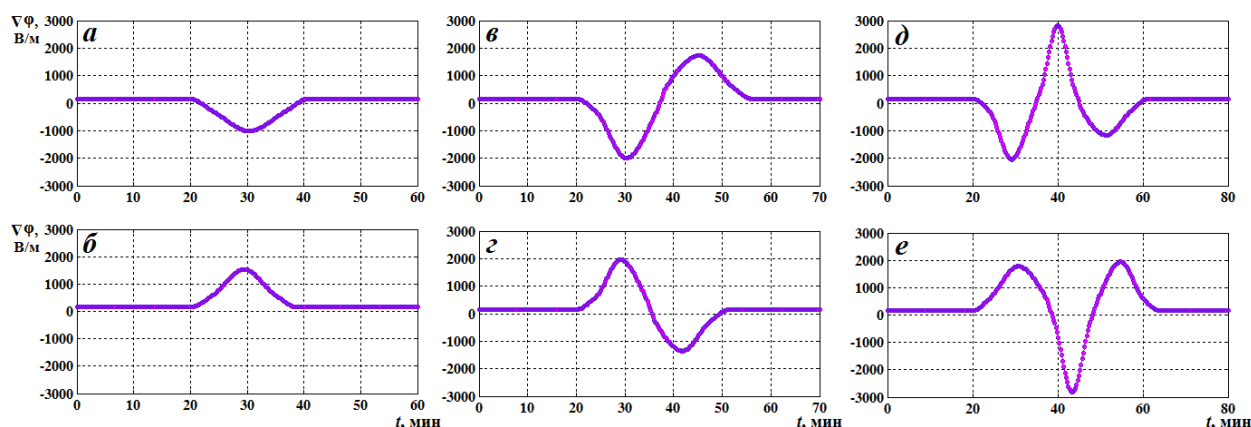


Рисунок 4.18 – Характерные изменения величины $\nabla\varphi$ для 6 основных типов «медленных вариаций» $\nabla\varphi$ при прохождении изолированных Cb

В ходе численного расчёта фоновое содержание аэрозоля у земли принималось равным $N = 3 \cdot 10^{10} \text{ м}^{-3}$.

Перейдём к результатам моделирования. На рисунке 4.19 представлено нормированные (относительно плотности ионов на верхней границе) временные распределения концентраций легких ионов на высотах 10, 25 и 50 м (столбцы *a–в*), а на рисунке 4.20 пространственные распределения в моменты времени начала, середины и окончания вариаций $\nabla\varphi$ (столбцы *a–в*) под воздействием 6 основных типов вариаций $\nabla\varphi$ (строки 1–6 соответственно). Рисунок 4.21 изображает динамику плотности объёмного заряда, а рисунок 4.22 полярных электропроводностей под влиянием 6 основных типов вариаций $\nabla\varphi$ обусловленных прохождением кучево-дождевых облаков.

Анализ пространственно-временного распределения рассчитанных концентраций электропроводностей и плотности объёмного заряда позволил выявить следующее.

1) Во время отрицательных возмущений $\nabla\varphi$ отмечается падение положительных значений плотности объёмного заряда ($\rho = n_1 - n_2$) и переход её отрицательную область, в то время как с положительными возмущениями $\nabla\varphi$ связан рост положительных значений ρ выше фоновых значений (рис 4.19, 4.20).

2) Превышение значений концентрации отрицательных ионов над концентрацией положительных, а следовательно отрицательные значения плотности объёмного заряда, не характерные для условий «хорошей погоды», отмечаются в нижнем слое приземной атмосферы ($z \leq 50 \text{ м}$), выше которого n_1 остаётся большей n_2 (рис 4.19, 4.20).

3) Различие между значениями n_1 и n_2 , во время положительных и отрицательных возмущений $\nabla\varphi$, тем больше чем выше абсолютные значения $\nabla\varphi$ и чем ближе к поверхности земли (рис. 4.19), в то время как с высотой оно быстро убывает.

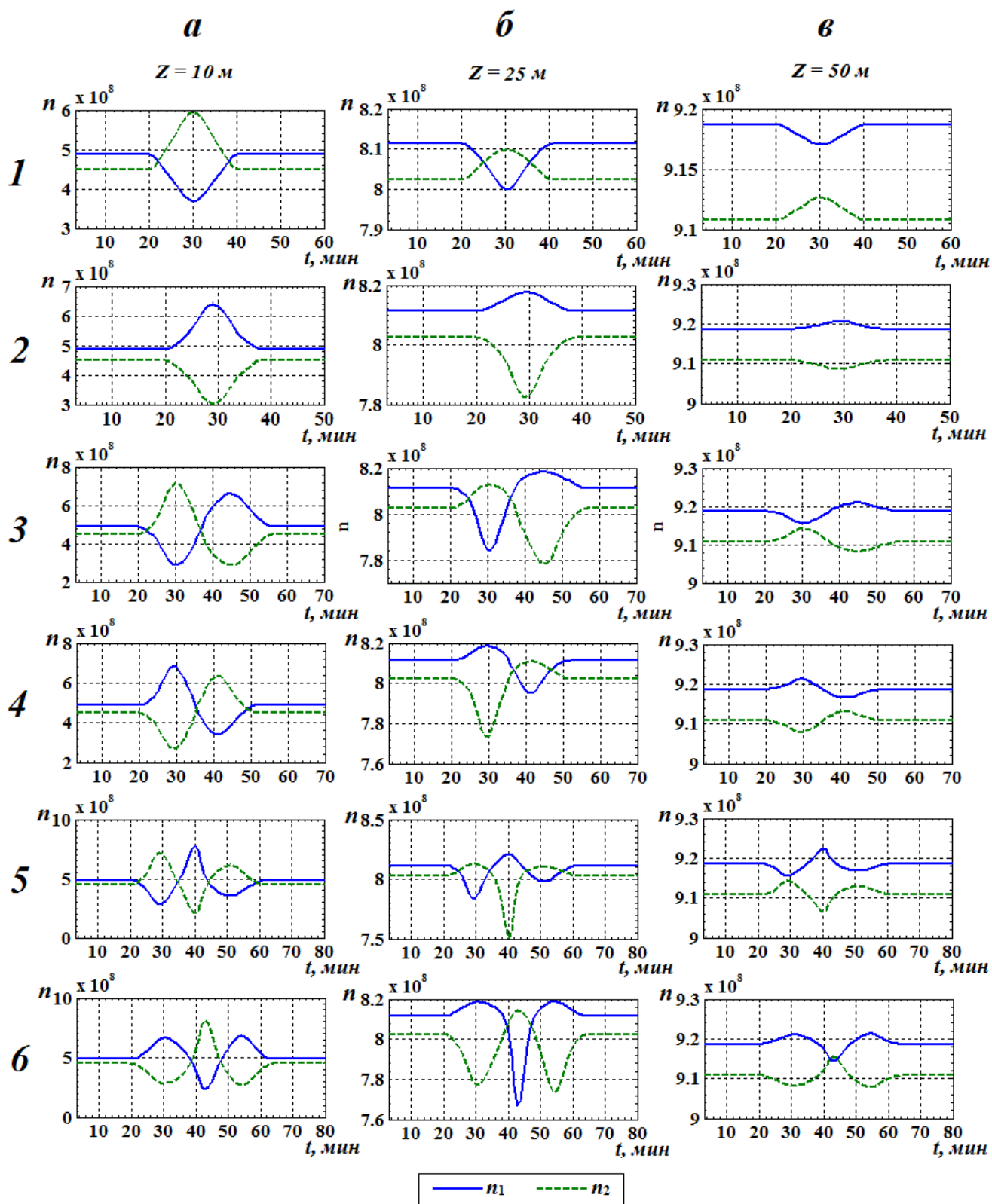


Рисунок 4.19 – Временное распределение концентрации положительных (n_1) и отрицательных (n_2) легких ионов под влиянием 6 основных типов вариаций $\nabla\phi$ при прохождении кучево-дождевых облаков.

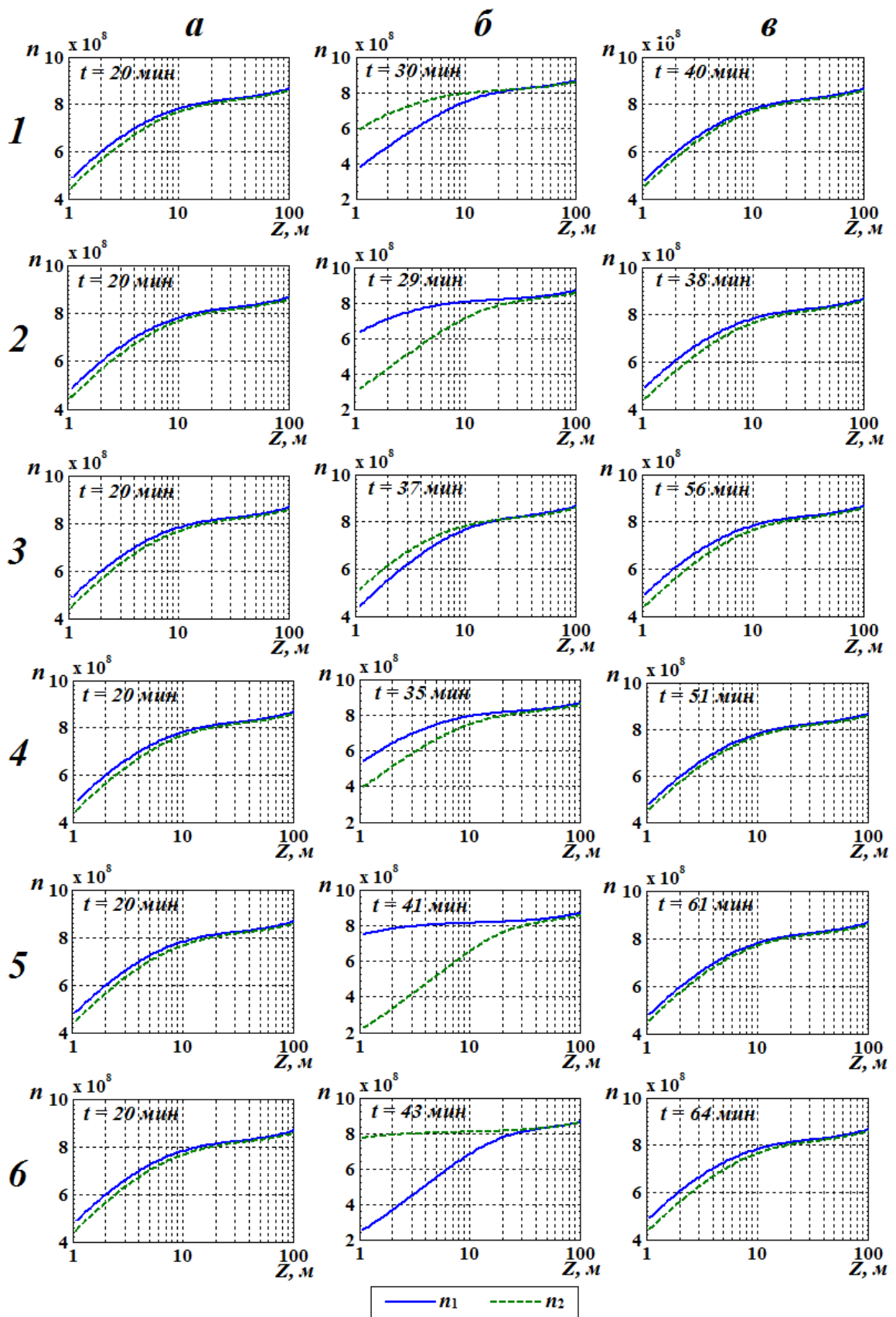


Рисунок 4.20 – Пространственное распределение концентрации положительных (n_1) и отрицательных (n_2) легких ионов под влиянием 6 основных типов вариаций $\nabla\varphi$ при прохождении кучево-дождевых облаков.

4) Как при положительных так и при отрицательных возмущениях $\nabla\varphi$ сильнее проявляется падение, относительно фонового уровня, концентрации ионов, полярность которых противоположна знаку $\nabla\varphi$, по сравнению с ростом концентрации ионитов того же знака, что особенно выражено на высотах ~ 25 м (рис. 4.19 а2-е2).

5) В моменты времени между двумя последовательными возмущениями $\nabla\varphi$ (при 3-6 типах вариаций $\nabla\varphi$) абсолютные значения n_1 и n_2 приближаются к фоновым, однако значение концентрации ионов, полярность которых имеет тот же знак что и возмущение $\nabla\varphi$, превышает значение концентрации противоположной полярности (рис. 4.20, а2-е2), что обусловлено запаздыванием процессов в электродном слое относительно изменений $\nabla\varphi$.

