

На правах рукописи

Данелян Баграт Григорьевич

**КОМПЛЕКСНЫЙ ФИЗИКО-СТАТИСТИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ
ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСКУССТВЕННОГО
УВЕЛИЧЕНИЯ ОСАДКОВ**

25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

г. Долгопрудный – 2006 г.

Работа выполнена в ГУ «Центральная Аэрологическая Обсерватория»

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук
Берюлев Геннадий Петрович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Ким Николай Сергеевич

кандидат физико-математических наук
Хайкин Михаил Натанович

Ведущая организация: ГУ «Научно-производственное объединение»
«Тайфун» Росгидромета, г.Обнинск

Защита диссертации состоится 19 декабря 2006 г в 11 часов на заседании
диссертационного совета К 327.010.01 Центральной Аэрологической обсерватории по
адресу: 141700, г. Долгопрудный, ул. Первомайская, 3

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Центральной Аэрологической
Обсерватории.

Автореферат разослан 17 ноября 2006 г

Ученый секретарь
диссертационного совета ЦАО

кандидат географических наук
Н.А. Безрукова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность работы Проблема искусственного увеличения осадков путем активных воздействий на облака имеет чрезвычайно важное народнохозяйственное значение. В целом ряде районов нашей страны возможность получения дополнительных осадков привела бы к положительным последствиям, как для повышения продуктивности сельскохозяйственного производства, так и для удовлетворения потребностей гидроэнергетики и целого ряда других отраслей народного хозяйства.

К настоящему времени в различных географических районах мира выполнено большое количество научных экспериментов и оперативных работ по искусственному увеличению осадков. Однако, несмотря на это, сегодня ещё нельзя утверждать, что проблема искусственного увеличения осадков решена окончательно.

Это связано в первую очередь с тем, до 80-х годов научные проекты по увеличению осадков проводились в основном с целью накопления опытных данных по искусственно вызванным осадкам и их статистической оценке. Исследования же самих облаков, подвергшихся засеву, носили не регулярный, чаще всего фрагментарный характер. Поэтому многие вопросы, связанные с пониманием процессов искусственного осадкообразования долгое время оставались экспериментально не изученными. Учитывая исключительную важность подобных исследований, ВМО в начале 80-х годов попыталась организовать Проект по увеличению осадков в Испании (ПУО) с привлечением разнообразных современных технических средств, как самолетных, так и наземных радиолокационных комплексов по измерению параметров облаков и осадков. Но, к сожалению, по ряду причин, в основном связанных с финансированием, проект пришлось закрыть. Таким образом, вопросы, связанные с проблемой понимания процессов искусственного осадкообразования, остались не решенными.

В связи с этим, и в первую очередь для понимания физики искусственного осадкообразования, остро встал вопрос проведения комплексного физико-статистического эксперимента. Для этого Центральной Аэрологической Обсерваторией были созданы, в соответствии с рекомендациями ВМО, специализированные

метеорологические полигоны - один по Международному научно-техническому сотрудничеству на острове Куба, второй в Поволжье, на территории Пензенской области. Полигоны были оснащены наземными радиолокационными комплексами и дополнительными осадкомерными станциями. Были подготовлены специализированные самолеты-метеолaborатории, оборудованные разнообразной научной аппаратурой и техническими средствами для проведения воздействий и исследований.

Целью диссертационной работы являлось:

Постановка и проведение тщательно спланированного комплексного физико-статистического эксперимента с разработкой специальных схем засевов и исследований, позволяющих выделить на фоне естественной изменчивости метеопараметров облаков искусственно созданные возмущения, приводящие к изменению параметров выпадающих из облаков осадков.

Выявление реакции облаков различных форм на их засев кристаллизующими реагентами.

Создание оперативных методов выявления эффекта воздействия в поле выпадающих осадков, измеряемых автоматическими радиолокационными комплексами, и оценка этих эффектов.

Внедрение результатов исследований в производственные работы по увеличению осадков.

Научная новизна

Впервые в области исследований по активным воздействиям проведен полномасштабный комплексный физико-статистический многосамолетный эксперимент с современными наземными радиолокационными комплексами.

Предложен и применен «модуляционный засев», позволяющий выделять на фоне естественной изменчивости параметров облачности искусственно созданные возмущения.

Впервые изучены изменения параметров облаков при одновременных синхронных полетах двух самолетов-метеолaborаторий, один из которых производил засев, другой проводил исследования. Одновременно с этим проводились измерения облачных параметров наземными радиолокационными комплексами.

Уточнены параметры конвективных и слоистообразных облаков, пригодных для воздействия с целью увеличения осадков.

Изучены спектры сверхкрупных частиц облаков в зонах засева, являющихся, зародышами осадков. Получено, что при засеве происходит значительное расширение спектра частиц, причем вид функции распределения частиц по размерам не меняется.

Научная и практическая ценность

Полученные результаты исследований существенно расширили понимание происходящих в облаках процессов естественного и искусственного осадкообразования.

Результаты исследований явились основой для создания нормативной руководящей документации, регламентирующей проведение производственных работ по увеличению осадков, которые успешно внедряются в хозяйственную практику как у нас в стране (Ставрополь, Якутия, Новосибирск и т.д.) так и за рубежом (Сирия, Иран).

Личный вклад автора

Автор принимал участие в планировании и организации экспериментальных работ, осуществлял руководство воздействиями и исследованиями на борту самолетов метеолабораторий, проводил обработку, анализ и обобщение экспериментального материала, участвовал во внедрении результатов исследований.

На защиту выносятся:

1. Методики проведения комплексного эксперимента.
2. Результаты исследований процессов искусственного осадкообразования при засеве облаков различных форм кристаллизующими реагентами.
3. Результаты применения исследований в производственных работах по увеличению осадков в различных географических районах мира.

Апробация работы Основные результаты докладывались на Всесоюзном семинаре по планированию и оценке эффективности работ по искусственному увеличению осадков 1984 – 1986 гг. (Москва), на Международных симпозиумах по тропической метеорологии 1985 г. (Ялта), 1987 г. (Гавана) и 1991 г. (Обнинск), на Всесоюзной конференции по активным воздействиям 1987 г. (Киев), на Международном симпозиуме по Взаимосвязям региональных и глобальных процессов в атмосфере и гидросфере 1988 г. (Тбилиси), на Международных конференциях по активным воздействиям 1989 г. (Женева) и 2003 г. (Касабланка).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 33 печатных работы в том числе 6 в реферируемых журналах, получено одно авторское свидетельство на изобретение, выпущено два руководящих методических документа.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 159 страницах, включая 50 рисунков и 33 таблицы. Список литературы содержит 166 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследований, дана общая характеристика работы.

В первой главе рассмотрено современное состояние исследований и результатов экспериментальных работ по активным воздействиям (АВ) на облака различных форм с целью увеличения осадков. Изложены существующие представления о физических основах искусственного увеличения осадков.

Показано, что накопленный к концу 70-х годов опыт проведения экспериментальных работ по увеличению осадков, базирующийся на упрощённых гипотезах воздействий, не способствовал совершенствованию представлений о физических процессах, происходящих в засеянных облаках. В начале 80-х годов при проведении научно-исследовательских программ по изучению возможности получения дополнительных осадков начали внедряться новейшие достижения в области электроники, лазерной, радиолокационной и вычислительной техники. Это позволило в значительной мере отказаться от проведения дорогостоящих длительных экспериментальных программ со статистической оценкой результатов воздействий и сосредоточить внимание на физических методах оценки причинно-следственных связей между засевом облаков и количеством выпадающих из них осадков. В связи с этим особое внимание стало уделяться натурным полевым исследованиям с применением самолетов-метеолабораторий.

