

**Институт геофизики им. М.З. Нодиа**

*на правах рукописи*

**Амиранашвили Автандил Георгиевич**

**Исследование грозо-градовых процессов в Грузии и  
их связей с аэрозольным загрязнением атмосферы**

04.00.23 – геофизика

Физика атмосферы и гидросферы

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Тбилиси

2006

Работа выполнена в отделе физики атмосферы  
Института геофизики им. М.З. Нодиа

Официальные оппоненты: Хантадзе А.Г.  
Доктор физико-математических наук, проф.  
Гвелесиани А.И.  
Доктор физико-математических наук  
Давиташвили Т.П.  
Доктор физико-математических наук, проф.

Защита диссертации состоится " 29 " июня 2006 г. в " 12 " час на  
заседании диссертационного Совета 04.00.23 при Институте геофизики им. М.З.  
Нодиа АН Грузии

Адрес: г. Тбилиси, 0193, ул. М. Алексидзе 1

Институт геофизики им. М.З. Нодиа

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке  
Института геофизики им. М.З.Нодиа

Автореферат разослан " 29 " мая 2006 г.

Ученый секретарь  
диссертационного Совета,  
кандидат физ.мат. наук

/Церетели Н.С./

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Среди различных разделов физики атмосферы в последние 35-40 лет все большее внимание исследователей привлекает бурно развивающаяся физика облаков и осадков. Одной из основных причин столь пристального интереса к облакам является то, что в настоящее время стала реальной возможность искусственного управления процессами, происходящими в них. Кроме этого облака являются одной из важнейших составляющих климата, обуславливающих его изменение как путем непосредственного влияния (режим жидких и твердых осадков, грозовая деятельность, конвективное перемешивание атмосферы, химический и аэрозольный состав воздуха и осадков, взаимодействие с малыми составляющими атмосферы и др.), так и косвенного – изменение режима солнечной радиации в атмосфере и у земной поверхности. Поэтому в последние годы в связи с интенсивными исследованиями современного антропогенного изменения глобального и регионального климата с целью разработки стратегии по смягчению возможных негативных последствий этих изменений, внимание к указанному разделу физики атмосферы еще более возросло. Что касается грозовых и градовых процессов, то интерес к ним не ослабевает практически в течение всего времени существования человечества, так как эти грозные явления природы довольно часто приносило людям непоправимый ущерб. Поэтому неудивительно, что борьба с грозами и градобитиями стала одной из главных задач искусственного воздействия на погоду.

Грузия является одним из грозо- и градоопасных регионов мира. В связи с указанным исследованием этих процессов здесь всегда были актуальны и им уделялось и уделяется повышенное внимание. Изучение гроз и града в Грузии имеет многовековую историю. Регулярные же метеорологические наблюдения за этими атмосферными явлениями проводятся уже более 100 лет. И если вначале эти наблюдения базировались на визуально-слуховом методе фиксации гроз и простой регистрации числа дней с градом, то в дальнейшем стали применяться и инструментальные методы исследований указанных явлений. Так, многолетние инструментальные наблюдения за параметрами атмосферного электричества, в том числе и грозами, проводились в Душети. Имеется значительное количество работ об электрической структуре конвективных облаков, выполненных с использованием летающей лаборатории. В Институте геофизики АН Грузии в период с 1978 по 1984 гг при проведении совместно с Главной геофизической обсерваторией им. А.И. Воейкова и Ленинградским гидрометеорологическим институтом исследований по созданию методики воздействия на грозовые процессы был накоплен значительный материал об электрических характеристиках грозовых облаков в Кахетинском регионе.

В течение длительного периода времени при разработке средств и методов воздействия на градовые процессы, а затем во время работы первой в мире противогодовой службы Грузии, в Кахетии и в других регионах Восточной и Южной Грузии наряду с детальным изучением климатологии града в этих районах с использованием градождемеров проводились инструментальные измерения количества твердых и жидких осадков, выпавших из градовых облаков. Дополнительно изучались и физические характеристики (плотность, размеры, структура и др.) отдельных градин.

Большое внимание уделялось исследованиям радиолокационных параметров конвективных облаков с целью определения радиолокационных критериев их грозо- и градоопасности, картированию территории Кахетии по распределению конвективной облачности и грозо- и градоопасности с использованием этих критериев. Важное внимание уделялось также теоретическим и экспериментальным лабораторным исследованиям процессов электризации облачных частиц, роста и таяния градин, поискам реагентов для активных воздействий на грозовые и градовые процессы.

В последние годы в связи с ростом индустриального загрязнения внешней среды особую актуальность приобрели проблемы влияния этих загрязнений как на изменение глобального, регионального и локального климата в целом, так и на изменчивость отдельных климатообразующих факторов. Особое значение эта проблема приобрела в нашей стране. Для Грузии, имеющей небольшую территорию, на которой можно встретить почти все виды климатов – от влажных субтропиков с высоким температурным фоном при избыточной увлажненности до холодного климата зоны вечных снегов и ледников, весьма существенны не только региональные эффекты изменения климата, но и эффекты локального масштаба (города, окрестности крупных источников эмиссии загрязнений атмосферы и др.).

Антропогенное загрязнение атмосферы над территорией Грузии просходило и происходит как в результате воздействия на нее местных источников ( активные воздействия на атмосферные процессы, промышленное производство, энергетика, автотранспорт, сельское хозяйство и др.), так и в результате переноса загрязнений из соседних с ней стран Европы и Азии со значительно более развитой индустрией. Поэтому даже незначительные антропогенные изменения глобального или регионального климатов быстро находят отклик если и не для всей территории Грузии, то по крайней мере для ее отдельных климатических зон.

Здесь же следует отметить, что источники загрязняющих атмосферу примесей на территории Грузии распределены крайне неравномерно. Основная доля их находится в Восточной Грузии, и особенно в городе Тбилиси и его окрестностях (Рустави, Каспи, Гардабани). В то же время в пределах ее малонаселенной территории и в горной местности эти источники вообще отсутствуют. Соответственно, антропогенная составляющая загрязнения атмосферы локальными источниками в Восточной Грузии значительно выше, чем в Западной, и максимальной является в Тбилиси. В малонаселенной местности и горных районах уровень загрязненности атмосферы невысок и зачастую близок к фоновым. С этой точки зрения территория Грузии может быть рассмотрена в качестве уникальной природной лаборатории для индикации и изучения антропогенных эффектов различного масштаба в современном изменении климата и отдельных климатообразующих факторов.

Учитывая указанное в 1996 году были начаты и продолжают по сей день широкомасштабные исследования современного изменения климата Грузии. Эти работы послужили новым импульсом в развитии работ по изучению грозо-градовых процессов в Грузии, как одних из важных составляющих климата. Важность таких исследований подтверждается тем, что эффекты антропогенных загрязнений атмосферы (включая активные воздействия на облака) в изменчивости интенсивности грозо-градовых процессов пока изучены недостаточно, данные различных авторов неоднозначны, что возможно обусловлено региональным характером этих эффектов. Так, например, Советский метод противогодовой защиты в различных регионах Мира зачастую не давал положительного эффекта. Поэтому особое внимание было уделено исследованиям влияние аэрозольного загрязнения атмосферы на градовую активность облаков в районах, где с конца шестидесятых до начала девяностых годов прошлого столетия проводились производственные работы по защите сельскохозяйственных культур от градобитий (Кахетия, Южная Грузия). Подобное исследование стало возможным после того, как с использованием методики проф. Таварткиладзе К.А. была создана база многолетних данных об аэрозольной оптической толщине атмосферы, являющейся одним из основных показателей уровня загрязненности атмосферы.

Таким образом, исследование вариаций грозовых и градовых процессов и их реакции на антропогенное загрязнение атмосферы, включая активные воздействия на них, имеет большое научное и практическое значение и представляет в целом крупную научную проблему, имеющую важное народнохозяйственное значение. Решение этой проблемы в

части определения общих закономерностей долговременной изменчивости грозо-градовых процессов и их связей с антропогенным аэрозольным воздействием в Грузии является темой диссертации. Решение этой проблемы одновременно создаст основу для развития нового научного направления – региональные особенности индустриальных и активных воздействий на атмосферные процессы, главной задачей которого будет исследование закономерностей пространственно-временной трансформации динамических, микрофизических и электрических процессов в облаках с учетом местной специфики конвективных процессов, степени индустриализации, физико-химических свойств присутствующих в атмосфере антропогенных аэрозолей и газов, и особенностей методики модификации погоды (борьба с грозами и градом, вызывание осадков, рассеяние туманов и др.).

**Целью исследования** является исследование грозовых и градовых процессов в Грузии и их связи с аэрозольным загрязнением атмосферы, включая активные воздействия на атмосферные процессы. Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи, которые были решены в процессе выполнения данной работы.

1. Определить параметры грозовой активности облаков (электрические и геометрические характеристики наземных молниевых разрядов, степень грозоопасности, соотношение между внутриоблачными и наземными молниевыми разрядами, среднесезонная интенсивность молниевых разрядов над единичной территорией, связь числа дней с грозами и количеством молниевых разрядов и др.).
2. Определить связи радиолокационных и электрических характеристик конвективных облаков.
3. Провести детальное картирование территории Кахетии по молниевой активности с использованием радиолокационных наблюдений за конвективными облаками.
4. Изучить долговременные вариации грозовых и градовых процессов, в особенности на территориях с активными воздействиями на атмосферные процессы (Кахетия, Южная Грузия).
5. Изучить связь грозовых и градовых процессов.
6. Определить уровни аэрозольного загрязнения атмосферы и облаков в районе исследований, включая распространение льдообразующего реагента от противоградовых изделий.
7. Усовершенствовать концепцию взаимосвязи конвективной облачности с малыми примесями в атмосфере.
8. Оценить роль грозовых процессов в изменчивости химического состава атмосферы, облачной среды и образовании вторичных аэрозолей.
9. Изучить реакцию электрического состояния конвективных облаков на искусственное воздействие льдообразующими реагентами, используемыми в практике работы противоградовой службы Грузии.
10. Исследовать комплексное влияние аэрозольного загрязнения атмосферы и активных воздействий на градовые процессы на изменчивость грозовой и градовой активности облаков.

**Объект исследования.** Параметры грозо-градовой активности и аэрозольного загрязнения атмосферы в Грузии.

Параметры грозовой активности: число дней с грозами ( $P$ ); продолжительность гроз ( $\Pi$ ); интенсивность внутриоблачных  $N_c$ , наземных  $N_g$  и суммарных молниевых разрядов  $N_t$ ; плотность молниевых разрядов и их интенсивность над единичной территорией; заряд, вовлеченный в молниевый разряд  $\Delta Q$ ; радиолокационный критерий грозоопасности  $R_t$ ;

Параметры градовой активности: число дней с градом (**ЧДГ**); комплексный радиолокационный критерий градоопасности **K<sub>г</sub>**; количество подвергнутых воздействию облаков **Y(1)**, площадь, побитая одним градобитием на 100 % - **Y(4)**, площадь, побитая градом на 100 % одним обработанным облаком - **Y(5)**, доля градовых облаков из подвергнутых воздействию - **Y(6)**, количество ожидаемых случаев града - **Y(8)**, фактическое количество случаев града - **Y(9)**, доля защищаемой территории, побитой градом на 100% - **Y(10)**, экономическая эффективность противоградовых работ - **Y(11)**; количество выпадающих жидких и твердых осадков.

Параметры аэрозольного загрязнения атмосферы (аэрозольная оптическая толщина атмосферы **AOD**; электропроводность воздуха **ЭПВ**; счетная концентрация твердых аэрозолей в атмосфере и облаках; естественная радиоактивность атмосферы и облаков; бета-радиоактивные выпадения **B**; количество реагента, рассеянного противоградовыми ракетами "Алазани" над единичной площадью (в ед. **Pb**, кг) - **Y(2)**; среднее количество реагента, введенного в одно облако (в ед. **Pb**, кг) - **Y(3)**).

Химический состав атмосферы (концентрация приземного озона **КПО**; **pH** осадков и содержание в них  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ).

**Научная новизна** состоит в том, что в работе впервые:

1. Активные воздействия на облака (борьба с грозами, градом, вызывание осадков) рассмотрены как составная часть общего антропогенного аэрозольного воздействия на атмосферные процессы.

2. Определены параметры молниевой активности конвективных облаков, установлена их связь с радиолокационными характеристиками облаков и проведено разделение грозовой деятельности облаков по интенсивности.

3. Получена эмпирическая модель пространственного распределения плотности молниевых разрядов в Кахетинском регионе.

4. Исследованы долговременные вариации параметров грозовой и градовой активности, градообразующего фактора гроз, характеристик аэрозольного загрязнения атмосферы и электропроводности воздуха. Определена статистическая структура указанных параметров, включая анализ устойчивости рядов наблюдений, выделение трендов, случайных составляющих и построение моделей пространственно-временного распределения.

5. Показано, что аэрозольная оптическая толщина атмосферы является не только интегральной характеристикой загрязненности всей толщи атмосферы, но и ее приземного слоя.

6. Исследовано аэрозольное загрязнение свободной атмосферы и облаков (короткоживущие продукты распада радона, счетная концентрация аэрозолей), включая несложные математические модели накопления и вертикального распределения аэрозолей в мощных конвективных облаках, распространение в них льдообразующего реагента от противоградовых изделий.

7. Изучено влияние антропогенных источников загрязнений и грозовых процессов на содержание в атмосфере озона и химический состав осадков.

8. Представлена усовершенствованная концепция взаимосвязи конвективных облаков с малыми примесями в атмосфере с учетом электрических процессов, протекающих в них, и ионизации воздуха.

9. Разработана опытная методика регулирования грозовой активности конвективных облаков путем воздействия на них льдообразующим реагентом.

10. На основании парного и множественного линейного и нелинейного корреляционного и регрессионного анализа получены физико-статистические модели связи

аэрозольного загрязнения атмосферы, включая активные воздействия на атмосферные процессы, с изменчивостью грозо-градовой активности облаков и режима осадков.

### **Защищаемые положения.**

1. Возможность использования аэрозольной оптической толщи атмосферы как параметра связи аэрозольного загрязнения воздушной среды с интенсивностью грозо-градовых процессов и режима осадков.

2. Физико-статистические модели пространственно-временных характеристик грозо-градовых процессов, аэрозольного загрязнения атмосферы и их взаимосвязей.

3. Рассмотрение ионизирующих излучений естественной радиоактивности свободной атмосферы и облаков (радон и продукты его распада) и космических лучей как факторов, влияющих на образование вторичных аэрозолей, и в конечном итоге на микроструктуру облаков и осадков.

4. Ускорение процессов образования в грозовых облаках вторичных аэрозолей по схеме газ→частица (нитраты, сульфаты и др.) под действием повышенного содержания в них озона и окислов азота, образуемых при молниевых разрядах.

5. Влияние на эффективность противоградовых работ изменчивости молниевой активности облаков в результате воздействия на них льдообразующим реагентом противоградовых изделий, приводящей к изменению содержания в них ядер кристаллизации, вторичных ядер конденсации и условий освоения ими влаги.

6. Нелинейность и региональность характера связи аэрозольного загрязнения атмосферы с интенсивностью грозо-градовых процессов и режима осадков.

7. Необходимость учета региональных особенностей долговременной изменчивости атмосферных процессов (грозы, град, осадки и др.), характера аэрозольного загрязнения атмосферы и их взаимосвязей при организации работ по активным воздействиям на погоду.

**Личный вклад автора.** Указанные выше исследования были проведены при непосредственном участии автора этой диссертации в качестве ответственного исполнителя или руководителя работ. На всех этапах исследования, начиная от постановки задачи до получения результатов, автор являлся главным или одним из основных инициатором и активным исполнителем.

**Достоверность полученных результатов** оценивалась путем определения точности измерений при проведении экспериментов, сопоставления полученных экспериментальных данных с аналогичными данными натурных, теоретических и лабораторных исследований различных авторов, а также с использованием хорошо известных и неоднократно апробированных в различных областях науки и техники статистических методов исследований стационарных и нестационарных рядов наблюдений.

**Ценность работы.** Полученные в работе основные результаты могут быть рекомендованы для использования как в научных целях (различные разделы физики атмосферы, особенно физика облаков, осадков и грозового электричества; физика атмосферного аэрозоля; активные воздействия на атмосферные процессы; изменение климата и др.), так и для практического применения, в частности, для индикации степени электрического и аэрозольного воздействия на окружающую среду (экология, здравоохранение и др.); усовершенствование методов воздействия на градовые процессы, вызывания осадков, борьбы с грозами, туманами; защита инженерных сооружений, летательных аппаратов и др. от молний. В частности, методическое письмо с рекомендациями по оценке молниевой активности конвективных облаков по данным

радиолокационных измерений передано для практического использования в Тбилисский аэропорт. Карта распределения плотности распределения молниевых разрядов в Кахетии передана в Гидрометеорологический департамент Грузии для практического использования по грозозащите при использовании и проектировании инженерных сооружений в указанном районе. В случае возобновления работ по активным воздействиям на атмосферные процессы в Грузии предусмотрено использование в этих работах представленной в диссертации опытной методики воздействия на грозы.

**Апробация работы.** Основные результаты и положения диссертации были доложены на различных международных и локальных семинарах, совещаниях, симпозиумах, конференциях и конгрессах, а также представлены в шести кандидатских диссертациях, выполненных под руководством (три из них) и со-руководством автора.

**Международные форумы:**

*По физике облаков, осадков и туманам:* Клермонт-Ферран, Франция, июль 1980; Цюрих, Швейцария, август 1996; Ванкувер, Канада, июль 1998; Рено, Невада, США, август 2000; Сент Джонс, Канада, июль 2001; Болонья, Италия, июль 2004.

*Атмосферному электричеству:* Тарту, Эстония, октябрь 1986; Уппсала, Швеция, июнь 1988; Санкт Петербург, Россия, июнь 1992; Версаль, Франция, июнь 2003.

*Физике атмосферного аэрозоля, ядер конденсации и нуклеации:* Будапешт, Венгрия, сентябрь 1984; Прага, Чехия, сентябрь 1999; Ролла, Миссури, США, август 2000; Киото, Япония, июль 2004.

*По активным воздействиям на гидрометеорологические процессы:* Пекин, Китай, май 1989; Нальчик, Россия, октябрь 1991.

*Атмосферному озону и фотохимическим процессам в атмосфере:* Москва, ноябрь, 1977; Тбилиси, Грузия, ноябрь 1981; Женева, Швейцария, март 2002; Вена, Австрия, сентябрь 2005.

*Конгрессы по геологии и геодезии:* Сиэтл, США, 1977; Бирмингем, Англия, июль 1999; Саппоро, Япония, июнь 2003.

*Конференции:* посвященная памяти проф. Сутугина А., Москва, Россия, июнь 2000; Американского геофизического общества, Сан Франциско, Калифорния, США, декабрь, 2000; по экологии и управлению окружающей среды Кавказа, Тбилиси, Грузия, октябрь, 2001; по состоянию и охране воздушного бассейна и водно-минеральных ресурсов курортно-рекреационных регионов, Кисловодск, Россия, апрель 2003.

**Локальные конференции:** посвященная 150 летию Тбилисской геофизической обсерватории, Тбилиси, октябрь, 1995; современные изменения климата в Грузии, Тбилиси, май 1998; посвященная 90-летию со дня рождения академика Давитая Ф.Ф., Тбилиси, сентябрь 2001; проблемы мониторинга и моделирования антропогенного загрязнения природной среды в Грузии, Тбилиси, Гидрометеорологический институт, май 2002.

Результаты диссертации докладывались также на семинарах отдела физики атмосферы института геофизики им. М.З. Нодиа в 1978 - 2005 гг. Полностью диссертационная работа рассмотрена на городском семинаре "Математическое моделирование геофизических и экологических процессов" в институте геофизики им. М.З. Нодиа 14 апреля 2006 г.

**Диссертации, защищенные на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук под руководством и со-руководством автора.**

1. Чумбуридзе З.А. – Грозовая активность конвективных облаков и влияние на нее антропогенных воздействий, Тбилиси, 1999, 1-150, (со-руководитель докт. физ.- мат. наук, проф. Хведелидзе З.В.).

2. Чихладзе В.А – Исследование вариаций концентрации приземного озона в Тбилиси, Тбилиси, 2005, 1- 146, ( со-руководитель докт физ.-мат. наук Д.Ф.Харчилава).



3. Киркитадзе Д.Д. – Исследование характеристик аэрозольного загрязнения атмосферы г. Тбилиси, Тбилиси, 2005, 1-160, (со-руководитель докт. физ.- мат. наук, проф. Таварткиладзе К.А).

4. Хуродзе Т.В. – Исследование статистической структуры числа дней с градом в теплый сезон года в Грузии, Тбилиси, 2005, 1-154.

5. Блиадзе Т.Г. – Экспериментальное моделирование процесса роста града, Тбилиси, 2005, 1-160.

6. Хунджуа А.Т. - Исследование вариаций электропроводности воздуха в Душети и их связей с некоторыми метео-геофизическими факторами, Тбилиси, 2006, 1-138.

**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 70 научных работах, в том числе: 3 статья в журналах с импакт-фактором (Изв. АН СССР, сер. ФАО, т. 25, No 9, 1989 – 1 статья, J.Aerosol Sci, Pergamon, vol.30, Suppl.1, 1999 – 2 статьи), 4 статья в изданиях, имеющих статус периодического и эквивалентным журналам с импакт-фактором (Proc.15th Int. Conf. on Nucleation and Atmospheric Aerosols, Rolla, Missouri, USA, 2000, August, 6-11, American Institute of Physics Conference Proc., vol.535, Melville, New York, 2000, ISBN 1-56396-958-0, ISSN 0094-243X – 2 статьи; Proc. 16<sup>th</sup> Int. Conf. on Nucleation and Atmospheric Aerosols, Kyoto, Kyoto University Press, Japan, 26-30 July 2004, ISBN 4 87698 635 5, ISSN 0094-243X – 2 статьи), 3 монографиях и других реферированных и рецензированных изданиях, рекомендованных Советом ученых экспертов.

#### **Объем и структура диссертации.**

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка использованной литературы, состоящего из 560 наименований. Общий объем диссертации 317 печатных страниц, в том числе таблиц - 74, рисунков - 122 и список литературы 28 страниц.

**Во введении** обосновывается актуальность темы и значение ее в развитии работ по изучению грозо-градовых процессов и их связи с аэрозольным загрязнением атмосферы, как одной из важных составляющих исследований в области физики атмосферного аэрозоля, облаков, осадков, грозового электричества, активных воздействий на атмосферные процессы, изменений локального, регионального и глобального климата, а также охраны окружающей среды.

**Первая глава.** Проведен анализ современного состояния исследований грозо-градовых процессов, аэрозольного загрязнения атмосферы и их взаимосвязей, проводимых в Грузии и за рубежом. Глава состоит из трех параграфов.

**В первом параграфе** проведен обзор исследований грозовых процессов. Обращено внимание на методы исследования гроз, современные представления об электрической структуре грозовых облаков. Представлены данные о характеристиках грозовой активности в различных регионах Мира. Рассмотрены принципы искусственного регулирования электрической активности облаков.

**Второй параграф** посвящен обзору теоретических, лабораторных экспериментальных и полевых исследований физических процессов зарождения, роста и таяния града. Особое внимание уделено вопросам активных воздействий на градовые процессы.

**В третьем параграфе** обсуждаются вопросы, связанные с исследованием естественных и антропогенных аэрозолей в атмосфере и их связи с изменчивостью микрофизических и электрических характеристик облаков. Обращено внимание на конденсационные и льдообразующие свойства аэрозолей, их роли в образовании зародышей градин, влиянии на грозо-градовую активность облаков.

Особо отмечена роль в этих исследованиях целого ряда зарубежных (Шуман, Маклин, Ладлам, Лист, Мейсон, Чалмерс, Деннис, Женев, Хоббс, Дессанс, Федерер, Чангнон, Прайс, Стыро, Шалавеюс, Имянитов, Степаненко, Лободин, Хргиан, Мазин, Качурин, Мучник, Плауде, Абшаев, Бурцев, Федченко, Аджиев, Глисов, Экба и др.) и грузинских (Балабуев, Бартишвили Г., Бартишвили Я., Бахсолиани, Бегалишвили, Бериташвили, Бибилашвили Н., Блиадзе, Ватишвили, Гагуа, Гвелесиани, Гзиришвили, Гигинейшвили, Гуния Г., Гуния С., Давитая, Двали, Дореули, Енукашвили, Калаиджева, Карцивадзе, Курдиани, Ломая, Ломинадзе, Махарашвили А., Махарашвили П., Надибаидзе, Нодия, Окуджава, Орджоникидзе, Салуквадзе, Сулаквелидзе, Сухишвили, Таварткиладзе, Харчилава Д., Хелая, Хоргуани, Цицкишвили, Чихладзе, Элизбарашвили Э. и др.) ученых, работы которых послужили основой данного исследования.

На основании анализа имеющихся литературных данных в частности отмечается, что в Грузии, несмотря на многолетнюю традицию изучения грозовых и градовых процессов, имеется значительный пробел в исследованиях физических параметров грозовой активности облаков. Недостаточно изучены долговременные вариации грозовых и градовых процессов, в особенности на территориях с активными воздействиями на атмосферные процессы (Кахетия, Южная Грузия). Не изучена реакция электрического состояния конвективных облаков на искусственное воздействие льдообразующими реагентами, используемыми в практике работы противорадовой службы Грузии. Практически не изучен вопрос о связи антропогенных аэрозольных загрязнений с грозовой и градовой активностью конвективных облаков, в том числе подвергнутых активному воздействию льдообразующими реагентами.

Анализ литературы также показал, что пока недостаточно развиты представления о взаимосвязи конвективной облачности с аэрозольным загрязнением атмосферы. Во многом противоречивы данные об эффективности воздействия на градовые процессы. При этом не до конца осмыслены механизмы конкуренции за облачную воду искусственно вводимыми в облака льдообразующими ядрами реагента с уже находящимися там ледяными ядрами и кристаллами (как естественного, так и антропогенного происхождения), количество которых соизмеримо, а то и больше, вводимых при воздействиях.