6) Изменение плотности объемного заряда (ρ) у поверхности земли во время 6 основных типов изменения $\nabla\varphi$ во время Cb качественно повторяет динамику $\nabla\varphi$ (рис. 4.21).

7) Различие между значениями n_1 и n_2 , во время положительных и отрицательных возмущений $\nabla\varphi$, тем больше чем выше абсолютные значения $\nabla\varphi$ и чем ближе к поверхности земли (рис. 4.19), в то время как с высотой оно быстро убывает.

8) Как при положительных так и при отрицательных возмущениях $\nabla\varphi$ сильнее проявляется падение, относительно фонового уровня, концентрации ионов, полярность которых противоположна знаку $\nabla\varphi$, по сравнению с ростом концентрации ионитов того же знака, что особенно выражено на высотах ~ 25 м (рис. 4.19 а2-е2).

9) В моменты времени между двумя последовательными возмущениями $\nabla\varphi$ (при 3-6 типах вариаций $\nabla\varphi$) абсолютные значения n_1 и n_2 приближаются к фоновым, однако значение концентрации ионов, полярность которых имеет тот же знак что и возмущение $\nabla\varphi$, превышает значение концентрации противоположной полярности (рис. 4.20, а2-е2), что обусловлено запаздыванием процессов в электродном слое относительно изменений $\nabla\varphi$.

10) Экстремальные значения ρ , быстро уменьшаются по мере удаления от поверхности (рис. 4.21).

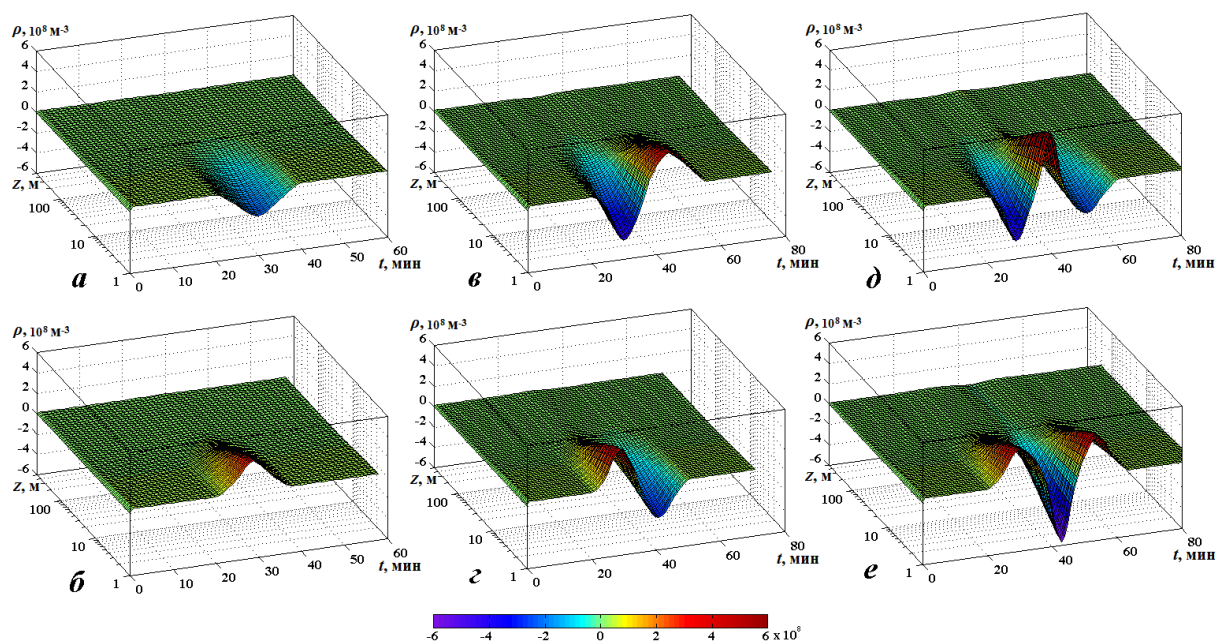


Рисунок 4.21 – Динамика плотности объёмного заряда под влиянием 6 основных типов ($a, б, в, г, д, е$, соответственно) вариаций $\nabla\varphi$ при прохождении кучево-дождевых облаков.

Изменение полярных электрических проводимостей во время каждого из основных типов вариаций градиента потенциала электрического поля обусловленных прохождением Cb характеризуется колебаниями значений λ_{\pm} относительно их фонового значения (рис. 4.22).

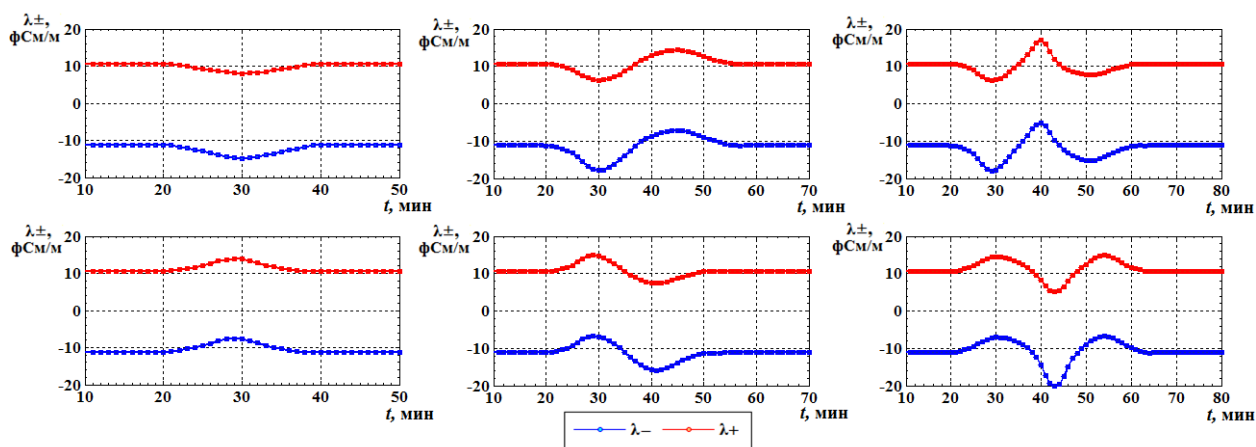


Рисунок 4.22 – Изменение со временем численно рассчитанных значений положительной (λ_+) и отрицательной (λ_-) электропроводностей (при $N = 3 \cdot 10^{10} \text{ M}^{-3}$) под влиянием 6 основных типов вариаций $\nabla\varphi$ обусловленных прохождением кучево-дождевых облаков.

Падение электропроводности одной из полярностей и рост электропроводности противоположной полярности при прочих равных условиях тем сильнее, чем выше абсолютные значения $\nabla\varphi$ во время возмущений электрического поля (рис. 4.22). Амплитуда колебаний λ_{\pm} при сходных значениях $\nabla\varphi$ тем больше, чем меньше содержание аэрозоля (ядер конденсации) на данном уровне.

Отмеченные особенности динамики параметров электродного слоя приближённо можно считать характерными для большинства случаев прохождения одиночных кучево-дождевых облаков и сопутствующих атмосферных явлений.

4.6. Классификация форм отклика $\nabla\varphi$, зарегистрированных при воздействии одиночных *Cb* на приземную атмосферу

Как следует из результатов разделов 4.2 в целом при прохождении кучево-дождевых облаков можно выделить 10 основных типов вариаций $\nabla\varphi$. При этом они связаны как с одиночными *Cb*, так и с их конгломератами. В случае изолированных внутримассовых *Cb*, согласно разделу 4.3, отклик в приземном электрическом поле можно свести всего 6 основным типам, предположительно связанным с конкретными стадиями развития облаков данной формы. Модельный расчёт, описанный в разделе 4.4, показал, что все основные типы вариаций $\nabla\varphi$, отмеченные экспериментально, могут быть объяснены прохождением *Cb* с определённым сочетанием величины зарядов, высоты их расположения и наклона электрической структуры.

Исследование формы вариаций $\nabla\varphi$ под воздействием *Cb* ранее проводилось и другими авторами. Так на основе исследований *Cb* в грозовой стадии, проведённых в Восточная Сибири [*Филиппов 1961; Филиппов 1974*], и Якутии [*Toropov, Kozlov, Mullayarov, Starodubtsev 2013*], были отмечены вариации $\nabla\varphi$

имеющие сходство с 1, 3, 4 и 5-6 типами вариаций $\nabla\varphi$, полученными в данной работе.

Модельные расчёты отклика $\nabla\varphi$ на различных расстояниях от перемещающегося кучево-дождевого облака, описанные в [Rakov, Uman 2003; Чернева, Пономарев, Фирстов, Бузевич 2007], с электрической структурой в виде вертикально поляризованного диполя (аналог одиночного Cb), показали, что формы модельных вариаций $\nabla\varphi$ близки к экспериментально выделенным формам $\nabla\varphi$ 1 и 7 типов.

Согласованный анализ основных типов отклика вариаций $\nabla\varphi$, атмосферных явлений и данных моделирования электрического поля, а использование результатов других авторов, при допущениях, что нижний положительный заряд отсутствует или очень мал, влияние верхнего отрицательного заряда на приземное электрическое поле несущественно, пункт измерения находится вблизи траектории движения Cb , за время прохождения в окрестностях пункта измерения в электрической структуре облака не происходит сильных изменений, позволил предложить классификацию форм отклика в электрическом поле на прохождение одиночных Cb , связывающую форму вариаций $\nabla\varphi$ как со стадией развития Cb , так и с особенностями наклона его электрической структуры. Эта классификация схематически изображена на рис. 4.23.

В ней группы I-V представляют возможные формы отклика $\nabla\varphi$ на основные стадии развития и их отдельные этапы. Так, в группу I вошли формы отклика в $\nabla\varphi$ конвективной ячейки, находящейся в стадии роста; в группу II – на раннем этапе стадии зрелости («ливневая стадия Cb »); в группу III – на промежуточном этапе стадии зрелости («подстадия инверсии электрической структуры Cb »); в группу IV – на позднем этапе стадии зрелости («грозовая стадия Cb »); в группу V – в стадии диссипации (разрушения).

Подразделение иконок форм отклика Cb на рис. 4 влево и вправо относительно центра связано с наклоном «главного диполя» Cb соответственно вперёд и назад относительно направления движения.

Расположение главных облачных зарядов и их относительной величины схематически изображено кружками с символами «+» и «-» соответственно, а направление перемещение диполя – стрелкой. Символ «*» у буквенного имени иконки обозначает, что данная форма вариаций $\nabla\varphi$ выделялась другими авторами в ходе эмпирических и модельных исследований [Филиппов 1961; Филиппов 1974; Rakov, Uman 2003; Чернева, Пономарев, Фирстов, Бузевич 2007; Toropov, Kozlov, Mullayarov, Starodubtsev 2013], а символ «**» – что эта форма динамики $\nabla\varphi$ качественно напоминает форму выделенную другими авторами, однако имеет специфические особенности, не отмеченные ранее.