Большинство зарубежных экспериментов по вызыванию осадков проводилось с помощью легкомоторных самолётов. По мнению зарубежных исследователей двухмоторные турбовинтовые или реактивные самолёты со скоростью полёта 100-150 м/с характеризуются достаточной оперативной гибкостью, малой стоимостью и простотой в обслуживании. Взлётный вес таких самолётов 3-5 тонн, полезная нагрузка несколько сотен килограмм, высота полёта до 9 км, а продолжительность полёта 3-5 часов. Удачными примерами использования таких самолётов для исследований и воздействий на облака можно считать работы с использованием самолётов типа «Куин Эйр», «Аэро Коммандер», «Бичкрафт», «Пайпер Навахо». В отечественных проектах, напротив, применялись тяжелые самолеты типа Ил-18, Ан-12, Ан-26, Ил-14 с большой

грузоподъемностью, способные в течение продолжительного времени проводить исследования облаков и их засев.

Обзор проектов по увеличению осадков позволил систематизировать методы и средства воздействий на облака и на основе этого сформулировать оптимальную научную концепцию искусственных воздействий на облака с целью увеличения осадков.

Научные основы искусственного увеличения осадков базируются на следующих экспериментально установленных фактах:

- переохлаждённые облака, в которых облачные капли остаются в жидком состоянии при температуре ниже 0°C , достаточно часто наблюдаются в реальной атмосфере;

- упругость насыщения водяного пара надо льдом меньше, чем над водой при той же температуре. Поэтому в присутствии переохлаждённых капель ледяные кристаллы неизбежно растут за счёт осаждения на них воды, испаряющейся с расположенных поблизости капель;

- большая часть осадков выпадает из смешанных облаков, содержащих и капли и кристаллы;

- основной способ воздействия на облака, содержащие переохлаждённые капли, состоит в искусственном внесении в них льдообразующих ядер с концентрациями, способствующими ускорению и интенсификации процесса осадкообразования.

Во второй главе обсуждаются методические вопросы проведения комплексного физико-статистического эксперимента по увеличению осадков.

Основной задачей эксперимента являлось определение возможности получения дополнительных осадков из конвективных и слоистообразных облаков при их засеве льдообразующими реагентами. Для её решения требовалось создание комплекса технических средств для проведения засева облаков и контроля результатов воздействия, а также проведения исследований атмосферных процессов в районе экспериментов.

Большие организационные сложности и научная многоплановость проблемы искусственного регулирования осадков, необходимость учета региональных особенностей, влияние технологических и метеорологических условий на проведение работ по воздействию на облака требуют тщательного планирования опытов.

Необходимы создание и оснащение специальных метеорологических полигонов информационно-измерительными системами, а также разработка методик засева облаков, контроля и оценки результатов воздействий.

При проведении экспериментов по воздействиям на облака с целью увеличения осадков подлежит регистрации и анализу следующий ряд основных характеристик атмосферы и облаков:

- структура полей температуры, влажности и ветра над метеополугоном;
- условия развития и структура облаков (вид, протяжённость и повторяемость полей облачности, их толщина, высота основания и вершин, скорость роста, продолжительность существования, температура на уровне нижней и верхней границ, уровень нулевой изотермы и т.д.);
- структура зон осадков (интенсивность, продолжительность, пространственное и временное распределение);
- мезо- и микромасштабная структура полей температуры и вертикальных движений;
- микрофизические характеристики облаков и осадков (водность, концентрация и спектры размеров капель и кристаллов, фазовый состав, ядра конденсации и кристаллизации и т. д.).

Из приведенного перечня параметров видно, что диапазон изучаемых процессов включает физические явления синоптических масштабов, а также мезо- и микро-масштабные явления. При их изучении, а также при принятии решений о проведении воздействий, оперативном контроле эффектов и оценке результативности воздействий необходимо использовать данные различных технических средств, входящих в состав информационно-измерительной системы, которыми обычно оснащаются метеорологические полигоны.

В состав информационно-измерительной системы (ИИС) обычно входят несколько подсистем, обеспечивающих разномасштабные измерения большого количества параметров атмосферы и облаков. Данные измерений, полученные в различных подсистемах, после прохождения первичной обработки поступают в оперативный центр и используются при проведении экспериментов по засеву облаков различных форм. К числу основных подсистем ИИС в первую очередь относятся комплексы бортовой самолётной измерительной аппаратуры, наземные радиолокационные измерительные комплексы, подсистема аэрологических и

метеорологических наблюдений, подсистема синоптического обеспечения работ, подсистемы связи и обработки экспериментальных данных.

Для проведения полетов при исследовании облачных параметров облаков различных форм были разработаны схемы парных полетов самолетов, иллюстрируемые на рис.1, где показаны парные полеты при воздействии на изолированные конвективные облака (а), воздействии на облачные скопления (кластеры) (б) и воздействии на слоистообразные облака (в, г).

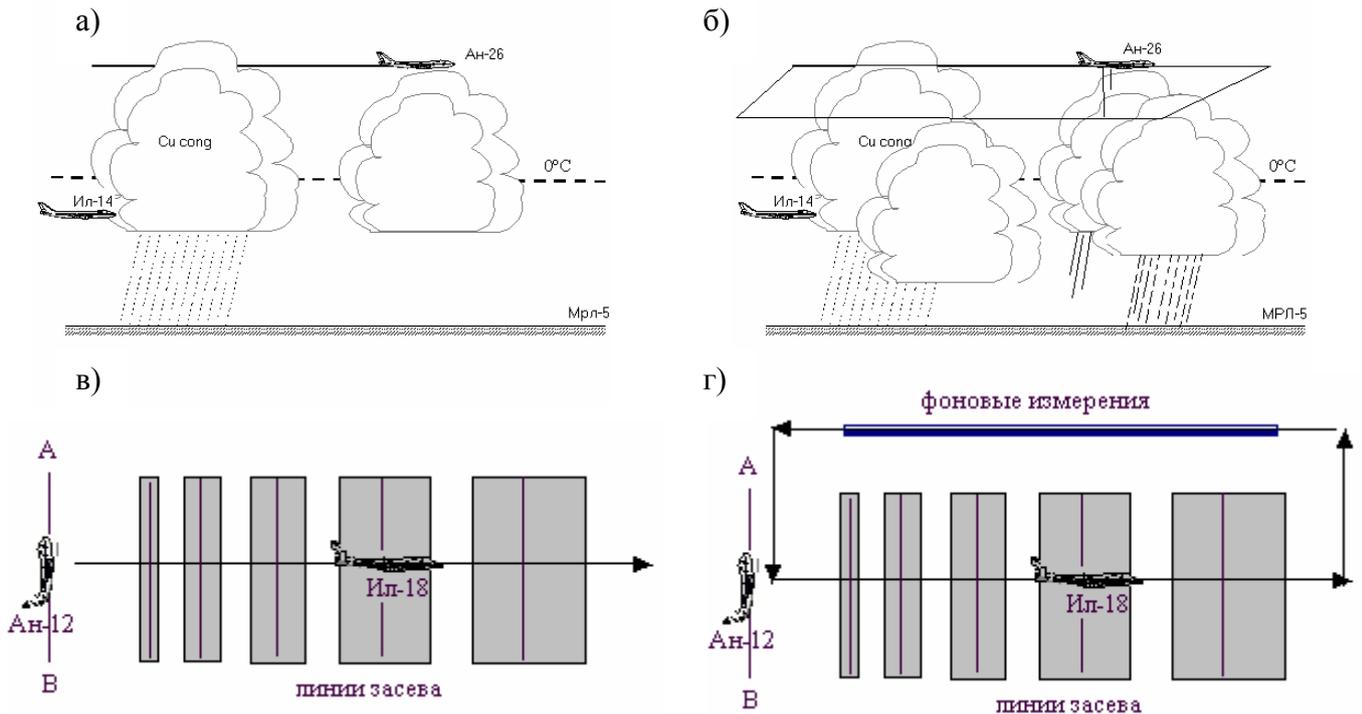


Рис. 2. Схемы полетов самолетов при исследованиях и опытных воздействиях на изолированные конвективные облака (а), на облачные кластеры (б) и на слоистообразные облака (в, г)

Воздействия на конвективные облака проводились с применением рандомизированных схем засева, обеспечивающих репрезентативность экспериментальной выборки из генеральной совокупности облаков и объективность полученных выводов.