С учетом указанного анализа был определен круг вопросов, требующих доработки, уточнения и новых исследований. Сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

**Вторая глава** представлена восьмью параграфами и посвящена методике исследований, характеристике используемых данных и описанию статистических методов их анализа.

*В первом параграфе* изложена разработанная проф. Таварткиладзе К.А. методика определения аэрозольной оптической толщи атмосферы по данным сети актинометрических наблюдений за интенсивностью прямой солнечной радиации.

*Во втором параграфе* представлена методика измерения короткоживущих продуктов распада радона в атмосфере и облаках. Измерение активности короткоживущих продуктов радона в свободной атмосфере проводилось с борта летающей лаборатории ИЛ-14 на высотах до 5000 м. Воздух прокачивался через фильтры типа АФА-РМП с помощью специальной самолетной воздуходувки типа ДВ-1. После окончания отбора пробы фильтр устанавливался для счета альфа – радиоактивности в прибор РВ-4 или на детектор БДЗА. Счет импульсов осуществлялся с помощью счетчиков типа МЭС-54 в течение от 5 до 15 мин. Расчет содержания радона и короткоживущих продуктов его распада проводился в предположении наличия радиоактивного равновесия между ними. Общая погрешность определения радиоактивности воздуха в зависимости от высоты зондирования составляла 8-20%.

При измерении радиоактивности облачной среды во время нахождения самолета в кучевых облаках (15-30 сек) газовая смесь воздуха и капель через изогнутую трубу

диаметром 15 см, направленную против движения самолета, наполняла полиэтиленовую камеру объемом 6-7 м<sup>3</sup>. Затем воздух из камеры прокачивался через фильтр площадью 100 см<sup>2</sup> в течение 1 минуты. После этого фильтр устанавливался для счета альфа – радиоактивности на детектор БДЗА.

Сбор проб облачной воды для анализа на альфа – радиоактивность осуществлялся с помощью заборника водности ЦАО. На пластинке было вырезано отверстие площадью 25 см<sup>2</sup>, в котором укреплялся фильтр типа ЛФС-1. Сбор проб облачной воды продолжался в течение 10-15 сек. После экспозиции фильтр в течение минуты высушивался на специальной плитке и затем в течение 5 – 10 минут регистрировалась его альфа – радиоактивность.

В третьем параграфе описана методика измерения счетной концентрации и размеров твердых аэрозолей в атмосфере и облаках. Для этих измерений использовались мембранные фильтры фирмы “Синпор”, размер пор которых составлял 1,0-1,5 мкм. Это позволяло захватывать частицы диаметром более 0,1-0,15 мкм практически со 100% коэффициентом улавливания. При исследованиях атмосферы воздух прокачивался через фильтр площадью 1 см<sup>2</sup> со скоростью 5 л/мин в течение 5-10 мин. Воздухозаборное устройство обеспечивало условия изокINETичности. При изучении содержания аэрозолей в облачной среде отбор проб осуществлялся одновременно с отбором проб для анализа на альфа– радиоактивность из полиэтиленовой камеры.

Измерение количества и размеров аэрозолей осуществлялось с помощью микроскопа типа БИОЛАМ-70 при увеличении более чем в 300 раз. Счет аэрозолей производился в отраженном свете с площади, которая обеспечивала статистическую погрешность не хуже 10%. Исследовались крупные и гигантские аэрозоли в трех диапазонах размеров: **I)**  $0,70 < d < 2,0$  мкм; **II)**  $2,0 \leq d < 4,0$  мкм; **III)**  $d \geq 4,0$  мкм.

Измерение счетной концентрации и спектра размеров аэрозолей в приземном слое воздуха проводились с помощью стандартного фотоэлектрического счетчика аэрозольных частиц АЗ-5. Счетчик позволяет измерять содержание аэрозолей в следующих 12 диапазонах размеров: 0,4-0,5; 0,5-0,6; 0,6-0,7 ; 0,7-0,8 ; 0,8-0,9 ; 0,9-1,0 ; 1,0-1,5 ; 1,5-2,0 ; 2,0-4,0 ; 4,0-7,0 ; 7,0-10,0 ;  $\geq 10,0$  мкм . Диапазон измерения счетной концентрации аэрозолей составляет от 0,001 до 300 см<sup>-3</sup>. Погрешность измерения не превышает 20%.

В четвертом параграфе рассмотрена методика определения концентрации легких ионов, напряженности электрического поля атмосферы и электропроводности воздуха.

Вертикальная составляющая напряженности электрического поля и концентрация легких ионов в свободной атмосфере и облаках измерялись соответственно с помощью прибора ПНП, и прибора типа Гердиена.

Электропроводность воздуха измерялась с помощью прибора Гердиена в павильоне для наблюдений за элементами атмосферного электричества, находящегося в городе Душети. Наблюдения за проводимостью воздуха проводились ежедневно в стандартное метеорологическое время: 1, 7, 13 и 19 час. В работе использованы данные с 1966 по 1990 гг.

Пятый параграф посвящен методике создания и контроля искусственной облачной среды в большой облачной камере.

Большая облачная камера представляет собой вертикальный цилиндр с двумя конусообразными окончаниями в его верхней и нижней части. Диаметр цилиндра – 4,6 м, высота камеры – 17 м, высота ее цилиндрической части – 12 м. Верхняя часть конуса цилиндра камеры переходит в вертикальную центральную трубу высотой 20 м и диаметром 1 м. Общая высота камеры вместе с центральной трубой составляет 40 м. Общий объем камеры – около 260 м<sup>3</sup>. Сбоку камеры расположена обводная труба диаметром 1 м и высотой 20 м, которая соединена с ней через специальную термически изолированную систему трубопроводов. В обводной трубе с помощью вентилятора можно создавать восходящий воздушный поток со скоростью 8 м/сек. Эксперименты в большой облачной камере и ее обводной трубе проводились при температурах воздуха от 0 до –20 °С.

Измерение влажности облачной среды проводилось приборами “ДИВО-1Л” с погрешностью измерения до 15% . Пределы измеряемой влажности для этого прибора составляют 0,1-5,0 г/м<sup>3</sup>. Для более полного контроля равномерности заполнения и трансформации влажности во времени в камере приборы располагались на трех уровнях ( 2,2 м, 6 м и 9,5 м от основания цилиндрической части камеры ).

Одновременно с влажностью искусственного тумана регистрировались концентрация и спектр размеров капель. Для этого была использована методика седиментационного измерения. Предметные стекла, покрытые смесью трансформаторного масла и вазелина, помещались в большую облачную камеру на глубину 2,3 – 2,5 м через те же люки, которые были использованы для датчиков влажности, и экспонировались там в горизонтальном положении необходимое время. Взятые из камеры пробы фотографировались с помощью микрофотонасадки МБР-1 с малогабаритной камерой “Зенит-В”. Полученные таким образом негативы в дальнейшем обрабатывались для определения концентрации и спектра размеров капель.

Для улавливания образующихся ледяных кристаллов после воздействия на переохлажденный туман льдообразующими реагентами, вблизи центра камеры помещалась “ловушка” – заборник проб, в котором помещались предметные стекла, смазанные лаком. Заборник позволял брать пробы через заданные интервалы времени с любыми выдержками. Для затвердевания пленки (толщина не должна превышать 100 мкм) метилметакрилата при - 10°С требовалось примерно 2 часа. После затвердения пленки, полученные реплики кристаллов изучались под микроскопом МБИ-9. Производилось микрофотографирование и подсчет числа кристаллов в девяти участках предметного стекла по прямоугольной сетке. По известной навеске реагента, площади основания камеры, площади кадра и среднего количества кристаллов в кадре определялся выход ледяных кристаллов с 1 г вещества.

Контроль электрического состояния облачной среды осуществлялся с помощью четырех приборов для измерения напряженности электрического поля атмосферы “Поле-4”, три датчика которых были расположены по вертикали на тех же уровнях, что и датчики влажности, а четвертый датчик – на полу в центре основания цилиндрической части камеры

Эксперименты по моделированию процессов роста свободно взвешенных градин в затопленной струе в среде нейтральных капель проводились в большой облачной камере с использованием тумана парения. Опыты по моделированию роста моделей градин в среде заряженных облачных капель проводились как в большой облачной камере (свободно взвешенные модели), так и в ее обводной трубе (закрепленная модель). При этом использовался пульверизационный туман, заряжаемый с помощью индукционного кольца, присоединенного к высоковольтной установке .

В шестом параграфе представлена методика исследований грозовой активности облаков.

В 1978 – 1984 гг Институтом геофизики АН Грузии совместно с Главной геофизической обсерваторией им. А.И.Воейкова, Ленинградским гидрометеорологическим институтом и Военизированной службой по борьбе с градом УГКС Грузии были проведены широкомасштабные полевые исследования процессов электризации облачной среды и возможностей регулирования грозовой активности облаков. Эксперименты проводились в северо-западной части Алазанской долины на базе Института геофизики АН Грузии и Военизированной службы по борьбе с градом. Ниже дается краткое описание инструментальных методов исследования грозовых облаков.

Величина  $\Delta Q$  и координаты центра заряда, вовлеченного в молниевый разряд, определялись по данным измерений кратковременных изменений вертикальной составляющей напряженности электрического поля (скачков поля) в нескольких точках земной поверхности с помощью электростатических флюксометров ПНП.

В основу расчета  $\Delta Q$  и координат молний положены предположения, что заряженная область, из которой заряд вовлекается в молниевый разряд, мала по сравнению с расстоянием до нее и ее действие эквивалентно действию точечного заряда, и что поверхность земли является идеально проводящей плоскостью. В случае однозарядной модели (разряд на землю) достаточно 4 пункта наблюдения. В случае дипольной модели – 7 пунктов. В экспериментах, проведенных в Кахетии, было 7 пунктов контроля атмосферного электричества ПКАЭ.

На территории командного пункта КП в селе Руиспири располагались радиолокаторы МРЛ-2, МРЛ-5 и АРС-3, а также один из ПКАЭ. Остальные шесть ПКАЭ находились в Алвани, Аргохи, Курдгелаури, Саниоре, Кондоли и Бушети. На этих пунктах располагались приборы для измерения напряженности электрического поля ПНП и счетчики грозовых разрядов ПРГ-15 с радиусом действия 15 км. Для синхронизации проводимых измерений (не хуже 1 сек) применялся синхронизатор времени, выдающий электрические импульсы через промежутки времени 0,5-1,0 мин. Эти импульсы передавались с КП с помощью средств связи на ПКАЭ, где с помощью автомата-синхронизатора на самописцах приводились в действие метки времени.

В связи с различными техническими трудностями 7 ПКАЭ одновременно функционировали очень редко. В основном в полевых работах велись одновременные измерения на 5-6 ПКАЭ. Поэтому расчеты координат и величин зарядов, вовлеченных в молниевый разряд, были проведены по однозарядной модели облака (то есть – разряды на землю).

В соответствии с требованием модели ПКАЭ были расположены на местности, близкой к равнине. Редукционные множители для этих пунктов относительно к Руиспири оказались близкими к 1. Для условий Алазанской долины погрешность определения координат заряда составляла 10-30% для территории полигона 50x60 км, а величин  $\Delta Q$  – 15-35% для территории полигона 10x15 км. Таким образом, координаты разрядов определялись достаточно точно даже за пределами расположения ПНП. Территория, на которой  $\Delta Q$  определялась с удовлетворительной точностью, существенно меньше и главным образом ограничена площадью, на которой расположены измерители скачков напряженности электрического поля.

При проведении экспериментов для получения данных в вертикальной структуре температуры, ветра, влажности и давления воздуха использовались средства аэрологического обеспечения, включающие в себя аэрологическую радиолокационную станцию “Метеор”. Воздействия на грозовые облака производились с помощью ракет “Алазани” с использованием противогодовой методики Института геофизики АН Грузии.

*В седьмом параграфе* дано описание характеристик используемых данных.

В диссертационной работе использованы следующие фактические материалы:

- данные о среднемесячных полуденных значениях аэрозольной оптической толщи атмосферы для станций Тбилиси, Телави, Цалка, Анасеули, Сенаки, Сухуми, Казбеги в/г, Крестовый перевал за весь период актинометрических наблюдений, взятые из архивов Институты географии и геофизики АН Грузии.
- данные о дневных значениях аэрозольной оптической толщи атмосферы для Тбилиси и Телави, взятые из архивов Институты географии и геофизики АН Грузии.
- данные Гидрометеорологического департамента Грузии об основных метеорологических параметрах атмосферы, бета-радиоактивных выпадениях и загрязнениях приземного слоя воздуха.
- данные Гидрометеорологического департамента Грузии и Абастуманской астрофизической обсерватории об общем содержании озона в Тбилиси и Абастумани .

- данные об атмосферных явлениях, взятые в фонде Гидрометеорологического департамента Грузии, а также в различных опубликованных в работах.
- данные о различных параметрах градовой активности облаков в годы работы противогодовой службы Грузии, а также данные о градобитиях в Кахетии, полученные Институтом геофизики АН Грузии.
- данные об электропроводности воздуха в Душети, взятые из архивов и отчетов Гидрометеорологического института АН Грузии.
- данные Института геофизики АН Грузии о концентрации приземного озона, химическом составе атмосферных осадков, микрофизических и электрических характеристиках облаков.

В восьмом параграфе кратко описаны используемые в работе статистические методы исследований стационарных и нестационарных временных рядов наблюдений. В частности, сравнение средних величин проводилось с использованием критерия Стьюдента. Критерий Фишера применялся для сравнения дисперсий средних, значимости коэффициента детерминации. В случаях равных и неравных дисперсий сравниваемых средних применялись соответствующие формулы для расчета критерия Стьюдента.

Анализ устойчивости временных рядов проводился с помощью расчетов значений коэффициентов автокорреляции, коэффициентов ранговой корреляции Спирмена и Кэндела, а также линейного коэффициента корреляции. Последний использовался также при обычном статистическом анализе данных. При этом сравнение значений линейных коэффициентов корреляции проводилось с помощью преобразования Фишера.

Доверительный интервал для среднего, а также его нижний и верхний уровни с заданной вероятностью, определялись как без учета, так и с учетом автокорреляции в рядах наблюдений. В последнем случае для доверительного интервала вводилась поправка на значение коэффициента автокорреляции с лагом 1 год.

Подбор функции тренда осуществлялся путем одновременного анализа значений коэффициента детерминации  $R^2$ , определяющего близость этой функции эмпирическим данным, и критерия Дарбина-Уотсона для остатков и осцилляционной составляющей, определяющего степень случайности последних.

В третьей главе представлены результаты исследований естественных и антропогенных аэрозолей в атмосфере. Глава состоит из восьми параграфов.

В первом параграфе представлено расположение важнейших антропогенных источников эмиссии аэрозолей и аэрозолеобразующих газов в Грузии (энергетика, промышленность, автотранспорт). Также представлено расположение 6 основных (Тбилиси, Телави, Цалка, Анасеули, Сенаки, Сухуми) и двух вспомогательных (Крестовый перевал, Казбеги) актинометрических станций, данные которых использовались для определения значений **AOD** - одной из важнейших характеристик аэрозольного загрязнения воздуха.

В частности показано, что период с 1985 по 1996 гг суммарная среднегодовая эмиссия прямых индустриальных выбросов твердых частиц и вторичных сульфатных и нитратных аэрозолей составляла 317 тыс. тонн. При этом доля вторичных сульфатов и нитратов от общей эмиссии аэрозолей составляет около 60 %, что хорошо соответствует такому же соотношению для глобальных выбросов антропогенных аэрозолей.

В Восточной Грузии доля антропогенных выбросов примесей от суммарной эмиссии составляет около 66 %. При этом их основные источники расположены на линии 80-100 км в городах Каспи, Тбилиси, Гардабани, Рустави. Отмечено, что под сильное влияние этих источников подпадает весь Кахетинский регион, расположенный к востоку от линии Каспи-Гардабани.

Показано, что в целом аэрозольное загрязнение атмосферы над территорией Грузии (тем более в последние годы) обусловлено действием внешних источников их эмиссии,

расположенных в развитых индустриальных странах Европы и Азии. Местные источники антропогенных аэрозолей в Грузии обуславливают повышенное содержание их в атмосфере над локальными территориями, прилегающими к этим источникам.

Во втором параграфе приведены результаты исследований пространственно-временных характеристик аэрозольной оптической толщи атмосферы в Грузии.

Проведен детальный анализ статистической структуры временных рядов **AOD** в Грузии в период с 1928 по 1990 гг (среднее, параметры рассеяния, коэффициенты асимметрии и эксцесса, вертикальное распределение среднего **AOD**, корреляционные связи между метеостанциями по **AOD**, устойчивость временных рядов наблюдений и др.). В частности показано, что в период с 1928 по 1990 гг происходил рост аэрозольного загрязнения воздуха на всех 6 основных пунктах измерения. При этом до 1985 г наблюдался монотонный рост антропогенной составляющей **AOD**, а затем - некоторый спад значений **AOD**. В таблице приведены данные об уровнях аэрозольного загрязнения атмосферы в Грузии в три двадцатилетних периода времени.

Таблица

Уровень фоновых, случайных и антропогенных составляющих **AOD** (для длины волны 1 мкм) для шести актинометрических станций Грузии в три периода времени

Период (годы)	Пункт	Тбилиси	Телави	Цалка	Анасеули	Сенаки	Сухуми	Среднее
1928-1950	Фон	0,023	0,015	0,016	0,020	0,021	0,016	0,019
	Случ.	0,019	0,023	0,020	0,017	0,021	0,023	0,021
	Антроп.	0,004	0,003	0,001	0,003	0,002	0,002	0,003
	Общее	0,046	0,041	0,038	0,040	0,044	0,042	0,042
1951-1970	Случ.	0,020	0,023	0,020	0,017	0,021	0,029	0,022
	Антроп.	0,037	0,032	0,016	0,026	0,024	0,026	0,027
	Общее	0,080	0,071	0,051	0,063	0,066	0,071	0,067
1971-1990	Случ.	0,032	0,042	0,028	0,032	0,025	0,031	0,032
	Антроп.	0,090	0,077	0,035	0,058	0,056	0,060	0,063
	Общее	0,144	0,134	0,079	0,111	0,102	0,106	0,113

Уровень загрязненности атмосферы аэрозолями оптически активного диапазона размеров над Кахетией (основной район исследований грозо-градовых процессов) мало отличается от этого уровня над Тбилиси. В Западной Грузии (Анасеули, Сенаки, Сухуми) уровень загрязненности атмосферы значительно ниже, чем в Кахетии и в районах, прилегающих к Тбилиси.

Воздушные течения и турбулентное перемешивание создают поле **AOD** над всей территорией Грузии с высокой линейной коррелированностью по отдельным пунктам измерений, хотя между ними довольно значительные расстояния. Причем, высокая линейная корреляция **R** между станциями отмечается не только по наблюдаемым значениям **AOD** (**R** не ниже 0,71), но и по значениям их случайных составляющих (**R** меняется от 0,31 до 0,70). Отметим, что указанное выше являются одними из необходимых условий для картирования территорий по уровню загрязненности атмосферы.

На примере Тбилиси проведено детальное исследование устойчивости рядов наблюдений за **AOD** (для остальных станций качественно сходные результаты). Временные ряды среднегодовых значений **AOD** автокоррелированы, причем степень автокоррелированности для различных периодов времени различна. Результаты анализа рядов наблюдений на автокоррелированность позволили внести поправки в значения доверительных интервалов для среднегодовых величин **AOD** в Тбилиси в различные промежутки времени. Так, в 1961-1970 гг 95% доверительный интервал для среднегодового значения **AOD**, равный 0,091, без учета автокорреляции составляет  $\pm 0,014$ , а с учетом

автокорреляции  $\pm 0,035$ . Те же значения соответственно для 1931-1960, 1961-1990 и 1931-1990 составляют: без учета автокорреляции  $0,054 \pm 0,006$ ,  $0,126 \pm 0,012$  и  $0,090 \pm 0,011$ , а с учетом автокорреляции -  $0,054 \pm 0,013$ ,  $0,126 \pm 0,032$  и  $0,090 \pm 0,051$ .

Во внутригодовом ходе имеет место монотонный рост среднемесячных значений **AOD** от января до июля, затем уменьшение до декабря. При этом со временем происходит рост абсолютных значений по всем **AOD** месяцам. Однако внутригодовой ход аэрозольной оптической толщи атмосферы, нормированный на июльское значение величин **AOD**, по крайней мере для шести последовательных десятилетних периодов осреднения достаточно устойчив во времени. Что касается осреднения по тридцатилетним и шестидесятилетним периодам времени, то в данном случае внутригодовой ход нормированных значений аэрозольной оптической толщи атмосферы имеет вполне устойчивый характер. Данные осреднения практически полностью совпадают друг с другом. Сравнение же осредненных за период с 1931-1990 гг нормированных на июль значений **AOD** с теми же величинами, осредненными по шести десятилетним периодам, показало незначимое различие между ними для всех периодов и месяцев. Иными словами, внутригодовой ход нормированного на июль осредненного за период 1931-1990 гг значений **AOD** устойчив во времени и, соответственно, удовлетворительно описывает внутригодовой ход нормированных значений **AOD** для разных периодов времени. Важно отметить, что при нормировании на среднегодовые значения **AOD** практически получаются аналогичные результаты. Также имеется полная устойчивость во времени соотношений между среднесезонными и среднегодовыми значениями **AOD**.

Вышеприведенные результаты об устойчивости нормированных значений **AOD**, могут иметь практическое применение для восстановления пропущенных рядов наблюдений. Так, например, если каким-либо способом (использование данных зарубежных станций и др.) удастся восстановить среднегодовые значения **AOD** в Тбилиси в период с 1992 по 2006 гг, можно будет с использованием этих результатов также восстановить и среднемесячные значения **AOD**. Можно также провести ориентировочные оценки внутригодового хода **AOD**, если эти данные имеются лишь для некоторых месяцев и др.

Как показал анализ, по крайней мере для пятилетних периодов осреднения годовых данных аэрозольной оптической толщи атмосферы, устойчивым во времени является и относительный вертикальный профиль **AOD\*** (нормированный на высоту 100 м) для малозагрязненных районов. Эмпирическая связь относительных значений **AOD\*** с высотой над уровнем моря имеет вид:

$$\mathbf{AOD}^* = 1,0277 \exp(-0,000224H), \text{ где } H \text{ в м}$$

С учетом наличия устойчивости во времени вертикального распределения нормированных среднегодовых значений **AOD\*** для малозагрязненных районов Грузии и допущении, что со временем в этих районах по абсолютным значениям **AOD** меняется пропорционально изменению **AOD** на фоновой станции Цалка, были рассчитаны величины аэрозольной оптической толщи атмосферы в указанных районах для различных высот местности в различные периоды времени, а также примерно определены границы этих территорий вокруг загрязненных районов (Тбилиси, Телави). Для загрязненных районов пространственное распределение **AOD** в различные периоды времени определялось с учетом их реальных значений над указанными станциями (Тбилиси, Телави) посредством графической интерполяции данных **AOD** в пределах этих территорий до границ с малозагрязненной местностью. Осреднение по высотам местности проводилось для площадок размером  $0,33^\circ \times 0,33^\circ$  (около  $1000 \text{ км}^2$ ). Вся территория Грузии была разделена на 70 таких площадок, для каждой из которых и определялось значение **AOD**. В конечном итоге это позволило провести картирование территории Грузии по уровню загрязненности атмосферы. Кроме этого проведена оценка вклада локальных источников загрязнений в значение **AOD**.



В качестве иллюстрации в диссертации приведены карты, на которых представлена динамика изменения **AOD** над территорией Грузии с 1956 по 1960 и с 1986 по 1990 гг. В частности, в период с 1986 по 1990 гг диапазон изменения **AOD** для различных регионов Грузии составлял 0,060-0,160 против 0,030-0,080 в 1956-1960 гг. Вклад локальных источников аэрозольного загрязнения атмосферы в значение **AOD** следующий: в период с 1961 по 1970 гг в Тбилиси - 22%, Телави – 16%, Анасеули, Сенаки, Сухуми – 2%; в период с 1981 по 1990 гг в Тбилиси и Телави – по 33%, Анасеули, Сенаки, Сухуми – 10 %. Учитывая, что в Кахетии отсутствуют крупные промышленные предприятия, указанные оценки для Тбилиси и Телави еще раз подтверждают, что основную роль в загрязнении атмосферы над Кахетией играет антропогенная эмиссия аэрозолей промышленными и транспортными объектами, расположенными на территории Тбилиси и прилегающей к ней местности.

Предложенный метод построения карт пространственно-временного распределения аэрозольной оптической толщи атмосферы не претендует на высокую точность. Тем не менее он позволяет в первом приближении получить представление о динамике аэрозольного загрязнения атмосферы для тех территорий, где не проводилось актинометрического мониторинга. Учитывая устойчивость во времени соотношений между годовыми, сезонными и месячными значениями **AOD** построение карт последних особой сложности не представляет.

Проведен анализ вариаций дневных значений **AOD**. В частности показано, что в среднем за год и в теплое полугодие в Тбилиси отмечается тенденция уменьшения значений аэрозольной оптической толщи атмосферы от будних дней к выходным с максимумом **AOD** в четверг. Более четко недельный ход **AOD** с минимумом в выходные дни проявляется при непрерывных наблюдениях в течение недели и более дней. Что касается Кахетии, то по имеющимся у нас данным в летний сезон в будние дни в 1960-1964 гг значения аэрозольной оптической толщи атмосферы были примерно на 6 % выше, чем в выходные.