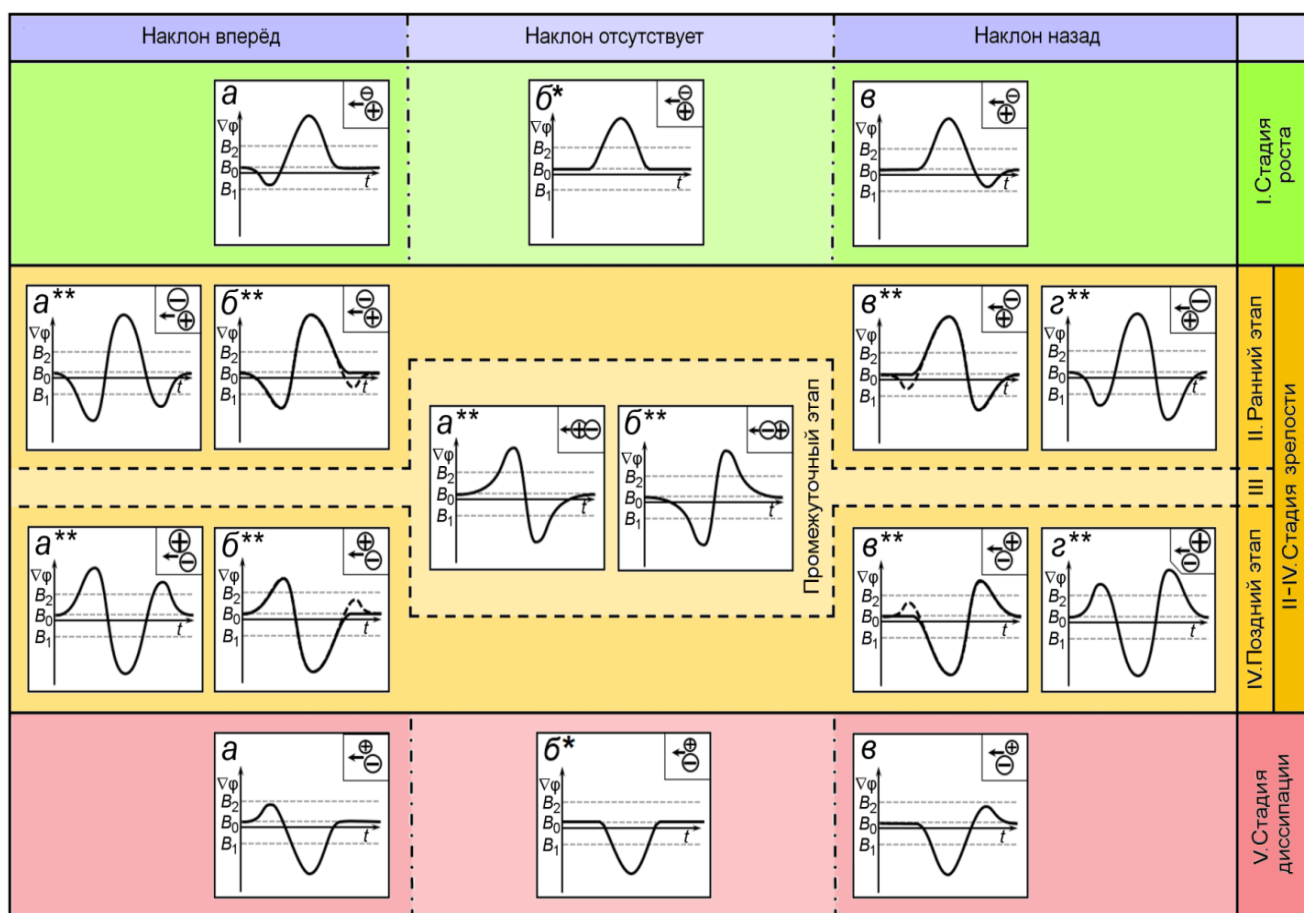


Рисунок 3.24. – Схема эволюции отклика в приземном электрическом поле в ходе жизненного цикла изолированного внутримассового Cb и при различном наклоне облачного диполя относительно направления движения. На схеме: “*” – данная форма вариаций $\nabla\varphi$ выделялась другими авторами, а “**” – эта форма динамики $\nabla\varphi$ качественно напоминает форму выделенную другими авторами, однако имеет не отмечаемые специфические особенности.

Для выделения различных форм отклика, соотносимых с отдельными стадиями *Cb* и особенностями наклона его электрической структуры, были использованы критерии (табл. 4.11), определяемые как количеством и порядком смены возмущений (d_n) различной полярности, так и соотношением средних значений $\nabla\varphi$ во время возмущений (V_{dn}) между собой и с граничными значениями B_0, B_1, B_2 .

Таблица 4.11. – Критерии выделения форм отклика для отдельных этапов развития *Cb*.

Этап развития	Разновидности форм отклика			
	<i>a</i>	<i>б</i>	<i>в</i>	<i>г</i>
I	$B_0 > V_{d1} > B_1, V_{d2} \geq B_2$	$V_{d2} \geq B_2$	$V_{d1} \geq B_2, B_0 > V_{d2} > B_1$	–
II	$V_{d1} \leq B_1, V_{d2} \geq B_2,$ $V_{d3} \leq B_1,$ $ V_{d2} > V_{d1} > V_{d3} $	$V_{d1} \leq B_1, V_{d2} \geq B_2,$ $ V_{d2} > V_{d1} $	$V_{d1} > B_2, V_{d2} < B_1,$ $ V_{d1} > V_{d2} $	$V_{d1} \leq B_1, V_{d2} \geq B_2,$ $V_{d3} \leq B_1, V_{d2} > V_{d3} >$ $ V_{d1} $
III	$V_{d1} \geq B_2, V_{d2} \leq B_1,$ $ V_{d1} \approx V_{d2} $	$V_{d1} \leq B_1, V_{d2} \geq B_2,$ $ V_{d1} \approx V_{d2} $	–	–
IV	$V_{d1} \geq B_2, V_{d2} \leq B_1,$ $V_{d3} \geq B_2,$ $ V_{d2} > V_{d1} > V_{d3} $	$V_{d1} \geq B_2, V_{d2} \geq B_1,$ $ V_{d2} > V_{d1} $	$V_{d1} \leq B_1, V_{d2} \geq B_2,$ $ V_{d1} > V_{d2} $	$V_{d1} \geq B_2, V_{d2} \leq B_1,$ $V_{d3} \geq B_2,$ $ V_{d2} > V_{d3} > V_{d1} $
V	$B_2 > V_{d1} > B_0, V_{d2} \leq B_1,$	$V_{d2} \leq B_1$	$V_{d1} \leq B_1, B_2 > V_{d2} > B_0$	–

Следует отметить, что представленное на рис. 4 разграничение стадий развития *Cb* является условным и определяется граничными значениями B_1 и B_2 , вычисляемыми на основе значений B_0 и s , которые в свою очередь зависят от времени года и физико-географического региона и должны быть подобраны эмпирически.

4.7. Выводы по главе

Представлена методика классификации форм вариаций $\nabla\varphi$ при воздействии кучево-дождевых облаков различного генезиса и оценки их временной структуры.

Описана математическая модель отклика в приземном электрическом поле изолированного кучево-дождевого облака с заданной электрической структурой. Показаны основные типы вариаций $\nabla\phi$ при воздействии кучево-дождевых облаков и их связь с генезисом Cb , а также формы вариаций $\nabla\phi$ при изолированных внутримассовых Cb и их связь со стадиями развития Cb . Представлены результаты модельной оценки отклика $\nabla\phi$ на изолированное Cb с заданной электрической структурой, а также отклика параметров электродного слоя на основные формы вариаций $\nabla\phi$ при Cb . Приведены результаты обобщения форм вариаций $\nabla\phi$, отмеченных на основе натуральных измерений и модельных исследований и связанных с воздействием изолированного кучево-дождевого облака на различных стадиях развития и с различным наклоном главного диполя.

В ходе исследования были получены следующие основные результаты.

1. Отмечено, что при прохождении изолированных кучево-дождевых облаков (Cb) наблюдаются 1-3 возмущения $\nabla\phi$ с общей длительностью <1 часа, фронтальных гряд Cb – серия непродолжительных возмущений $\nabla\phi$ с общей длительностью несколько часов, а при МКК – 1-2 возмущения с длительностью каждого >1 часа.

2. Установлено, что при прохождении кучево-дождевых облаков различного генезиса форма «медленных» вариаций $\nabla\phi$ в $2/3$ случаев относятся к 10 основным типам, связанным с наиболее встречающимися формами отклика.

3. Выявлено, что форма «медленных» вариаций $\nabla\phi$ в 97% одиночных внутримассовых Cb принадлежит к 6 основным типам, связанным с различными стадиями жизни отдельной конвективной ячейки.

4. Оценена зависимость формы «медленных вариаций» $\nabla\phi$ при прохождении модельного Cb от величины основных зарядов, высоты их расположения, наклона облачного диполя и удаления от него.

5. Отмечено, что отрицательные значения $\nabla\phi$ при прохождении изолированного зрелого Cb , как правило, не отмечаются на расстоянии > 4 км от центра (точки проекции) главного диполя.

6. Выявлено, что значений $\nabla\varphi > 1$ кВ/м могут распространяться от точки проекции центра главного диполя изолированного зрелого *Cb* на расстояние до 15 км, а значения $\nabla\varphi > 0,5$ кВ/м – до 20 км.

7. Показано, что при прохождении фронтальной гряды *Cb* значений $\nabla\varphi > 1000$ В/м, могут отмечаться на расстояниях > 20 км от точки проекции центра кластера кучево-дождевых облаков.

8. Определено, что дальность обнаружения по направлению движения изолированного зрелого кучево-дождевого облака при величине порогового сдвига 1 кВ/м равна в среднем ~ 12 км.

9. Представлена классификация оклика в приземном электрическом поле изолированных кучево-дождевых облаков с учётом их стадии развития и наклона облачного диполя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как следует из литературного обзора на настоящее время недостаточно исследованы электрофизические процессы в приземном слое под воздействием облаков, особенно кучево-дождевых (грозовых), и сопутствующих им атмосферных явлений.

Данные мониторинга геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН, дополненные данными измерений ГМС Томск и дистанционного зондирования Земли за период ~ 10 лет позволяют провести комплексное исследование электрофизических процессов во время отмеченных выше условий.

В разделе 2 рассмотрены основные данные, использованные в диссертационном исследовании и описана методика обработки вариаций градиента потенциала электрического поля под воздействием облаков основных форм. Приведен статистический анализ значений $\nabla\varphi$ под воздействием облаков основных форм.

Основные результаты по 2 разделу:

1. Оценены статистические характеристики значений градиента потенциала электрического поля ($\nabla\varphi$) во время ясной погоды и при прохождении облаков: *Ci*, *Cc*, *Cs*, *Ac*, *As*, *Cu*, *Sc*, *St*, *Ns* и *Cb*.

2. Отмечено, что средние значения $\nabla\varphi$ при безоблачной погоде в тёплый и холодный сезоны года для территории юга Западной Сибири составляют 230 и 290 В/м соответственно.

3. Установлено, что СКО значений $\nabla\varphi$ при прохождении *Cb* превышает аналогичные значения при других формах облачности в холодный сезон более чем в 4 раза, а тёплый сезон более чем в 5 раз.

4. Показано, среднее значение $\nabla\varphi$ при прохождении *Cb* в холодный сезон на 750 В/м больше, а СКО в 1,8 раза меньше аналогичных значений для тёплого сезона.

5. Выявлено, что главная мода в распределении $\nabla\varphi$ при прохождении *Cb* в тёплый сезон приходится на отрицательные значения $\nabla\varphi \sim 1$ кВ/м, в то время как в холодной – на равные по величине положительные значения.

6. Предложен метод выявления кучево-дождевых облаков на основе пороговых значений $\nabla\varphi$, оправдываемость которого составляет более 75%.

В разделе 3 описана методика отбора натуральных данных градиента потенциала электрического поля и полярных электрических проводимостей при прохождении кучево-дождевых облаков и ливневых осадков, а также оценки временной структуры вариаций $\nabla\varphi$ и λ_{\pm} . Описаны основные уравнения, используемые для математического моделирования вариаций $\nabla\varphi$, ρ и λ_{\pm} под воздействием *Cb* и ливневых осадках. Отмечены характерные особенности динамики $\nabla\varphi$ и λ_{\pm} при *Cb* и ливневых осадках. Показаны особенности временной структуры вариаций $\nabla\varphi$ при воздействии кучево-дождевых облаков и связанных с ними атмосферных явлений. Представлены результаты модельной оценки динамики $\nabla\varphi$, ρ и λ_{\pm} при *Cb* и ливневых осадках.

В ходе работы по 3 разделу были получены следующие основные результаты.

1. Получено, что длительность «медленных» вариаций $\nabla\varphi$ в среднем по всем случаям прохождения кучево-дождевой облачности составляет 53 минуты, то есть наблюдается прохождение в среднем двух конвективных ячеек (~ 30 мин).

2. Отмечено, что среднее значение размаха $\nabla\varphi$ при *Cb* в грозовой стадии превышает аналогичное значение в ливневой стадии более чем в 2,1 раза.

3. Рассчитано, что длительность отдельных структурных элементов вариаций $\nabla\varphi$ (возмущений) при прохождении *Cb* составляет ~ 10 мин.

4. Выявлено, что распределения общей длительной «медленных» вариаций $\nabla\varphi$ под воздействием *Cb* и средних значений положительных и отрицательных возмущений $\nabla\varphi$ близки к составному распределению Леви-Парето.

5. Отмечено, что перелом распределении общей длительной «медленных» вариаций $\nabla\varphi$ под воздействием *Cb* приходится на длительность ~ 60 мин, а два

различных участка распределения предположительно связаны с принципиально различными проявлениями кучево-дождевой облачности: одиночные кучево-дождевые облака или конгломераты *Cb*.