Статистическая оценка является решающей фазой при получении количественных данных об эффекте воздействия. Для оценки эффекта воздействия на конвективные облака применялся аппарат статистической проверки гипотез. Задача формулировалась в виде проверки нулевой гипотезы относительно различий выборок количества осадков засеянных и контрольных облаков. Нулевая гипотеза может проверяться различными

способами, отличающимися друг от друга применяемыми критериями проверки и статистическими моментами выборок, подлежащими сравнению. В нашем эксперименте в качестве проверки нулевой гипотезы относительно различия значений параметров засеянных и контрольных облаков применялся критерий Манна-Уитни.

Оценка эффекта воздействия при засеве слоистообразных облаков производилась по цифрокортам радиолокационных измерений осадков с помощью разработанного «метода перемещающейся мишени». Суть его состоит в следующем.

На основе информации о пространственном положении линии засева облачности, с учётом вертикального распределения направления и скорости ветра в атмосфере для некоторого начального момента времени t_0 рассчитывается положение на поверхности земли (а следовательно, и на радиолокационных цифрокортах интенсивности осадков) той площадки, в пределах которой должны выпасть в этот момент полосы осадков от одной или нескольких заданных линий засева облачности кристаллизующим реагентом. Необходимое для этого расчёта значение скорости падения частиц осадков определяется опытным путём по радиолокационным наблюдениям за наклонными полосами падения осадков, по которым с учётом информации о вертикальном профиле ветра в атмосфере с большой точностью можно рассчитать скорость падения частиц осадков.

Полученная таким образом опытная площадка (ОП) последовательно перемещается для каждого из следующих моментов измерения распределений интенсивности осадков на основе значений скорости и направления ветрового переноса на уровне подвергшегося засеву осадкогенерирующего слоя. Для каждого из этих моментов с использованием соответствующей ему цифрокарты интенсивности осадков определяется средняя интенсивность для всей опытной площадки. Полученная таким образом диаграмма изменения во времени средней интенсивности осадков на опытной площадке при правильном ее выборе неизбежно должна испытать на себе влияние интенсификации осадков в полосах засева, если таковое имеет место в действительности.

Выявление и оценка этого влияния осуществляются путем сравнения диаграммы изменения интенсивности осадков на опытной площадке с аналогичной диаграммой для невозмущённого поля осадков. Для получения такой диаграммы по бокам от опытной площадки, в зонах, где влияние засева на осадки исключено, выбираются, если позволяет площадь распределения осадков, две симметричные площадки такого же размера как и ОП, которые называются контрольными площадками (КП). Контрольные площадки перемещаются по ветру синхронно с опытной и на них для каждого

последующего положения также рассчитывается средняя интенсивность осадков, которая затем усредняется по обеим контрольным площадкам. Полученные таким образом сравнительные значения интенсивности и построенная на их основе диаграмма временного изменения интенсивности осадков используются для сравнения с диаграммой интенсивности на опытной площадке.

Глава третья посвящена анализу и систематизации экспериментального материала, полученного в ходе проведения комплексных экспериментов по воздействию на конвективные и слоистообразные облака на Камагуэйском (Куба) и Пензенском метеополигонах и исследованию реакции облаков на засев их кристаллизующим реагентом.

Полевые опыты по воздействию на конвективные облака на Кубе проводились в мае–октябре 1984–1989 гг. в дневное время, преимущественно в период с 11 до 19 часов местного времени. Всего в течение 128 дней было выполнено 243 опыта, из них 203 опыта были полностью обеспечены радиолокационной информацией и по ним, в основном, и был проведен физико-статистический анализ.

Комплексный эксперимент по воздействиям на фронтальные слоистообразные облака проводился в период с 1981 г. по 1989 г. в основном на Пензенском метеорологическом полигоне, который был полностью организован к концу 1983 г. За указанный период было проведено 93 максимально контролируемых опыта по засеву слоистообразных облаков различных форм (St, Sc, Ns, Ns – As –Ac).

Проведен анализ распределения опытов по погодным условиям. На Кубе основная часть опытов проводилась в однотипных синоптических ситуациях. В 67 % случаев район полигона находился под влиянием барических ложбин, связанных с развитием восточных волн на юго-западной периферии западного отрога азорского антициклона. В этих случаях возникали наиболее благоприятные условия для развития конвективных облаков и кластеров, потенциально пригодных для воздействий. На Пензенском метеополигоне анализ сопутствующей синоптической информации показал, что основная часть опытов была проведена в условиях, когда формирование облачности в районе работ определялось существованием в атмосфере барической ложбины (44 % случаев) или было связано с циклонической деятельностью (30 % случаев). Значительно меньше случаев было связано с малоградиентными барическими полями (17 %), антициклоническими условиями (7 %) и барическими гребнями (2 %).

Проведено исследование реакции облаков на засев с контролем термодинамических и микрофизических параметров облаков. Сравнение характеристик в вершинах засеянных и контрольных конвективных облаков, полученных с 5-минутными интервалами, показало, что между 10-й и 15-й минутами после воздействия в группе засеянных облаков наблюдается рост максимальных значений скоростей восходящих потоков с 6,5 м/с до 11,8 м/с, максимальных значений пульсаций скорости ветра с 9,8 м/с до 14,4 м/с, средних значений пульсаций температуры с $-0,2$ до $0,0$ °С и заметное увеличение значений влажности с 0,1 до $0,9$ г/м³, что свидетельствует о проявлении при засеве динамического эффекта и интенсификации внутриоблачных процессов. Что касается распределения аналогичных характеристик в контрольных облаках, то их ход в течение всего срока наблюдений остается более равномерным.

Данные измерений облачных характеристик в нижней части облаков, полученные при пролётах самолета Ил-14, показали, что в первые 20 минут после засева в засеянных облаках резко возрастает концентрация сверхкрупных частиц диаметром более 200 мкм и уменьшается жидкокапельная влажность. По всей видимости это связано с ростом облачных частиц, что не может не привести к интенсификации осадкообразования в облаках. Косвенным подтверждением этого факта является и уменьшение скорости восходящих потоков и некоторое увеличение средних значений пульсаций температуры в облаках, измеренных вдоль трассы полёта самолёта. Приведенные результаты достаточно убедительно свидетельствуют о положительной реакции облаков на их засев льдообразующими реагентами.