Таким образом, даже в шестидесятые-семидесятые годы прошлого столетия в Кахетии наблюдался недельный ход аэрозольного загрязнения атмосферы. Так как в Кахетии отсутствуют сильные локальные источники загрязнения атмосферы, вполне естественно предположить, что указанный недельный ход **AOD** в первую очередь должен быть вызван недельной изменчивостью загрязнения атмосферы в Тбилиси. Однако следует учесть, что временная изменчивость аэрозольной оптической толщи атмосферы обладает определенной инерцией, связанной с разницей во времени между поступлением в атмосферу частиц антропогенной пыли (обычно утренние часы) и образованием вторичных аэрозолей по схеме газ → частица. Поэтому недельный ход **AOD** во многом может быть обусловлен местными условиями.

*В третьем параграфе* проведен анализ изменчивости электропроводности приземного слоя воздуха в Душети в 1966-1990 гг и ее связи с аэрозольным загрязнением атмосферы в Тбилиси.

Среднее значение **ЭПВ** меняется от  $31,9 \cdot 10^{-15}$  / ом·м в холодное полугодие до  $38,8 \cdot 10^{-15}$  / ом·м в теплое при среднегодовом значении  $35,4 \cdot 10^{-15}$  / ом·м. Среднее значение **AOD** меняется от 0,108 в холодное полугодие до 0,166 в теплое при среднегодовом значении 0,137. Анализ временных рядов **ЭПВ** и **AOD** на устойчивость показал, что признаки неслучайности и автокоррелированности в них выражены достаточно ярко .

95% - ый доверительный интервал средних полугодических и годовых значений **ЭПВ** без учета автокорреляции в рядах наблюдений меняется от  $\pm 1,4 \cdot 10^{-15}$  / ом·м в холодный период до  $\pm 2,2 \cdot 10^{-15}$  / ом·м в теплое полугодие, а с учетом автокорреляции от  $\pm 2,0 \cdot 10^{-15}$  / ом·м в холодное полугодие до  $\pm 4,5 \cdot 10^{-15}$  / ом·м в теплое. 95% - ый доверительный интервал средних полугодических и годовых значений **AOD** без учета автокорреляции в рядах наблюдений меняется от  $\pm 0,010$  в год до  $\pm 0,012$  в теплое полугодие, а с учетом автокорреляции от  $\pm 0,019$  в холодное полугодие до  $\pm 0,022$  за год.

Тренды средних полугодовых и годовых значений **ЭПВ** и **АОД** за указанный период времени удовлетворительно аппроксимируются линейными уравнениями. Соотношение между средними значениями случайной компоненты **ЭПВ** и ее измеренными величинами в теплое полугодие составляет 12,9 %, в холодное – 18,5 %, по годовым данным – 11,9 %.

Уменьшение значений **ЭПВ** в Душети к 1990 г. по сравнению с 1966 г. составило: по годовым данным 27,8%, для теплого периода года – 34,2%, для холодного полугодия – 22,2%. Анализ данных также показал, что динамика изменчивости положительной электропроводности воздуха в Душети практически аналогична динамике изменчивости суммарной электропроводности. Соотношение **ЭПВ** / **ЭПВ(+)** для различных периодов года составляет примерно 50%.

Соотношение между средними значениями случайной компоненты **АОД** и ее измеренными величинами в теплое полугодие составляет 19,9 %, в холодное – 26,9 %, по годовым данным – 20,4 %.

Рассмотрено две модели регрессии **ЭПВ** с **АОД**: прямая линейная регрессия и интегральная линейная регрессия. В частности, для первой модели по среднегодовым данным и для теплого полугодия эта связь имеет вид:

$$\begin{aligned} \text{ЭПВ}(1-12) &= -78,051 \cdot \text{АОД}(1-12) + 46,07 & (R^2 = 0,23) \\ \text{ЭПВ}(4-9) &= -103,64 \cdot \text{АОД}(4-9) + 56,022 & (R^2 = 0,31) \end{aligned}$$

Относительный вариационный размах для **ЭПВ** по среднегодовым данным в исследуемый период составляет 50,8%, а для теплого периода – 57,2%. Вклад в эти вариации изменчивости **АОД** в пределах вариационного размаха составляет для годовых данных 22,9%, а для теплого периода – 25,4 %.

Для второй модели интегральной регрессии, в которую входят значения антропогенной и случайной составляющих аэрозольной оптической толщи атмосферы, связь между **ЭПВ** и **АОД** имеет вид:

$$\begin{aligned} \text{ЭПВ}(1-12) &= -164,22 \cdot \text{АОД}(\text{антр.}, 1-12) + 19,54 \cdot \text{АОД}(\text{случ.}, 1-12) + 52,72 & (R^2 = 0,55) \\ \text{ЭПВ}(4-9) &= -204,1 \cdot \text{АОД}(\text{антр.}, 4-9) + 4,26 \cdot \text{АОД}(\text{случ.}, 4-9) + 65,92 & (R^2 = 0,61) \end{aligned}$$

Вклад в относительные вариации **ЭПВ** изменчивость антропогенной составляющей **АОД** в пределах вариационного размаха для второй модели составляет по годовым данным 28,8%, а для теплого периода – 35,8 %. Вклад случайных же компонент значительно меньше и составляет для годовых данных 4,2%, и для теплого периода всего 0,75%. Таким образом, долговременный отрицательный тренд электропроводности воздуха в Душети главным образом связан с ростом антропогенной составляющей аэрозольного загрязнения атмосферы в Тбилиси и практически не зависит от ее случайной составляющей.

Для холодного полугодия линейная корреляционная связь между **ЭПВ** и **АОД** малозначима. Объяснение этого факта требует дальнейшего анализа.

Представлен также линейный корреляционный и регрессионный анализ связей дневных значений аэрозольной оптической толщи атмосферы в Тбилиси с суммарной электропроводностью воздуха в Душети для различных серий измерений вне зависимости от типа погоды. Наличие значимой обратной связи между дневными величинами **АОД** и **ЭПВ** дополнительно подтверждает репрезентативность значений **АОД** в качестве параметра, характеризующего уровень загрязненности приземного воздуха не только в Тбилиси, но и за его пределами, по крайней мере на расстояниях до Душети.

В четвертом параграфе рассмотрены результаты самолетных исследований аэрозольного загрязнения нижнего пятикилометрового слоя тропосферы над Тбилиси и Кахетией в 1973-1977 гг.

Над Тбилиси измерения проводились в безоблачные дни. Над Кахетией данные измерений разделены на три группы: безоблачные дни (1), дни с кучевыми облаками (2), дни с облаками различных типов, включая кучевые (3). Для безоблачных дней счетная концентрация аэрозолей **n** диаметром более 0,7 мкм над Тбилиси меняется в среднем от 6,1

см<sup>-3</sup> на высоте 1,0 км до 1,4 см<sup>-3</sup> на уровне 5,0 км. Содержание аэрозолей над Кахетией для всех групп измерений меняется от 5,6 см<sup>-3</sup> на высоте 1,0 км до 0,4 см<sup>-3</sup> на высоте 5,0 км и на всех уровнях зондирования ниже, чем над Тбилиси. В дни с облаками счетная концентрация аэрозолей над Кахетией значительно увеличивается и становится практически такой же, как и над Тбилиси в безоблачные дни.

В пределах нижнего пятикилометрового слоя атмосферы распределение аэрозолей по размерам для обоих районов имеет достаточно устойчивый характер и мало меняется с высотой и под влиянием облачности. Коэффициент Юнге для Тбилиси составляет 1,7, а для Кахетии 1,3 для всех трех групп. Однако на отдельных высотах спектр распределения аэрозолей по размерам в дни с облаками существенно сдвинут в сторону укрупнения (например, для высоты 3,5 км и др.). Над Тбилиси несколько превалирует мелкодисперсная фракция. Это, видимо, связано с большим количеством над Тбилиси вторичных аэрозолей по сравнению с Кахетией.

В нижнем слое тропосферы в дни с кучевой облачностью по сравнению с безоблачными днями имеется следующий рост: общее содержание альфа – радиоактивности – на 33%; общего содержания аэрозолей – I диапазон – на 21 %, II диапазон – на 13 %, III диапазон – на 100 %. То есть значительно большему влиянию подвержены гигантские частицы. Сильно развитая конвективная облачность, в отличие от слабой, способствует уменьшению содержания аэрозолей в безоблачной атмосфере. В данном случае помимо накопления аэрозолей в конвективных облаках часть их сильными конвективными потоками может переноситься на значительные расстояния, выноситься в стратосферу и др.

Были проведены оценки весовой концентрации аэрозолей в оптически активном диапазоне их размеров от 0,2 до 4,0 мкм по диаметру и их общей массы в пятикилометровом слое атмосферы. Так, в Тбилиси эта масса составляет 140 мг/м<sup>2</sup>, в Кахетии в безоблачные дни 66 мг/м<sup>2</sup>, в дни с кучевыми облаками – 90 мг/м<sup>2</sup> и в дни с различной облачностью – 165 мг/м<sup>2</sup>. Основная масса аэрозолей (более 70%) сосредоточена в нижнем трехкилометровом слое атмосферы. Масса аэрозолей размерами от 0,2 до 4,0 мкм составляет немногим менее 60% от общей массы аэрозолей (на примере Тбилиси). Хорошо прослеживается влияние антропогенных загрязнений воздуха и облачности на общую массу аэрозолей в оптически активном диапазоне их размеров. Так, например, над Тбилиси общая масса оптически активных аэрозолей в вертикальном столбе воздуха больше среднеглобального значения того же параметра для естественных аэрозолей примерно в 4 раза, над Кахетией в безоблачные дни примерно в 1,4 раза. Средний и среднекубический диаметры оптически активных аэрозолей по нашим оценкам соответственно составляют: над Тбилиси 0,46 и 0,80 мкм; над Кахетией – 0,56 и 1,0 мкм. Масса сульфатов в пятикилометровом столбе воздуха над Тбилиси-Рустави оценена величиной 15 мг/м<sup>2</sup>. Общее содержание оптически активных минеральных аэрозолей над Тбилиси оценивается величиной 100 мг/м<sup>2</sup>.

С учетом вышеуказанных и литературных данных проведена оценка значений компонент минеральных, сульфатных и антропогенных аэрозолей в значении **AOD**. Для длины волны 1,0 мкм эти значения составляют: для минеральных аэрозолей - 0,038; сульфатов - 0,042; антропогенных аэрозолей - 0,083 и суммарное значение - 0,165. Таким образом, в последние десятилетия, до 1990 года, над Тбилиси аэрозольная оптическая толщина атмосферы примерно в три раза превышала ее среднеглобальное значение. При этом в Тбилиси доля **AOD** для минеральных аэрозолей от общего его значения составляла около 23%, для сульфатов – 26% и для индустриальной пыли, нитратов и др. – 50%. Учитывая, что примерно половина **AOD** сульфатов антропогенного происхождения, долю антропогенной составляющей аэрозольной оптической толщи атмосферы в Тбилиси можно оценить примерно в 60%. То есть примерно то, что для антропогенной составляющей тренда **AOD** в 1971-1990 гг, приведенной в таблице второго параграфа.

Проведен анализ дневных данных вертикального распределения аэрозолей в Кахетии, который показал, что значимое превышение содержания аэрозолей в будние дни по сравнению с выходными наблюдается на высоте 1,0 км для частиц с размерами  $d > 0,7$  мкм,  $2,0 \leq d < 4,0$  и  $d \geq 4,0$  мкм.

Рассмотрены парные и множественные линейные корреляционные и регрессионные связи **AOD** с содержанием в тропосфере счетной концентрации аэрозолей, радона и озона.

Тбилиси является урбанизированным городом с высоким уровнем загрязненности воздуха. Под его влиянием находится Кахетинский регион, где загрязненность атмосферы радиационно-активными аэрозолями мало отличается от Тбилиси. Абастумани и Цалка являются высокогорными станциями с относительно низким уровнем загрязнения атмосферы. Разность высот между Тбилиси, Цалкой и Абастумани немногим больше одного км. Если взять разность в значениях аэрозольной оптической толщи атмосферы и общего содержания озона соответственно между Тбилиси и Цалкой ( $\Delta AOD$ ) и Тбилиси и Абастумани ( $\Delta TO$ ), то эти величины будут характеризовать уровень антропогенного загрязнения атмосферы над Тбилиси аэрозолями и озоном.

По данным 1973-1990 гг получено, между содержанием  $\Delta TO$  и  $\Delta AOD$  в целом отмечается значимая положительная линейная корреляционная связь (по годовым данным  $R = 0,34$  с достоверностью не хуже 80%). Учитывая, что аэрозоли в целом способствуют уменьшению содержания озона, расходуя его на свое окисление, в данном случае положительная корреляция обусловлена участием озона в генерировании вторичных аэрозолей, вносящих существенный вклад в изменчивость аэрозольной оптической толщи атмосферы. Корреляция озона с вторичными аэрозолями тем выше, чем выше содержание озона. Так, для летнего сезона при значениях  $\Delta TO$  выше 15 единиц Добсона величина коэффициента корреляции между  $\Delta AOD$  и  $\Delta TO$  растет до 0,55.

Уровень коррелированности вторичных аэрозолей с озоном также зависит от количества в атмосфере минеральных и антропогенных аэрозолей негезохимического происхождения. Чем последних больше, тем корреляция ниже, меняет знак на обратный, и наоборот. В то же время при слишком большом количестве вторичного аэрозоля указанная корреляция также может ослабевать, если количество образующегося озона в тропосфере меньше его расхода на создание вторичных аэрозолей и окисление твердых минеральных и антропогенных. Таким образом, указанные связи имеют достаточно сложный характер и во многом обусловлены локальными особенностями физико-химических свойств антропогенных загрязнений атмосферы и требуют дальнейших исследований.

Для Кахетии удалось сопоставить данные 11 случаев одновременных самолетных измерений счетной концентрации аэрозолей размером более 0,7 мкм и радона с наземными измерениями аэрозольной оптической толщи атмосферы ( $AOD_K$ ), проведенными в июне-июле 1973 г. По данным вертикального зондирования атмосферы были рассчитаны общее содержание аэрозолей  $Q(\text{аэр})$  и радона  $Q(\text{рад})$  в вертикальном столбе воздуха толщиной от 1 до 3 км. Оказалось, что между радоном и аэрозольной оптической толщиной атмосферы имеется достаточно высокая корреляционная связь ( $R = 0,56$  с достоверностью не хуже 90%). Между счетной концентрацией аэрозолей и  $AOD_K$  корреляция малозначимая и  $R$  составляет всего 0,21. Уравнение множественной линейной регрессии, связывающее  $AOD_K$  с  $Q(\text{рад})$  и имеет вид:

$$AOD_K = 0,0156Q(\text{рад}) + 0,0059Q(\text{аэр}) + 0,0922$$

Здесь  $Q(\text{рад})$  в  $10^3$  Бк/м<sup>2</sup>,  $Q(\text{аэр})$  в  $10^9$  м<sup>-2</sup>. Значения степеней при соответствующих коэффициентах указанного уравнения опущены.

Изменчивость аэрозольной оптической толщи атмосферы при изменениях в пределах вариационного размаха  $Q(\text{аэр})$  составляет 10,5 %, а  $Q(\text{рад})$  – 48,6 %. Таким образом можно предположить, что в данном случае по крайней мере для летнего сезона года вариации аэрозольной оптической толщи атмосферы в основном обусловлены вторичными

аэрозолями, интенсивность генерации которых напрямую связана с наличием в атмосфере радона.

Наконец нами была изучена связь концентрации приземного аэрозоля с **AOD** в Тбилиси. Из всего набора архивных данных нам удалось найти 11 случаев одновременных измерений в 1987-1988 гг **AOD** и счетной концентрации приземного аэрозоля. Получено, что с увеличением размера аэрозолей корреляция **AOD** с их концентрацией в приземном слое воздуха быстро ослабевает. Так, для частиц с диаметром 0,4-0,5 мкм, 0,5-0,6 мкм, 0,6-0,7 мкм **R** соответственно = 0,60; 0,45 и 0,39. В данном случае значимым является лишь коэффициент корреляции между **AOD** и концентрацией приземного аэрозоля диаметром 0,4-0,5 мкм (**R**= 0,60 ).

Таким образом, **AOD** является достаточно репрезентативной характеристикой загрязненности приземного воздуха аэрозолями малых размеров (по крайней мере до диаметра 0,8 мкм). Отметим также, что коэффициент корреляции между значением **AOD** и общим содержанием минерального аэрозоля диаметром более 0,7 мкм в слое воздуха 1-3 км в Кахетии составлял всего 0,21. Коэффициент корреляции между значением **AOD** и концентрацией приземного аэрозоля размерами 0,7-10 мкм составляет 0,15. То есть в обоих случаях получают сходные результаты с незначимыми величинами **R**. Это еще раз подтверждает, что основную роль в вариациях **AOD** играют частицы малых размеров, и особенно вторичные аэрозоли.

Пятый параграф представлен экспериментальными данными о содержании естественной радиоактивности и аэрозолей в кучевых облаках.

Во время полевых работ 1975-1977 гг было исследовано 70 вертикальных профилей распределения радиоактивности облачных капель, 50 вертикальных профилей радиоактивности облачной среды и воздуха, и 9 вертикальных профилей содержания твердых аэрозолей в облачной среде и каплях.

Накопление естественной радиоактивности происходит в основном в нижней кромке облака, причем в более мощных облаках степень накопления радионуклидов сильнее. Величина радиоактивности облачной среды в среднем на всех высотах превышает значение радиоактивности воздуха в свободной атмосфере на уровне нижней границы кучевых облаков, которая составляет  $(0,5 \pm 0,1) \cdot 10^{-10}$  Ки/м<sup>3</sup>. Так, для облаков с вертикальной мощностью от 600 до 1500 м содержание радионуклидов в облачной среде у нижней границы облаков в 2-4 раза превышает величину радиоактивности воздуха, поступающего через нижнее основание.

В средней части облаков степень накопления незначительно зависит от их вертикальной мощности. Так, в этой части облаков с вертикальной мощностью 700-1100 м, 1100-1500 м и 1500-2200 м радиоактивность капель и удельная радиоактивность облачной воды соответственно составляют (множитель  $10^{-10}$  опущен): 0,58 Ки/м<sup>3</sup> и 0,94 Ки/г; 0,65 Ки/м<sup>3</sup> и 0,76 Ки/г; 0,72 Ки/м<sup>3</sup> и 0,74 Ки/г.

Вертикальное распределение аэрозолей в кучевых облаках похоже на вертикальное распределение радиоактивности облачной среды. Чаще всего концентрация аэрозолей резко падала в нижней трети облаков, а затем либо медленно убывала по высоте, либо оставалась постоянной. При этом накопление нерадиоактивных аэрозолей в облаках происходит сильнее, чем радиоактивных (особенно в нижней части кучевых облаков). Так, содержание аэрозолей в указанных выше трех диапазонах размеров в нижней, средней и верхней части кучевых облаков на каплях и в облачной воде в среднем составляет (множитель  $10^6$  опущен): (8-9) м<sup>-3</sup> и (40-45) г<sup>-3</sup>; (1,1-1,5) м<sup>-3</sup> и (2,4-3,3) г<sup>-3</sup>; (0,9-1,4) м<sup>-3</sup> и (3,6-5,6) г<sup>-3</sup>.

Следует учесть, что аэрозоли различных размеров накапливаются в облаках по-разному. Сильнее всего накапливаются гигантские аэрозоли (**d** ≥ 4,0 мкм). Однако здесь следует указать, что гигантские аэрозольные частицы могут создаваться в облаке из более мелких частиц

путем присоединения их к облачным каплям с образованием конгломератов аэрозольных частиц.

Приведены данные о параметре вымывания продуктов распада радона облачными каплями, значение которого меняется в пределах от  $4 \cdot 10^{-4} \text{ сек}^{-1}$  до  $16 \cdot 10^{-4} \text{ сек}^{-1}$  и зависит от мощности облаков.

В шестом параграфе проведен расчет накопления и распределения аэрозольной примеси в мощном конвективном облаке.

Облако представлено в виде фильтра с подвижной верхней границей. Введены следующие обозначения:  $q_0$  – концентрация аэрозолей у нижней границы облака;  $q_H$  – концентрация аэрозолей у верхней границы облака;  $w(t)$  – скорость восходящего потока воздуха в облаке, зависящая от времени;  $H(t)$  – вертикальная мощность облака, зависящая от времени;  $Q(a)$  – общее содержание аэрозолей в облачной среде – в параллелепипеде высотой  $H$  и единичным поперечным сечением.

Если предположить, что конвективное облако является фильтром, то справедливо следующее уравнение:

$$dQ(a)/dt = q_0 \cdot w(t) - q_H \cdot w(t) \quad (3.6.1)$$

Значение  $q_H$  по определению есть  $q_0 \cdot \exp(-\Lambda t)$ , где  $t$  – время пребывания аэрозоля в облаке.  $t = H / w(cp)$ , где  $w(cp)$  – средняя скорость восходящего потока воздуха. С учетом указанного выражение (3.6.1) примет вид:

$$dQ(a)/dt = q_0 \cdot w(t) (1 - \exp(-\Lambda H / w(cp))) \quad (3.6.2)$$

Значения  $H$  и  $w(t)$  для конвективного облака аппроксимировано выражениями:

$$w(t) = w_0 + bt, \quad H(t) = H_0 + at \quad (3.6.3)$$

Общее содержание аэрозоля в столбе воздуха  $H(t)$  с единичным поперечным сечением связано со значениями концентрации аэрозолей в облачной среде  $q$  следующим выражением:

$$\int_0^{H(t)} q dz = Q(a) \quad (3.6.4)$$

Решение уравнения (3.6.4) реализовано с использованием метода Рунге-Кутты. Для задания значений параметров  $w(t)$  и  $H(t)$  использованы данные различных исследователей, в том числе и автора. В соответствие с указанным заданы следующие параметры облака:

$$w(t) = 1 + 0,0025t; \quad t - \text{в сек, } w(t) - \text{м/сек. } H(t) = 2,8t; \quad t - \text{в сек, } H(t) - \text{в м.}$$

$t$  меняется от 0 до 3600 сек. За это время вертикальная мощность облака растет от 0 до 10000 м. Скорость  $w$  изменяется от 1 до 10 м/сек. Значение параметра  $\Lambda$  взято  $5 \cdot 10^{-4} \text{ сек}^{-1}$  и  $10^{-3} \text{ сек}^{-1}$ .

Как показали расчеты, накопление аэрозолей, в основном, происходит в нижней части облака. Затем концентрация аэрозолей убывает с высотой. Со временем содержание аэрозолей в облаке растет. В частности, через час после развития облака в нем содержится аэрозолей больше, чем в том же объеме в свободной атмосфере: для аэрозолей диаметром от 0,70 до 2,0 мкм – в 2,4 раза и в 1,7 раз при  $\Lambda=10^{-3} \text{ сек}^{-1}$  и  $\Lambda=5 \cdot 10^{-4} \text{ сек}^{-1}$  соответственно; для аэрозолей размерами от 2,0 до 4,0 мкм – в 3,5 раза и в 2,5 раза при  $\Lambda=10^{-3} \text{ сек}^{-1}$  и  $\Lambda=5 \cdot 10^{-4} \text{ сек}^{-1}$  соответственно. Отношение содержания аэрозолей в облаке через час после его развития к концентрации аэрозолей в свободной атмосфере на том же уровне меняется от 1,5 до 6 в зависимости от размера аэрозолей, высоты и параметра  $\Lambda$  (величина коэффициента турбулентности в свободной атмосфере равна  $20 \text{ м}^2/\text{сек}$ ). Указанное хорошо подтверждает описанный ранее экспериментальный факт, что в атмосфере после распада облаков наблюдаются области с повышенным содержанием аэрозолей.

В целом приведенных выше данные расчетов качественно, а в ряде случаев и количественно, согласуются как с проведенными нами измерениями содержания аэрозолей в облаках и атмосфере, так и с результатами полевых исследований других авторов.

Наконец, если предположить, что в облако поступает льдообразующий, а не пассивный аэрозоль, и из-за роста на этих ядрах кристаллов льда он полностью остается в облаке, по формуле  $Q' = q_{(0)}wt$  можно в первом приближении оценить накопление в облаке ядер кристаллизации. Так, для облака с высотой 5 км число ядер будет примерно  $5 \cdot 10^3 q_{(0)}$ , высотой 8 км -  $12 \cdot 10^3 q_{(0)}$ , высотой 10 км -  $18 \cdot 10^3 q_{(0)}$ , где  $q_{(0)}$  – концентрация льдообразующих ядер на уровне нижней границы облака. Таким образом, степень накопления пассивных аэрозолей и льдообразующих ядер одного порядка (для пассивного аэрозоля накопление в облаке при  $\Lambda = 10^{-3} \text{ сек}^{-1}$  примерно составляет: для 5 км –  $3,7 \cdot 10^3 q_0$ ; для 8 км –  $9,5 \cdot 10^3 q_0$ , для 10 км –  $14,5 \cdot 10^3 q_0$ , где  $q_0$  – концентрация пассивного аэрозоля на уровне нижней границы облака). Эти оценки вполне согласуются с данными других авторов, в которых показано, что в облаках содержание ледяных ядер в несколько раз выше, чем вне облаков.

Анализируя результаты, приведенные выше, можно предположить, что накоплением естественного аэрозоля в облаках конвективного типа можно объяснить увеличение в них ледяных кристаллов примерно на один порядок при благоприятных условиях (соответствующих динамических и микрофизических характеристиках облаков, обуславливающих значение параметра вымывания). Определенную роль в образовании кристаллов в облаках может играть естественная радиоактивность капель. По нашим измерениям содержание продуктов распада радона на каплях облака может достигать значений  $(1-6) \cdot 10^{-10}$  Ки/г (или  $2 \cdot 10^2 - 1,3 \cdot 10^3$  расп/мин·г). По литературным данным температура замерзания капель с радиоактивностью  $57-1,1 \cdot 10^3$  расп/мин·г повышается на  $(2-3)^\circ\text{C}$  по сравнению с температурой замерзания дистиллированной воды, равной  $-20,5^\circ\text{C}$  (для капель размером 2 мм по диаметру). Таким образом, естественная радиоактивность вполне может быть одним из факторов, способствующим размножению кристаллов льда, хотя о количественной стороне судить пока рано.