6. Показано, что под влиянием вариаций $\nabla\varphi$, обусловленных прохождением *Cb* происходят противофазные изменения в концентрации положительных (n_+) и отрицательных (n_-) лёгких ионов.

7. Замечено, что падение электропроводности (λ) одной из полярностей и рост λ противоположной полярности при прочих равных условиях тем сильнее, чем выше абсолютные значения $\nabla\varphi$ во время возмущений электрического поля.

8. Показано, что амплитуда колебаний λ_{\pm} при сходных значениях $\nabla\varphi$ тем больше, чем меньше содержание аэрозоля (ядер конденсации) на данном уровне.

9. Выявлено, что выпадение интенсивного ливневого дождя приводит к быстрому росту (особенно n_-), а ливневого снега – к согласованному исчезновению легких ионов обеих полярностей.

10. Отмечено, что перенос и распад в атмосфере дочерних продуктов распада радона приводит к монотонному росту n_{\pm} после выпадения интенсивных ливневых осадков.

В разделе 4 представлена методика классификации форм вариаций $\nabla\varphi$ при воздействии кучево-дождевых облаков различного генезиса и оценки их временной структуры. Описана математическая модель отклика в приземном электрическом поле изолированного кучево-дождевого облака с заданной электрической структурой. Показаны основные типы вариаций $\nabla\varphi$ при воздействии кучево-дождевых облаков и их связь с генезисом *Cb*, а также формы вариаций $\nabla\varphi$ при изолированных внутримассовых *Cb* и их связь со стадиями развития *Cb*. Представлены результаты модельной оценки отклика $\nabla\varphi$ на изолированное *Cb* с заданной электрической структурой, а также отклика параметров электродного слоя на основные формы вариаций $\nabla\varphi$ при *Cb*. Приведены результаты обобщения форм вариаций $\nabla\varphi$, отмеченных на основе натуральных измерений и модельных исследований и связанных с воздействием

изолированного кучево-дождевого облака на различных стадиях развития и с различным наклоном главного диполя.

В ходе исследования по 4 разделу были получены следующие основные результаты.

1. Отмечено, что при прохождении изолированных кучево-дождевых облаков (*Cb*) наблюдаются 1-3 возмущения $\nabla\varphi$ с общей длительностью < 1 часа, фронтальных гряд *Cb* – серия непродолжительных возмущений $\nabla\varphi$ с общей длительностью несколько часов, а при МКК – 1-2 возмущения с длительностью каждого > 1 часа.

2. Установлено, что при прохождении кучево-дождевых облаков различного генезиса форма «медленных» вариаций $\nabla\varphi$ в 2/3 случаев относится к 10 основным типам, связанным с наиболее встречающимися формами отклика.

3. Выявлено, что форма «медленных» вариаций $\nabla\varphi$ в 97% одиночных внутримассовых *Cb* принадлежит к 6 основным типам, связанным с различными стадиями жизни отдельной конвективной ячейки.

4. Оценена зависимость формы «медленных вариаций» $\nabla\varphi$ при прохождении модельного *Cb* от величины основных зарядов, высоты их расположения, наклона облачного диполя и удаления от него.

5. Отмечено, что отрицательные значения $\nabla\varphi$ при прохождении изолированного зрелого *Cb*, как правило, не отмечаются на расстоянии > 4 км от центра (точки проекции) главного диполя.

6. Выявлено, что значений $\nabla\varphi > 1$ кВ/м могут распространяться от точки проекции центра главного диполя изолированного зрелого *Cb* на расстояние до 15 км, а значения $\nabla\varphi > 0,5$ кВ/м – до 20 км.

7. Показано, что при прохождении фронтальной гряды *Cb* значений $\nabla\varphi > 1000$ В/м, могут отмечаться на расстояниях > 20 км от точки проекции центра кластера кучево-дождевых облаков.

8. Определено, что дальность обнаружения по направлению движения изолированного зрелого кучево-дождевого облака при величине порогового сдвига 1 кВ/м равна в среднем ~12 км.

9. Представлена классификация оклика в приземном электрическом поле изолированных кучево-дождевых облаков с учётом их стадии развития и наклона

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизированная Информационная Система Обработки Режимной Информации (АИСОРИ) [Электронный ресурс] / Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных (ВНИИГМИ-МЦД). – Электрон. дан. – Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД. – URL:<http://aisori.meteo.ru/ClimateR> (дата обращения: 21.02.2015).
2. Аджиев А. Х. Физико-математическое моделирование электризации конвективных облаков при естественном их развитии / А. Х. Аджиев, А. В. Шаповалов // Труды ВГИ. – 1991. – Вып. 83. – С. 3–12.
3. Аджиев А. Х. Атмосферно-электрические явления на Северном Кавказе / А. Х. Аджиев, Г. В. Куповых. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2004. – 137 с.
4. Адушкин В. В. Возмущения электрического поля атмосферы в ближней зоне подземного взрыва / В. В. Адушкин, С. П. Соловьев // Физика Земли. – 1989. – № 3. – С. 51.
5. Адушкин В. В. Электрическое поле, возникающее при взрыве на выброс / В. В. Адушкин, С. П. Соловьев, В. В. Сурков // Физика горения и взрыва. – 1990. – Т. 26, № 4. – С. 117.
6. Адушкин В. В. Генерация электрического и магнитного поля при воздушных, наземных и подземных взрывах / В. В. Адушкин, С. П. Соловьев // Физика горения и взрыва. – 2004. – Т. 40, № 6. – С. 42–51.
7. Азбукин А. А. Автоматические метеостанции АМК-03 и их модификации / А. А. Азбукин, А. Я. Богушевич, А. А. Кобзев, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров, В. Д. Шелевой // Датчики и системы. – 2012. – № 3. – С. 47–52.
8. Анисимов С. В. Механизмы формирования спектра пульсаций электрического поля приземной атмосферы / С. В. Анисимов, Е. А. Мареев, Н. М. Шихова, Э. М. Дмитриев // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2001. – Т. 44. – № 7. – С. 562-576.

9. Анисимов С. В. Численное моделирование электричества приземной атмосферы / С. В. Анисимов, Э. М. Дмитриев // Геофизические исследования. – 2008. – Т.9, № 3. – С.7–15.
10. Анисимов С. В. Геофизические исследования глобальной электрической цепи / С. В. Анисимов, Е. А. Мареев // Физика Земли. – 2008. – №10. – С.8–18.
11. Атмосфера. Справочник (справочные данные, модели) / под ред. Ю. С. Седунов [и др.]. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 509 с.
12. Ашабоков Б. А. Численное моделирование градовых облаков / Б. А. Ашабоков, Х. Х. Калажоков. – М.: Гидрометеиздат, 1992. – 135 с.
13. Ашабоков Б. А. Численные исследования образования и роста града при естественном развитии облака и активном воздействии / Б. А. Ашабоков, Л. М. Федченко, А. В. Шаповалов, Р. А. Шоранов // Метеорология и гидрология. – 1994. – № 1. – С. 41–48.
14. Ашабоков Б. А. О некоторых результатах численного моделирования активного воздействия на мощные градовые облака / Б. А. Ашабоков, Л. М. Федченко, А. В. Шаповалов, Р. А. Шоранов // Труды ВГИ. – 1996. – Вып. 89. – С. 37–47.
15. Ашабоков Б. А. Физика градовых облаков и активных воздействий на них: состояние и направления развития / Б. А. Ашабоков, Л. М. Федченко, В. О. Тапасханов, А. В. Шаповалов, В. А. Шаповалов, М. К. Макуашев, А. Х. Кагермазов, Л. Т. Созаева, А. А. Ташилова, Л. А. Кешева. – Нальчик: Изд-во Печатный двор, 2013. – 216 с.
16. Базелян Э. М. Физика молнии и молниезащиты / Э. М. Базелян, Ю. П. Райзер. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 320 с.
17. Базелян Э. М. Азбука молниезащиты / Э. М. Базелян. – М.: «Знак», 2010. – 192 с.
18. Бекряев В. И. Нестационарная численная модель S_b / В. И. Бекряев, М. В. Гурович // Труды ГГО. – 1991. – Вып. 538. – С. 109–121.
19. Бекряев В. И. Молнии, спрайты и джеты / В. И. Бекряев. – СПб.: изд. РГГМУ, 2009. – 96 с.

20. Вельтищев Н. Ф. Мезометеорология и краткосрочное прогнозирование. Сборник лекций. Пособие для самостоятельной работы студентов. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 136 с.
21. Вельтищев Н. Ф. Мезометеорологические процессы / Н. Ф. Вельтищев, В. М. Степаненко. – М.: МГУ, 2006. – 101 с.
22. Вельтищев Н. Ф. Эксперименты по численному моделированию интенсивной конвекции / Н. Ф. Вельтищев, В. Д. Жупанов // Метеорология и гидрология. – 2008, № 9. – С. 30–44.
23. ВНИИГМИ-МЦД. Доступ к данным. Основные метеорологические параметры (сроки). Автоматизированная Информационная Система Обработки Режимной Информации (АИСОРИ) [Электронный ресурс] – Электрон. дан. – URL:<http://aisori.meteo.ru/ClimateR> (дата обращения: 14.03.2016).
24. Воробьев В. И. Синоптическая метеорология / В. И. Воробьев. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 616 с.
25. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В.В. Ясюкевич, В.А. Говоркова и др. – М.: Росгидромет, 2014. – 1009 с.
26. Гальперин С. М. Электризация конвективных облаков в естественном цикле развития и при воздействиях / С. М. Гальперин, Л. В. Кашлева, Ю. П. Михайловский, В. Д. Степаненко // Вопросы атмосферного электричества. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – С. 76–102.
27. Горбатенко В. П. Влияние изменения подстилающей поверхности на грозовую активность / В. П. Горбатенко, А. А. Дульзон // География и природные ресурсы. – 1997. – № 2. – С. 142–146.
28. Горбатенко В. П. Пространственные и временные вариации грозовой активности над Томской областью / В. П. Горбатенко, А. А. Дульзон, М. В. Решетько // Метеорология и гидрология. – 1999. – № 12. – С. 21–28.
29. Горбатенко В. П. Сравнительный анализ изменений грозовой активности над различными регионами / В. П. Горбатенко // География и природные ресурсы. – 2000. – № 3. – С. 118–121.

30. Горбатенко В. П. Изменения грозовой активности над антропогенно измененной подстилающей поверхностью / В. П. Горбатенко // География и природные ресурсы. – 2000. – № 2. – С. 139–142.
31. Горбатенко В. П. Структура временных рядов числа дней с грозой / В. П. Горбатенко // Оптика атмосферы и океана. – 2000. – № 11. – С. 1026–1029.
32. Горбатенко В. П. О пространственном распределении числа дней с грозой и плотности разрядов молнии в землю / В. П. Горбатенко // Вестн. Том. гос. пед. ун-та. – 2000. – Вып. 18, № 2. – С. 39–42.
33. Горбатенко В. П. Анализ структуры временных рядов повторяемости форм атмосферной циркуляции и грозовой активности / В. П. Горбатенко, И. И. Ипполитов, М. В. Кабанов, С. В. Логинов, М. В. Решетько, М. И. Таранюк // Оптика атмосферы и океана. – 2002. – Т. 15, № 8. – С. 693–698.
34. Горбатенко В. П. Результаты исследования грозовой активности над территорией Томской области / В. П. Горбатенко, А. А. Дульзон // Известия ТГТУ. – 2006. – № 2. – С. 94–98.
35. Горбатенко В. П. Конвекция в атмосфере над юго-востоком Западной Сибири / В. П. Горбатенко, Д. А. Константинова // Оптика атмосферы океана. – 2009. – Т. 22, № 1. – С. 17–21.
36. Горбатенко В. П. Молния как звено глобальной электрической цепи / В. П. Горбатенко, Т. В. Ершова. – Томск: Издательство ТГПУ, 2011. – 214 с.
37. Дульзон А. А. Исследование некоторых особенностей фронтальных и внутримассовых гроз / А. А. Дульзон, В. А. Раков // Метеорология и гидрология. – 1986. – № 9. – С. 59–63.
38. Дульзон А. А. Исследование характеристик интенсивности грозовой деятельности / А. А. Дульзон, Ф. А. Гиндуллин, В. П. Горбатенко // Изв. ВУЗов. Физика. – Томск : Том. гос. ун-т, 1996. – № 4. – С. 87–93.
39. Датчик напряженности электрического поля «Поле-2»: [Техническое описание и инструкция по эксплуатации]. – Л.: Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова, 1989. – 35 с.