Выявление реакции слоистообразных облаков на засев льдообразующими реагентами проводилось в условиях применения «модуляционного» засева, представляющего собой засев облаков со строго заданной временной периодичностью, которая преобразуется в пространственную периодичность возмущений в поле микрофизических и термодинамических параметров облаков и интенсивности выпадающих осадков. В результате этого засеянные зоны облачности чередуются с участками невозмущенной облачности, что позволяет на фоне естественной изменчивости параметров облаков и осадков выделить искусственно возникшие возмущения. Примеры полос искусственных осадков представлены на рис.4.

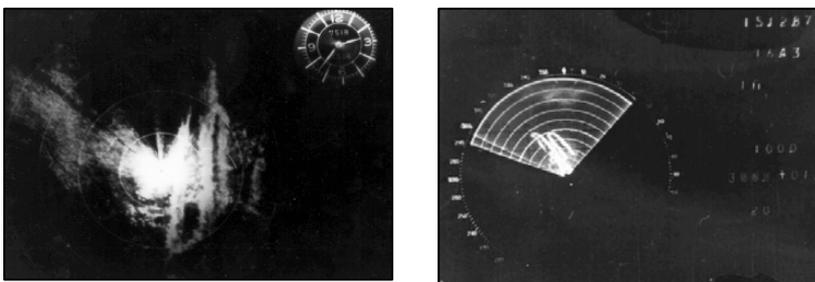


Рис.4. Примеры проявления полос искусственных осадков

Из всего многообразия измеряемых в опытах параметров наибольший интерес представляет исследование спектров сверхкрупных облачных частиц диаметром более 200 мкм. Это обусловлено тем, что облачные частицы с эффективным диаметром более 200 мкм по сути являются частицами осадков или их зародышами и поэтому все изменения, происходящие в результате засева в этой части спектра облачных частиц, в конечном счете ответственны за возможные изменения в спектрах частиц осадков, а в итоге - и в количестве осадков, выпадающих на землю.

Получено, что в результате засева облаков происходит расширение спектра сверхкрупных облачных частиц, причем вид функции распределения частиц по размерам не меняется как для конвективных так и для слоистообразных облаков (рис.5) .

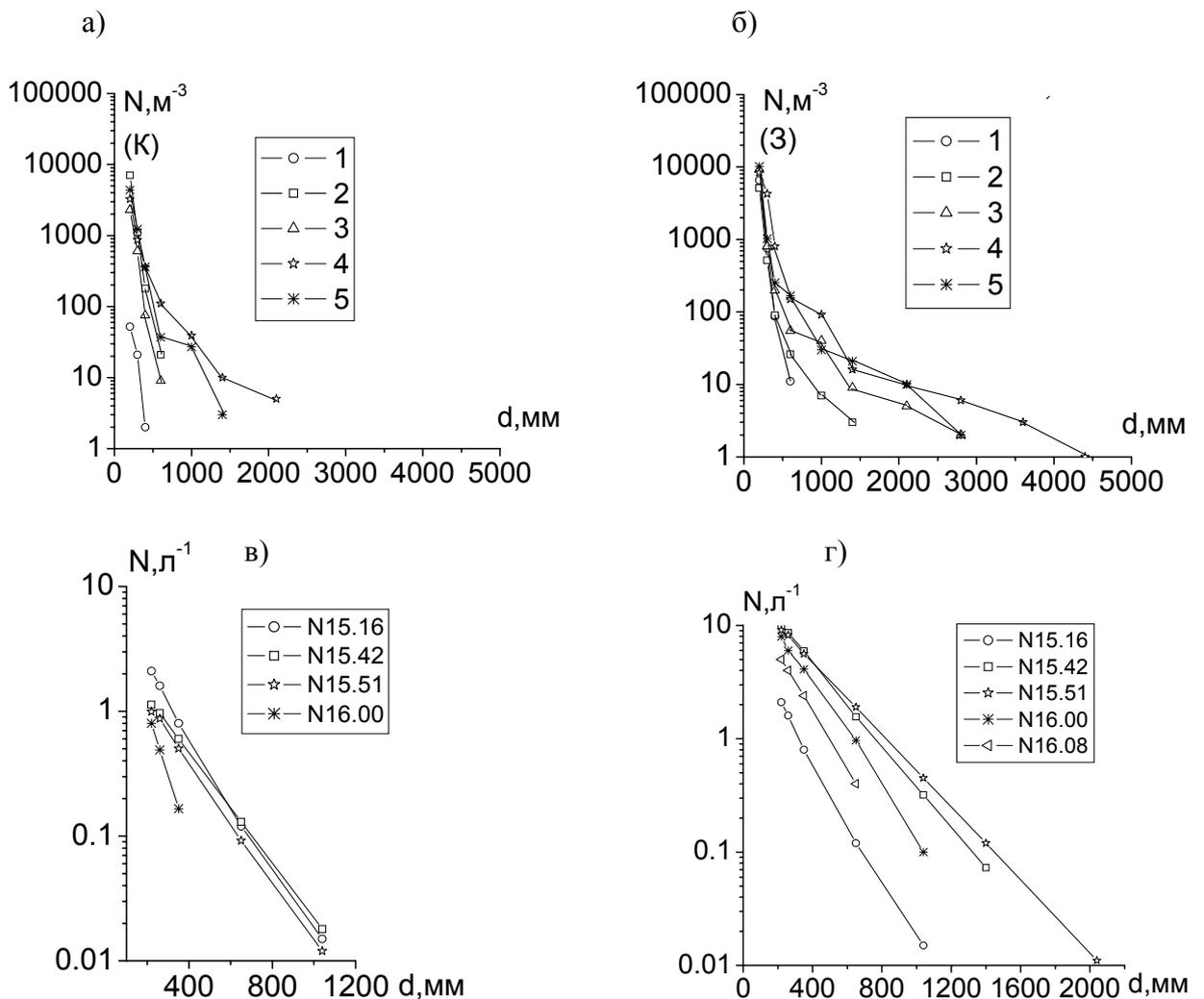


Рис. 5 Эволюция спектра сверхкрупных частиц облаков с диаметром больше 200 мкм (а, б) - в конвективных облаках (З-засеянное облако, К-контрольное, 1-5 № проходов), (в,г) - в слоистообразных облаках (первый график- невозмущённая засевом область облачности, второй график- область линии засева)

Четвертая глава посвящена физико-статистической оценке проведенных воздействий на облака с целью увеличения осадков. Подробно рассмотрены три этапа проведенного на Кубе комплексного эксперимента: поисковый этап (1984 г.), исследовательский этап (1985 г) и подтверждающий этап эксперимента (1986 – 1989 гг.). В период полевых сезонов 1984-1985 гг. было проведено 92 опыта, из них 42 - в 1984 г. и 50 – в 1985 г. В ходе этих опытов был проведен поиск наиболее пригодных облаков для засева, отрабатывались методика и технология воздействия, была проведена предварительная оценка эффекта воздействия. В период полевых сезонов 1986 – 1989 гг. был проведен подтверждающий эксперимент, в ходе которого была проведена основная оценка результатов воздействия. Всего за этот период было исследовано 46 изолированных облаков (24 засеянных и 22 контрольных) и 82 облачных кластера (42 засеянных и 40 контрольных). В ходе поискового и исследовательского этапов был выявлен класс облаков с верхними границами от 6 до 8 км, находящихся в стадии развития, засев которых привел к увеличению осадков. Засев же облаков с высотами до 6 км и более 8 км, наоборот, приводил к преждевременному разрушению облаков и уменьшению количества осадков. Учитывая это, анализ характеристик облаков на подтверждающем этапе был проведен для трёх диапазонов их высот: 1) $H_0 < 6$ км; 2) $H_0 = 6-8$ км; 3) $H_0 > 8$ км. Анализ стратифицированных таким образом данных показал, что наибольший положительный эффект наблюдался при засеве облаков с верхней границей радиоэхо между 6 и 8 км. Засев таких облаков привёл к увеличению осадков в среднем на 81 % (32,0 кт.). Засев же облаков с $H_0 < 6$ км и $H_0 > 8$ км привёл к увеличению осадков на 10 % (3,1 кт.) и 8 % (6,2 кт.), соответственно. Оценка засеянной и контрольной выборок по критерию Манна-Уитни показала, что при критическом уровне значимости 0,05 ни для одной из трёх групп высот положительный эффект не оказался значимым.