Не до конца ясна пока и роль ионизационных процессов, протекающих в облаках под действием космического излучения и альфа – излучения продуктов распада радона, в процессе образования ледяных зародышей и кристаллов льда. С одной стороны происходит зарядка капель воды в результате взаимодействия их с ионами, что в дальнейшем оказывает влияние на процессы их замерзания. С другой стороны ионы являются хорошими центрами конденсации. При пролете альфа – частиц вблизи капель может иметь место следующее: образование на легких ионах ядер конденсации и интенсивная перекачка на них водяного пара с крупных капель; одновременное охлаждение капель из-за испарения и образование в ее окрестностях локальных зон с пересыщением. В этих зонах находящийся межоблачный аэрозоль может быстро превращаться в ледяной зародыш. Однако это предположение требует экспериментальной проверки.

Таким образом, в зависимости от содержания ледяных ядер в свободной атмосфере число их в облаках, даже без учета активации и неактивных аэрозольных частиц, может быть довольно значительным. В практике активных воздействий на атмосферные процессы (противоградовые работы, вызывание осадков и др.) пока не учитывается наличие в облаках естественного фона ядер кристаллизации и содержания кристаллов. Например, для получения положительного эффекта при воздействии на градовые облака считается, что достаточно в зонах образования града создать концентрацию искусственных льдообразующих ядер  $\geq 10^4 \text{ м}^{-3}$ . Эффективность противоградовых работ в бывшем СССР, да и сейчас в России, составляет 75-80 %. Воздействие на сверхмощные градовые процессы остается до сих пор неэффективным. Одной из причин этого может являться быстрое рассеяние по объему облака внесенного ракетами льдообразующего реагента турбулентностью и вертикальными потоками воздуха.

В седьмом параграфе представлены результаты расчета распространения льдообразующего реагента от трасс противоградовых изделий “Алазани” в восходящем турбулентном потоке воздуха.

Если представить облако в виде бесконечного по горизонтали восходящего турбулентного потока воздуха и предположить, что скорость потока и величина турбулентного перемешивания постоянны в пространстве и времени, то решение уравнения диффузии для мгновенного точечного источника имеет вид :

$$q = q_0 / (4\pi t K_T)^{3/2} \exp\{-[(z-wt)^2 + x^2 + y^2] / 4t K_T\} \quad (3.7.1)$$

Здесь:  $K_T$  - коэффициент турбулентного обмена (внутри  $C_b$  коэффициент турбулентности часто достигает  $500 \text{ м}^2/\text{сек}$  и более),  $w$  - скорость восходящего потока воздуха,  $q_0$  - мощность точечного источника,  $t$  - время,  $x, y, z$  - координаты.

Разбивая траекторию полета ракеты на множество точечных источников и используя принцип суперпозиции из выражения (3.7.1) нетрудно получить выражение для расчета распространения льдообразующего реагента от трассы полета противорадового изделия.

$$q = q_0 / (4\pi t K_T)^{3/2} \sum \{ \exp\{-[(z-z_i) - w(t-t_i)]^2 + (x-x_i)^2 + (y-y_i)^2\} / 4((t-t_i) K_T) / (t-t_i)^{3/2} \} \quad (3.7.2)$$

Здесь -  $x_i, y_i, z_i$  - координаты множества точечных источников в моменты времени  $t_i$ ,  $1 \leq i \leq 300$  (300 - число разбинок траектории полета ракеты),  $0 \leq t_i \leq 35$ ,  $t$  - время выделения реагента, равное 35 сек. Выход активных ядер с одного противорадового изделия "Алазани" при температуре воздуха  $-10^\circ\text{C}$  составляет примерно  $5 \cdot 10^{15}$  частиц. В ракете содержится 1,1 кг пиротехнического состава, в том числе около 0,5 кг йодистого свинца.

Расчеты показали, что реагент распространяется в облаке крайне неравномерно. Площади, засеянные реагентом с концентрацией более  $10^4 \text{ м}^{-3}$ , сильно зависят от времени, высоты,  $w, K_T$  и угла пуска противорадовых ракет. При скоростях восходящего потока более 25 м/сек реагент быстро продувается через облако. Таким образом, для поддержания в различных зонах облака высоких концентраций льдообразующего реагента, превышающего естественный фон, необходимо частое повторение инъекций противорадовыми изделиями, особенно при высоких значениях скорости восходящего потока воздуха и коэффициента турбулентного обмена.

В восьмом параграфе рассмотрена концепция взаимодействия аэрозолей с облачностью. Подробно анализируются данные различных ученых, включая и автора данной работы, о конденсационных и льдообразующих свойствах атмосферных аэрозолей естественного и антропогенного происхождения, взаимодействия их с микрофизическими и электрическими характеристиками облаков и др.

Так, например, более высокая степень гигроскопичности городского аэрозоля по сравнению с сельским обнаружена и нами (Батуми и Годердзский перевал, измерения аэрозольной оптической толщи атмосферы). Анализ данных самолетных измерений концентрации легких ионов и радона в конвективных облаках показал, что в облаках также, как и в свободной атмосфере, наблюдается прямая связь между уровнем ионизации воздуха (радон и космическое излучение) и содержанием ядер конденсации. Изменение интенсивности ионизации от  $5,75 \text{ пар ионов см}^{-3}\text{сек}^{-1}$  до  $8,0 \text{ пар ионов см}^{-3}\text{сек}^{-1}$  увеличивает содержание ядер конденсации в 1,56 раза. При этом доля интенсивности ионизации за счет радона и короткоживущих продуктов его распада невелика и не превышает 10 %.

Прямая зависимость концентрации ядер конденсации от интенсивности ионизации прослеживается также в условиях высокой ионизации. Так, например, в Ново-Афонской пещере при почти 100% влажности воздуха изменение интенсивности ионизации от  $126 \text{ пар ионов см}^{-3}\text{сек}^{-1}$  до  $1041 \text{ пар ионов см}^{-3}\text{сек}^{-1}$  приводит к увеличению концентрации ядер конденсации почти в четыре раза. И это при практическом отсутствии в пещере значительных количеств окислов серы, азота и озона. Основным источником ионизации воздуха в пещере является радон и продукты его распада. Таким образом, космическая и радиоактивная ионизация воздуха может существенным образом влиять на процессы образования вторичных аэрозолей в атмосфере и облаках.

На основании вышеуказанного отмечается, что в целом процессы взаимодействия аэрозолей с облаками достаточно сложны. Имеется несколько схем различных авторов этого



взаимодействия. В наших ранних исследованиях (Амиранашвили, Гзиришвили) была предложена схема стимулирования гетерогенной нуклеации льда при окислении аэрозолей озоном. В этой схеме учитываются также грозовые процессы. В диссертации представлена уточненная концепция взаимодействия аэрозолей с конвективными облаками.

В концепции отмечается разнообразность взаимосвязей между процессами, протекающими в облаках и безоблачной атмосфере. С одной стороны аэрозоль, модифицируясь в атмосфере и попадая в облачную среду в результате увлажнения или взаимодействия с облачными каплями, способствует образованию ледяных ядер и кристаллов. Изменение фазового состояния облачной среды приводит к изменению ее электрической активности (внутриоблачные, межоблачные, наземные разряды). Разрядная деятельность изменяет химический состав облачной среды (образование озона, окислов азота и др. ), а также непосредственно действует на образование твердой фазы в облаках. Указанные газы вместе с радоном, окислами серы и др. компонентами в условиях высокой увлажненности и космической ионизации приводят к интенсивной генерации ядер конденсации. Конденсация на этих ядрах водяного пара приводит к локальным пересыщениям и активации инактивных ядер в межкапельной среде и образованию ядер кристаллизации и ледяных кристаллов, то есть опять-таки к изменению фазового состояния облачной среды. Одновременно действие высоких концентраций озона на инактивные аэрозоли почвенного происхождения в межкапельном пространстве активизирует их в смысле льдообразования. Фазовые переходы и процессы ионизации приводят к изменению электрической активности облака и цикл повторяется снова.

Пробивая тропопаузу мощные вертикальные потоки воздуха могут переносить в стратосферу значительные количества водяного пара, аэрозолей, озона, окислов азота, серы и других примесей. Таким образом, мощные конвективные и грозовые облака могут вносить существенный вклад в изменение химического состава атмосферы, содержания в ней аэрозолей.

Совокупное взаимодействие молниевой активности облаков, ионизации воздуха, их аэрозольного и химического состава в зависимости от содержания и вида последних может приводить как к интенсификации осадков (в том числе и твердых), так и к уменьшению их. Первое, в частности, возможно, когда освоение влаги ядрами конденсации и кристаллизации приводит к образованию крупнокапельной или капельно-кристаллической системы, способствующей дальнейшему быстрому коагуляционному росту облачных элементов. Второе может происходить при чрезмерном образовании ядер конденсации и кристаллизации (например, в сильно загрязненной местности), когда в результате освоение ими влаги создается мелкодисперсная капельная или капельно-кристаллическая система, затрудняющая дальнейший коагуляционный рост облачных частиц и выпадение жидких и твердых осадков (так называемый эффект “перезасева”).

Поэтому в соответствие с этой концепцией не следует ожидать прямых связей между грозовой и градовой активностью, осадками и аэрозольно-газовыми загрязнениями атмосферы и др. Указанные взаимосвязи должны характеризоваться региональными особенностями, обусловленными как физическими условиями процессов образования облачности, так и количеством и видом аэрозольно-газового загрязнения воздуха (в том числе размерами, химическим составом и конденсационной и льдообразующей активностью твердых минеральных и антропогенных частиц аэрозолей, могущих оказывать существенное влияние на образование крупных капель и зародышей градин).

Следует отметить, что данная концепция не претендует на завершенность и предусмотрено ее дальнейшее развитие.

**В четвертой главе**, состоящей из пяти параграфов, приведены результаты исследований грозовых процессов в Восточной Грузии и активных воздействий на них.

*В первом параграфе* представлены данные о характеристиках грозовой активности конвективных облаков в условиях Кахетии, полученные в процессе проведения полевых экспериментов в период с 1978 по 1984 гг в северо-западной части Алазанской долины Институтом геофизики АН Грузии совместно с Главной геофизической обсерваторией им. А.И.Воейкова, Ленинградским гидрометеорологическим институтом и Военизированной службой Грузии по борьбе с градом. За это время было проведено комплексное исследование грозовых процессов в течение 20 дней с общим временем измерения электрических параметров облаков на 7 пунктах около 117 часов. На всех ПКАЭ было зарегистрировано всеми грозорегистраторами 9288 разрядов. При этом удалось определить координаты и величину заряда, вовлеченного в молниевый разряд, для 338 наземных разрядов. Всего было проведено комплексное исследование электрических и радиолокационных характеристик 22 конвективных облаков.

Из всех зарегистрированных разрядов типа облако-земля 297 (или 88%) несли отрицательный заряд, а 41 (или 12%) – положительный. Общий заряд, унесенный из облаков положительными разрядами, составил 1520 Кл, а отрицательными – 9543 Кл. На один положительный разряд в среднем приходился заряд в 37 Кл, а на один отрицательный – 32 Кл. Средняя величина заряда, приходящаяся на один молниевый разряд по абсолютному значению составляла около 33 Кл. Частота разрядов на землю менялась от 1 до 11 за 5 мин. Чаще всего наблюдался один разряд на землю за 5 мин. (43% случаев). 10-11 разрядов за 5 мин. отмечалось в 2,6 % случаев. С увеличением частоты разрядов увеличивается и общий заряд, уносимый этими разрядами из облака. При одном разряде на землю в среднем нейтрализуется заряд в 29 Кл, при четырех – 69 Кл, при 10-11 разрядах – 108 Кл. Средняя же величина заряда, нейтрализованного во время единичного разряда на землю, уменьшается с увеличением частоты разрядов. Так, при частоте молниевых разрядов в 1 разряд за 5 мин. из облака единичным разрядом уносится заряд в 29 Кл; при частоте 5 разрядов – 13 Кл; при частоте 10-11 разрядов – 11 Кл на разряд.

Абсолютные значения зарядов, вовлеченных в молниевый разряд, меняются от 0,2 до 540 Кл. Наиболее часто регистрировались заряды от 0,2 до 10 Кл на один молниевый разряд (37,5% случаев) и от 10 до 20 Кл на один разряд (17,8% случаев). На заряды от 0,2 до 40 Кл на один разряд приходится 75,6% случаев. Отметим, что в среднюю величину заряда на один молниевый разряд заряды от 40 до 540 Кл вносят существенный вклад, хотя их количество составляет всего 24,4% от общего числа разрядов.

Наиболее часто заряд на землю переносится с высот  $H_Q$  от 6 до 8 км при среднем значении 6,7 км. Диапазон изменений  $H_Q$  от 0,9 до 14 км. Отрицательные заряды переносятся в среднем с высоты 6,5 км ( $\sigma = 3,2$  км), а положительные с высоты 7,5 км ( $\sigma = 3,1$  км). Соотношение между числом внутриоблачных и наземных разрядов составляет 2,16. Средняя в сезон интенсивность суммарного числа внутриоблачных и наземных разрядов в условиях Кахетии составляет  $(1,7 \pm 0,35) \cdot 10^{-3}$  разряд $\cdot$ мин $^{-1}$  $\cdot$ км $^{-2}$ .

Показано, что вышеприведенные данные несмотря на существенную разницу в методике измерений, в целом неплохо согласуются с аналогичными данными других авторов.

*Второй параграф* посвящен установлению связей радиолокационный и электрических параметров грозовых облаков.

Зависимость интенсивности наземных молниевых разрядов  $N_g$  от максимальной высоты радиозаха облаков  $H_m$ , имеет вид:

$$N_g = 0,52 \cdot 10^{-3} H_m^{3,275} \text{ мин}^{-1} \quad (R^2 = 1)$$

Соотношение между максимальной высотой радиолокационной отражаемости облаков и величиной заряда, вовлеченного в молниевые разряды в течение минуты  $\Delta Q$ , удовлетворительно описывается полиномом третьей степени:

$$\Delta Q = -0,5667 \cdot H_m^3 + 14,436 \cdot H_m^2 - 116,52 \cdot H_m + 308,23 \text{ Кл/мин} \quad (R^2 = 0,98)$$

Зависимость интенсивности молниевых разрядов на землю от радиолокационного критерия грозоопасности  $R_t$  определяется выражением:

$$N_g = 0,0678 \cdot R_t - 0,2473 \quad (R^2 = 0,96)$$

Соотношение между  $\Delta Q$  и  $R_t$  имеет вид:

$$\Delta Q = -0,1961 \cdot R_t^2 + 6,6975 \cdot R_t - 32,984 \text{ Кл/мин} \quad (R^2 = 0,97)$$

Наконец, соотношение между комплексным радиолокационным критерием грозоопасности  $K_r$  и интенсивностью молниевых разрядов на землю, описывается полиномом третьей степени:

$$K_r = 177,82 \cdot N_g^3 - 391,91 \cdot N_g^2 + 286,53 \cdot N_g - 55,119 \quad (R^2 = 0,98)$$

Отметим, что комплексный радиолокационный критерий грозоопасности  $K_r$  является осредненной по семи радиолокационным параметрам облаков вероятностной характеристикой выпадения града. Цикл развития грозоопасных облаков условно разделен на 4 стадии. 1 – малоградовая,  $K_r$  меняется от 1 до 40%; 2 – грозоопасная -  $K_r$  меняется от 41 до 60%; 3 - весьма грозоопасная -  $K_r$  меняется от 61 до 100%; 4 – градоносная –  $K_r = 100\%$ .

В соответствие с вышеуказанным соотношением на первой стадии развития грозового облака число наземных молниевых разрядов менее  $1,25 \text{ мин}^{-1}$ , на второй стадии -  $N_g$  меняется от 1,26 до 1,37 разряд·мин<sup>-1</sup>, на третьей стадии диапазон изменения  $N_g$  от 1,38 до 1,52 разряд·мин<sup>-1</sup>, и на четвертой –  $N_g$  больше 1,52 разряд·мин<sup>-1</sup>. Как следует из этих оценок, различие интенсивности грозовых разрядов в потенциально грозоопасных и грозовых облаках не столь уж значительное – рост значений  $N_g$  от первой стадии до четвертой составляет всего около 20%.

В соответствие с приведенными выше связями электрических и радиолокационных характеристик конвективных облаков была проведена их классификация по интенсивности грозовой деятельности для условий Алазанской долины.

Разделение грозовой деятельности облаков по интенсивности в условиях Алазанской долины

Состояние грозовой деятельности	Радиолокационные параметры		Электрические параметры, мин <sup>-1</sup>	
	$R_t$	$H_m$ , км	$N_g$	$\Delta Q$ , Кл
<b>Гроза</b>	> 10	> 8	>0,4	>11
<b>Существенное ослабление грозы</b>	6...10	6...8	<0,4	<11
<b>Подавление грозы</b>	<6	<6	0	0

При грозе число наземных разрядов больше 0,4 за мин., величина заряда, вовлеченного в молниевый разряд, более 11 Кл, значение радиолокационного параметра грозоопасности выше 10, максимальная высота радиоэха облака больше 8. При существенно ослабленной грозе число разрядов на землю менее 0,4 за мин., величина переносимого молнией заряда менее 11 Кл, значение радиолокационного параметра грозоопасности от 6 до 10, максимальная высота радиоэха облака от 6 до 8. Наконец при состоянии “подавление грозы” в течение минуты разрядов не наблюдается,  $R_t < 6$  и  $H_m < 6$  км.

В третьем параграфе представлены результаты определения плотности распределения молниевых разрядов на землю в Кахетинском регионе.

Зависимость между интенсивностью молниевых разрядов конвективных облаков и их максимальной высотой радиоэха с использованием данных многолетних радиолокационных наблюдений за облаками позволила провести детальное районирование Кахетинского региона по грозовой активности.

Исследуемая территория была разделена на квадраты  $5 \times 5 \text{ км}^2$  (характерный размер зоны повышенной радиолокационной отражаемости). В каждом квадрате подсчитывалось среднее многолетнее (за период с 1972 по 1976 гг) количество конвективных облаков с  $H_m \geq 6,0 \text{ км}$ , а также время нахождения облаков с соответствующей высотой верхней границы в исследуемом квадрате. Затем с учетом соотношения между  $N_g$  и  $H_m$  и времени нахождения облака над данным квадратом определялось количество разрядов на землю в этом квадрате. Основным допущением при этом являлось то, что разряды на землю происходят под зоной с максимальной радиолокационной отражаемостью. Это вносит некоторую неопределенность при оценке плотности разрядов на землю для небольших конкретных площадей, так как основная доля наземных молниевых разрядов происходит в пределах зоны повышенной отражаемости. Однако при подсчете общего количества разрядов от всех облаков и осреднении их для больших площади ( $\geq 100 \text{ км}^2$ ) эта неопределенность сводится к минимуму.

Территория Кахетии была разбита на 269 квадратов, каждый площадью  $25 \text{ км}^2$ . Таким образом общая площадь исследуемого региона составила  $6725 \text{ км}^2$ . Обработке были подвергнуты данные более 15400 грозовых зон в указанных квадратах и времени их нахождения в пределах квадрата. В диссертации представлена карта распределения на исследуемой территории среднесезонного (апрель-сентябрь) количества конвективных облаков с  $H_m$  более  $6,0 \text{ км}$  на площади  $25 \text{ км}^2$ . Распределение конвективной облачности над территорией Кахетии имеет крайне неравномерный характер и меняется от 3 до 35 на квадрат. В среднем для диапазона высот местности от  $0,156$  до  $0,3 \text{ км}$  (общая площадь  $1225 \text{ км}^2$ ) количество облаков над квадратом составляет  $8,6 \pm 4,0$  за сезон, для диапазона высот местности от  $0,3$  до  $1,1 \text{ км}$  (общая площадь  $4500 \text{ км}^2$ ) –  $11,5 \pm 5,0$  облаков, а для диапазона высот местности от  $1,1$  до  $1,875 \text{ км}$  (общая площадь  $1000 \text{ км}^2$ ) –  $16,0 \pm 9,0$  облаков.

Как показали расчеты в условиях Кахетии в среднем в сезон на площади  $6725 \text{ км}^2$  происходит около 24500 наземных молниевых разрядов. Причем, более половины из этого общего количества приходится на грозовые зоны с  $H_m$  от 9 до 11 км. Подавляющее количество молниевых разрядов приходится на грозовые зоны с  $H_m$  от 8 до 12 км (около 87%). Наибольшая повторяемость значений  $H_m$  приходится на диапазон высот от 9 до 10 км, тогда как наибольший вклад в количество молниевых разрядов дают грозовые зоны с  $H_m$  от 10 до 11 км. Градоопасные облака с вероятностью выпадения града более 40% дают около 55% вклада в общую разрядную деятельность.

Расчеты количества молниевых разрядов в каждом из 269 квадратов позволили построить для Кахетинского региона карту среднесезонной плотности распределения наземных грозовых разрядов. Для перехода к общему количеству разрядов или к числу внутриоблачных разрядов величину  $N_g$  достаточно умножить на коэффициенты 3,16 или 2,16. Распределение грозовых разрядов над территорией Кахетии, также как и распределение конвективной облачности, имеет весьма неравномерный характер и меняется от 13 до 377 разрядов на квадрат. В среднем для диапазона высот местности от  $0,156$  до  $0,3 \text{ км}$  плотность наземных разрядов составляет 47 на квадрат, а для диапазона высот местности от  $1,5$  до  $1,7 \text{ км}$  – 215 разрядов на квадрат за сезон. Эмпирическая зависимость плотности разрядов от высоты местности имеет вид:

$$N_g = 42,1 \cdot \exp 0,978H \quad (R^2 = 0,95)$$

В среднем для территории Кахетии число наземных разрядов в сезон составляет 91 на  $25 \text{ км}^2$ . Соответственно среднее число наземных и внутриоблачных разрядов составляет 288 на  $25 \text{ км}^2$  (или  $11,5 \text{ км}^{-2}$ ).

Показано, что несмотря на трудности стыковки данных о молниевых разрядах, полученными самыми различными методами, сопоставление наших данных с аналогичными данными других авторов дает основание полагать о применимости радиолокационных наблюдений за конвективными облаками для детального районирования территорий по грозовой активности.

Наконец, сопоставление данных инструментальных и визуально-слуховых наблюдений за грозами позволило оценить среднюю для территории Кахетии плотность грозовых разрядов в течение одного дня с грозой, которая для наземных разрядов составляет  $2,15 \pm 0,43$  разряда на  $25 \text{ км}^2$  в день, а для общего числа наземных и внутриоблачных разрядов –  $6,8 \pm 1,4$  разряда на  $25 \text{ км}^2$  в день. Таким образом, зная число дней с грозами в сезон или продолжительность гроз можно оценить количество молниевых разрядов как для отдельных станций, так и для всей территории исследуемого района для тех лет, когда инструментальных наблюдений за грозами не проводилось. Подобные расчеты важны, например, для оценки максимальных значений поражаемости земной поверхности молниями по длительному ряду наблюдений за числом дней с грозами, что важно для проектирования строительства различных объектов, линий электропередач и др.

В четвертом параграфе рассмотрены результаты исследований изменчивости грозовой активности конвективных облаков при воздействии на них льдообразующим реагентом. В период с 1978 по 1983 гг в Алазанской долине были проведены исследования возможности регулирования грозовой деятельности облаков и облачных систем конвективных форм с использованием противогородовых средств воздействия и методики воздействия, модифицированной применительно к поставленной задаче. За указанный период было исследовано около 120 облаков. Из них проанализированы данные о 106 облаках, из которых 18 естественного развития и 88 подвергнутых воздействию.

Для оценки эффекта воздействия были использованы как данные инструментальных измерений электрического состояния облаков, так и данные радиолокационных параметров, имеющих тесные связи с грозовой активностью облаков (**R<sub>t</sub>**, **K<sub>r</sub>** и **Hm**). Критерии существенного ослабления грозовой деятельности приведены во втором параграфе. Результат воздействия считался положительным, если время жизни подвергнутого воздействию облака с **R<sub>t</sub> ≥ 8** и **Hm ≥ 8** км было менее 60 мин., что является средним временем жизни грозового облака, развивающегося в естественных условиях в исследуемом регионе.

Максимальная высота исследованных облаков колебалась в диапазоне от 6,1 до 12,8 км; максимальные значения коэффициентов грозо- и градоопасности изменялись от 5 до 34, и от 0 до 100 соответственно. Время наблюдения за облаками составляло от 7 до 152 мин.; продолжительность воздействия в различных опытах менялась от 1 до 105 мин.; количество противогородовых ракет "Алазани", введенных в облака – от 6 до 360.

Положительного эффекта воздействия удалось достичь в 53% случаев. Примерно в 22% случаев эффект был отрицательным – время жизни грозовых облаков было больше 60 мин. В 25% случаев результат получился неопределенным.

Важно отметить, что положительного эффекта удалось достичь и при подавлении грозовых облаков с высотой верхней границы в диапазоне от 10 до 12,8 км. Среднее время жизни грозы в этих облаках составило около 40 мин. и мало отличается (на 5 – 6 мин.) от среднего времени жизни грозы для всех облаков с положительным эффектом воздействия.

Во всех случаях существенное ослабление грозовой деятельности было при воздействии на облака с  $8 < \mathbf{Hm} < 10$  км. Для этих облаков время жизни грозы снижается до 22-29 мин., что почти в два раза меньше времени жизни грозы в облаках естественного развития аналогичной вертикальной мощности, составляющего 43 мин.