40. Двали Е. Р. Электрическое поле при различных формах облаков и осадков в предгрозовой и грозовой периоды в Иркутске / Е. Р. Двали // Исследование облаков, осадков и грозового электричества. – М., 1961. – С. 249–253.
41. Довгалюк Ю. А. Применение полуторамерной модели для решения фундаментальных и прикладных задач физики облаков / Ю. А. Довгалюк, Н. Е. Веремей, А. А. Синькевич. – СПб.: Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова, 2013. – 218 с.
42. Донченко В. А. Физические основы электрооптики аэрозольной атмосферы: учебное пособие / В. А. Донченко, М. В. Кабанов, Б. В. Кауль, И. В. Самохвалов. – Томск: Изд-во НТЛ, 2009. – 180 с.
43. Донченко В. А. Атмосферная электрооптика: учебное пособие / В. А. Донченко, М. В. Кабанов, Б. В. Кауль, И. В. Самохвалов. – Томск: Изд-во НТЛ, 2010. – 220 с.
44. Донченко В. А. Электрооптические явления в атмосфере: учебное пособие / В. А. Донченко, М. В. Кабанов, Б. В. Кауль, П. М. Нагорский, И. В. Самохвалов. – Томск: Изд-во НТЛ, 2015. – 316 с.
45. Дроздов О. А. Климатология / О. А. Дроздов, В. А. Васильев, Н. В. Кобышева, А. Н. Раевский, Л. К. Смекалова, Е. П. Школьный – Л: Гидрометеиздат, 1989. – 568 с.
46. Евтушенко А. А. О генерации электрического заряда в мезомасштабных конвективных системах / А. А. Евтушенко, Е. А. Мареев // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. – 2009. – Т. 45, № 2. – С. 255–265.
47. Евтушенко А. А. Моделирование возмущений состава мезосферы под действием высотных разрядов – спрайтов / А. А. Евтушенко, Е. А. Мареев // Известия вузов. Радиофизика. – 2011. – Т. 54, № 2. – С. 123–140.
48. Ершова Т. В. Исследования атмосферного электричества в Томске / Т. В. Ершова, В. П. Горбатенко // Вестн. Том. гос. пед. ун-та. – 2010. – Вып. 9, № 99. – С. 178–182.

49. Западно-Сибирское УГМС: Гидрометеорологическая информация: Карты погоды. [Электронный ресурс] – Электрон. дан. – URL: <http://www.meteo-nso.ru/pages/6> (дата обращения: 14.03.2016).
50. Зверев А. С. Синоптическая метеорология / А. С. Зверев. – Л.: Гидрометеоиздат, 1977. – 712 с.
51. Золотов С. Ю. Алгоритмы и программное обеспечение для обработки и моделирования атмосферных климатообразующих факторов // Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Томск, 2003.
52. Золотов С. Ю. Методологические основы распределенной информационной системы мониторинга состояния окружающей среды / С. Ю. Золотов, Е. Л. Додолин // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, 2010. – Т. 1, № 2. – С. 203–206.
53. Имянитов И. М. Электрическая структура конвективных облаков (Cu cong) и ее связь с движением воздуха в облаках / И. М. Имянитов // Исследование облаков, осадков и грозового электричества. – М., Гидрометеоиздат, 1961. – С. 225–238
54. Имянитов И. М. Современное состояние исследований атмосферного электричества / И. М. Имянитов, К. С. Шифрин // Успехи физических наук. – 1962. – Т. LXXVI, № 4. – С. 593–642.
55. Имянитов И. М. Электричество свободной атмосферы / И. М. Имянитов, Е. В. Чубарина. – Л.: Гидрометеоиздат, 1965. – 239 с.
56. Имянитов И. М. Электричество облаков / И. М. Имянитов, Е. В. Чубарина, Я. М. Шварц. – Л.: Гидрометеоиздат, 1971. – 94 с.
57. Имянитов И. М. Исследование электрического поля атмосферы / И. М. Имянитов, В. П. Колоколов // Труды ГГО. – 1974. – № 344. – С. 232–250.
58. Имянитов И. М. Проблема происхождения электрического поля атмосферы и современные представления об атмосферном электричестве / И. М. Имянитов, В. П. Колоколов // Труды I Всесоюзного симпозиума по атмосферному электричеству. – Л.: Гидрометеоиздат, 1976. – С. 5–22.

- 59.Имянитов И. М. Структура и условия развития гроз / И. М. Имянитов // Метеорология и гидрология. – 1981. – № 3. – С. 5-17.
- 60.Ипполитов И. И. Динамика спектра вариаций атмосферно-электрического поля в предгрозовой атмосфере / И. И. Ипполитов, М. В. Кабанов, П. М. Нагорский, С. В. Смирнов // Оптика атмосферы и океана. – 2012. – Т. 25, № 2. – С. 132–136.
- 61.Ипполитов И. И. Суточные вариации напряженности электрического поля в дымах от лесных пожаров / И. И. Ипполитов, М. В. Кабанов, П. М. Нагорский, Ю. А. Пхалагов, С. В. Смирнов // Доклады Академии наук. – 2013. Т. 453, № 2. – С. 207.
- 62.Кальчихин В. В. Оптико-электронный двухканальный измеритель осадков / В. В. Кальчихин, А. А. Кобзев, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров // Оптика атмосферы и океана, 2011. – Т. 24, № 11. – С. 990–996.
- 63.Кальчихин В. В. Определение микроструктурных характеристик жидких атмосферных осадков с помощью оптического осадкомера / В. В. Кальчихин, А. А. Кобзев, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров // Оптика атмосферы и океана, 2015. – Т. 28, № 7. – С. 669–672.
- 64.Кальчихин В. В. Особенности применения оптического метода для измерения параметров атмосферных осадков / В. В. Кальчихин, А. А. Кобзев, В. А. Корольков, А. А. Тихомиров // Известия высших учебных заведений. Физика, 2015. – Т. 58, № 8-2. – С. 169–171.
- 65.Камалдина И. И. Об изменении электрической структуры кучево-дождевых облаков в процессе их развития / И. И. Камалдина // Труды ГГО. – 1968. – Вып. 225. – С. 85–91.
- 66.Кашлева Л. В. Атмосферное электричество / Л. В. Кашлева. – СПб.: РГГМУ, 2008. – 116 с.
- 67.Клименко В. В. О статистических характеристиках электрических полей грозовых облаков в атмосфере / В. В. Клименко, Е. А. Мареев, М. В. Шаталина, Ю. В. Шлюгаев, В. В. Соколов, А. А. Булатов, В. П. Денисов // Известия вузов. Радиофизика. – 2013. – Т. 56, № 11–12, – С. 856–874.

68. Кобранова А. А. Моделирование процессов в электродном слое при прохождении конвективной облачности зимой / А. А. Кобранова, В. Н. Морозов, П. М. Нагорский, К. Н. Пустовалов // Тезисы Всеросс. конф. «XI Сибирское совещание по климатологическому мониторингу». Томск, 21 – 23 сентября 2015. – Томск, 2015. – С. 200–201.
69. Кобранова А. А. Моделирование электрического состояния атмосферы в период зимних штормов / А. А. Кобранова, В. Н. Морозов, П. М. Нагорский, К. Н. Пустовалов // Известия вузов. Физика. – 2015. – Т. 58, № 8/2. – С. 220–223.
70. Козлов В. И. Инструментальные наблюдения грозовой деятельности в Якутии в 1993-1994 гг. / В. И. Козлов, В. А. Муллаяров // Метеорология и гидрология. – 1996. – №2. – С. 105–109.
71. Козлов В. И. Грозовая активность в Якутии по наблюдениям с помощью однопунктового грозопеленгатора-дальномера / В. И. Козлов, В. А. Муллаяров, А. Д. Лаптев, С. П. Вальков, Б. Н. Громов // Известия АН. Физика атмосферы и океана. – 1996. – Т. 32, №2. – С. 216–221.
72. Козлов В. И. Характеристики грозowych очагов по инструментальным наблюдениям в Якутии в 1993-2001 гг. / В. И. Козлов, В. А. Муллаяров, А. Е. Васильев // Метеорология и гидрология. – 2003. – №2. – С. 39–45.
73. Козлов В. И. Грозовая активность в Якутии / В. И. Козлов, В. А. Муллаяров. – Якутск: Изд-во СО РАН (Якутский филиал), 2004. – 104 с.
74. Козлов В. И. Параметры грозовой активности и молниевых разрядов на территории центральной Якутии в 2009–2012 гг. / В. И. Козлов, В. А. Муллаяров, Ю. М. Григорьев, Л. Д. Тарабукина // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2014. – Т. 50, № 3. – С. 365–372.
75. Козлов В. И. Вариации электростатического поля во время зимних туманов / В. И. Козлов, В. А. Муллаяров, П. М. Нагорский, К. Н. Пустовалов, А. А. Торопов // Тезисы Всеросс. конф. «XI Сибирское совещание по климатологическому мониторингу». Томск, 21 – 23 сентября 2015. – Томск, 2015. – С. 35–36.

76. Колоколов В. П. О характеристиках глобального распределения грозовой деятельности / В. П. Колоколов // Метеорология и гидрология. – 1969. – № 11. – С. 47–54.
77. Красногорская Н. В. Электричество нижних слоёв атмосферы и методы его измерения // Н. В. Красногорская. – Л.: Гидрометиздат, 1972. – 323 с.
78. Кузнецов В. В. О влиянии циклонов на атмосферное электрическое поле Камчатки / В. В. Кузнецов, Н. В. Чернева, Г. И. Дружин // Доклады Академии наук. – 2007. – Т. 412, № 4. – С. 547–551.
79. Кузнецов В. В. Исследование Форбуш-понижений и эффектов терминатора в атмосферном электрическом поле на обсерватории «Паратунка» / В. В. Кузнецов, Н. В. Чернева // Вестник Камчатской региональной организации Учебно-научный центр. Серия: Науки о Земле. – 2008. – № 11. – С. 89–97.
80. Куповых Г. В. Электричество приземного слоя / Г. В. Куповых // Известия высших учебных заведений, Сев.-Кав. рег., Естест. науки. – 1995. – № 4, – С. 32–34.
81. Куповых Г. В. Электрический объемный заряд в приземном слое / Г. В. Куповых // Известия ТРТУ. – 1998. – № 3. – С. 202–205.
82. Куповых Г. В. Теория электродного эффекта в атмосфере / Г. В. Куповых, В. Н. Морозов, Я. М. Шварц. – Таганрог: Издательство ТРТУ, 1998. – 123 с.
83. Куповых Г. В. Нестационарные электрические процессы в приземном слое атмосферы / Г. В. Куповых, В. Н. Морозов // Известия высших учебных заведений. Сев.-Кав. Регион. Естественные науки. – 2001. – № 4. – С. 82–85.
84. Куповых Г. В. Классический (нетурбулентный) электродный эффект в приземном слое / Г. В. Куповых, В. Н. Морозов // Известия высших учебных заведений. Сев.-Кав. регион. Естественные науки. – 2003. – № 2. – С. 43–46.
85. Куповых Г. В. Электродный эффект в приближении сильного турбулентного перемешивания / Г. В. Куповых, В. Н. Морозов // Известия высших учебных заведений. Сев.-Кав. регион. Естественные науки. – 2003. – № 3. – С. 51–53.