Сравнение погодных условий, в которых развивались экспериментальные облака, показало, что в отличие от 1985 г. в 1986-1988 гг. изотермы -10 °С и -20 °С для экспериментальных дней находились в среднем не на высотах 6 и 8 км, а на высотах 6,5 км и 8 км. Это означает, что для уточнения высотного критерия пригодности облаков для засева необходимо было изменить диапазон «благоприятных» высот 6-8 км на 6,5-8 км. В результате такой стратификации и дальнейшего анализа было получено, что засеянные облака с высотой H_0 от 6,5 до 8 км имели время жизни на 10 мин больше, дали осадков на 115 % (41,7 кт.) больше и имели большую высоту радиоэха, значения отражаемости и площади осадков по сравнению с незасеянными облаками, Оценка для

засеянной и контрольной выборок показала, что различия для них между выборками времени существования облаков, количества выпавших из них осадков и суммарной площади осадков за время существования облака получены на уровнях значимости 0,034, 0,031 и 0,047, соответственно. Таким образом, для группы облаков с высотой верхней границы радиоэха на момент пролёта самолёта в диапазоне 6,5-8 км (между изотермами -10°C и -20°C) увеличение количества осадков, времени жизни облака и площади осадков при засеве изолированных облаков не является случайным и обусловлено изменениями в эволюции облаков, подвергнутых воздействию.

Подобный результат был получен и для облачных скоплений - «кластеров». В группе облаков с верхними границами ячеек от 6,5 до 8 км засеянные ячейки в среднем имели время жизни на 10,1 мин больше, дали осадков на 66 % больше, были на 1,6 км выше и имели площадь выпадения осадков на 28 – 32 % большую, чем контрольные ячейки облачных кластеров.

Проведена оценка эффекта воздействий на слоистообразные облака по 93 опытам, проведенным в период с 1981 г. по 1989 г. Засев проводился на облака различного типа, характеризующиеся широким спектром метеопараметров, значения которых находились преимущественно в рамках предварительно принятых критериев пригодности для засева. Воздействия проводились без применения рандомизации. Количественная оценка эффекта воздействия проводилась с применением «метода перемещающейся мишени», описанного выше (см гл.2). Примеры такой оценки при воздействиях на слоистообразные облака, отличающиеся интенсивностью выпадающих из них естественных осадков, приведены на рис 6 (а, б, в).

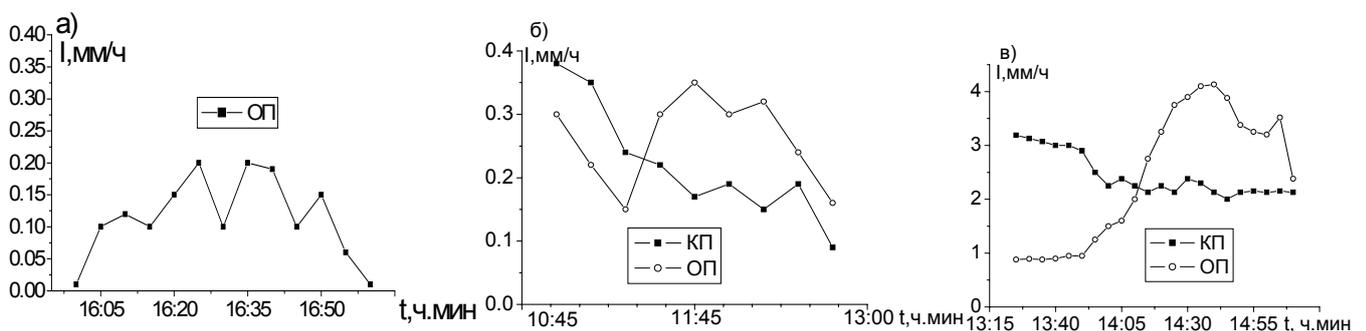


Рис.6 Диаграммы изменения средней интенсивности осадков на опытной (ОП) и контрольной(КП) площадках в опытах 8 февраля 1984 г. (а - без естественных осадков), 2 марта 1984 г. (б – со слабыми осадками) и 3 февраля 1985 г. (в – с умеренными естественными осадками)

Анализ результатов воздействий на слоистообразные облака по всем 93 опытам показал, что эффект увеличения осадков в результате засева удалось надёжно зафиксировать в 43 опытах. В остальных 50 опытах обнаружить увеличение осадков не удалось. Нужно отметить, что воздействия на облака проводились в более широком диапазоне метеорологических параметров, нежели тот, который был определён предварительными критериями пригодности облаков к засеву. По всей вероятности, это и определило в конечном счёте полученный результат. Более детальный анализ показал, что облака, в которых засев привел к увеличению осадков, по своим параметрам несколько отличались от облаков, в которых эффект не был обнаружен. Так, они имели более мощные засеваемые слои в оптимальном для температурного порога действия реагента диапазоне, были менее переохлаждены, имели в большинстве случаев значения нижней границы менее 1000 м и в 90 % случаев в этих облаках наблюдалось пересыщение водяного пара по отношению к поверхности льда, рассчитанное по эмпирическому соотношению:

$$\Delta = T_i - T_{\text{обл}} = -d - 0,12 T_{\text{обл}} - 7,5 \cdot 10^{-4} T_{\text{обл}}^2$$

где T_i - точка инея, $T_{\text{обл}}$ - температура облачного воздуха, d – дефицит точки росы.

На рис. 7 приведено распределение опытов с выявленным и не установленным эффектом в зависимости от знака Δ .

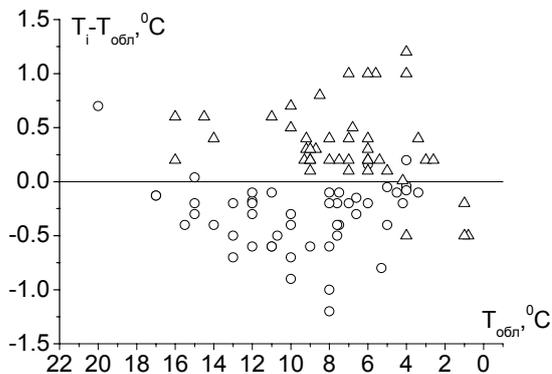


Рис.7 Распределение опытов с выявленным эффектом воздействия и без него в зависимости от знака Δ
 Δ -опыты с выявленным эффектом
 O - опыты без выявленного эффекта

Изучена зависимость интенсивности искусственных осадков от количества реагента, применяемого при засеве облаков. Получено, что при увеличении нормы расхода реагента интенсивность осадков вначале несколько растёт, затем несколько уменьшается. Оптимальные нормы расхода такого реагента, как сухой лед, для наиболее повторяющихся в опытах слоев облачности с толщиной 500-1500 м составляли 400– 1000 г/км. Уменьшение интенсивности осадков при увеличении нормы расхода происходит, по всей видимости, вследствие явления «перезасева», при

котором в облаках создаются концентрации ледяных кристаллов, значительно превышающие концентрацию естественных кристаллов, и который приводит к тому, что при неизменной интегральной водности осадкогенерирующего облачного слоя и постоянстве притока водяного пара резкое увеличение количества одновременно растущих частиц осадков сопровождается существенным замедлением процесса их роста, уменьшением их размеров и скорости падения, что, в свою очередь, вызывает заметное сокращение потока осадков из искусственно засеянного облачного слоя на некоторый промежуток времени. Происходит перераспределение осадков, убедительно показанное в опыте по созданию благоприятных погодных условий в дни празднования Дня Города в Москве 07.09.97 г. (см. рис. 8).