Воздействие на 19 облаков с вертикальной мощностью от 10 до 12,5 км дало отрицательный результат (продление грозовой деятельности), хотя в 26 случаях воздействие на облака такой же мощности привело к положительному эффекту. Примечательно, что в этих случаях положительного эффекта удалось добиться путем введения в облака меньшего количества реагента (81 ракета в среднем на облако против 125 ракет), но большей интенсивности воздействия: в среднем по облаку 4 ракеты в мин. за 20 мин. против 2,6 ракеты в мин. за 47 мин.

Таким образом, для существенного ослабления грозовой деятельности облаков в диапазоне  $10 < H_m < 12,8$  км в среднем необходимо вводить в облако в течение не менее 20 мин. изделия "Алазани" с интенсивностью не менее 4 ракет/мин. Для существенного подавления грозовой активности облаков с  $8 < H_m < 10$  км достаточно в среднем вводить в облако не менее 2 ракет/мин. в течение не менее 13 мин.

Введение в облака реагента с меньшей интенсивностью, вероятно, приводит к появлению зон неоднородностей из-за характера рассеяния льдообразующих ядер от трасс полета ракет "Алазани", что приводит к увеличению времени жизни грозы.

Рассмотрим подробнее реакцию электрического состояния грозовых облаков, в качестве характеристики которого взяты значения  $R_t$ , на интенсивность введения в них льдообразующего реагента. В качестве показателя относительного изменения коэффициента  $R_t$  рассмотрим величину  $R_{t1} = (R_{tmax} - R_{tнач}) / R_{tmax} \cdot t$  на стадии роста облака и  $R_{t2} = (R_{tmax} - R_{tкон}) / R_{tmax} \cdot t$  на стадии разрушения облака.

Здесь –  $R_{tmax}$  - максимальное значение коэффициента грозоопасности;  $R_{tнач}$  и  $R_{tкон}$  – начальное и конечное значение  $R_t$ . Интенсивность введения реагента  $J$  считалась по количеству ракет, введенных в облако за 1 мин.

Получено, что в стадии роста облака связь между  $R_{t1}$  и  $J$  может быть описана уравнением регрессии вида:  $R_{t1} = 5,8 - 0,7 J$  ( $R^2 = 0,60$ ),  
а в стадии разрушения:  $R_{t2} = 1,8 + 0,0881 J^2 - 0,373 J$  ( $R^2 = 0,48$ )

Таким образом, при воздействии на облако с целью ослабления грозовой активности интенсивность введения реагента не должна быть уменьшена до уровня, приводящего в интенсификации грозовой деятельности как в стадии роста, так и в стадии разрушения облака.

Указанное выше подтверждается также характером изменчивости числа грозовых разрядов в зависимости от интенсивности введения реагента в облака. При невысокой интенсивности введения реагента в облака происходит рост молниевой активности примерно на 15% ( $J = 2$  ракеты/мин). С повышением интенсивности введения реагента в облака происходит уменьшение грозовой активности, которая достигает минимума при  $J = 7$  ракет/мин и более. Таким образом, как и было отмечено выше, эти данные достаточно хорошо совпадают с результатами анализа эффективности воздействия на грозовые облака с использованием их радиолокационных характеристик.

Для оценки норм расхода льдообразующего реагента для воздействия на электрическое состояние облаков нами были проведены также натурные опыты по воздействию на кучевые облака с борта летающей лаборатории, и серия лабораторных экспериментов в большой облачной камере Института геофизики АН Грузии. Оценки, проведенные нами, показали, что для нейтрализации заряда 10-30 Кл в грозовой ячейке облака с вертикальной мощностью 10 км и водностью  $5 \text{ г/м}^3$  необходимо 10-30 кг реагента йодистого свинца (или 20-60 ракет). Это согласуется с данными натурных экспериментов по воздействию на грозы. Для нейтрализации заряда в маленьких кучевых облаках достаточно нескольких сот граммов реагента.

В пятом параграфе приведены результаты исследований влияние гроз на содержание озона в тропосфере и химический состав осадков. В частности показано, что когда имеются изолированные мало подвижные грозовые облака, вполне четко вырисовывается картина изменения концентрации приземного озона КПО под влиянием электрических процессов. Так, при  $N_t = 0-10$  разрядов за 5 мин КПО составляет  $45-63 \text{ мкг/м}^3$ , а при  $N_t$  равном около 40 разрядов за 5 мин КПО растет до  $70 \text{ мкг/м}^3$ . При изменениях напряженности электрического поля атмосферы от -1000 до -3000 в/м отмечается тенденция роста КПО с ростом напряженности электрического поля.

Многолетние синхронные наблюдения за КПО и радиолокационными параметрами облаков позволили построить общую картину зависимости КПО от  $H_m$ . Получено, что

влияние облаков на **КПО** прослеживается по крайней мере в радиусе 30 км вокруг облака. В приземном слое атмосферы практически на всей площади кольца вокруг облака с внутренним радиусом 5 км и внешним – 30 км, содержание озона повышено. Облака с **Hm** 6-7 км влияют на **КПО** несколько слабее – в радиусе до 20 км. Явно выраженной зависимости **КПО** на разных расстояниях от облака от их вертикальной мощности не наблюдается. Так, например, увеличение **КПО** в исследуемой зоне действия облаков с **Hm** = 7-8 км и 8-9 км такое же, или даже несколько выше, чем для облаков с **Hm** = 9-12 км. Это, по всей видимости, связано с наложением электрических и динамических факторов на вариации **КПО**.

Содержание озона при грозовых процессах растет с высотой. При грозах в атмосфере в слое 5-8 км отмечается высокая концентрация озона (более 400 мкг/м<sup>3</sup>), превышающая концентрацию озона на уровне главного максимума, а также концентрацию смогового озона в Тбилиси и Руиспири (до 170 мкг/м<sup>3</sup>).

Содержание озона повышено не только в грозовых, но и в небольших кучевых облаках. Самолетные исследования показали, что в центральной части облака содержание озона вдвое выше, чем в свободной атмосфере на том же уровне полета.

Таким образом, как в грозовых облаках и их окрестностях, так и в небольших кучевых облаках большие концентрации озона в условиях высокой влажности в присутствии ионизирующего излучения радона и космических лучей способствуют ускорению генерации вторичных аэрозолей по схеме газ→частица (образование сульфатов, нитратов и др), а также активации и неактивных с точки зрения льдообразования частиц аэрозолей, о чем шла речь в параграфе 3.8. В конечном итоге это действие должно проявиться в изменении микрофизической и электрической структуры облаков, режима осадков, их химического состава.

Так, многолетние наблюдения за вариациями **КПО** показали, что при интенсивных градовых процессах в Алазанской долине (площадь выпадения града более 100 га, общее количество случаев -26), среднее значений **КПО** в Руиспири составляло 36±6 мкг/м<sup>3</sup>, а при малоинтенсивных градовых процессах (площадь выпадения града менее 100 га, общее количество случаев -20), среднее значений **КПО** в Руиспири составляло 50±8 мкг/м<sup>3</sup>.

Рассмотрены эффекты влияния гроз на химический состав атмосферных осадков в условиях Алазанской долины. Проанализированы данные о содержании в осадках **NH<sub>4</sub><sup>+</sup>**, **NO<sub>3</sub><sup>-</sup>**, **Ca<sup>2+</sup>**, **SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>** и **pH** дождевой воды. Микроэлемент кальций терригенного происхождения и был выбран нами в качестве фонового элемента. Пробы осадков отбирались в с. Руиспири в летний период 1967-1970 гг. Всего был проведен анализ 195 проб дождевой воды, из которых 68 проб из грозовых облаков. Наличие электрических разрядов в облаках определялось визуально-слуховым методом. Весь массив данных был разделен на 6 градаций. 1 – дождь без грозы, 2 – дождь с грозой, 3 – дождь с грозой (будние дни), 4 – дождь с грозой (выходные дни), 5 - дождь без грозы (будние дни), 6 - дождь без грозы (выходные дни).

Показано, что содержание всех указанных химических составляющих в осадках в дни с грозами выше, чем в дни без гроз (градации 1 и 2 соответственно). Значения **pH** в градациях 1 и 2 статистически мало различимы.

При осадках с грозой в будние и выходные дни (градации 3 и 4) все значения химических составляющих и **pH**, кроме **SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>**, статистически неразличимы. Что касается **SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>**, то в будние дни содержание его в осадках с грозой выше, чем в выходные.

Наконец, в осадках без гроз (градации 5 и 6) в будние и выходные дни все значения химических составляющих и **pH**, кроме **Ca<sup>2+</sup>**, статистически мало различимы. Что касается кальция, то в будние дни содержание его в осадках ниже, чем в выходные. Основным источником антропогенных загрязнений воздуха в Кахетии, как было показано в главе 3, является Тбилиси с прилегающими территориями. То есть, недельный ход загрязненности

воздуха в Тбилиси и Кахетии сказывается и на недельном ходе содержания в осадках сульфатов.

Таким образом, увеличение  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$  и  $\text{SO}_4^{2-}$  в осадках из грозовых облаков свидетельствует о наличии мощного дополнительного источника продуцирования нитратных и сульфатных аэрозольных частиц в электрически активных облаках. В диссертации приведены наиболее вероятные химические реакции, приводящие к быстрому образованию ядер конденсации, с учетом продуцирования молниями озона и  $\text{NO}$ .

Проведена оценка продуцирования азота наземными молниевыми разрядами в различных районах Кахетии, меняющаяся в пределах от 1 до 30 кг/км<sup>2</sup> в год.

**Пятая глава** состоит из четырех параграфов и в ней представлены результаты исследований долговременных вариаций грозо-градовых процессов в Грузии.

*В первом параграфе* изложены результаты исследований изменчивости числа дней с градом и грозой в Грузии в 1941-1990 гг и ее особенности в районах с активными воздействиями на атмосферные процессы (Кахетия, Южная Грузия).

При анализе были использованы данные 123 метеостанций, расположенных примерно равномерно по территории Грузии, за исключением высокогорных и малонаселенных районов. Получено, что из 123 метеостанций Грузии уменьшение среднего числа градобитий в период времени с 1941 по 1960 гг по сравнению с периодом с 1971 по 1990 гг отмечается на 66 станциях, увеличение – на 14 станциях, неизменность – на 43 станциях.

Изучена также изменчивость среднего на одну метеостанцию числа дней с градом в целом по Грузии (**ЧДГ**), ее Западной (**ЧДГ<sub>W</sub>**) и Восточной (**ЧДГ<sub>E</sub>**) частях за три периода времени: 1 - 1941-1990; 2 -1941-1960; 3 – 1971 – 1990. В соответствии с двусторонними критериями Стьюдента и Хи-квадрат для редких событий с достоверностью 90 % и выше можно утверждать следующее:

На территории Западной Грузии среднее в теплое полугодие число градобитий меньше, чем в Восточной для всех указанных выше периодов времени (соответственно 1,84 и 0,97). Сравнение двух 20-летних периодов времени 1941-1960 и 1941-1990 гг. показало, что в общем имеется уменьшение числа дней с градом как для всей территории Грузии в целом, так и для ее Восточной и Западной частей (соответственно 1,55 и 0,92; 2,23 и 1,35; 1,2 и 0,7).

Корреляционная связь между **ЧДГ<sub>E</sub>** и **ЧДГ<sub>W</sub>** для всех периодов времени достаточно высокая (**R** составляет 0,55-0,78 ). Иными словами территория Западной Грузии в целом, где уровень антропогенных загрязнений атмосферы значительно ниже, чем в Восточной, при исследованиях эффектов воздействия этого загрязнения на градовые процессы вполне может быть использована в качестве контрольной для последней.

Отношение числа дней с градом в Восточной Грузии к числу дней с градом в Западной Грузии составляет для 1941-1990 гг. 190 %, 1941-1960 гг. – 186 %, 1971-1990 гг. – 193 %. То есть, в Восточной Грузии по отношению к Западной Грузии произошел некоторый рост числа дней с градом в 1971-1990 гг. по сравнению с 1941-1960 гг.

Временные ряды **ЧДГ<sub>W</sub>**, **ЧДГ<sub>E</sub>** и **ЧДГ** для периода 1941-1990 гг неслучайны, автокоррелированы. Во всех трех случаях выделяются две составляющие ряда **ЧДГ** - тренд и случайная компонента. Все три кривые тренда имеет вид полинома второй степени с хорошо выраженным монотонным уменьшением во времени, особенно в последние тридцать лет исследуемого периода. Во временном ряде соотношения **ЧДГ<sub>E</sub> / ЧДГ<sub>W</sub>** также выделяется тренд, имеющего вид полинома второй степени с тенденцией роста в последний двадцатилетний промежуток времени исследуемого периода. То есть, как было указано выше, в этот промежуток времени в Восточной Грузии по сравнению с Западной отмечался некоторый рост градобитий.



Рассмотрены особенности изменчивости числа дней с грозами в теплое полугодие  $P$  в условиях Грузии в период с 1941 по 1990 гг. При анализе были использованы данные 115 метеостанций. За исследуемый период картина изменчивости числа дней с грозами по отдельным метеостанциям следующая: рост  $P$  отмечался на 43 станциях, уменьшение - на 18, неизменность – на 54 станциях. То есть, в отличие от числа дней с градом, по отдельным станциям превалирует отсутствие изменчивости  $P$ .

На территории Западной Грузии среднее в теплое полугодие число дней с грозами меньше, чем в Восточной для всех указанных выше периодов времени (соответственно 32,1 и 37,3). Сравнение двух 20-летних периодов времени 1941-1960 и 1941-1990 гг. показало, что в общем изменчивость числа дней с грозами как для всей территории Грузии в целом, так и для ее Восточной и Западной частей незначительная.

Линейная корреляция между средним на одну метеостанцию числом дней с грозами в теплое полугодие в Восточной  $P_E$  и Западной Грузии  $P_W$  достаточно высокая для всех указанных трех периодов времени ( $R$  не менее 0,69). Отношение  $P_E/P_W$  составляет для 1941-1990 гг. 117 %, 1941-1960 гг. – 114 %, 1971-1990 гг. – 122 %. То есть, в Восточной Грузии по отношению к Западной Грузии, как и в случае с числом дней с градом, произошел некоторый рост числа дней с грозами в 1971-1990 гг. по сравнению с 1941-1960 гг.

В отличие от  $ЧДГ$ , временные ряды  $P_W$ ,  $P_E$  и  $P$  практически устойчивы во времени и не имеют выраженной тенденции к росту или убыванию. Имеется незначительная тенденция роста со временем отношения  $P_E/P_W$ . В целом изменчивость соотношения между Восточной Грузией и Западной по числу дней с градом в 1960-1941 и 1971-1990 гг. выражена значительно сильнее, чем по числу дней с грозами.

Таким образом, отсутствие трендов по числу дней с грозой свидетельствует о том, что условия образования конвективных процессов в целом для Грузии, а также ее Восточной и Западной частей, с течением времени существенно не менялись и на отрицательные тренды числа дней с градом оказывать влияния не должны.

Проведены исследование изменчивости среднего на метеостанцию  $ЧДГ$  и  $P$  в районах, где проводились противоградовые работы (Кахетия, Южная Грузия). Сравнивались данные о  $ЧДГ$  и  $P$  в годы без воздействия (1941-1960) и с воздействием (1970-1989) для групп метеостанций, расположенных на контрольных ( $КТ$ ) и защищаемых ( $ЗТ$ ) территориях.  $ЗТ1$  – 8 метеостанций Кахетинского района (Ахмета, Сагареджо, Телави, Гурджаани, Кварели, Цнори, Лагодехи, Шираки),  $ЗТ2$  – 4 метеостанции Южной Грузии (Болниси, Тетри-Цкаро, Дманиси, Цалка),  $КТ1$  – (Бакуриани, Ципа, Сакара, Гудаури, Гори, Мухрани, Душети, Джава),  $КТ2$  – (Ахалкалаки, Боржоми, Абастумани, Ахалцихе, Бакуриани). Выбор контрольных территорий обусловлен значимостью корреляционных связей между  $ЗТ$  и  $КТ$  по числу дней с грозой и градом до начала работы противоградовой службы.

Выявлено, что в 1970-1989 гг по сравнению с 1941-1960 гг на  $ЗТ1$  произошел незначительный рост  $P$  (достоверность не хуже 80%). На остальных территориях изменений среднего на метеостанцию  $P$  для указанных периодов времени не наблюдалось. Что касается числа дней с градом, то с достоверностью не хуже 95% на всех исследуемых территориях в 1970-1989 гг по сравнению с 1941-1960 гг среднее на метеостанцию  $ЧДГ$  уменьшилось.

В то же время отношение числа дней с градом на  $ЗТ1$  к  $КТ1$  в 1941-1960 гг составило 71%, а в 1970-1989 гг – 96%. То же отношение на  $ЗТ2$  к  $КТ2$  в 1941-1960 гг составляло 62%, а в 1970-1989 гг – 131 %. То есть на обеих защищаемых территориях по отношению к соответствующим контрольным территориям в годы работы противоградовой службы среднее на метеостанцию количество градобитий увеличилось.

Показано, что в период с 1941 по 1990 гг в целом наблюдаются положительные тренды отношения числа дней с градом на  $ЗТ1$  к  $КТ1$  и на  $ЗТ2$  к  $КТ2$ , особенно в период

опытных и производственных работ по борьбе с градом. Кривые трендов трендов соответственно имеют вид полиномов четвертой и шестой степени.

Таким образом можно заключить, что условия образования конвективных процессов на **ЗТ** и **КТ** с течением времени происходили более-менее одинаково (отсутствие трендов по числу дней с грозой). В то же время наличие трендов в числе дней с градом указывает на изменение физических условий образования града в конвективных облаках, одним из важнейших факторов которых, по всей вероятности, является антропогенное загрязнение атмосферы, включая активные воздействия на атмосферные процессы.

*Во втором параграфе* представлен более подробный, чем в предыдущем, анализ данных о числе дней с градом и грозой в Кахетии в годы без воздействия (1941-1960) и функционирования противоградовой службы (1967-1989).

На **КТ1** в среднем на метеостанцию в первый период времени происходило 2,5 градобития в теплое полугодие, а во второй период времени – 1,3 (или примерно 52 % от первого периода). На **ЗТ1** соответственно эти значения составляют 1,76 и 1,3, или примерно 74 % от первого периода. То есть, на **ЗТ1** уменьшение **ЧДГ** происходило медленней, чем на **КТ1**. Или, иными словами, на **ЗТ1** по сравнению с **КТ1** число градобитий во второй период времени возросло более чем на 20 %.

На **КТ1** в первый период времени диапазон изменений **ЧДГ** составлял (0-15), а во второй период времени – (0-8). В функции распределения **ЧДГ** максимум как в первом, так и во втором периоде времени приходился на дни без града (32% и 42% соответственно). Таким образом, на **КТ1** наряду с уменьшением максимального **ЧДГ** во втором периоде времени возросла доля дней без града. На **ЗТ1** в функции распределения **ЧДГ** в первом периоде времени максимум приходился на значение 2 градобития в сезон. Во втором периоде времени характер функции распределения изменился и наряду с уменьшением наибольшего числа дней с градом, максимумом стало число дней без града. Таким образом, вид функции распределения **ЧДГ** на **ЗТ1** во второй период времени по характеру стал приближаться к виду этой функции для **КТ1** в первый и второй периоды времени.

Линейное регрессионное соотношение между **ЧДГ** на **КТ1** и **ЗТ1** в 1941-1960 и 1967-1989 гг вполне соответствует аналогичному соотношению для Восточной и Западной Грузии. В обоих случаях линия регрессии для второго периода времени параллельна линии регрессии для первого периода и расположена ниже. Таким образом, можно предположить, что в годы с высоким антропогенным загрязнением атмосферы как в целом для территории Восточной Грузии (по сравнению с Западной), так и для Кахетии (по сравнению с **КТ1**) уменьшение числа дней с градом, по всей видимости, имеет сходные причины.

Отметим, что общая тенденция к уменьшению числа дней с градом как на **КТ1**, так и на **ЗТ1** может быть связана и с общей тенденцией потепления климата в Восточной Грузии за последние 100 лет, хотя это требует дополнительных исследований. Таким образом, процессы изменения числа дней с градом на этих территориях не позволяют однозначно утверждать, что уменьшение **ЧДГ** в Кахетии произошло в результате работы противоградовой службы.

Динамика числа дней с грозами существенно отличается от динамики **ЧДГ**. Для целого ряда станций в значениях **Р** отмечаются положительные тренды, тогда как для **ЧДГ** таких трендов не было. На **ЗТ1** в целом превалирует положительная изменчивость **Р**, на **КТ1** – отсутствие. Функции распределения числа дней с грозой для обоих периодов времени для **КТ1** мало отличаются друг от друга. В функции распределения **Р** для **ЗТ1** во втором периоде времени максимум переместился в сторону увеличения числа дней с грозой. Соотношение между средним на одну метеостанцию числом дней с грозами на **ЗТ1** и **КТ1** для обоих периодов времени практически не изменилось и составило примерно 100%.

Линейное регрессионное соотношение между **Р** на **КТ1** и **ЗТ1** в 1941-1960 и 1967-1989 гг аналогично такому же соотношению для Восточной и Западной Грузии. В обоих

случаях линии регрессии для двух периодов времени близки друг к другу. Таким образом, в масштабе **КТ**, **ЗТ** и выше конвективные процессы, приводящие к грозообразованию, с течением времени не испытывают значительных изменений. Однако в микромасштабах изменение грозовой активности может быть значительным.

Для примера приведены данные о вариациях числа дней с близкими грозами и их продолжительности **П** в Телави и Душети, а также изменчивости соотношения указанных параметров в Телави (район с воздействиями) и Душети (фоновая станция) в 1967-1984 гг.

Получено, что изменчивость **Р** в Телави и Душети имеет противоположный ход – в Телави слабый положительный тренд, в Душети – отрицательный. Тренд **П** на обеих станциях отрицательный, однако в Душети он выражен более ярко, чем в Телави. Соответственно тренды соотношения числа дней с грозами и продолжительности гроз в Телави и Душети положительные. В данном случае можно предположить наличие эффекта влияния активных воздействий на градовые процессы в Кахетии на изменение продолжительности гроз.

Наконец отметим, что сопоставление результатов исследования изменчивости **ЧДГ** и **Р** в Восточной Грузии с изменчивостью облачности нижнего яруса, являющейся косвенной характеристикой грозо-градовых процессов, показало, что наибольшие положительные тренды облачности наблюдаются в районах с активными воздействиями на атмосферные процессы (Кахетия, Южная Грузия). Для Кахетии тенденция роста облачности нижнего яруса совпадает с общим положительным трендом числа дней с грозами и противоположна трендам числа дней с градом.

*Третий параграф* посвящен результатам исследований особенностей изменчивости некоторых параметров градовых процессов в Кахетии в период с 1967 по 1984 гг, когда противорадовые работы проводились по методике Института геофизики АН Грузии. Результаты анализа изменчивости параметров градовых процессов и воздействия в частности показали следующее.

Среднее значений количества подвергнутых воздействию облаков **Y(1)** составляет 692 и меняется от 385 до 1083. Тренд **Y(1)** положительный, линейный; в 1980-1984 гг по сравнению с 1967-1971 гг значение **Y(1)** выросло на 63 % по экспериментальным данным и на 68 % по расчетной линии регрессии.

Среднее количество реагента, рассеянного на площади 10000 га **Y(2)**, составляет 94,4 кг и меняется от 29 до 186 кг. Тренд **Y(2)** линейный, положительный. Значение **Y(2)** в 1980-1984 гг по сравнению с 1967-1971 гг увеличилось в 1,59 раза по наблюдаемым значениям и в 1,51 раза по расчетной линии регрессии. Это хорошо соответствует росту количества подвергнутых воздействию градоопасных облаков в указанный период времени.

Тренд количества реагента, введенного в одно облако **Y(3)**, слабый отрицательный линейный, практически малозначимый. В течение лет значение **Y(3)** менялось от 3,4 до 186 кг при среднем значении 10,7 кг (или примерно 48 ракет “Алазани”). Таким образом, в исследуемый период существенных отклонений от используемой методики введения реагента в облака не наблюдалось.

Значение площади, пораженной одним градобитием на 100% **Y(4)**, меняется от 32 га до 370 га при средней величине 176 га. Тренд **Y(4)** линейный отрицательный. Значение **Y(4)** в 1980-1984 гг по сравнению с 1967-1971 гг сократилась в среднем на 35% по экспериментальным данным и на 43% по расчетной линии регрессии.

Величина площади, пораженной одним обработанным облаком на 100% **Y(5)**, в среднем составляет 4,0 га и меняется в течение лет от 9,0 до 1,3 га. Тренд в ряде **Y(5)** отсутствует.

Доля градовых облаков из подвергнутых воздействию **Y(6)** в среднем составляет 2,6 % и меняется от 1,3% до 4,5%. Тренд **Y(6)** линейный положительный. В 1980-1984 гг по

сравнению с 1967-1971 гг значение  $Y(6)$  увеличилось в 1,5 раза для реальных данных и в 1,45 раз для данных линии регрессии.

Осредненное на метеостанцию количество осадков  $Y(7)$  в среднем составляет 549 мм и меняется от 351 до 860 мм. Тренд  $Y(7)$  линейный положительный. В 1980-1984 гг по сравнению с 1967-1971 гг величина  $Y(7)$  увеличилась на 27 % по измеренным значениям и на 18% по расчетной линии регрессии.

Среднее значение ожидаемых случаев града  $Y(8)$  составляет 159 и меняется от 71 до 243. Тренд  $Y(8)$  линейный положительный. В 1980-1984 гг по сравнению с 1967-1971 гг значение  $Y(8)$  увеличилась примерно в 1,53 раза как для экспериментальных данных, так и для данных линии регрессии.