86. Куповых Г. В. Турбулентный электродный эффект в приземном слое / Г. В. Куповых, В. Н. Морозов // Известия высших учебных заведений. Сев.-Кав. регион. Естественные науки. – 2003. – №3. – С. 55–62.
87. Куповых Г. В. Структура электродного слоя вблизи поверхности земли в приближении сильного турбулентного перемешивания / Г. В. Куповых, В. Н. Морозов // Известия высших учебных заведений. Сев.-Кав. регион. Естественные науки. – 2003. – №4. – С. 44–48.
88. Куповых Г. В. Электродный эффект в приземном слое атмосферы (постановка задачи) / Г. В. Куповых, В. Н. Морозов // Известия высших учебных заведений. Сев.-Кав. регион. Естественные науки. Приложение №1. – 2003. – С. 38–40.
89. Куповых Г. В. О связи электрического поля с объемным зарядом в приземном слое атмосферы / Г. В. Куповых, А. С. Болдырев, И. С. Литвинова, А. Г. Марченко // Известия высших учебных заведений. Сев.-Кав. регион. Естественные науки. Приложение №3. – 2003. – С. 42–45.
90. Мазин И. П. Облака: строение и физика образования / И. П. Мазин, С. М. Шметер. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 279 с.
91. Мазин И. П. Облака и облачная атмосфера. Справочник / И. П. Мазин, А. Х. Хргиан. – Л.: Гидрометиздат, 1989. – 647 с.
92. Мареев Е. А. Загадки атмосферного электричества / Е. А. Мареев, В. Ю. Трахтенгерц // Природа. – 2007. – № 3. – С. 24–33.
93. Мареев Е. А. Российские исследования в области атмосферного электричества в 2003-2007 гг. / Е. А. Мареев, В. Н. Стасенко // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2009. – Т. 45, № 5. – С. 709–720.
94. Мареев Е. А. Достижения и перспективы исследований глобальной электрической цепи / Е. А. Мареев // Успехи физических наук. – 2010. – Т. 180, № 5. – С. 527–534.
95. Мареев Е. А. Российские исследования атмосферного электричества в 2011–2014 гг. / Е. А. Мареев, В. Н. Стасенко, А. А. Булатов, С. О. Дементьева, А. А. Евтушенко, Н. В. Ильин, Ф. А. Кутерин, Н. Н. Слюняев, М. В. Шаталина //

- Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2016. – Т. 52, № 2. – С. 175.
96. Мареева О. В. О роли конвективного генератора в глобальной электрической цепи / О. В. Мареева, Е. А. Мареев, А. В. Калинин, А. А. Жидков // Солнечно-земная физика. – 2012. – № 21, № 134. – С. 115–118.
97. Матвеев Л. Т. Основы общей метеорологии. Физика атмосферы / Л. Т. Матвеев. – Л.: Гидрометеиздат, 1965. – 875 с.
98. Матвеев, Л. Т. Динамика облаков / Л. Т. Матвеев. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 311 с.
99. Матвеев Л. Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы / Л. Т. Матвеев. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 751 с.
100. Матвеев Л. Т. Физика атмосферы. – СПб.: Гидрометеиздат, 2000. – 777 с.
101. Махоткин Л. Г. Дни с грозой, продолжительность гроз и число грозовых разрядов / Л. Г. Махоткин // Труды ГГО. – 1980. – Вып. 401. – С.11–16.
102. Махоткин Л. Г. Профессор П. Н. Тверской – организатор и руководитель исследований по атмосферному электричеству в Советском Союзе / Л. Г. Махоткин, В. П. Колоколов // Труды II Всесоюзного симпозиума по атмосферному электричеству. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – С. 7–9.
103. Мейсон Б. Дж. Физика облаков / Б. Дж. Мейсон // Л.: Гидрометеиздат, 1961, – 542 с.
104. Механико-математический факультет НИ ТГУ: Карты [Электронный ресурс] – Электрон. дан. – URL: <http://gpu.math.tsu.ru/maps> (дата обращения: 14.06.2016).
105. Михайлова Г. А. Эффекты солнечной и геомагнитной активностей в вариациях спектров мощности электрических и метеорологических величин в приземной атмосфере на Камчатке во время солнечных событий в октябре 2003 г. / Г. А. Михайлова, О. В. Капустина, С. Э. Смирнов // Геомагнетизм и аэрномия, 2014. – Т. 54, № 5. – С. 691–700.
106. Михайловский Ю. П. Эмпирическая модель электрически активных конвективных облаков и возможности ее использования для тестирования

- численной модели / Ю. П. Михайловский // Труды НИЦ ДЗА (филиала ГГО). – 2002. – Вып. 4, № 552. – С. 66–75.
107. Михайловский Ю. П. Методы и результаты исследований электризации конвективных облаков с помощью самолётов / Ю. П. Михайловский, Л. В. Кашлева // Радиолокационная метеорология и активные воздействия. – СПб: Главная геофизическая обсерватория, 2012. – С. 98–114.
108. Морозов В. Н. К вопросу о физико-математическом моделировании электрических процессов в нижних слоях атмосферы / В. Н. Морозов // Атмосферное электричество: Труды II Всесоюзного симпозиума. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – С. 14–17.
109. Морозов В. Н. Распределение электрических характеристик в приземном турбулентном слое атмосферы / В. Н. Морозов // Труды ГГО. – 1986. – Вып. 498. – С. 106–118.
110. Морозов В. Н. Расчеты электростатических полей грозовых облаков, необходимых для инициирования разрядов облако-верхние слои атмосферы / В. Н. Морозов // Прикладная метеорология. – 2001. – Вып. 3, № 549. – С. 34–47.
111. Морозов В. Н. Исследования атмосферного электричества / В. Н. Морозов, В. С. Снегуров, Я. М. Шварц // Современные исследования Главной геофизической обсерватории. – 2001. – Т. 2. – С. 203–228.
112. Морозов В. Н. Расчет электрических полей грозовых облаков для инициирования электрических разрядов облако-верхние слои атмосферы / В. Н. Морозов // Геомагнетизм и аэрономия. – 2002. – Т. 42, № 1. – С. 121–129.
113. Морозов В. Н. Математическое моделирование атмосферно-электрических процессов с учётом влияния аэрозольных частиц и радиоактивных веществ / В. Н. Морозов – СПб.: изд. РГГМУ, 2011. – 253 с.
114. Морозов В. Н. Теория электрических явлений в атмосфере / В. Н. Морозов, Г. В. Куповых. – Изд-во: LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co. KG Germany, 2012. – 330 с.

115. Морозов В. Н. Воздействие зимней конвективной облачности на динамику электродного слоя / В. Н. Морозов, П. М. Нагорский, К. Н. Пустовалов, А. А. Рязанов, С. В. Смирнов // *Материалы Всеросс. конф. «Глобальная электрическая цепь»*. Борок, 28 октября – 1 ноября 2013. – Ярославль, 2013. – С. 37–38.
116. Мохов И. И. Вертикальный температурный градиент в тропосфере и его связь с приповерхностной температурой по данным реанализа / И. И. Мохов, М. Г. Акперов // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. – 2006. – Т. 42, № 4. – С. 467–475.
117. Мучник В. М. Физика грозы / В. М. Мучник – Л: Гидрометиздат, 1974. – 351 с.
118. Нагорский П. М. Электродный слой в электрическом поле мощной конвективной облачности / П. М. Нагорский, В. Н. Морозов, С. В. Смирнов, А. В. Афонюшкин, К. Н. Пустовалов // *Материалы VII Всеросс. конф. по Атмосферному электричеству*. Санкт-Петербург, 24–28 сентября 2012. – СПб, 2012. – С. 177–179.
119. Нагорский П. М. Электродный слой в электрическом поле мощной конвективной облачности / П. М. Нагорский, В. Н. Морозов, С. В. Смирнов, К. Н. Пустовалов // *Известия вузов. Радиофизика*. – 2013. – Т. 56. – № 11. – С. 853–863. Nagorsky P. M. Electrode layer in the electric field of deep convective cloudiness / P. M. Nagorskiy, V. N. Morozov, S. V. Smirnov, K. N. Pustovalov // *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2014. – V. 56, № 11-12. – P. 769–777.
120. Нагорский П. М. Вариации метеорологических и атмосферно-электрических величин в дымах от мощных летних лесных пожаров / П. М. Нагорский, И. И. Ипполитов, М. В. Кабанов, К. Н. Пустовалов, С. В. Смирнов, В. С. Яковлева // *Труды II Всеросс. конф. «Экология и космос»*. Санкт-Петербург, 10 – 11 февраля 2015. – СПб, 2015 – С. 229-233.
121. Нагорский П. М. Мощные лесные пожары как фактор перестройки атмосферных процессов / П. М. Нагорский, И. И. Ипполитов, М. В. Кабанов, К. Н. Пустовалов, С. В. Смирнов, В. С. Яковлева // *Тезисы Всеросс. конф. «XI*

- Сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу». Томск, 21 – 23 сентября 2015. – Томск, 2015. – С. 56.
122. Нагорский П. М. Динамика атмосферно-электрических величин приземного слоя в экстремальных метеорологических условиях / П. М. Нагорский, К. Н. Пустовалов, С. Ю. Золотов, О. Г. Ланская, С. В. Смирнов // Материалы IV Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». Санкт-Петербург, 20-21 апреля 2016. – СПб.: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2016. – С. 602–606.
123. Нагорский П. М. Динамика электродного слоя во время прохождения мощной конвективной облачности / П. М. Нагорский, А. А. Кобранова, О. Г. Ланская, В. Н. Морозов, К. Н. Пустовалов // Труды XXV Всероссийской открытой научной конференции «Распространение радиоволн». Томск, 4–9 июля 2016. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2016. – Т. III. – С. 218–221.
124. Нагорский П. М. Мониторинг городской среды Сибири: принципы формирования базы данных об опасных метеорологических явлениях / П. М. Нагорский, В. С. Яковлева, К. Н. Пустовалов, С. В. Смирнов, М. С. Черепнев, Г. А. Яковлев // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. – 2016. – № 3. – С. 53–63.
125. Нагорский П. М. Динамика электродного слоя во время прохождения мощной конвективной облачности / П. М. Нагорский, А. А. Кобранова, О. Г. Ланская, В. Н. Морозов, К. Н. Пустовалов // Известия вузов. Физика. – 2016. – Т. 59, № 12/3. – С. 203–208.
126. Облака и облачная атмосфера. Справочник / Под ред. И. П. Мазина, А. Х. Хргиана. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 647 с.
127. Оболенский В. Н. Метеорология / В. Н. Оболенский. – М.: «Новая деревня», 1927. – 619 с.
128. Оболенский В. Н. Метеорология. Часть II (специальная) / В. Н. Оболенский. – Л.-М.: Гидрометеорологическое издательство, 1939. – 443 с.

129. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. – М.: РОСГИДРОМЕТ, 2008. – 29 с.
130. Пономарев Е.А. Формирование локального электрического поля атмосферы / Е. А. Пономарев, Н. В. Чернева, П. П. Фирстов // Геомагнетизм и аэрномия. – 2011. – С. 405–411.
131. Попов И. Б. Статистические оценки влияния различных метеорологических явлений на градиент электрического потенциала атмосферы / И. Б. Попов // Труды ГГО. – 2008. – № 558. – С. 152–161.
132. Пустовалов К. Н. Свойства электродного слоя под воздействием электрического поля конвективной облачности / К. Н. Пустовалов, П. М. Нагорский, В. Н. Морозов, С. В. Смирнов // Материалы Всеросс. конф. «Контроль окружающей среды и климата (КОСК-2012)». Томск, 1–3 октября 2012. – Томск, 2012. – С. 94-95.
133. Пустовалов К. Н. Электрическое поле конвективной облачности как фактор, управляющий электродным слоем / К. Н. Пустовалов, П. М. Нагорский, С. В. Смирнов // Материалы Междунар. конф. «Климатология и гляциология Сибири». Томск, 16–20 октября 2012. – Томск, 2012. – С. 227-229.
134. Пустовалов К. Н. Динамика электродного слоя при прохождении конвективной облачности в зимних условиях / К. Н. Пустовалов, В. Н. Морозов, П. М. Нагорский, А. А. Рязанов, С. В. Смирнов // Тезисы Всеросс. конф. «X Сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу». Томск, 14 – 17 октября 2013. – Томск, 2013. – С. 122-123.
135. Пустовалов К.Н. Электрические параметры приземной атмосферы при прохождении мощной конвективной облачности / К. Н. Пустовалов, П. М. Нагорский // Тезисы Междунар. конф. «Изменение климата и окружающей среды Северной Евразии: анализ, прогноз, адаптация». Кисловодск, 14 – 20 сентября 2014. – М.-Кисловодск: ГЕОС, 2014. –С. 267-269.
136. Пустовалов К.Н. Динамика электрических параметров приземной атмосферы при прохождении облаков различных форм / К. Н. Пустовалов, П. М. Нагорский // Тезисы XVIII Всеросс. конф. «Состав атмосферы.