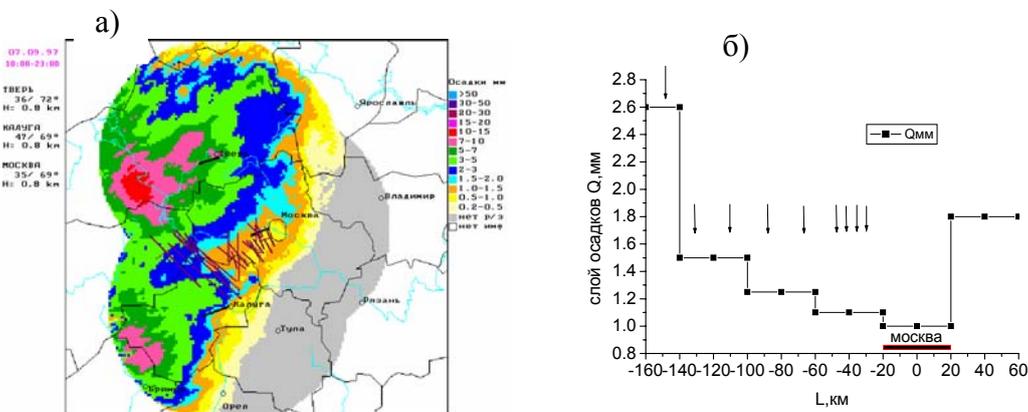


Рис. 8. Цифрокарта слоя осадков с 10 до 23 часов с линиями засева (а) и диаграмма изменения количества осадков в створе воздействия на облачность, натекающую на Москву (б) 07.09.1997 г. (стрелками указаны рубежи засева)

В целом проведенный анализ показал, что при благоприятных условиях в облаках для искусственного увеличения осадков можно получить ощутимые добавки в виде дополнительных осадков. Так, при воздействии на изолированные конвективные облака увеличение осадков может достигать до 115 %, давая дополнительный объем осадков до 42 кт с каждого облака. Для ячеек кластеров относительное увеличение осадков составляет до 70 % при абсолютном увеличении их количества до 83 кт. При воздействии на слоистообразные облака относительное увеличение осадков в отдельном опыте может составлять от 20 до 100 %, абсолютное же увеличение колеблется в достаточно широких пределах от 12 до 1400 кт.

В пятой главе описаны выполненные с участием автора производственные работы по регулированию осадков, проведенные как за рубежом, так и у нас в стране, в которых использовались результаты исследований, изложенные в диссертации.

Начиная с 1986 г. опытно-производственные работы по увеличению осадков проводились в Ставропольском крае (1986 – 1989 гг.), в Новосибирской области (1990 – 1991 гг.), в районах Северного Казахстана (1991 г.). С 1991 по 1997 гг. производственные работы по искусственному увеличению осадков выполнялись в рамках международного коммерческого контракта в Сирийской Арабской Республике. С 1995 г. такие работы проводятся в республике Саха (Якутия). С 1999 г. по настоящее время совместные производственные работы по увеличению осадков ведутся в Исламской Республике Иран. Из перечисленных производственных работ по увеличению осадков на особом месте стоят работы, проводившиеся в Сирии. Эти работы были проведены в виде законченного цикла от предварительного научного обоснования (исследование условий и демонстрация разработанных методов в марте-апреле 1991 г.) до 5-летнего производственного проекта (1992 – 1997 гг.) и полной передачи (продажи) российской технологии искусственного увеличения осадков сирийской стороне. Оценка эффекта воздействий проводилась с применением метода исторической регрессии, адаптированного для условий Сирии. Необходимость такой адаптации была вызвана прежде всего тем, что по условиям контракта воздействию подлежали все пригодные для засева облака и поэтому выбрать постоянную контрольную территорию было невозможно. Адаптированный применительно к условиям проекта в Сирии метод исторической регрессии был назван «методом плавающего контроля». Результаты оценки эффекта воздействия для Сирии в целом приведены в табл. 1

Таблица 1
Оценка эффекта воздействий для всей территории Сирии

Сезон	Фактическое количество осадков, км ³	Оценка количества осадков, км ³	Эффект воздействий км ³	Относительная эффективность воздействий, %	Уровень значимости
1	2	3	4	5	6
1991-1992	33,857	29,073	4,784	16,5	
1992-1993	28,814	24,731	4,083	16,5	< 0,05
1993-1994	30,246	27,077	3,169	11,7	< 0,05
1994-1995	14,058	13,152	0,906	6,9	
1995-1996	36,607	34,023	2,584	7,6	< 0,05
1991-1996	29,667	26,580	3,086	11,6	< 0,05

Из таблицы видно, что относительная эффективность воздействий, т.е. процентное отношение объема дополнительных осадков к их естественному значению за сезон для всей территории Сирии изменялось в период работ в пределах 6,9 – 16,5 % при средней величине 11,6 %. При этом для трёх сезонов (1992-1993, 1993-1994 и 1995-

1996 г.) значения эффекта воздействий оказались статистически значимыми, как и оценка за весь период работ.

В целом, в результате активных воздействий на территории Сирии в период 1991-1996 гг. ежегодно было получено в среднем около 3,1 км³ воды дополнительных осадков, что составляет почти 12 % от их естественного объёма.

Проект по увеличению осадков в Исламской Республике Иран был начат в 1999 г. и продолжается по настоящее время. В течение трёх сезонов 1999 г., 2000 г. и 2001 г. работы проводились с применением российского самолета-метеолaborатории Ан-30. К настоящему времени с помощью российской стороны оборудованы два самолета типа Ан-26 для продолжения работ по увеличению осадков. Количество дополнительных осадков, полученных за три указанных периода в провинции Йезд, приведены в таблице 2.

Таблица 2

Оценка эффекта воздействий в провинции Йезд в сезонах 1999 – 2001 гг.

Сезон	Фактическое количество осадков, км ³	Оценка количества осадков, км ³	Эффект воздействий км ³	Относительная эффективность воздействий, %
1	2	3	4	5
1999	8,3393	6,4814	1,8579	28,7
2000	2,46	1,75	0,71	40,3
2001	9,0766	7,4252	1,6514	22,2

В результате работ по искусственному увеличению осадков в провинции Йезд было получено от 0,71 до 1,86 км³ дополнительной воды за сезон.

Результаты опытно-производственных работ, проведенных в России и в бывшем СССР, приведены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты работ по увеличению осадков проведенных в России и бывшем СССР

характеристики	Ставрополь 1986-1989	Якутия 1995-1997 2003-2005	Новосибирск 1990-1991	Северный Казахстан 1991
Площадь работ 10 ³ (км ²)	30 - 36	25 - 40 35	25 - 35	44,3
Количество дополнительных осадков (км ³)	0,241-0,586	0,09-0,35 0,148-0,365	0,35 – 0,47	0,37
Относительное увеличение %	10 - 22	12 - 117 10,2 - 23,4	20 - 35	30 - 50

В **Заключении** диссертационной работы сформулированы основные результаты:

1. Впервые проведен комплексный физико-статистический эксперимент по исследованию процессов осадкообразования при засеве облаков кристаллизирующими реагентами с одновременным применением нескольких самолетов-метеолабораторий и наземным радиолокационным сопровождением исследований.