Среднее значение фактических случаев града  $Y(9)$  равно 18,6 и меняется от 6,8 до 42,3. Тренд значений  $Y(9)$  удовлетворительно аппроксимируется степенной функцией времени с показателем степени в виде обратно-временной функции. Соотношение между средними значениями случайной компоненты фактических случаев града и ее измеренными величинами - 81 %. Среднее значение  $Y(9)$  в 1980-1984 гг по сравнению с 1967-1971 гг увеличилась в 2,3 раза по измеренным значениям и в 1,8 по расчетной линии тренда. Отметим, что фактическое количество случаев града возросло значительно больше, чем ожидаемое. И хотя между ними имеется достаточно высокая линейная корреляционная связь ( $R = 0,66$ ), это указывает на необходимость в случае возобновления противоградовых работ дальнейшего совершенствования методики распознавания градоопасности облаков.

Доля защищаемой территории, побитой градом на 100%  $Y(10)$ , в среднем составляет 0,36% и меняется от 0,09 до 0,96%. Тренд значений  $Y(10)$  удовлетворительно аппроксимируется той же функцией, что и ряд  $Y(9)$ . Соотношение между средними значениями случайной компоненты доли защищаемой территории, побитой градом на 100%, и ее измеренными величинами составляет 83 %. Среднее значение  $Y(10)$  в 1980-1984 гг по сравнению с 1967-1971 гг увеличилось в 1,83 раза как по измеренным значениям, так и по расчетной линии тренда.

Среднее значение эффективности воздействия на градовые процессы  $Y(11)$  равно 82,5% и меняется от 53 до 98%. Тренд значений  $Y(11)$  удовлетворительно аппроксимируется неполной гамма-функцией. Соотношение между средними значениями случайной компоненты эффективности воздействия и ее измеренными величинами составляет 26%. Среднее значение  $Y(11)$  в 1980-1984 гг по сравнению с 1967-1971 гг уменьшилось на 12 % по реальным значениям и на 15 % по расчетной линии тренда.

Оценка репрезентативности метеостанций для характеристики градобитий показала, что одна метеостанция характеризует среднее число дней с градом в сезон на площади примерно 400 км<sup>2</sup> за период времени более 10-13 лет. Для обнаружения трендов внутри короткого промежутка времени (15-20 лет) 8 метеостанций для Кахетинского региона недостаточно. Соответственно для этих целей и использованы данные противоградовой службы.

Показано, что до начала работ по воздействию, в Кахетии в среднем на 100% поражалось градом 2% ЗТ1, в годы с воздействием (1967-1989) – 0,48% ЗТ1, в годы после прекращения воздействия (1990-2000) – 2,6% ЗТ1.

Получено, что на ЗТ1 в среднем в год фиксировалось 19 случаев града. Количество интенсивных процессов (поражение территории на 60-100%) в среднем в год составляет 4,56 случаев, а малоинтенсивных (поражение территории на 10-60%) – 14,4 случаев. Средняя площадь поражения на 100% на все виды градобитий в период работы противоградовой службы составляла 3770 га в год. Площадь поражения на 100 % в год на все интенсивные процессы составляет 2750 га, а на малоинтенсивные – 1020 га (или, соответственно, 0,35% и 0,13% ЗТ1). На одно градобитие в общем случае, на одно интенсивное и одно

малоинтенсивное градобитие в среднем соответственно приходится 200, 600 и 70 га поврежденной территории, или 0,0255; 0,0764 и 0,00892 % ЗТ1.

*В четвертом параграфе* проведен анализ связи грозовых и градовых явлений.

Установлены скорости роста закрепленной в вертикальной аэродинамической трубе и свободно взвешенных в затопленной струе моделей градин в искусственной облачной среде в зависимости от ее температуры, влажности и степени заряжения. В частности получено, что:

Скорость прироста массы льда  $M'$  и значение интегрального коэффициента захвата  $E$  для модели закрепленной градины при любых условиях роста в заряженной облачной среде выше, чем в нейтральной. При этом роль заряжения облачной среды в изменчивости  $E$  и  $M'$ , в особенности  $E$ , довольно существенна. В условиях же сухого роста эта роль в изменчивости  $E$  и  $M'$  проявляется еще более четко.

Интенсивность роста массы и размеров свободно взвешенных градин в заряженной облачной среде, как и для случая с закрепленной, также выше, чем в нейтральной (сухой рост, облачная среда пульверизационная). При этом значение  $E$  для градин диаметром 20-35 мм в нейтральной среде в среднем составляет  $0,59 \pm 0,067$ , а в заряженной -  $0,70 \pm 0,063$ . Таким образом, рост градин существенно зависит от электрического состояния облачной среды.

Для натуральных условий наибольшее количество данных имеется о числе дней с грозами и градом. Учитывая, что число гроз тесно связано с количеством молниевых разрядов, в целом ряде исследований проводится изучение отношения числа случаев града к числу случаев с грозами. Введен специальный термин, называемый градообразующим фактором гроз  $j$ , который и является этим соотношением. При этом известно, что с увеличением частоты гроз их градообразующий фактор уменьшается.

Показано, что для территории Грузии в целом, ее Западной и Восточной частей, ЗТ1 и КТ1 между средним на метеостанцию ЧДГ и Р в 1941-1990, 1941-1960, 1971-1990 гг в основном наблюдалась значимая положительная линейная корреляционная связь (за исключением ЗТ1 для периода 1941-1960 гг и КТ1 для периода 1967-1989 гг, где корреляция малозначимая).

В период с 1941 по 1990 гг для территории Грузии в целом, ее Западной и Восточной частей среднее на метеостанцию значение  $j$  составляет соответственно 3,73 %, 3,04 % и 4,94 %. Для всех периодов значения  $j$  в Восточной Грузии выше, чем в Западной. Во второй период времени по сравнению с первым величина  $j$ . При этом указанное уменьшение для территории Грузии, ее Западной и Восточной частей происходит одинаково, примерно на 42%. На КТ1 величина  $j$  в годы с воздействием по сравнению с годами без воздействия уменьшилась на 52%, тогда как ЗТ1 это уменьшение составило всего 31 %.

Анализ линейных корреляционных и регрессионных связей среднего на метеостанцию значений  $j$  и Р для территории Грузии, ее Западной и Восточной частей в 1941-1960 гг и 1971-1990 гг. показал следующее. Если в первый период времени эта связь была обратная, что вполне согласуется с общепринятыми воззрениями по этому вопросу, то во второй период времени, когда уровень загрязненности атмосферы значительно возрос, связь  $j$  с Р стала положительной. При этом теснота корреляционной связи между указанными параметрами в период 1971-1990 гг в Восточной Грузии оказалась выше, чем в Западной ( $R = 0,41$  и  $0,12$  соответственно), тогда как в период 1941-1960 гг теснота этой связи в Восточной и Западной Грузии была одинакова ( $R = -0,28$  и  $-0,33$  соответственно).

Что касается ЗТ1 и КТ1, то для этих территорий картина следующая. В годы до воздействия на атмосферные процессы на ЗТ1 корреляция между  $j$  и Р была хоть и слабая, но отрицательная ( $R = -0,22$ ). В годы с воздействием эта связь полностью исчезла. В первый период времени на КТ1 корреляция между  $j$  и Р была значимая отрицательная ( $R = -0,51$ ). Во второй период времени она стала незначимой. То есть тенденция изменчивости связи между

**ж** и **Р** во второй период времени для **ЗТ1** и **КТ1** аналогична этой тенденции для территории Грузии и ее обеих указанных выше частей.

Таким образом, учитывая, что долговременные вариации числа дней с грозами на указанных выше территориях Грузии не претерпевали значительных изменений, что является признаком относительной устойчивости во времени возникновения конвективных процессов, можно заключить, что одной из основных причин эффекта изменения во времени обратной связи градообразующего фактора гроз с числом дней с грозами на прямую, является рост антропогенного загрязнения атмосферы.

**Шестая глава**, в которой проведены оценки влияния антропогенного загрязнения атмосферы на изменчивость грозовых и градовых процессов, представлена пятью параграфами.

*В первом параграфе* изучена роль искусственных льдообразующих реагентов и радиоактивных примесей в атмосфере в изменчивости грозовой активности в Телави в 1967-1984 гг. В качестве фоновой станции взята Душети.

Представлены результаты комплексного анализа данных об изменении числа дней с грозами в теплое полугодие **Р**, продолжительности гроз **П**, продолжительности грозового дня **П<sub>д</sub>**, соотношений между указанными параметрами в Телави и Душети (**Р(Т/Д)**, **П(Т/Д)** и т.д.) при различных уровнях радиоактивных выпадений **В** и масштабов активных воздействий на облака (**Ж** – количество ракет “Алазани”). За фоновую относительную продолжительность гроз в Телави принято значение соотношения между **П** в Телави и **П** в Душети в годы до активных воздействий (1946-1960), равное  $(115 \pm 8) \%$ .

Корреляционный анализ зависимости числа грозовых разрядов **Nt** от **В** показал, при **В** > 3,0 Бк/м<sup>2</sup>·сутки теснота положительной корреляционной связи между **Nt** и **В** значительно выше, чем при **В** ≤ 3,0 Бк/м<sup>2</sup>·сутки. Поэтому при дальнейшем анализе уровень радиоактивного фона условно разделен на два диапазона: **В** ≤ 3,0 Бк/м<sup>2</sup>·сутки, и **В** > 3,0 Бк/м<sup>2</sup>·сутки.

Получено, что при значениях **В** ≤ 3,0 Бк/м<sup>2</sup>·сутки воздействие на облака в Телавском районе приводило к увеличению **П(Т/Д)**, за исключением одного сезона, когда в облака в общей сложности было введено максимальное количество ядер кристаллизации (более  $5 \cdot 10^{19}$ ) с помощью 10300 ракет “Алазани”. Зависимость изменения продолжительности гроз от количества введенного в облака реагента в данном случае имеет нелинейный характер, описываемый полиномом второй степени:

$$\mathbf{П(Т/Д) = -0,000002994 \cdot J^2 + 0,0335 \cdot J + 82,55 \quad (R^2 = 0,69)}$$

Введение в облака от 1400 до 6800 ракет в сезон способствовало увеличению продолжительности гроз, более 6800 ракет в сезон – уменьшению этой продолжительности.

В отличие от вышеуказанного, при **В** > 3,0 Бк/м<sup>2</sup>·сутки зависимость изменения продолжительности гроз от количества реагента, внесенного в облака, близка к линейной.

$$\mathbf{П(Т/Д) = 0,0114 \cdot J + 62,94 \quad (R^2 = 0,64)}$$

Введение дополнительных ядер кристаллизации до значений  $2,1 \cdot 10^{19}$  в сезон (4200 ракет) приводило в уменьшению сезонной продолжительности гроз в Телави, а выше этого значения – к увеличению **П(Т/Д)**.

В общем, если в качестве основного критерия эффекта одновременного действия на грозовую активность в Телавском районе радиоактивных примесей и искусственных льдообразующих аэрозолей взять изменение соотношения в Телави и Душети параметров **Р**, **П** и **П<sub>д</sub>** по сравнению с годами без воздействия, получается следующая картина. В целом в годы с воздействием (18 лет) значения числа дней с грозами и продолжительность гроз в Телави не меняются, происходит рост средней продолжительности грозового дня. В сезоны с бета-радиоактивным фоном менее 3,0 Бк/м<sup>2</sup>·сутки (8 сезонов) число дней с грозами в Телави не меняется, растут продолжительность гроз в сезон и продолжительного грозового дня. В

сезоны с бета-радиоактивным фоном более  $3,0 \text{ Бк/м}^2 \cdot \text{сутки}$  (10 сезонов) в Телави отмечается уменьшение числа дней с грозами, неизменность сезонной продолжительности гроз и рост продолжительности грозового дня.

Таким образом, наличие радиоактивных примесей в атмосфере в определенной мере оказывает влияние на электрические процессы, протекающие в облаках и, соответственно, на результаты искусственного воздействия на них. До конца механизмы этого влияния еще не выяснены. О некоторых из них было сказано в предыдущих разделах. Здесь дополнительно отметим, что радиоактивные примеси помимо непосредственного участия в изменении электрической и микрофизической структуры облаков могут также являться трассерами других малых составляющих атмосферы (льдообразующих ядер, аэрозолей и др.) или метеорологических элементов (например, осадков) и влияние последних маскироваться радионуклидами. Однако четкое разделение действия перечисленных факторов по отдельности – дело будущих исследований.

*Во втором параграфе* представлены результаты исследования влияния аэрозольного загрязнения атмосферы на грозовую активность.

Рассмотрено влияние аэрозольного загрязнения атмосферы, показателем которого взята **АОД**, на параметры грозовой активности **Р**, **П** и **П<sub>д</sub>** в Тбилиси и Телави. В качестве фоновой станции для Тбилиси, как и для Телави, взята станция Душети. Соотношения между указанными параметрами для Тбилиси и Душети обозначены через **Р(Тб/Д)** и т.д. Периоды сравнения и разделение данных по уровням бета-радиоактивного фона те же, что и в предыдущем параграфе. За фоновую относительную продолжительность гроз в Тбилиси принято значение соотношения между **П** в Тбилиси и **П** в Душети в годы до активных воздействий (1946-1960), равное  $(57 \pm 6) \%$ .

Получено, что при  $\mathbf{B} > 3,0 \text{ Бк/м}^2 \cdot \text{сутки}$  значения коэффициента корреляции между соотношениями **П(Тб/Д)** и **АОД**, **П(Т/Д)** и **АОД**, **П(Т/Д)** и **Ж** выше, чем в целом по периоду с 1967-1984 гг (соответственно **R** = 0,57 и 0,32; 0,57 и 0,47; 0,80 и 0,32).

Это соотношение для обеих станций при  $\mathbf{B} \leq 3,0 \text{ Бк/м}^2 \cdot \text{сутки}$  больше, чем при  $\mathbf{B} > 3,0 \text{ Бк/м}^2 \cdot \text{сутки}$  (соответственно для **П(Т/Д)** - 142 %, **П(Тб/Д)** - 77 % и для **П(Т/Д)** - 115 %, **П(Тб/Д)** - 65 %). Значения этих соотношений во всех случаях при  $\mathbf{B} \leq 3,0 \text{ Бк/м}^2 \cdot \text{сутки}$  находятся в основном выше фоновых для Телави и Тбилиси (7 сезонов из 8), а при  $\mathbf{B} > 3,0 \text{ Бк/м}^2 \cdot \text{сутки}$  в равной степени выше и ниже фоновых (по 5 сезонов). То есть в целом рост загрязненности атмосферы в Телави и Тбилиси способствует увеличению сезонной продолжительности гроз. При этом высокий радиоактивный фон ( $\mathbf{B} > 3,0 \text{ Бк/м}^2 \cdot \text{сутки}$ ) препятствует этому росту при уровнях загрязненности атмосферы в Тбилиси со значениями **АОД** до 0,140-0,150 и в Телави 0,120-0,130.

Следует отметить, что зависимость соотношения **П(Т/Д)** от количества введенных в облака ракет носит более четко выраженный характер, чем зависимость этого же соотношения от **АОД**. Этот факт можно объяснить тем, что данные о количестве ракет привязаны конкретно к дням с грозами, тогда как данные об **АОД** характеризуют среднесезонный уровень загрязненности атмосферы над пунктом наблюдения включая все дни с ясным небом. Однако сходство приведенных зависимостей соотношений **П(Т/Д)** и **П(Тб/Д)** соответственно от количества введенных в облака ракет и **АОД** довольно высокое и свидетельствует о сходстве физических процессов, протекающих в конвективных облаках при воздействии на них антропогенными аэрозолями и льдообразующим реагентом, с учетом радиоактивного фона.

В период с 1946 по 1960 гг в среднем значение **АОД** в составляло 0,080. В указанный период линейных корреляционных связей между **П(Тб/Д)** и **АОД**, а также **П(Т/Д)** и **АОД** не имелось. Эти связи возникли в период с 1967 по 1984 гг, когда уровень загрязненности атмосферы в Тбилиси и Телави возрос примерно в два раза. Эффект действия на грозовую активность аэрозольного загрязнения атмосферы в Тбилиси и Телави (включая активные

воздействия на градовые процессы) проявляет себя практически одинаково. В годы с высоким уровнем аэрозольного загрязнения атмосферы (1967-1984 гг) по сравнению с периодом без воздействий (1946-1960 гг) с учетом изменений грозовой активности на фоновой станции в Душети, в Тбилиси отмечается уменьшение числа дней с грозами на 16 % (при  $V > 3,0$  Бк/м<sup>2</sup>·сутки), рост сезонной продолжительности гроз на 12 % (при  $V \leq 3,0$  Бк/м<sup>2</sup>·сутки) и рост продолжительности грозового дня в среднем на 24 % при обоих уровнях  $V$ .

Исследования зависимости средней по пятилеткам в период с 1948 по 1982 гг значений продолжительности грозового дня в Тбилиси, Телави и Душети от аэрозольной оптической толщи атмосферы показали следующее. Для Тбилиси и Душети зависимость  $\Pi_d$  от  $AOD$  описывается полиномом четвертой степени, для Телави – третьей степени.

В Тбилиси с ростом  $AOD$  до значений 0,150-0,160 увеличивается и  $\Pi_d$  с 1,2 до 2,2 час. С увеличением загрязненности атмосферы до  $AOD = 0,180$  продолжительность грозового дня убывает до 1,5 час. То есть, возможно, срабатывает эффект “перезасева”.

В Телави зависимость  $\Pi_d$  от  $AOD$  не имеет такого ярко выраженного характера, как в Тбилиси. Отмечается рост  $\Pi_d$  с увеличением  $AOD$ , а затем некоторая стабилизация с тенденцией уменьшения по мере увеличения загрязненности атмосферы. В данном случае это видимо связано с наличием в атмосфере наряду с аэрозолями индустриального происхождения и льдообразующих частиц реагента противогрозовых ракет.

В Душети связь  $\Pi_d$  с  $AOD$  в Тбилиси для указанного периода осреднений слабая.

Третий параграф посвящен изучению связи интенсивности грозовых процессов с аэрозольным загрязнением атмосферы.

В данном параграфе проведены оценки влияния параметров аэрозольного загрязнения атмосферы ( $AOD$  в Тбилиси,  $V$  бета-радиоактивные выпадения,  $ЭПВ$  в Душети) на такие характеристики грозовых процессов, как количество молниевых разрядов  $Y$  и их интенсивность  $Nt$ , логарифм множителя максимальной радиолокационной отражаемости облаков  $LgZm$ , радиолокационный параметр грозоопасности  $R_t$ . Эмпирические модели связи интенсивности грозовых процессов с аэрозольным загрязнением атмосферы получены на основании парного и множественного линейного и нелинейного корреляционного и регрессионного анализа данных.

Связь числа молниевых разрядов в Душети с  $AOD$  в Тбилиси носит описывается полиномом второй степени. С ростом  $AOD$  от 0,12 до 0,17 количество разрядов убывает примерно от 6000 до 2800. Затем, с ростом  $AOD$  от 0,17 до 0,21 число разрядов в сезон увеличивается до 4000.

Связь числа молниевых разрядов  $ЭПВ$  также описывается полиномом второй степени. В данном случае при изменении  $ЭПВ$  от  $31 \cdot 10^{-15}/\text{ом} \cdot \text{м}$  до  $40 \cdot 10^{-15}/\text{ом} \cdot \text{м}$  число разрядов меняется слабо. Дальнейший рост  $ЭПВ$  до  $48 \cdot 10^{-15}/\text{ом} \cdot \text{м}$  приводит к увеличению числа разрядов примерно от 2000 до 8000 в сезон.

Связь между числом молниевых разрядов и  $V$  имеет вид полинома третьей степени. Как уже было отмечено в первом параграфе при значениях  $V \leq 3,0$  Бк/м<sup>2</sup>·сутки вариации числа разрядов большие и связь их с  $V$  не прослеживается. Однако с дальнейшим ростом  $V$  отмечается и рост количества разрядов. Так, число грозовых разрядов в Душети увеличивается от 2000 до 8000 при росте  $V$  от 6 до 15 Бк/м<sup>2</sup>·сутки.

Связь интенсивности молниевых разрядов в Душети с  $AOD$  в Тбилиси описывается полиномом четвертой степени. С ростом  $AOD$  от 0,11 до 0,125 интенсивность молниевых разрядов уменьшается с 115 разр/час до 40 разр/час. Затем при изменении  $AOD$  от 0,125 до 0,185 интенсивность молниевых разрядов меняется слабо. При дальнейшем росте  $AOD$  от 0,185 до 0,195 интенсивность грозовых разрядов увеличивается от 30-40 разр/час до 70 разр/час.



Связь интенсивности молниевых разрядов с **B** описывается полиномом третьей степени. В данном случае при изменении **B** от 1,5 до 10 Бк/м<sup>2</sup>·сутки интенсивность разрядов меняется слабо. С дальнейшим ростом **B** до 20 Бк/м<sup>2</sup>·сутки интенсивность молниевых разрядов увеличивается примерно с 60 до 100 разр/час. Последующее увеличение бета-радиоактивного фона до 26 Бк/м<sup>2</sup>·сутки связано с уменьшением интенсивности молниевых разрядов со 100 до 50 разр/час.

Связь продолжительности грозового дня в Душети с **AOD** в Тбилиси по данным месячных наблюдений (1971-1973 гг) описывается полиномом второй степени. С ростом **AOD** от 0,11 до 0,150-0,160 значение **П<sub>д</sub>** убывает примерно с 170 мин. до 115 мин. Дальнейший рост **AOD** от 0,160 до 0,195 связан с увеличением продолжительности грозового дня с 115 мин. до 140 мин.

Соотношение между продолжительностью грозового дня и **B** имеет вид полинома третьей степени. С увеличением **B** от 1,5 до 10 Бк/м<sup>2</sup>·сутки значение **П<sub>д</sub>** растет примерно от 90 мин. до 140 мин. В диапазоне значений **B** от 10 до 20 Бк/м<sup>2</sup>·сутки продолжительность грозового дня меняется слабо. Дальнейший рост **B** до 26 Бк/м<sup>2</sup>·сутки связан с увеличением **П<sub>д</sub>** до 180 мин.

Связь **LgZm** с **AOD** в Телави описывается полиномом третьей степени. С ростом **AOD** от 0,090 до 0,180 значение **LgZm** уменьшается примерно с 2,7 до 2. Затем при росте **AOD** от 0,180 до 0,230 величина **LgZm** растет от 2 до 2,6.

Характер связи радиолокационного параметра грозоопасности с **AOD** аналогичен связи **LgZm** с **AOD**. Вначале с ростом **AOD** от 0,090 до 0,170 значение **R<sub>t</sub>** убывает примерно с 16 до 10. Затем при росте **AOD** от 0,170 до 0,230 величина **R<sub>t</sub>** слабо растет от 10 до 12.

Связь **LgZm** с **B** имеет вид полинома третьей степени. В данном случае при изменении **B** от 1 до 10 Бк/м<sup>2</sup>·сутки значение **LgZm** слабо убывает примерно от 2,4 до 2,2. С дальнейшим ростом **B** до 16 Бк/м<sup>2</sup>·сутки величина **LgZm** увеличивается примерно с 2,2 до 3,0.

Характер связи радиолокационного параметра грозоопасности с **B** аналогичен предыдущему случаю и также имеет вид полинома третьей степени. В данном случае при изменении **B** от 1 до 6 Бк/м<sup>2</sup>·сутки значение **R<sub>t</sub>** слабо убывает примерно от 13 до 11. С дальнейшим ростом **B** до 16 Бк/м<sup>2</sup>·сутки величина **R<sub>t</sub>** увеличивается примерно с 11 до 14,5.

Представлены также примеры моделей двумерных нелинейных зависимостей параметров грозовой активности от **AOD** и **B**. Показано, что в целом эти связи имеют достаточно сложный характер. Загрязнение атмосферы в зависимости от его характера и уровня может приводить как к росту, так и к уменьшению интенсивности грозовых процессов.

*В четвертом параграфе* исследована связь интенсивности градовых процессов с аэрозольным загрязнением атмосферы.

Проведены оценки изменчивости некоторых параметров градовых процессов в условиях Кахетии под влиянием аэрозольного загрязнения атмосферы в годы работы противоградовой службы в период с 1967 по 1984 гг.

Получено, что при низких уровнях бета-радиоактивных выпадений и высоких значениях аэрозольной оптической толщи атмосферы (**B** ≤ 3 Бк/м<sup>2</sup>·сутки, **AOD** = 0,179) по сравнению с высокими уровнями бета-радиоактивного фона и низкими величинами аэрозольной оптической толщи атмосферы (**B** > 3 Бк/м<sup>2</sup>·сутки, **AOD** = 0,129) наблюдалась следующая изменчивость указанных характеристик градовой активности в Кахетии: рост количества подвергнутых воздействию облаков на 25 %, рост ожидаемого количества случаев града на 16 %, рост фактического количества случаев града на 58 %, увеличение пораженной на 100 % доли защищаемой территории на 25 %, уменьшение эффективности воздействия на 5 %. Таким образом, как и в случаях с грозовой активностью, прослеживается действие аэрозольного загрязнения атмосферы и на параметры градовой активности облаков.

Одними из важнейших параметров градовой активности являются доля защищаемой территории, поврежденная градом на 100 %  $Y(10)$ , и эффективность воздействия  $Y(11)$ , характеризующими интенсивность градовых процессов. Множественный линейный регрессионный анализ показал, что между значениями  $Y(10)$ ,  $Y(11)$  и количеством реагента, введенного в одно облако  $Y(3)$ ,  $AOD$  и  $B$  имеются следующие линейные регрессионные связи с совокупным коэффициентом корреляции, равным соответственно 0,73 и 0,70.

$$Y(10) = 0,003668 Y(3) + 1,723 AOD + 0,006353 B - 0,286$$

$$Y(11) = - 0,136 Y(3) - 91,72 AOD - 0,30765 B + 110,95$$

Анализ этих уравнений показывает, что изменчивость одной из независимых переменных в пределах вариационного размаха при неизменном значении двух других может приводить к изменчивости  $Y(10)$  в следующих пределах : за счет  $Y(3)$  – 162 %,  $AOD$  – 73%,  $B$  – 25 %, а  $Y(11)$  - за счет  $Y(3)$  – 26 %,  $AOD$  – 17%,  $B$  – 5 %. Таким образом, в годы с активными воздействиями в Кахетии интенсивность градовых процессов главным образом была связана с производственной деятельностью противоградовой службы (количество введенных в одно облако противоградовых ракет). В то же время существенный вклад в изменчивость интенсивности градобитий вносило аэрозольное загрязнение атмосферы. Бета-радиоактивные загрязнения также имели определенное влияние на интенсивность градовых процессов, но значительно меньшее, чем два первых фактора.