- Атмосферное электричество. Климатические процессы». Борок, 29 сентября – 3 октября 2014. – Ярославль, 2014. – С. 66-67.
137. Пустовалов К. Н. Вариации атмосферного электрического поля, связанные с кучево-дождевыми облаками в ливневой и грозовой стадиях / К. Н. Пустовалов, П. М. Нагорский // Тезисы XIX Междунар. конф. «Состав атмосферы. Атмосферное электричество. Климатические процессы». Туапсе, 25 – 29 мая 2015. – М.: ГЕОС, 2015. – С. 115.
138. Пустовалов К. Н. Исследование электрических процессов атмосферного приземного слоя при дождях различной интенсивности / К. Н. Пустовалов, А. А. Кобзев, П. М. Нагорский // Материалы XXI Междунар. симп. «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» [Электронный ресурс]. Томск, 22 – 26 июня 2015. – С. D89-D92.
139. Пустовалов К. Н. Вариации электрического поля приземной атмосферы при прохождении кучево-дождевой облачности / К. Н. Пустовалов, П. М. Нагорский // Труды XIV Междунар. конф. «Взаимодействие полей и излучения с веществом» [Электронный ресурс]. Иркутск, 14 – 18 сентября 2015. – С. 341–343.
140. Пустовалов К. Н. Электрические процессы в приземном слое во время выпадения осадков / К. Н. Пустовалов, А. А. Кобзев, П. М. Нагорский, В. С. Яковлева // Тезисы Всеросс. конф. «XI Сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу». Томск, 21 – 23 сентября 2015. – Томск, 2015. – С. 215–216.
141. Пустовалов К.Н. Вариации напряжённости приземного электрического поля при прохождении кучево-дождевой облачности / К. Н. Пустовалов, П. М. Нагорский // Материалы II Всеросс. конф. «Глобальная электрическая цепь». Борок, 5 – 9 октября 2015. – Ярославль, 2015. – С. 89-90.
142. Пустовалов К.Н. Моделирование воздействия зимней конвективной облачности на динамику электродного слоя / К. Н. Пустовалов, В. Н. Морозов, П. М. Нагорский, А. А. Кобранова // Материалы II Всеросс. конф. «Глобальная электрическая цепь». Борок, 5 – 9 октября 2015. – Ярославль, 2015. – С. 40–41.

143. Пустовалов К. Н. Формализация вариаций электрического поля приземной атмосферы при прохождении кучево-дождевой облачности / К. Н. Пустовалов, П. М. Нагорский // *Материалы II Междунар. конф. «Климатология и гляциология Сибири»*. Томск, 20 – 23 октября 2015. – Томск, 2015. – С. 119–122.
144. Пустовалов К. Н. Приземное электрическое поля во время мощной конвективной облачности различного генезиса / К. Н. Пустовалов, П. М. Нагорский // *Труды XXV Всероссийской открытой научной конференции «Распространение радиоволн» [Электронный ресурс]*. Томск, 4–9 июля 2016. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2016. –Т.Ш. – С. 233–236.
145. Пустовалов К. Н. Отклик в приземном электрическом поле изолированных внутримассовых кучево-дождевых облаков / К. Н. Пустовалов, П. М. Нагорский // *Труды XXV Всероссийской открытой научной конференции «Распространение радиоволн» [Электронный ресурс]*. Томск, 4–9 июля 2016. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2016. –Т.Ш. – С. 229–232.
146. Пустовалов К. Н. Динамика метеорологических и атмосферно-электрических параметров приземной атмосферы при прохождении мощной конвективной облачности летом в Северной Хакасии / К. Н. Пустовалов, В. А. Корольков, С. А. Кураков, П. М. Нагорский // *Избранные труды Международной конференции по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды «ENVIROMIS-2016»*. Томск, 11-16 июля 2016. – Томск: Издательство Томского ЦНТИ, 2016. – С. 322–324.
147. Пустовалов К. Н. Электрические величины приземной атмосферы в сложных метеорологических условиях / К. Н. Пустовалов, А. А. Кобзев, П. М. Нагорский, О. Г. Ланская // *Материалы XXII Международного симпозиума «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» [Электронный ресурс]*. Томск, 30 июня - 3 июля 2016. – Томск, 2016. – С. D238–D241.

148. Пустовалов К. Н. Основные типы вариаций электрического поля при прохождении кучево-дождевых облаков различного генезиса / К. Н. Пустовалов, П. М. Нагорский // Оптика атмосферы и океана. – 2016. – Т. 29, № 8. – С. 647–653.
149. Пустовалов К.Н. Разработка системы автоматического выявления опасных метеорологических ситуаций конвективного происхождения в окрестностях аэродрома / К. Н. Пустовалов, А. А. Кобзев, В. А. Корольков, П. М. Нагорский, А. Е. Тельминов, А. А. Тихомиров // Сборник научных статей по материалам IV Всероссийской научно-практической конференции «Академические Жуковские чтения». Воронеж, 23 – 24 ноября 2016. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2017. – Том 1. – С. 194–198.
150. Пхалагов Ю. А. Связь аномальных атмосферных условий с изменчивостью электрического поля / Ю. А. Пхалагов, И. И. Ипполитов, П. М. Нагорский, С. Л. Одинцов, М. В. Панченко, С. В. Смирнов, В. Н. Ужегов // Оптика атмосферы и океана. 2009. – Т. 22, № 1. – С. 25–30.
151. Пхалагов Ю. А. Исследования изменчивости и взаимосвязи оптических и электрических характеристик приземной атмосферы в зимних условиях / Ю. А. Пхалагов, В. Н. Ужегов, В. В. Польшкин, В. С. Козлов, И. И. Ипполитов, П. М. Нагорский / Оптика атмосферы и океана. – 2011. – Т. 24, № 4. – С. 269–274.
152. Расписание погоды. rp5.ru. Погода в Томске. Архив погоды на метеостанции [Электронный ресурс] – Электрон. дан. – URL:http://rp5.ru/Архив_погоды_в_Томске (дата обращения: 12.03.2016).
153. Роджерс Р. Р. Краткий курс физики облаков / Р. Р. Роджерс. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 231 с.
154. Руководство по метеорологическим приборам и методам наблюдений. ВМО-№ 8. – Женева: Всемирная Метеорологическая Организация, 2014. – 786 с.
155. Рыбнов Ю. С. Микробаромы как источник возмущений электрических и инфразвуковых полей / Ю. С. Рыбнов, О. П. Попова, С. П. Соловьев, В. А.

- Харламов, А. В. Соловьев // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2016. – Т. 59, № 12–3. – С. 211–216.
156. Селезнева Е.С. О закономерности вертикального распределения ядер конденсации в атмосфере / Е. С. Селезнева, М. И. Юдин // Труды ГГО. – 1960. – Вып. 105. – С. 37–42.
157. Семенченко Б. А. Физическая метеорология: Учебник / Б. А. Семенченко. – М.: Аспект Пресс, 2002. – 415 с.
158. Смирнов С. Э. Вариации квазистатического электрического поля в приземной атмосфере на Камчатке во время геомагнитных бурь в ноябре 2004 г. / С. Э. Смирнов, Г. А. Михайлова, О. В. Капустина // Геомагнетизм и аэрномия, 2013. – Т. 53, № 4. – С. 532–545.
159. Смирнов С. Э. Реакция электрического состояния приземной атмосферы на геомагнитную бурю 5 апреля 2010 г. / С. Э. Смирнов // Доклады Академии Наук, 2014. – Т. 456, № 3. – С. 342–346.
160. 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 аэрномия, 2014. – Т. 54, № 2. – С. 257–265.
161. Соколенко Л. Г. Датчик электрической проводимости воздуха / Л. Г. Соколенко, Я. М. Шварц // Труды ГГО. – 1990. – Вып. 527. – С. 33–36.
162. Соколов В. В. Практические применения исследований атмосферного электричества в оперативной работе гидрометеорологической службы / В. В. Соколов, Е. А. Мареев // Сборник трудов VII Всероссийская конференция по атмосферному электричеству. Санкт-Петербург, 24-28 сентября 2012. – СПб, 2012. – С. 227–228.
163. Соловьев С. П. Акустико-гравитационные волны и сопутствующие им возмущения атмосферного электрического поля / С. П. Соловьев, Ю. С. Рыбнов, В. А. Харламов, А. В. Крашенинников // Геомагнетизм и аэрномия. – 2017. – Т. 57, № 3. – С. 363–375.

164. Спивак А. А. Геофизические поля в условиях мегаполиса / А. А. Спивак, А. В. Адушкин, В. М. Овчинников, С. П. Соловьев, Е. Н. Ферапонтова // Доклады Академии наук. – 1993. – Т. 332, № 5. – С. 641.
165. Спивак А. А. Геофизические поля мегаполиса / А. А. Спивак, Д. Н. Локтев, Ю. С. Рыбнов, С. П. Соловьев, В. А. Харламов // Геофизические процессы и биосфера. – 2016. – Т. 15, № 2. – С. 39–54.
166. Тарабукина Л. Д. Аналитическое выражение для распределения плотности грозовых разрядов по территории северной Азии / Е. Д. Тарабукина, В. И. Козлов, Р. Р. Каримов // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. – 2016. – Т. 13, № 3. – С. 184–191.
167. Тарабукина Л. Д. Грозовая и солнечная активность на территории северной Азии / Е. Д. Тарабукина, В. И. Козлов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2016. – Т. 59, № 12-3. – С. 201–204.
168. Тарабукина Л. Д. Пространственное распределение грозовых разрядов в северной Азии / Е. Д. Тарабукина, В. И. Козлов, Р. Р. Каримов, В. А. Муллаяров // Метеорология и гидрология. – 2017. – № 2. – С. 20–29.
169. Тверской П. Н. Курс геофизики / П. Н. Тверской. – М.-Л.: Госиздат, 1930. – 568 с.
170. Тверской П. Н. Атмосферное электричество / П. Н. Тверской. – Л.: Гидрометеиздат, 1949. – 252 с.
171. Тверской П. Н. Курс метеорологии (Физика атмосферы) / П. Н. Тверской. – Л.: Гидрометеиздат, 1962. – 700 с.
172. Филиппов А. Х. Электрическое поле атмосферы в предгрозовой и грозовой периоды в Иркутске / А. Х. Филиппов // Исследование облаков, осадков и грозового электричества. – М., 1961. – С. 254–258.
173. Филиппов, А.Х. Статистические характеристики гроз Якутии / А.Х. Филиппов, Д.Ф. Хуторянская // Доклады Института географии Сибири и Дальнего Востока. – 1971. – Вып. 31. – С. 39–46
174. Филиппов А. Х. Грозы Восточной Сибири / А. Х. Филиппов – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 75 с.

175. Фирстов П. П. Атмосферно-электрические эффекты во время эксплозии вулкана Шивелуч 16 ноября 2014 г. / П. П. Фирстов, Р. Р. Акбашев, Р. Холзворт, Н. В. Чернева, Б. М. Шевцов // Известия российской академии наук. Физика атмосферы и океана. – 2017. – Т. 53, № 1. – С. 29–37.
176. Френкель Я. И. Теория явлений атмосферного электричества / Я. И. Френкель. – Л.-М.: Гостехиздат, 1949. – 152 с.
177. Френкель Я. И. Теория явлений атмосферного электричества, 3-е издание / Я. И. Френкель. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 152 с.
178. Хргиан А. Х. Физика атмосферы / А. Х. Хргиан. – М: Государственное издательство физико-математической литературы, 1958. – 645 с.
179. Хргиан А.Х. Физика атмосферы. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1969. – 645 с.
180. Чалмерс Дж. Атмосферное электричество / Дж. Чалмерс. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 420 с.
181. Чернева Н. В. Базовые модели источников вариаций вертикальной компоненты атмосферного электрического поля / Н. В. Чернева, Е. А. Пономарев, П. П. Фирстов, А. В. Бузевич // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. – 2007. – Вып. 10, № 2. – С. 60–64.
182. Чернева Н. В. Влияние природных процессов на формирование локального электрического поля атмосферы. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Специальность: 25.00.29 - Физика атмосферы и гидросферы / Санкт-Петербургский государственный университет. с. Паратунка Камчатского края, 2010. – 124 с.
183. Чернева Н. В. Влияние метеорологических факторов на электрические параметры нижней атмосферы / Н. В. Чернева, П. П. Фирстов // Метеорология и гидрология. – 2013. – № 3. – С. 56–65.
184. Шакина Н. П. Динамика атмосферных фронтов и циклонов / Н. П. Шакина. – Л.: Гидрометеиздат, 1985 – 260 с.
185. Шакина Н. П. Гидродинамическая неустойчивость в атмосфере / Н. П. Шакина. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 309 с.