2. Отработаны методические вопросы взаимодействия сложной многокомпонентной информационно-измерительной системы при проведении комплексного эксперимента.

3. Разработаны схемы парных полетов самолетов-метеолабораторий для проведения воздействия и исследования реакции облаков различного типа на засев.

4. Проведены парные синхронные самолетные исследования (один СМЛ – засевающий, второй - исследовательский) изменений в поле параметров переохлажденных облаков различного типа, происходящих при их засеве кристаллизирующим реагентом.

5. Впервые разработан и применен «модуляционный засев», позволяющий с большой надежностью выделять на фоне естественной изменчивости параметров в облаках искусственно созданные возмущения с заданной частотой.

6. Разработан и применен метод «перемещающейся мишени», позволяющий на основе осадкомерных данных наземного радиолокационного комплекса в ходе единичного опыта выделить и оценить изменения в поле естественных осадков, происходящие в результате воздействий.

7. Проведены, для выявления реакции облаков на засев, измерения микрофизических и термодинамических параметров в облаках, подвергавшихся засеву, и их сравнения с параметрами в невозмущенных засеваемых областях облачности.

8. Установлено, что при засеве в облаках происходит расширение спектра сверх-крупных облачных частиц с диаметром больше 200 мкм, при этом вид функции распределения облачных частиц не меняется.

9. Установлено, что при динамическом засеве происходит увеличение температуры засеваемого облачного объема в среднем от 0,2 до 0,5 °С, что приводит к интенсивному росту облака и увеличению скорости восходящих движений в 1,5 – 2 раза.

10. Проведена физико-статистическая оценка эффекта воздействий для конвективных облаков и физическая оценка для слоистообразных облаков.

11. Уточнен класс конвективных и слоистообразных облаков, засев которых приводит к увеличению осадков в результате засева.

12. Экспериментально подтверждено, что увеличение норм расхода реагента в слоистообразных облаках может привести к перезасеву и, как следствие, к перераспределению осадков, что имеет важное практическое значение

13. Разработан практический предиктор, диагностирующий наличие переохлажденной жидкокапельной влаги в облаках по пересыщению водяного пара относительно поверхности льда.

14. Проведено внедрение результатов исследований по увеличению осадков при проведении отечественных и международных проектов.

Список публикаций по теме диссертации :

1. Берюлев Г.П., Данелян Б.Г., Серегин Ю.А., Черников А.А. Планирование физического эксперимента по проблеме искусственного увеличения осадков из фронтальных облачных систем., Тезисы докладов Всесоюзного семинара. «Планирование и оценка эффективности работ по искусственному увеличению осадков», М., Гидрометеиздат, 1984 г., с. 4-6.

2. Берюлев Г.П., Данелян Б.Г., Иванов А.А. Использование радиолокационных средств для проведения работ по активным воздействиям с целью увеличения осадков и оценки их результатов., Тезисы докладов Всесоюзного семинара. «Планирование и оценка эффективности работ по искусственному увеличению осадков», М., Гидрометеиздат, 1984 г., с. 31-33

3. Берюлев Г.П., Данелян Б.Г., Диневич Л.А., Корнеев В.П. Некоторые результаты по оценке эффективности воздействий на слоистообразные фронтальные облака с целью увеличения осадков, Тезисы докладов Всесоюзного семинара. «Планирование и оценка эффективности работ по искусственному увеличению осадков», М., Гидрометеиздат, 1984 г., с. 35-36.

4. Серогодский А.В., Власюк М.П., Данелян Б.Г., Прилепов В.Н., Серебров С.В., Серегин Ю.А., Способ получения аморфного льда. Авторское свидетельство № 1166359, 01 марта 1985 г.

5. Берюлев Г.П., Данелян Б.Г., Невзоров А.Н. Об измерениях спектров кристаллов в полосах воздействий на слоистообразные облака. Труды ЦАО., вып.,162., М., Гидрометеиздат., 1986., с. 42-48.

6. Берюлев Г.П., Данелян Б.Г. Об одном методе оценки эффекта воздействий на фронтальные слоистообразные облака по цифровым радиолокационным данным. Тезисы докладов 3-Всесоюзного семинара. «Планирование и оценка эффективности работ по искусственному увеличению осадков», Тбилиси, 1986., с. 65-69.

7. Берюлев Г.П., Данелян Б.Г., Серегин Ю.А., Черников А.А. Предварительные результаты работ по искусственному увеличению зимних осадков. Метеорология и гидрология., 1987., № 3., с. 6-17.

8. Берюлев Г.П., Данелян Б.Г., Серегин Ю.А., Черников А.А. Физический контроль результатов воздействий при засевах фронтальных слоистообразных облаков. Тезисы докладов Всесоюзной конференции по активным воздействиям на гидрометеорологические процессы., ВНИИГМИ-МЦД., Обнинск., 1987., с. 133-134.

9. Берюлев Г.П., Данелян Б.Г., Власюк М.П., Серегин Ю.А., Тороян Г.Р., Хворостьянов В.И., Черников А.А. Экспериментальное исследование и численное моделирование орографической облачной системы. Тезисы докладов международного симпозиума. «Взаимосвязь региональных и глобальных процессов в атмосфере и гидросфере», Тбилиси., с. 12

10. Берюлев Г.П., Данелян Б.Г., Иванов А.А. Использование радиолокационных средств для проведения работ по активным воздействиям с целью увеличения осадков и оценки их результатов. Планирование и оценка эффективности работ по искусственному увеличению осадков., М., Гидрометеиздат, 1988 г., с. 152-162

11. Берюлев Г.П., Данелян Б.Г., Диневич Л.А., Корнеев В.П. Некоторые результаты по оценке эффективности воздействий на слоистообразные фронтальные облака с целью увеличения осадков., Планирование и оценка эффективности работ по искусственному увеличению осадков., М., Гидрометеиздат, 1988 г., с. 166-173.

12. Берюлев Г.П., Данелян Б.Г., Власюк М.П., Серегин Ю.А., Тороян Г.Р., Хворостьянов В.И., Черников А.А. An experimental investigation and numerical simulation of the natural and seeded orographic cloud system., Proc.5th WMO Sci. Conf.on Weather Mod.and Applied Cloud Phys., Geneva, 1989., p. 243-246.

13. Берюлев Г.П., Данелян Б.Г., Власюк М.П., Серегин Ю.А., Тороян Г.Р., Хворостьянов В.И., Черников А.А. Экспериментальное исследование и численное моделирование орографической облачной системы. Метеорология и гидрология., 1989., № 7., с. 22-30.

14. Беляев В.П., Данелян Б.Г., Батиста Л., Валдес М., Зацепина Л.П., Зимин Б.И., Мартинес Д., Серегин Ю.А. Эксперимент 1984 г. по засеvu облаков на Кубе. Труды ЦАО., вып..172., М., Гидрометеoиздат., 1989.,с. 25-32.

15. Беляев В.П., Данелян Б.Г., Батиста Л., Валдес М., Зацепина Л.П., Зимин Б.И., Мартинес Д., Серегин Ю.А. Результаты эксперимента 1985 г. по засеvu конвективных облаков на Кубе. Труды ЦАО., вып.,172., М., Гидрометеoиздат., 1989.,с.32-40.