Следует отметить, что связи параметров градовой активности облаков с аэрозольным загрязнением атмосферы несколько лучше описываются нелинейными уравнениями.

Связь количества случаев града с аэрозольной оптической толщиной атмосферы в Телави описывается полиномом третьей степени. При значениях  $AOD$  от 0,075 до 0,120 значения  $Y(9)$  изменяются незначительно. С дальнейшим ростом  $AOD$  от 0,120 до 0,200 количество случаев града на ЗТ1 увеличивается примерно от 10 до 28. С еще большим ростом  $AOD$  наблюдается тенденция убывания числа случаев града.

Связь количества случаев града с  $B$  можно описать полиномом третьей степени. В целом с ростом  $B$  происходит уменьшение количества случаев града на ЗТ1. Так, при росте  $B$  от 1 до 15 Бк/м<sup>2</sup>·сутки число случаев града на защищаемой территории уменьшается примерно от 25 до 5.

Зависимость доли защищаемой территории, поврежденной градом на 100 %, от  $AOD$  описывается полиномом четвертой степени. В общем с ростом  $AOD$  происходит волнообразное изменение в сторону увеличения значения  $Y(10)$ .

Связь доли защищаемой территории, поврежденной градом на 100 %, с  $B$  также описывается полиномом четвертой степени. В отличие от предыдущего случая с ростом  $B$  происходит волнообразное изменение в сторону уменьшения значения  $Y(10)$ .

Уравнение множественной линейной регрессии между средним на метеостанцию количеством осадков  $Y(7)$ ,  $Y(3)$ ,  $AOD$  и  $B$  имеет вид:

$$Y(7) = 13 Y(3) + 1506,65 AOD + 3,684 B + 161,37 \quad (R^2 = 0,283)$$

Изменчивость в пределах вариационного размаха каждой из независимых переменных при неизменности других приводит к следующей изменчивости количества осадков: за счет количества вводимого в облака реагента – на 38,1%, за счет аэрозольного загрязнения атмосферы – на 41,1 %, за счет бета-радиоактивного фона – на 9,5%.

Представлены также примеры моделей двумерных нелинейных зависимостей параметров градовой активности от  $AOD$  и  $B$ .

Таким образом, интенсивность градовых процессов, как и грозовых, существенно зависит от аэрозольного загрязнения атмосферы, хотя эта зависимость имеет достаточно сложный характер. В целом рост нерадиоактивного аэрозольного загрязнения атмосферы приводил к усилению интенсивности градобитий и соответственно к уменьшению эффективности воздействия противоградовых работ. Поэтому в дальнейшем, в случае

восстановления работы противоградовой службы, фактор антропогенного загрязнения атмосферы должен быть учтен в методике воздействия на градовые процессы.

В пятом параграфе проведено изучение чувствительности суточных вариаций интенсивности градовых процессов к изменчивости аэрозольного загрязнения атмосферы.

Представлен анализ данных о жидких осадках для Телави в 1967-1970 гг, и градодождемерной сети о жидких и твердых осадках для Кахетинского региона в теплое полугодие 1964-1966 гг. Получены следующие результаты.

Среднесуточное количество осадков в Телави в будние дни по всем данным (240 измерений) составляет 6,77 мм, а в выходные дни (102 измерения) - 4,91 мм. Количество осадков в будние дни с грозами составляет 8,98 мм, а в выходные дни с грозами - 6,79 мм. Суточное количество осадков в будние без гроз равно 5,18 мм, а в выходные дни без гроз 3,01 мм.

Аналогичный результат также получается при анализе данных градодождемерной сети. Среднее на один градодождемер количество жидких осадков в будние дни составляет 15 мм, а в выходные - 9,37 мм. Количество твердых осадков на один градодождемер в будние дни составляет 2,28 мм, а в выходные - 1,04 мм. Сумма жидких и твердых осадков в будние дни примерно в 1,65 раза выше, чем в выходные. Для всех перечисленных случаев в соответствии с критерием Стьюдента с уровнем значимости не хуже 0,2 суточное количество жидких и твердых осадков в будние дни выше, чем в выходные.

В недельном ходе жидких и твердых осадков (по данным градодождемеров) минимум наблюдался в воскресенье (в указанный период времени была 6-дневная рабочая неделя). Кроме этого имеется два экстремума, во вторник и пятницу, объяснение наличия которых требует дальнейших исследований.

Недельный ход **LgZm** (данные 899 измерений 1972-1976 гг) аналогичен ходу количества жидких и твердых осадков, с минимумом в выходные дни (в данном случае была уже 5-дневная рабочая неделя) и двумя экстремумами во вторник и пятницу.

Анализ данных противоградовой службы о площадях, пораженных градом на 100%, показал, что в период с 1984 по 1989 гг интенсивность градобитий в Кахетии в будние дни была выше, чем в выходные (соответственно 161 и 137 га пораженной на одно градобитие территории). Таким образом можно полагать, что и во второй половине 80-х годов прошлого столетия эффект роста интенсивности градобитий в будние дни по сравнению с выходными сохранился.

Наконец, представлены результаты проведенного нами анализа литературных данных об интенсивности градобитий на Северном Кавказе в будние и выходные дни (Тлисов и др.). С достоверностью не хуже 90% по двустороннему критерию Манна-Уитни на Северном Кавказе в 1983-1990 гг в будние дни масса, энергия и количество выпавших градин была выше, чем в выходные дни. Разница в размерах града незначима. В будние дни по сравнению с выходными (данные 1982-1989 гг) происходит рост доли капельных зародышей града и убывание доли крупяных зародышей. Рост доли капельных зародышей в будние дни может быть обусловлен увеличением содержания в атмосфере в эти дни крупнодисперсной фракции аэрозолей, способствующей образованию капельных зародышей града. Иными словами в будние дни по сравнению с выходными растет вероятность роста града по механизму теплового дождя, что и приводит к более высокой интенсивности градобитий из-за более высокой плотности града в эти дни. Этот эффект находится в хорошем соответствии с тем фактом, что в будние дни количество выпадающих осадков выше, чем в выходные.

Таким образом на Северном Кавказе, как и в Кахетии, интенсивность градобитий в будние дни выше, чем в выходные. Соответственно можно предположить, что в указанный период времени эффект антропогенного загрязнения атмосферы в изменчивости интенсивности градовых процессов носил региональный характер.

## Основные выводы

1. Проведено исследование пространственно-временного распределения аэрозольного загрязнения атмосферы над территорией Грузии (аэрозольная оптическая толщина атмосферы, бета-радиоактивные выпадения, счетная концентрация твердых аэрозолей и содержание продуктов радона в нижней тропосфере до уровня 5000 м).

1.1 Установлены антропогенные, случайные и фоновые значения **AOD** для различных районов Грузии в период с 1928 по 1990 гг. Между станциями отмечается высокая линейная корреляция как по наблюдаемым значениям **AOD**, так и по значениям их случайных составляющих. Временные ряды **AOD** автокоррелированы и степень автокоррелированности для различных периодов времени различна. Внесены поправки в значения доверительных интервалов для среднегодовых величин **AOD** с учетом автокорреляции.

1.2 Выявлено, что внутригодовой ход **AOD**, нормированного на его июльские значения, устойчив во времени. Имеется также полная устойчивость во времени соотношений между среднесезонными и среднегодовыми значениями **AOD**, а также относительного вертикального профиля **AOD** для малозагрязненных районов, нормированного на высоту 100 м.

1.3 Создана модель пространственно-временного распределения **AOD** в Грузии и построены карты, на которых представлена динамика изменения **AOD** над указанной территорией по пятилетним периодам с 1956 по 1990 гг. Оценен вклад локальных источников аэрозольного загрязнения атмосферы в значение **AOD**, который, в частности, в период с 1981 по 1990 гг в Тбилиси и Телави составляет по 33%, Анасеули, Сенаки, Сухуми – 10 %. Показано, что в будние дни значения **AOD** в Тбилиси и Кахетии выше, чем в выходные.

1.4 Проведен анализ изменчивости электропроводности приземного слоя воздуха в Душети в 1966-1990 гг и выявлена его обратная связь с **AOD** в Тбилиси по среднегодовым и дневным данным. Получены соответствующие регрессионные модели.

1.5 Результаты самолетных исследований аэрозольного загрязнения нижнего пятикилометрового слоя тропосферы и Кахетией в 1973-1977 гг. в частности показали следующее. Более 70% массы аэрозолей размерами 0,2 - 4,0 мкм сосредоточена в нижнем трехкилометровом слое атмосферы. В безоблачные дни над Кахетией масса аэрозолей в вертикальном столбе воздуха высотой 5 км составляет 66 мг/м<sup>2</sup>, в дни с кучевыми облаками – 90 мг/м<sup>2</sup> и в дни с различной облачностью – 165 мг/м<sup>2</sup>. В Тбилиси доля **AOD** для минеральных аэрозолей от общего его значения составляет около 23%, для сульфатов – 26% и для индустриальной пыли, нитратов и др. – 50%. Показано, что в городской местности аэрозоль более гигроскопичен, чем в сельской. В Кахетии, значимое превышение содержания аэрозолей в будние дни по сравнению с выходными наблюдается на высоте 1,0 км для частиц с размерами  $d > 0,7$  мкм,  $2,0 \leq d < 4,0$  и  $d \geq 4,0$  мкм. Вариации **AOD** в Кахетии примерно на 49 % обусловлены содержанием радона в нижнем трехкилометровом слое атмосферы и всего на 10% твердыми аэрозолями размером выше 0,7 мкм.

1.6 В облаках, как и в свободной атмосфере, наблюдается прямая связь между уровнем ионизации воздуха (радон и космическое излучение) и содержанием ядер конденсации. Изменение интенсивности ионизации от 5,75 пар ионов см<sup>-3</sup>сек<sup>-1</sup> до 8,0 пар ионов см<sup>-3</sup>сек<sup>-1</sup> увеличивает содержание ядер конденсации в 1,56 раза. При этом доля интенсивности ионизации за счет радона и короткоживущих продуктов его распада невелика и не превышает 10 %.

1.7 Выявлена прямая корреляционная связь между **AOD** и содержанием озона в тропосфере над Тбилиси, свидетельствующая о важной роли озона в образовании вторичных аэрозолей. Показано, что **AOD** является достаточно репрезентативной характеристикой

загрязненности приземного воздуха аэрозолями малых размеров (по крайней мере до диаметра 0,8 мкм).

1.8 На основании несложных математических моделей проведен расчет накопления и распределения аэрозольной примеси в мощных конвективных облаках, а также закономерностей распространения в них льдообразующего реагента от трасс противораковых ракет “Алазани”. Сравнение расчетных и экспериментальных данных о накоплении пассивных и льдообразующих аэрозолей в облаках показали их качественное, а в ряде случаев и количественное согласие.

1.9 Разработана уточненная концепция взаимодействия аэрозолей с конвективными облаками с учетом электрических, ионизационных и др. процессов, протекающих в атмосфере и облаках. На основании концепции делается вывод, что это взаимодействие должно характеризоваться региональными особенностями, обусловленными как физическими условиями процессов образования облачности, так и физико-химическими свойствами аэрозольно-газового загрязнения воздуха.

2. Исследованы характеристики грозовой активности конвективных облаков в условиях Кахетии, изучена реакция электрического состояния облаков на активные воздействия льдообразующим реагентом, исследовано влияние гроз на содержание озона в тропосфере и химический состав осадков. В частности получены следующие результаты.

2.1 На один положительный разряд в среднем приходился заряд в 37 Кл, а на один отрицательный – 32 Кл. Средняя величина заряда, приходящаяся на один молниевый разряд по абсолютному значению составляла около 33 Кл. Отрицательные заряды переносятся в среднем с высоты 6,5 км, а положительные с высоты 7,5 км. Соотношение между числом внутриоблачных и наземных разрядов составляет 2,16. Средняя в сезон интенсивность суммарного числа внутриоблачных и наземных разрядов в условиях составляет  $(1,7 \pm 0,35) \cdot 10^{-3}$  разряд $\cdot$ мин $^{-1}$  $\cdot$ км $^{-2}$ .

2.2 Получены эмпирические связи частоты молниевых разрядов и величин зарядов, вовлеченных в молниевый разряд, с максимальной высотой радиолокационной отражаемости облаков, радиолокационным критерием грозоопасности, комплексным радиолокационным критерием градоопасности. Проведена классификация облаков по интенсивности их грозовой деятельности для условий Алазанской долины.

2.3 Созданы эмпирические модели распределения грозовых облаков с вертикальной мощностью более 6 км и плотности молниевых разрядов на землю для территории Кахетии. Количество облаков в сезон на площади 25 км $^2$  меняется от 3 до 35 при среднем значении 11,7, а число наземных молниевых разрядов от 13 до 377 при среднем значении 91. С высотой происходит рост числа грозовых зон и плотности разрядов на землю. Плотность наземных молниевых разрядов в течение одного дня с грозой составляет  $2,15 \pm 0,43$  разряда на 25 км $^2$  в день, а для общего числа наземных и внутриоблачных разрядов –  $6,8 \pm 1,4$  разряда на 25 км $^2$  в день. Подавляющее количество молниевых разрядов приходится на грозовые зоны с **Hm** от 8 до 12 км (около 87%). Наибольшая повторяемость значений **Hm** приходится на диапазон высот от 9 до 10 км, тогда как наибольший вклад в количество молниевых разрядов дают грозовые зоны с **Hm** от 10 до 11 км. Градоопасные облака с вероятностью выпадения града более 40% дают около 55% вклада в общую разрядную деятельность.

2.4 Разработана опытная методика воздействия на грозовые облака с использованием штатных средств противораковой защиты. Положительного эффекта воздействия удалось достичь в 53% случаев, в 22% случаев эффект был отрицательным и в 25% случаев – неопределенным. Для существенного ослабления грозовой деятельности облаков в диапазоне  $10 < \mathbf{Hm} < 12,8$  км в среднем необходимо вводить в облако в течение не менее 20 мин. изделия “Алазани” с интенсивностью не менее 4 ракет/мин. Для существенного подавления грозовой активности облаков с  $8 < \mathbf{Hm} < 10$  км достаточно в среднем вводить в облако не менее 2 ракет/мин. в течение не менее 13 мин. При невысокой интенсивности введения

реагента в облака происходит рост молниевой активности примерно на 15% ( $J = 2$  ракеты/мин). С повышением интенсивности введения реагента в облака происходит уменьшение грозовой активности, которая достигает минимума при  $J = 7$  ракет/мин и более. Указанные нормы расхода реагента подтверждаются результатами лабораторных экспериментов и опытами по воздействию на небольшие конвективные облака с борта летающей лаборатории.

2.5 Влияние грозовых облаков на концентрацию приземного озона прослеживается по крайней мере в радиусе 30 км вокруг облака. При грозах в слое 5-8 км отмечается высокая концентрация озона (более  $400 \text{ мкг/м}^3$ ), превышающая концентрацию озона на уровне главного максимума, а также концентрацию смогового озона в Тбилиси и Руиспири (до  $170 \text{ мкг/м}^3$ ). Содержание озона повышено не только в грозовых, но и в небольших кучевых облаках. В центральной части облака содержание озона вдвое выше, чем в свободной атмосфере на том же уровне. При интенсивных градовых процессах в среднем значения **КПО** ниже, чем при малоинтенсивных (соответственно  $36 \pm 6 \text{ мкг/м}^3$  и  $50 \pm 8 \text{ мкг/м}^3$ ). В Кахетии содержание в осадках  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ , и  $\text{SO}_4^{2-}$  в дни с грозами выше, чем в дни без гроз. При этом содержание сульфатов в осадках с грозой в будние дни выше, чем в выходные. Количество азота, продуцируемого наземными молниевыми разрядами в различных районах Кахетии, оценивается от 1 до  $30 \text{ кг/км}^2$  в год.

3. Исследованы долговременные вариации числа дней с грозами и градом в Грузии и ее различных частях. В частности, получены следующие результаты.

3.1 Временные ряды среднего на метеостанцию числа дней с градом в Западной **ЧДГ<sub>Е</sub>**, Восточной **ЧДГ<sub>В</sub>** и территории Грузии в целом для периода 1941-1990 гг неслучайны, автокоррелированы. Все три кривые тренда имеют вид полинома второй степени с хорошо выраженным монотонным уменьшением во времени, особенно в последние тридцать лет исследуемого периода. Во временном ряде отношения **ЧДГ<sub>Е</sub> / ЧДГ<sub>В</sub>** также выделяется тренд, имеющего вид полинома второй степени с тенденцией роста в последний двадцатилетний промежуток времени исследуемого периода. В период с 1941 по 1990 гг в также наблюдаются положительные тренды отношения числа дней с градом на защищаемых (**ЗТ**) территориях (Кахетия, Южная Грузия) по отношению к соответствующим контрольным (**КТ**) и, особенно в период опытных и производственных работ по борьбе с градом. Кривые трендов трендов соответственно имеют вид полиномов четвертой и шестой степени. То есть, в этот промежуток времени в Восточной Грузии по сравнению с Западной, а также на **ЗТ** по сравнению с **КТ** отмечался некоторый рост градобитий. В отличие от **ЧДГ**, временные ряды среднего на метеостанцию числа дней с грозами в Западной **Р<sub>В</sub>**, Восточной **Р<sub>Е</sub>**, в целом по Грузии, на **ЗТ** и **КТ** практически устойчивы во времени и не имеют выраженной тенденции к росту или убыванию. Имеется незначительная тенденция роста со временем отношения **Р<sub>Е</sub>/Р<sub>В</sub>**. Таким образом, условия образования конвективных процессов в целом для Грузии, а также в ее указанных частях, с течением времени существенно не менялись и на отрицательные тренды числа дней с градом оказывать влияния не должны.

3.2 В Кахетии по сравнению с контрольной территорией в годы с воздействием среднее на метеостанцию число дней с градом возросло на 20%. Изменчивость числа дней с грозами в Телави и Душети имеет противоположный ход – в Телави слабый положительный тренд, в Душети – отрицательный. Тренд продолжительности гроз на обеих станциях отрицательный, однако в Душети он выражен более ярко, чем и Телави. Соответственно тренды соотношения числа дней с грозами и продолжительности гроз в Телави и Душети положительные. В данном случае можно предположить наличие эффекта влияния активных воздействий на градовые процессы в Кахетии на изменение продолжительности гроз.

3.3 В 1967-1984 гг в Кахетии отмечались положительные тренды ожидаемого и фактического количества случаев града; количества градоопасных облаков, подвергнутых воздействию; доли градовых облаков из подвергнутых воздействию; доли защищаемой

территории, поврежденной градом на 100%. В то же время наблюдались отрицательные тренды площадей, пораженных градом на 100% одним градобитием; количества реагента, введенного в одно облако; эффективности противоградовой защиты. Построены соответствующие модели трендов с выделением случайных компонент. Таким образом, в указанный период времени в Кахетии происходила интенсификация градовых процессов и, одновременно, уменьшение эффективности работы противоградовой службы.

Показано, что до начала работ по воздействию, в Кахетии в среднем на 100% поражалось градом 2% защищаемой территории, в годы с воздействием (1967-1989) – 0,48% **ЗТ**, в годы после прекращения воздействия (1990-2000) – 2,6% **ЗТ**. На одно градобитие в общем случае, на одно интенсивное (поражение территории на 60-100%) и одно малоинтенсивное градобитие (поражение территории на 10-60%) в среднем соответственно приходится 200, 600 и 70 га поврежденной на 100% территории.

#### 3.4 Исследованы связи грозовых процессов с градовыми.

На основании лабораторных экспериментов установлено, что интегральный коэффициент захвата облачных капель градинами в заряженной среде выше чем в нейтральной ( $0,70 \pm 0,063$  и  $0,59 \pm 0,067$  соответственно).

Показано, что для территории Грузии в целом и ее указанных выше частей между средним на метеостанцию числом дней с градом и грозами в 1941-1990, 1941-1960, 1971-1990 гг в основном наблюдалась значимая положительная линейная корреляционная связь.

В период с 1941 по 1990 гг для указанных территорий отмечаются отрицательные тренды градообразующего фактора гроз. При этом выявлено, что в первый период времени (1941-1960, низкий уровень загрязненности атмосферы) между градообразующим фактором гроз и числом дней с грозами наблюдалась обратная корреляционная связь, которая изменилась на прямую во второй период времени (1971-1990, высокий уровень загрязненности атмосферы, активные воздействия на облака).

4. Исследовано влияние антропогенного загрязнения атмосферы (включая активные воздействия на градовые облака) на изменчивость грозовых и градовых процессов. Основные результаты следующие.

4.1 Получена эмпирическая модель связи сезонной продолжительности гроз в Телави с количеством введенного в облака реагента и уровнем бета-радиоактивных выпадений.

4.2 Показано, что в целом в годы с воздействием (1967-1984) значения числа дней с грозами и продолжительность гроз в Телави не меняются, происходит рост средней продолжительности грозового дня. В сезоны с бета-радиоактивным фоном менее  $3,0 \text{ Бк/м}^2 \cdot \text{сутки}$  (8 сезонов) число дней с грозами в Телави не меняется, растут продолжительность гроз в сезон и продолжительного грозового дня. В сезоны с бета-радиоактивным фоном более  $3,0 \text{ Бк/м}^2 \cdot \text{сутки}$  (10 сезонов) в Телави отмечается уменьшение числа дней с грозами, неизменность сезонной продолжительности гроз и рост продолжительности грозового дня.

4.3 Рост загрязненности атмосферы в Телави и Тбилиси способствует увеличению сезонной продолжительности гроз. При этом высокий радиоактивный фон ( $B > 3,0 \text{ Бк/м}^2 \cdot \text{сутки}$ ) препятствует этому росту при уровнях загрязненности атмосферы в Тбилиси со значениями **AOD** до 0,140-0,150 и в Телави 0,120-0,130.

Зависимости средних по пятилеткам в период с 1948 по 1982 гг значений продолжительности грозового дня  $\Pi_d$  от аэрозольной оптической толщи атмосферы для Тбилиси и Душети описывается полиномом четвертой степени, а для Телави – третьей степени. В частности, в Тбилиси с ростом **AOD** до значений 0,150-0,160 увеличивается и  $\Pi_d$  с 1,2 до 2,2 час. С увеличением загрязненности атмосферы до **AOD** = 0,180 продолжительность грозового дня убывает до 1,5 час. То есть, возможно, срабатывает эффект “перезасева”.

4.4 На основании парного и множественного линейного и нелинейного корреляционного и регрессионного анализа данных получены эмпирические модели связи количества молниевых разрядов и их интенсивности, логарифма множителя максимальной радиолокационной отражаемости облаков, а также радиолокационного параметра грозоопасности с аэрозольной оптической толщиной атмосферы и бета-радиоактивными выпадениями. Показано, что в целом эти связи имеют достаточно сложный характер. Загрязнение атмосферы в зависимости от его характера и уровня может приводить как к росту, так и к уменьшению интенсивности грозových процессов.

4.5 Получены парные и множественные линейные и нелинейные эмпирические модели связи интенсивности градовых процессов с аэрозольной оптической толщиной атмосферы, бета-радиоактивными выпадениями и количеством вводимого в облака реагента. В частности выявлено следующее.

В Кахетии при низких уровнях бета-радиоактивных выпадений и высоких значениях аэрозольной оптической толщи атмосферы ( $B \leq 3$  Бк/м<sup>2</sup>·сутки,  $AOD = 0,179$ ) по сравнению с высокими уровнями бета-радиоактивного фона и низкими величинами аэрозольной оптической толщи атмосферы ( $B > 3$  Бк/м<sup>2</sup>·сутки,  $AOD = 0,129$ ) наблюдался рост количества подвергнутых воздействию облаков на 25 %, рост ожидаемого количества случаев града на 16 %, рост фактического количества случаев града на 58 %, увеличение пораженной на 100 % доли защищаемой территории на 25 %, уменьшение эффективности воздействия на 5 %. Таким образом, как и в случаях с грозовой активностью, прослеживается действие аэрозольного загрязнения атмосферы и на параметры градовой активности облаков.

В линейном приближении в пределах вариационного размаха изменчивость доли защищаемой территории, поврежденной градом на 100%, за счет активных воздействий составляет – 162 %,  $AOD$  – 73%, бета-радиоактивных выпадений – 25 %; изменчивость эффективности воздействия от указанных параметров соответственно зависит на 26 %, 17%, и 5 %; среднего на метеостанцию количества осадков - соответственно на 38,1%, 41,1 % и 9,5%.

Связь количества случаев града  $Y(9)$  с аэрозольной оптической толщиной атмосферы в Телави описывается полиномом третьей степени. При значениях  $AOD$  от 0,075 до 0,120 значения  $Y(9)$  изменяются незначительно. С дальнейшим ростом  $AOD$  от 0,120 до 0,200 количество случаев града на  $ЗТ1$  увеличивается примерно от 10 до 28. С еще большим ростом  $AOD$  наблюдается тенденция убывания числа случаев града.

Таким образом, интенсивность градовых процессов, как и грозových, существенно зависит от аэрозольного загрязнения атмосферы, хотя эта зависимость имеет достаточно сложный характер. В целом рост нерадиоактивного аэрозольного загрязнения атмосферы приводил к усилению интенсивности градобитий и соответственно к уменьшению эффективности воздействия противоградовых работ. Поэтому в дальнейшем, в случае восстановления работы противоградовой службы, фактор антропогенного загрязнения атмосферы должен быть учтен в методике воздействия на градовые процессы.