186. Шаманский Ю. В. Глобальные и локальные вариации электрического поля / Ю. В. Шаманский // Труды V Российской конференции по атмосферному электричеству. Владимир: ВлГУ, 2003. – Т.1. – С.46-49.
187. Шаталина М. В. Мониторинг и моделирование грозовых событий в нижегородском регионе: интенсивная гроза 1-2 июня 2015 г. / М. В. Шаталина, С. О. Дементьева, Е. А. Мареев // Метеорология и гидрология. – 2016. – № 11. – С. 81–87.
188. Шишкин Н. С. Облака, осадки и грозовое электричество / Н. С. Шишкин. – Л.: Гидрометеиздат, 1964. – 402 с.
189. Шметер С. М. Физика конвективных облаков / С. М. Шметер. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. – 220 с.
190. Шметер С. М. Термодинамика и физика конвективных облаков / С. М. Шметер. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 287 с.
191. Шметер С. М. Характеристики затопленной конвекции во фронтальных облаках и условия её образования / С. М. Шметер // Метеорология и гидрология. – 1990. – № 11. – С. 36–44.
192. Юман М. Молния / М. Юман. – М.: Изд-во «Мир», 1972. – 328 с.
193. Яковлева В. С. Модель вертикального распределения плотности плазмы приземной атмосферы / В. С. Яковлева, П. М. Нагорский, В. В. Зукау, Я. В. Лужанчук // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2010. – Т. 53, № 11. – С. 86–88.
194. Ahrens C. D. Essentials of Meteorology. An Invitation to the Atmosphere, 6nd Edition / C. D. Ahrens. – Cengage Learning, 2012. – 506 p.
195. Bennett A. J. Measurement of Atmospheric Electricity During Different Meteorological Conditions: A thesis for the degree of Doctor of Philosophy. – University of Reading, 2007. – 258 p.
196. Bennett A.J. Atmospheric Electricity in Different Weather conditions / A. J. Bennett, R. G. Harrison // Weather. – 2007. – V. 62. – P. 277–283.
197. Bennett A. J. Variability in surface atmospheric electric field measurements / A. J. Bennett, R. G. Harrison // J. Phys.: Conf. Ser., 2008. – V. 142. – P. 012046.

198. Barnard V. The approximate mean height of the thundercloud charges taking part in a flash to ground / V. Barnard // *Journal of Geophysical Research*, 1951. – V. 56, №. 1. – P. 33–35.
199. Bluestein H. B. *Synoptic-Dynamic Meteorology in Midlatitudes. Volume I: Principles of Kinematics and Dynamics* / H. B. Bluestein. – Oxford University Press, 1992 – 448 p.
200. Bluestein H. B. *Synoptic-Dynamic Meteorology in Midlatitudes. Vol. II: Observations and Theory of Weather Systems* / H. B. Bluestein. – New York: Oxford Univ. Press, 1993. – 608 p.
201. Bluestein H. B. *Severe Convective Storms and Tornadoes: Observations and Dynamics* / H. B. Bluestein. – Springer Berlin Heidelberg, 2013. – 456 p.
202. Chalmers J. A. *Atmospheric Electricity*, 2nd Edition / J. A. Chalmers. – Pergamon PressLtd, 1967. – 515 p.
203. Chernokulsky A. V. Recent variations of cloudiness over Russia from surface daytime observations / A. V. Chernokulsky, O. N. Bulygina, I. I. Mokhov // *Environ. Research Letters*. – 2011. – V. 6, № 3. – P. 035202.
204. Davydenko S. S. On the calculation of electric fields and currents of mesoscale convective systems / S. S. Davydenko, E. A. Mareev, T. C. Marshall, M. O. Stolzenburg // *Journal of Geophysical Research*. – 2004. – V. 109. – P. D11103.
205. 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. – P. 165–177
206. Dye J. E. The Electrification of New Mexico Thunderstorms: 1. Relationship Between Precipitation Development and the Onset of Electrification / J. E. Dye, W. P. Winn, J. J. Jones, D. W. Breed // *Journal of Geophysical Research*, 1989. – V. 94, № D6. – P. 8643–8656.
207. EOSDIS Worldview. [Электронный ресурс] – Электрон. дан. – URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov/> (дата обращения: 14.03.2016).
208. *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. WMO-№ 8. – Geneva, World Meteorological Organization (WMO), 2012. – 713 p.

209. Hobbs P. M. Organization and structure of clouds and precipitation on the mesoscale and microscale in cyclonic storms / P. M. Hobbs // *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 1978. – V 16, № 4. – P. 741–755.
210. Hoppel W. A. Theory of the electrode effect / W. A. Hoppel // *J. Atm. and Terr. Phys*, 1967. – V. 29, № 6. – P. 708–721.
211. Hoppel W. A. Electrode effect: comparison of the theory and measurement / W. A. Hoppel // *Planetary Electrodynamics*. – New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1969. – P.167–181 pp.
212. Hoppel W. A. Ion-aerosol attachment coefficients and the steady state charge distribution on aerosols in a bipolar environment / W. A. Hoppel, G. M. Frick // *Aerosol Sci. and Tech.*, 1986. – V.5, № 1. – P. 1–21.
213. Houze R. A. *Cloud Dynamics* / R. A. Houze // *International Geophysics Series*, Volume 53. – New York–London: Academic Press, 1993. – 605 pp.
214. Houze R. A. *Cloud Dynamics*, 2nd Edition / R. A. Houze // *International Geophysics Series*, Volume 104. – New York–London: Academic Press, 2014. – 496 pp.
215. Kalchikhin V. V. Measurement of snow characteristics using optical precipitation gauge / V. V. Kalchikhin, A. A. Kobzev, V. A. Korolkov, A. A. Tikhomirov // *Proceedings of SPIE*, 2016. – V. 10035. – P. 100352W-1–100352W-4.
216. Kobzev A. A. Electrical processes in the surface layer during the rains of varying intensity / A. A. Kobzev, P. M. Nagorskiy, K. N. Pustovalov // *Abstracts Intern. symp. «Atmospheric Radiation and Dynamics (ISARD-2015)»*. St. Petersburg, 23 - 26 June 2015. – St. Petersburg, 2015 – P. 240.
217. LAADS Web. Level 1 and Atmosphere Archive and Distribution System. Data [Электронный ресурс] – Электрон. дан. – URL: <http://ladsweb.nascom.nasa.gov/> (дата обращения: 14.03.2016).
218. Lin Y.-L. *Mesoscale Dynamics* / Y.-L. Lin. – Cambridge: Cambridge University Press, 2007. – 630 p.
219. Mac Gorman D. R. *The Electrical Nature of Storms* / D. R. Mac Gorman, W. D. Rust. – New York: Oxford University Press, 1998. – 432 p.

220. Maddox R. A. Mesoscale Convective Complexes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1980. – V. 61. – P. 1374–1387.
221. Malyshkov S. Yu. Estimation of the lithospheric component share in the Earth natural pulsed electromagnetic field structure / S. Yu. Malyshkov, V. F. Gordeev, V. I. Polyvach, S. G. Shtalin, K. N. Pustovalov // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering (5th International Conference: Modern Technologies For Non-Destructive Testing)*, 2017. – V.189. – P. 012023.
222. Mareev E. A. Formation of charge layers in the planetary atmospheres / E. A. Mareev // *Space Science Reviews*. – 2008. – V. 137. – P. 373–397.
223. Marshall T.C. Electrical evolution during the decay stage of New Mexico thunderstorms / T. C. Marshall // *Journal of Geophysical Research*, 2009. – V. 114. – P. D02209.
224. MODIS Atmosphere: Images: Level-1B Granule Images [Электронный ресурс]. – https://modis-images.gsfc.nasa.gov/IMAGES/02_1km_main.html (дата обращения: 14.03.2016).
225. Nagorskiy P.M. Winter Convective Clouds and Unstationary Electrode Layer / P. M. Nagorskiy, V. N. Morozov, K. N. Pustovalov, A. A. Ryazanov, S. V. Smirnov // *Abstracts Intern. conf. on Atmospheric Electricity (ICAE 2014)* [Электронный ресурс]. Norman, 15 - 20 June 2014.
226. Nagorskiy P. M. Powerful forest fires and atmospheric processes / P. M. Nagorskiy, I. I. Ippolitov, M. B. Kabanov, K. N. Pustovalov, S. V. Smirnov, V. S. Yakovleva // *Abstracts Intern. symp. «Atmospheric Radiation and Dynamics (ISARD-2015)»*. St.Petersburg, 23 - 26 June 2015. – St.Petersburg, 2015. – P. 266.
227. Nagorskiy P.M. Comparative analysis of the long-period variations of ionizing radiation and atmospheric electrical quantities / P. M. Nagorskiy, K. N. Pustovalov, S. V. Smirnov, V. S. Yakovleva // *Book of Abstracts. 11th Intern. Conf. Problems of Geocosmos*. St. Petersburg, Petrodvorets, October 3-7, 2016. – St.-Petersburg, 2016. – P. 81.
228. Nicoll K. A. Measurements of atmospheric electricity aloft / K. A. Nicoll // *Surv. Geophys.*, 2012. – V. 33. – P. 991–1057.

229. Platnick S. The MODIS Cloud Products: Algorithms and Examples From Terra / S. Platnick, M. D. King, S. A. Ackerman, W. P. Menzel, B. A. Baum, J. C. Riedi, R. A. Frey // IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2003. – V. 41, № 2. – P. 459–473.
230. Pustovalov K.N. Study of atmospheric surface layer electrical processes in case of varying intensity rain / K. N. Pustovalov, A. A. Kobzev, P. M. Nagorskiy // Proc. SPIE 9680, 21st International Symposium Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics (November 20, 2015), 2015. – 96806L.
231. Pustovalov K.N. Electric quantities of surface atmosphere in adverse weather conditions / K. N. Pustovalov, A. A. Kobzev, P. M. Nagorskiy, O. G. Lanskaya // Proc. SPIE 10035, 22nd International Symposium Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics (November 29, 2016), 2016. – 1003569.
232. Qu J. J. Earth Science Satellite Remote Sensing. Vol. 1: Science and Instruments / J. J. Qu, W. Gao, M. Kafatos, R. E. Murphy, V. V. Salomonson. – Beijing: Tsinghua University Press and Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg, 2006. – 418 p.
233. Rakov, V. A. Lightning: Physics and Effects / V. A. Rakov, M. A. Uman. – New York: Cambridge Univ. Press, 2003. – 687 p.
234. Stolzenburg M. Charge structure and dynamics in thunderstorms / M. Stolzenburg, T. C. Marshall // Space Sci. Rev., 2008 – №137. – P. 355–372
235. Stolzenburg M. Electrical structure in thunderstorm convective regions 1. Mesoscale convective systems / M. Stolzenburg, W. D. Rust, B. F. Smull, T. C. Marshall // J. Geophys. Res., 1998.– №103. – P. 14059–78.
236. Stolzenburg M. Electrical structure in thunderstorm convective regions 2. Isolated storms / M. Stolzenburg, W. D. Rust, T. C. Marshall // J. Geophys. Res., 1998. – № 103. – P. 14079–96
237. Stolzenburg M. Electrical structure in thunderstorm convective regions 3. Synthesis / M. Stolzenburg, W. D. Rust, T. C. Marshall // J. Geophys. Res., 1998 – №103. – P. 14097–108
238. Thomson W. (Lord Kelvin). Reprint of Papers on Electrostatics and Magnetism. – London: Macmillan and Co, 1872. – 682 pp.

239. Thomson J. J. Conduction of electricity through gases / J. J. Thomson. – Cambridge: Cambridge University Press, 1903. – 572 p.
240. Toropov A. A. Experimental observations of strengthening the neutron flux during negative lightning discharges of thunderclouds with tripolar configuration / A. A. Toropov, V. I. Kozlov, V. A. Mullayarov, S. A. Starodubtsev // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2013. – V. 94. – P. 13–18.
241. Uman M. A. Lightning discharge / M. A. Uman. – New York-London: Academic Press, 1987. – 390 p.
242. Vonnegut B. Electric Potential Gradients above Thunderstorms / B. Vonnegut, C. B. Moore, R. P. Espinola, H. H. Blau, Jr. // Journal of the Atmospheric Sciences, 1966. – V. 23. – P. 764–770.
243. Wang P. K. Physics and Dynamics of Clouds and Precipitation / P. K. Wang. – Cambridge: Cambridge University Press, 2013. – 467 p.
244. Williams E. R. The Tripole Structure of Thunderstorms / E. R. Williams // Journal of Geophysical Research, 1989. – V. 94, № D11. – P. 13151–13167.
245. Wilson C. T. R. A theory of thundercloud electricity / C. T. R. Wilson // Proceedings of the Royal Society (Series A), 1956. – V. 236. – P. 297–317.
246. Yakovleva V. S. Effect of precipitation on the background levels of the atmospheric β - and γ - radiation / V. S. Yakovleva, P. M. Nagorsky, M. S. Cherepnev, A. G. Kondratyeva, K. S. Ryabkina // Applied Radiation and Isotopes, 2016. – V. 118. – P. 190–195.