16. Батиста Л., Белинский О. И., Данелян Б.Г., Зимин Б.И., Колосков Б.П. Результаты оценки облачных ресурсов для регулирования осадков на Камагуэйском метеополигоне. Труды 4 Международной конференции по Тропической метеорологии., 1989., с. 330-335.

17. Батиста Л., Беляев В.П., Беликов С.Г., Данелян Б.Г., Зимин Б.И., Колосков Б.П., Мельничук Ю.В., Руденко Ю.М. Радиолокационные характеристики конвективных облаков и осадков в районе КМП на Кубе. Труды 4 Международной конференции по Тропической метеорологии., 1989., с. 345-350.

18. Батиста Л., Беляев В.П., Данелян Б.Г., Зацепина Л.П., Зимин Б.И., Серегин Ю.А., Черников А.А., Вальдес М. Предварительная оценка возможности искусственного регулирования осадков в провинции Камагуэй (Куба) по данным рандомизированных экспериментов. Труды 4 Международной конференции по Тропической метеорологии., 1989., с. 325-330.

19. Батиста Л., Белинский О. И., Беляев В.П., Данелян Б.Г., Зимин Б.И., Колосков Б.П., Мельничук Ю.В., Попова Л. Облачные ресурсы для увеличения осадков на КМП. Труды Всесоюзной конференции по активным воздействиям на гидрометеорологические процессы 1987г., Киев., 1990., с. 84-89.

20. Беляев В.П., Данелян Б.Г., Зацепина Л.П., Зимин Б.И., Серегин Ю.А., Черников А.А., Вальдес М., Мартинес Д. Результаты рандомизированных экспериментов по засеvu конвективных облаков на Кубе. Труды Всесоюзной конференции по активным воздействиям на гидрометеорологические процессы 1987г., Киев., 1990., с. 214-220.

21. Батиста Л., Беляев В.П., Беликов С.Г., Данелян Б.Г., Зимин Б.И., Колосков Б.П., Мельничук Ю.В., Руденко Ю.М., Серегин Ю.А. Характеристики тропических конвективных облаков в районе Камагуэйского метеополигона (Куба) по данным радиолокационных наблюдений. Труды Всесоюзной конференции по активным воздействиям на гидрометеорологические процессы 1987г., Киев., 1990., с. 521-526.

22. Берюлев Г.П., Данелян Б.Г., Серегин Ю.А., Черников А.А. Физический контроль результатов воздействий при засевах фронтальных слоистообразных облаков. Труды Всесоюзной конференции по активным воздействиям на гидрометеорологические процессы 1987г., Киев., 1990., с. 200-204.

23. Агапов Ю.В., Данелян Б.Г., Колдаев А.В., Колосков Б.П., Моргоев А.К., Гамбоа Ф. Evolution of supercooled liquid water and radar characteristics of the tropical convective cloud. Fifth Inter.Symp. on Tropic.Meteor. Obninsk, 26 May- June 1991. Abstr. of Pap., 1991, p.140.

24. Батиста Л., Беляев В.П., Данелян Б.Г., Зацепина Л.П., Зимин Б.И., Колосков Б.П., Серегин Ю.А., Вальдес М., Мартинес Д., Перес К. Результаты экспериментов по активным воздействиям на изолированные облака и облачные кластеры на Камагуэйском метеорологическом полигоне. Труды ЦАО выпуск 177., М., Гидрометеиздат., 1992 г., с. 54-61.

25. Берюлев Г.П., Беляев В.П., Данелян Б.Г., Зимин Б.И., Колосков Б.П., Черников А.А. Оценка эффективности и количества дополнительных осадков из конвективных облаков. Метеорология и гидрология., 1995., № 4., с. 66-86.

26. Берюлев Г.П., Беляев В.П., Власюк М.П., Данелян Б.Г., Колосков Б.П., Корнеев В.П., Мельничук Ю.В., Черников А.А. Опыт активного воздействия на облака над Москвой 9 мая 1995 г. Метеорология и гидрология., 1996., № 5., с. 71-82.

27. Берюлев Г.П., Беляев В.П., Власюк М.П., Данелян Б.Г., Колосков Б.П., Корнеев В.П., Мельничук Ю.В., Черников А.А. Активные воздействия на облака и оценка их результатов: опыт работы над Москвой 9 мая 1995 г. Обзорение прикладной и промышленной математики, сер. Вероятность и статистика, М., "ТВП", 1996, т.36, вып.2, с.149-162.

28. Беляев В.П., Данелян Б.Г., Колосков Б.П., Ю.В., Черников А.А. Основные результаты экспериментов по увеличению осадков из конвективных облаков на Кубе. Труды ЦАО выпуск 181., М., Гидрометеиздат.. 1996 г., с. 52-60.

29. Берюлев Г.П., Власюк М.П., Данелян Б.Г., Колосков Б.П., Корнеев В.П., Поздеев В.Н., Федоров., Прошин Ю.И., Дихтяренко., Ларионов В.П., Колмогоров А.В. Результаты экспериментальных работ по ИУО в Якутии в 1995-1996 гг. Тезисы научной конференции Росгидромета декабрь 1996 г.

30. Беляев В.П., Данелян Б.Г., Зимин Б.И., Колосков Б.П., Ю.В., Серегин Ю.А. Влияние технологических и погодных условий проведения опытов на эффективность воздействия. Труды ЦАО выпуск 181., М., Гидрометеиздат., 1996 г., с. 38-51.

31. Берюлев Г.П., Зимин Б.И., Мельничук Ю.В., Колосков Б.П., Данелян Б.Г., Рябова Р.Ю., Руководящий документ. Методические Указания. Проведения работ по искусственному увеличению атмосферных осадков самолетными методами. РД 52.11.637-2002., Гидрометеиздат, С-П, 2002 г.

32. Берюлев Г.П., Зимин Б.И., Мельничук Ю.В., Колосков Б.П., Данелян Б.Г., Рябова Р.Ю., Руководящий документ. Методические Указания. Проведения работ по искусственному увеличению осадков из слоистообразных облаков. РД 52.11.646-2003., Гидрометеиздат, С-П, 2003 г.

33. V.P.Korneev., V.N.Stasenko., G.P.Beriulev., B.P.Koloskov., B.G.Danelian., J.Ortigao. Field studies of the possibility of precipitation enhancement by cloud seeding over the Portugal territory. WMP Report №39 Casablanca Morocco 7-12 April 2003 ELGHTH WMO scientific conference of weather modification.

34. B.P.Koloskov., G.P.Beriulev., B.G.Danelian., A.A.Chernikov., E.A.Samusenko., A.Semsaryazani., Pahlavanhosseiny., G.Amiryazdani., Khatibi.

Result of precipitation enhancement operations in the central part of Iran during 1999-2001. WMP Report №39 Casablanca Morocco 7-12 April 2003 ELGHTH WMO scientific conference of weather modification

35. Плауде Н.О., Зотов Е.И., Вычужанина М.В., Данелян Б.Г., Манахова Н.А. Результаты исследований характеристик атмосферного аэрозоля в Сирии. Метеорология и гидрология.,2004., № 1., с. 71-82.

36. Берюлев Г.П., Данелян Б.Г., Невзоров А.Н. Исследование микрофизического строения холодных облаков над Сирией в марте-апреле 1991 г. Метеорология и гидрология.,2004., № 3., с. 51-61.