4.6 Изучена чувствительность суточных вариаций интенсивности градовых процессов к изменчивости аэрозольного загрязнения атмосферы.

Получено, что в Кахетии в будние дни интенсивность градовых процессов выше, чем в выходные (пораженные градом площади; логарифм множителя максимальной радиолокационной отражаемости; количество жидких и твердых осадков). Аналогичная ситуация и для Северного Кавказа (масса, энергия и количество выпавших градин). В будние дни по сравнению с выходными здесь происходит рост доли капельных зародышей града и убывание доли крупяных зародышей (увеличение вероятности роста града по механизму теплого дождя). Таким образом можно предположить, что в период осуществления противоградовых работ в бывшем Советском Союзе эффект антропогенного загрязнения атмосферы в изменчивости интенсивности градовых процессов носил региональный характер.



## **Основные результаты диссертации опубликованы в следующих научных работах**

1. Амиранашвили А., Айвазишвили И., Гзиришвили Т., Окуджава А., Салуквадзе Т., Харчилава Д., Хоргуани В. – Основные результаты исследования атмосферных процессов и перспективы их развития, Сб. Трудов, посвященный 150-летию Тбилисской геофизической обсерватории, Тбилиси, Мецниереба, 1997, 139-142, (на грузинском языке).
2. Амиранашвили А., Амиранашвили В., Биадзе Т., Нодия А., Чихладзе В., Бахсолиани М., Хуродзе Т. – Особенности многолетней изменчивости градобитий в Кахетии, Тр. Института географии им. Вахушти Багратиони АН Грузии, том 21, UISSNN 1512-1224, Тбилиси, 2003, 58-79, (на грузинском языке).
3. Амиранашвили А., Бериташвили Б., Мкурналидзе И. – Многолетние вариации числа дней с грозами в Восточной Грузии, Тр. Института географии им. Вахушти Багратиони АН Грузии, том 21, UISSNN 1512-1224, Тбилиси, 2003, 134-149, (на грузинском языке).
4. Амиранашвили А., Гзиришвили Т., Нодия А., Дореули Р., Хеладзе Т., Чумбуридзе З. – Исследование процессов электризации грозо-градовых облаков в Восточной Грузии, Сб. Трудов, посвященный 150-летию Тбилисской геофизической обсерватории, Тбилиси, Мецниереба, 1997, 143-150, (на грузинском языке).
5. Амиранашвили А., Дореули Р., Чумбуридзе З. – Взаимосвязь гроз и града, Наука и техника, № 4-6, 1999, 104-108, (на грузинском языке).
6. Амиранашвили А., Калаиджева Л., Хунджуа А., Вачнадзе Дж. – Некоторые результаты исследований электропроводности воздуха в Душети, Тр. Института гидрометеорологии, ISSN 1512-0902, том 108, 2002, 72-78, (на грузинском языке).
7. Abdaladze M., Amiranashvili A., Bibilashvili T., Chitaladze A., Chitaladze D., Doreuli R., Khorguani F., Khurodze T. - Distribution of the Convective Cloudiness in Kakheti Region in Georgia and its Influence on Some Climatic Elements, AGU 2000 Fall Meeteng, Abstract, San Francisco, California, US, December 15-19, 2000, A22A-15.
8. Abesalashvili L.Sh., Amiranashvili A.G., Supatashvili G.D. – Results of Rain Chemical Content Investigation in Alazani Valley, Proc. 12<sup>th</sup> Int. Conf. on Clouds and Pricipitation, Zurich, Switzerland, August 19-23, vo2. , 1996, 1066-1069.
9. Amiranashvili A.G. – National Report on Ongoing and Planned Ozone Research and Monitoring and on Calibration and Archiving of Measurements in Georgia, Report of the 5<sup>th</sup> meeting of the ozone research managers of the parties to the Vienna Convention for the protection of the ozone layer, Geneva, March 25-27, 2002, 12, 83-85.
10. Amiranashvili A. – Scheme of the Interaction of Atmospheric Aerosols and Convective Clouds, IUGG 2003 Abstract, Sapporo, Japan, June 30-July 11, 2003, MI02b/D-041.A.
11. Amiranashvili A.G. – National Report on Existing and Planned Activities Relating to Ozone Research and the Monitoring. Calibration and Archiving of Measurements; and on UV-B Monitoring and Initiatives Aimed at the Prevention of UV-B and Sun-Related Injuries in Georgia, Report of the 6<sup>th</sup> meeting of the ozone research managers of the parties to the Vienna Convention for the protection of the ozone layer, Vienna, Austria, September 19-21, 2005, 48, 129-133.
12. Amiranashvili A.G., Amiranashvili V.A., Bachiasvili L.L., Bibilashvili T.N., Supatashvili G.D. - Influence of the Anthropogenic Pollution of the Atmosphere and Thunderstorms on the Precipitations Regime and their Chemical Composition in Alazani Valley Conditions, Proc. 14<sup>th</sup> International Conference on Clouds and Precipitation, Bologna, Italy, 18-23 July 2004, 2\_3\_216.1-2\_3\_216.2.
13. Amiranashvili V., Amiranashvili A., Bakhsoлиани М., Begalishvili N., Tavartkiladze K. - The Dynamics of Hail Processes in the Kakheti Region of Georgia in 1967-1998, Abstr. IUGG 99, Birmingham, UK, July 26-30, 1999, B280.
14. Amiranashvili A.G., Amiranashvili V.A., Beritashvili B.Sh., Mkurnalidze I.P., Chumberidze Z.A. – Some Characteristics of a Thunderstorm Activity in Georgia, Proc. 12<sup>th</sup> Int. Conf. on Atmospheric Electricity, Versailles, France, 9-13 June, vol.1, 2003, 711-714.
15. Amiranashvili A., Amiranashvili V., Bibilashvili T., Chumberidze Z., Gzirishvili T., Doreuli R., Nodia A., Khorguani F., Kolesnikov Yu. - Distribution of Convective Clouds and Lightning

- Discharges of the Earth Surface in Kakheti Region of Georgia, Proc.13th Int.Conf. on Clouds and Precipitation,Reno,Nevada,USA, ,August 14-18, vol.2 , 2000,1050-1052.
16. Amiranashvili A., Amiranashvili V., Chochishvili K., Kirkitadze D. - The Distribution of Aerosols Over the Georgian Territory in the Lower Troposphere ,Journal of Georgian geophysical society, ISSN 1512-1127, Jssue B. Physics of Atmosphere, Ocean and Space Plasma, Vol 8 B, 2003, 70-75.
  17. Amiranashvili A., Amiranashvili V., Doreuli R., Khurodze T., Kolesnikov Yu.-Some Characteristics of Hail Processes in the Kakheti Region of Georgia, Proc.13th Int. Conf. on Clouds and Precipitation,Reno,Nevada, USA, August 14-18, vol.2, 2000, 1085-1087.
  18. Amiranashvili A., Amiranashvili V., Gzirishvili T., Gunia G., Intskirveli L., Kharchilava J.- Variations of the Weight Concentrations of Dust, Nitrogen Oxides, Sulphur Dioxide and Ozone in the Surface Air in Tbilisi., Proc.15th Int.Conf. on Nucleation and Atmospheric Aerosols, Rolla, Missouri, USA, 2000, August, 6-11,AIP, Conference Proc.,vol.535, Melville, New York, 2000, 793-795.
  19. Amiranashvili A.G., Amiranashvili V.A., Gzirishvili T.G., Kharchilava J.F., Tavartkiladze K.A. – Modern Climate Change in Georgia. Radiatively Active Small Atmospheric Admixtures, Institute of Geophysics, Monograph, Trans. of M.Nodia Institute of Geophysics of Georgian Acad. of Sci. , ISSN 1512-1135, vol. LIX, 2005, 1-128.
  20. Amiranashvili A., Amiranashvili V., Gzirishvili T., Kolesnikov Yu., Tavartkiladze K.- Spatial-Temporary Variations of Total and Lower Layer Cloudiness Over the Georgian Territory. Proc.13th Int.Conf. on Clouds and Precipitation,Reno,Nevada,USA, August, 14-18, vol.2, 2000, 1159-1162 .
  21. Amiranashvili A.G., Amiranashvili V.A, Kalaijeva L.L., Karauli N.D., Khunjua A.T., Nodia A.G., Vachnadze J.I. – Characteristics of Air Conductivity in Dusheti, Proc. 12<sup>th</sup> Int. Conf. on Atmospheric Electricity, Versailles,France, 9-13 June , vol.1, 2003, 353-356.
  22. Amiranashvili A., Amiranashvili V., Khurodze T.,Tavartkiladze K.,Tsitskishvili M. - Some Characteristics of the Aerosol Pollution of the Atmosphere Over the Territory of Kakheti in the Warm Season,Proc.Int.Conf. Dedicated to Memory of Prof.A.Sutugin,Moscow,Russia, June 26-30, 2000, 128-129.
  23. Amiranashvili A.G., Amiranashvili V.A., Kirkitadze D.D, Tavartkiladze K.A. - Some Results of Investigation of Variations of the Atmospheric Aerosol Optical Depth in Tbilisi , Proc. 16<sup>th</sup> Int. Conf. on Nucleation&Atmospheric Aerosols, Kyoto, Japan, 26-30 July 2004, 416-419.
  24. Amiranashvili A.G., Amiranashvili V.A., Nodia A.G. Khurodze T.V., Toronjadze A.F., Bibilashvili T.N.- Spatial-Temporary Characteristics of Number of Days with a Hails in the Warm Period of Year in Georgia, Proc. 14<sup>th</sup>International Conference on Clouds and Precipitation , Bologna , Italy ,18-23 July 2004, 2\_2\_215.1-2\_2\_215.2.
  25. Amiranashvili A.G, Amiranashvili V.A., Tavartkiladze K.A., - Spatial-Temporary Variations of the Number of Fog Days per Year in Georgia, Proc.1<sup>st</sup> Int. . Conf. on Fog and Fog Collection, Vancouver, Canada, July 19-24, 1998, 357-360
  26. Amiranashvili A., Amiranashvili V.,Tavartkiladze K. – Dynamics of the Aerosol Pollution of the Atmosphere in Georgia in 1956-1990, J.Aerosol Sci, Pergamon, vol.30, Suppl.1, 1999, S667-S668.
  27. Amiranashvili A., Amiranashvili V., Tavartkiladze K.- Aerosol Pollution of the Atmosphere and Its Influence on Direct Solar Radiation in Some Regions of Georgia,Proc.15th Int.Conf. on Nucleation and Atmospheric Aerosols, Rolla, Missouri, USA, 2000, August, 6-11,AIP, Conference Proc.,vol.535,Melville, New York, 2000, 605-607.
  28. Amiranashvili A., Amiranashvili V., Tavartkiladze K.- Influence of Cloudiness Trends on the Total Solar Radiation in Tbilisi, Proc.13th Int. Conf. on Clouds and Precipitation,Reno,Nevada,USA, August 14-18, vol.2, 2000, 876-877.
  29. Amiranashvili A., Amiranashvili V., Tavartkiladze K. - Comparative Analysis of Long-Term Variations of Number of Fog Days Per Year and Various Climateforming Factors in Georgia, Proc.2th Int. Conf.on Fog and Fog Collection, St.John's, Canada, July 15-20, 2001, 361-364.
  30. Amiranashvili A., Amiranashvili V., Tavartkiladze K, Gabedava V. – Spatil-Temporary Characteristics of the Aerosol Pollution of the Atmosphere in Georgia, Proc. 1<sup>st</sup> Int. Conf . on Ecology and Environmental Management in Caucasus, Tbilisi, Georgia, October 6-7, 2001, 57-58.

31. Amiranashvili A., Balavadze A., Zurashvili Z., Khelaia E. – On the Possibility of Predicting a Thunderdanger of Clouds, Proc. 9<sup>th</sup> Int. Conf. on Atmospheric Electricity, St. Petersburg, Russia, 15-19 June, vol.1, 1992, 157-159.
32. Amiranashvili A.G., Beritashvili B.Sh, Mkurnalidze I.P. - Correlation Between Number of Thunder-Days and Duration of Thunderstorm Activity in Eastern Georgia, Proc. 14<sup>th</sup> International Conference on Clouds and Precipitation, Bologna, Italy, 18-23 July 2004, 2\_1\_214.1-2\_1\_214.4.
33. Amiranashvili A., Bliadze T., Chiabrishvili N., Chikhladze V., Gzirishvili T., Kirkitadze D., Nodia A., Odisharia M., Okujava A.- Complex for Laboratory Modelling of Microphysical and Electrical Properties of Aerodisperse Formations, Proc.Int.Conf. Dedicated to Memory of Prof.A.Sutugin,Moscow,Russia,June 26-30, 2000, 54-55.
34. Amiranashvili A.G.,Bliadze T.G.,Chiabrishvili N.G.,Gzirishvili T.G.,Kirkitadze D.D.,Nodia A.G.,Odisharia M.A., Okujava A.M. – Laboratory Modelling of the Transformation of Microphysical and Electrical Properties of Artificial Water Fogs, Proc.1<sup>st</sup> Int. Conf. on Fog and Fog Collection, Vancouver, Canada, July 19-24, 1998, 333-335.
35. Amiranashvili A.G., Chikhladze V.A., Kharchilava J.F, Buachidze N.S., Intskirveli L.N. - Variations of the Weight Concentrations of Dust, Nitrogen Oxides, Sulphur Dioxide and Ozone in the Surface Air in Tbilisi in 1981-2003, Proc. 16<sup>th</sup> International Conference on Nucleation&Atmospheric Aerosols, Kyoto, Japan, 26-30 July 2004, 678-681.
36. Amiranashvili A., Nodia A., Khurodze T.,Kartvelishvili L.,Chumburidze Z.,Mkurnalidze I.,Chikhradze N. – Variability of Number of Hail and Thunderstorm Days in the Regions of Georgia with Active Influence on Atmospheric Processes, Bull. of the Georgian Acad. of Sciences, 172, N3, 2005, 484-486.
37. Amiranashvili A.G.,Gzirishvili T.G.,Chumburidze Z.A. – On the Role of Artificial Iceforming Reagents and Radioactive Intermixtures in the Variation of Convective Clouds Thunderstorm and Hail Activity, Proc. 12<sup>th</sup> Int. Conf. on Clouds and Precipitation,Zurich, Switzerland, August 19-23, vol. 1, 1996, 267-270.
38. Amiranashvili A.G., Gzirishvili T.G., Kartsivadze A.I., Nodia A.G. – Aircraft Investigations of the Distribution of Aerosols in the Lower Troposphere, Proc. 11<sup>th</sup> Int. Conf. on atmospheric aerosols,Condensation and Ice Nuclei,Budapest, Hungary, 3-8 September, vol.1,1984, 148-153.
39. Amiranashvili A.G.,Gzirishvili T.G.,Kartsivadze A.I., Okudjava A.M., Kharchilava D.F., Grasnich K.H. – Some Experimental Data on the Variability of the Ozone Density at Different Levels of Lowest Atmosphere, Result of ozone research, Geod. Geoph. Veroff. R. 2, H. 28, Berlin, 1987, 12-18.
40. Amiranashvili A.G.,Gzirishvili T.G., Nekhotina L.M., Trofimenko L.T., Bogachuk V.S. – Variation of Thunderclouds Electrical and Radar Parameters as a Result of Artificial Modification, Pap. Subm. to the 5<sup>th</sup> WMO Sc. Conf. on Weather Modification and Appl. Cloud Physics, Beijing, China, vol.1, WMO/TD-No 269, 8-12 May 1989, 357-358.
41. Budagashvili T., Karchava J.,Gunia G.,Inyskirveli L.,Kuchava T.,Gurgenidze M., Amiranashvili A.,Chikhladze T.- Inventory of Greenhouse Gas Emissions and Sinks, Georgia's Initial National Communication on Under the United Nations Framework Convention on Climate Change, Project GEO/96/G31, Tbilisi, 1999,33-45.
42. Tavartkiladze K, Shengelia I.,Amiranashvili A., Amiranashvili V. – The Influence of Relative Humidity on the Optical Properties of Atmospheric Aerosols, J.Aerosol Sci, Pergamon, vol.30, Suppl.1, 1999, S639-S640.
43. Амиранашвили А.Г. – Исследование скорости распространения меченной примеси в кучевом облаке, Тр. Ин-та геофизики АН ГССР, т. 47, ”Мецниереба”, 1980, 68-73.
44. Амиранашвили А.Г., Амиранашвили В.А., Киркитадзе Д.Д., Чиабришвили Н.Г., Чочишвили К.М. - К вопросу об образовании вторичных аэрозолей в атмосфере, Труды Института геофизики АН Грузии, ISSN 1512-1135, том 58, 2004,119-126.
45. Амиранашвили А.Г., Амиранашвили В.А., Таварткиладзе К.А. – Некоторые характеристики аэрозольного загрязнения атмосферы в Восточной Грузии, Сб. докл. 3-ей Межд. конф “Состояние и охрана воздушного бассейна и водно-минеральных ресурсов курортно-рекреационных регионов”, Кисловодск, 21-24 апреля 2003, 17-18.
46. Амиранашвили А.Г., Амиранашвили В.А., Харчилава Д.Ф., Таварткиладзе К.А.,Торшелидзе Т.И., Габедава В.А.- Оценка влияния долговременных вариаций общего содержания озона на

- изменчивость режима биологически активной ультрафиолетовой солнечной радиации в Грузии, Сб. докл. 3-ей Межд. конф “Состояние и охрана воздушного бассейна и водно-минеральных ресурсов курортно-рекреационных регионов”, Кисловодск, 21-24 апреля 2003, 76-77.
47. Амиранашвили А.Г., Апхаидзе А.А., Балавадзе А.Ш., Нодия А.Г., Харчилава Д. Ф. – Некоторые закономерности распределения озона, естественных радиоактивных и нерадиоактивных аэрозолей и напряженности электрического поля в нижней тропосфере, Тр. Всесоюзн. Совещ. по озону, Москва, ноябрь, 1977, М., Гидрометеиздат, 1980, 225-229.
  48. Амиранашвили А.Г., Бахсолиани М.Г., Бегалишвили Н.А., Берадзе Н.И., Бериташвили Б.Ш., Рехвиашвили Р.Г., Цинцадзе Т.Н., Рухадзе Н.П. – О возобновлении работ по регулированию осадков в Восточной Грузии, Тр. Института гидрометеорологии, ISSN 1512-0902, том 108, 2002, 249-260.
  49. Амиранашвили А.Г., Блиядзе Т.Г., Киркитадзе Д.Д., Нодия А.Г., Хунджуа А.Т., Хуродзе Т.В. - Исследование долговременных вариаций грозовых и градовых процессов в условиях Восточной Грузии и их связей с антропогенным загрязнением атмосферы, Деп., Техинформ, № рег. 1250, Тбилиси, 01.03.2006, 1-6.
  50. Амиранашвили А.Г., Богачук В.С., Гзиришвили Т.Г., Нехотина Л.М., Трофименко Л.Т. – Исследование взаимосвязей между радиолокационными и электрическими параметрами грозовых облаков и оценка эффективности воздействия на них, Сб. Атмосферное электричество, Тр. 3-го Всесоюзн. Симп. по атмосферному электричеству, Тарту, Эстония, 28-31 октября 1986, Л., Гидрометеиздат, 1988, 116-119.
  51. Амиранашвили А.Г., Гзиришвили Т.Г. - Аэрозоли и ледяные кристаллы в атмосфере, Тбилиси, Мецниереба, 1991, 1-113.
  52. Амиранашвили А.Г., Гзиришвили Т.Г., Нодия А.Г. – Влияние кристаллизующих реагентов и ПАВ на электрическое состояние кучевых облаков, Сб. докл. III Всесоюзн. Симп. по атмосферному электричеству, Тарту, Эстония, 28-31 октября, 1986, 68-72.
  53. Амиранашвили А., Джишкариани Д., Нодия А., Таташидзе З., Сепиашвили Р. – Содержание аэроионов и естественная радиоактивность воздуха в Цхалтубской пещере, АН Грузии, Тбилиси, 1994, 1-53.
  54. Амиранашвили А.Г., Киркитадзе Д.Д., Нодия А.Г., Хунджуа А.Т., Хуродзе Т.В. - Исследование долговременных вариаций электропроводности воздуха в Душети и их связей с некоторыми метео-геофизическими факторами, Деп., Техинформ, № рег. 1249, 01.03.2006, Тбилиси, 2006, 1-8.
  55. Амиранашвили А.Г., Маградзе Г.Д. – 8-ая Международная конференция по атмосферному электричеству, Уппсала, Швеция, 13-16 июня 1988, Изв. АН СССР, сер. ФАО, то. 25, No 9, 1989, 1001-1006.
  56. Амиранашвили А., Маградзе Г., Гамхиташвили Л. – Распространение льдообразующего реагента от трасс противоградовых изделий “Алазань” и “Кристалл” в восходящем турбулентном потоке воздуха, Тр. Всес. конф. “Активн. Возд. На гидрометеорологические процессы”, Нальчик, 22-25 октября 1991, Санкт-Петербург, Гидрометеиздат, книга 2, 1995, 152-155.
  57. Амиранашвили А.Г., Нодия А.Г., Торонджадзе А.Ф., Хуродзе Т.В. - Изменчивость числа дней с градом в Грузии в 1941-1990 гг, Труды Института геофизики АН Грузии, ISSN 1512-1135, том 58, 2003, 127-132.
  58. Амиранашвили А.Г., Нодия А.Г., Торонджадзе А.Ф., Хуродзе Т.В. - Некоторые статистические характеристики числа дней с градом в теплое полугодие в Грузии в 1941-1990 гг, Труды Института геофизики АН Грузии, ISSN 1512-1135, том 58, 2003, 133-141.
  59. Амиранашвили А.Г., Нодия А.Г. - К вопросу о распределении легких ионов в кучевых облаках, Тр. Ин-та геофизики АН СССР, т. 44, “Мецниереба”, 1978, 87-98.
  60. Амиранашвили А.Г., Нодия А.Г., Махарашвили А.З. – Заряжение самолета ИЛ-14 в свободной атмосфере в зависимости от содержания аэрозолей, Сб. Атмосферное электричество, Тр. 3-го Всесоюзн. Симп. по атмосферному электричеству, Тарту, Эстония, 28-31 октября 1986, Л., Гидрометеиздат, 1988, 264-265.

61. Амиранашвили А.Г., Нодия А.Г., Харчилава Д.Ф. – О влиянии конвективной облачности на распределение аэрозолей, озона и напряженности электрического поля в атмосфере, Тр. Ин-та геофизики АН ГССР, т. 44, "Мецниереба", 1978, 5-17 .
62. Амиранашвили А.Г., Нодия А.Г., Чиабришвили Н.Г., Киркитадзе Д.Д., Окуджава А.М., Чихладзе В.А., Биадзе Т.Г., Хунджуа А.Т. - Оценка влияния аэрозольного загрязнения воздуха на изменчивость параметров атмосферного электричества в условиях Восточной Грузии, Деп., Техинформ, № рег. 1251, 01.03.2006, Тбилиси, 2006, 1-8.
63. Карцивадзе А.И., Амиранашвили А.Г., Гзиришвили Т.Г., Нодия А.Г. – Результаты самолетных исследований электрических характеристик кучевых облаков, Тр. Ин-та геофизики АН ГССР, т.49, "Мецниереба", 1982, 68-75.
64. Степаненко В.Д., Имянитов И.М., Богачук В.С., Карцивадзе А.И., Амиранашвили А.Г., Салуквадзе Т.Г., Гзиришвили Т.Г., Бохашвили В.Х., Саркисова Л.С., Качурин Л.Г., Дивинский Л.И., Иванов Б.Д., Осипов Ю.Г. - Предварительные результаты опытов по воздействию на грозовые процессы льдообразующим реагентом, Тр. Ин-та геофизики АН ГССР, т.49, "Мецниереба", 1982, 13-44.
65. Стыро Б.И., Амиранашвили А.Г. – Некоторые результаты исследования естественной радиоактивности кучевых облаков, Тр. Ин-та физики АН Лит. ССР, Физика атмосферы, N 5, "Мокслас", 1979, 25-41 .
66. Стыро Б.И., Амиранашвили А.Г. – Исследование распределения аэрозолей над территорией Грузии, Тр. Ин-та физики АН Лит. ССР, Физика атмосферы, N 8, "Мокслас", 1983, 18-24.
67. Харчилава Д.Ф., Амиранашвили А.Г. – Исследование вариаций атмосферного озона в Грузии, Результаты исследований по международным геофизическим проектам, Москва, МГК, 1988, 1-114.
68. Харчилава Д.Ф., Амиранашвили А.Г., Локапишвили М.Г. – Некоторые характеристики вертикального распределения озона над территорией Грузии, Сб. научн. тр. "Фотохимические процессы земной атмосферы", М., Наука, 1990, 231-234.
69. Харчилава Д.Ф., Амиранашвили А.Г., Чихладзе В.А. – Некоторые результаты исследований концентрации приземного озона в Руиспири и Тбилиси в 2002 году, Сб. докл. 3-ей Межд. конф "Состояние и охрана воздушного бассейна и водно-минеральных ресурсов курортно-рекреационных регионов", Кисловодск, 21-24 апреля 2003, 37-38.
70. Харчилава Д.Ф., Карцивадзе А.И., Гзиришвили Т.Г., Амиранашвили А.Г., Мухранели И.А., Нодия А.Г., Балавадзе А.Ш., Мургулия Н.К., Бритаев А.С., Плессинг П., Герсдорф М. – Результаты исследования атмосферного озона в Грузии, Матер. Докл. Рабочего Совещания по исследованию атмосферного озона, Тбилиси, Мецниереба, 1982, 6-32.