

МИНИСТЕРСТВО ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ
И ЭКОЛОГИИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИИ
И МОНИТОРИНГУ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
(Росгидромет)

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ВЫСОКОГОРНЫЙ ГЕОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ»



ДОКЛАДЫ
ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
ПО ФИЗИКЕ ОБЛАКОВ И АКТИВНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ
НА ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

23-27 октября 2017г.

Часть 2

г. Нальчик

УДК 551.509 + 551.324 + 504.3.054
ББК Д241.4я43 + 26.823 + 20.1
Д 633

Оргкомитет конференции:

Председатель: Беккиев М.Ю. – директор ФГБУ «ВГИ»
Заместители председателя: Калов Р.Х. – зам. директора ФГБУ «ВГИ» по научной работе;
Федченко Л.М. – главный научный сотрудник ФГБУ «ВГИ»;
Абшаев М.Т. - главный научный сотрудник ФГБУ «ВГИ»;
Калов Х.М. - главный научный сотрудник ФГБУ «ВГИ»

Члены оргкомитета:

Барекова М.В. – ученый секретарь ФГБУ «ВГИ»;
Колычева В.Г. – зам. директора ФГБУ «ВГИ» по общим вопросам;
Агзагова М.Б. – главный бухгалтер ФГБУ «ВГИ»;
Лиев К.Б. – зав. лабораторией радиолокационной метеорологии ФГБУ «ВГИ»;
Ташева Л.А. – комендант.

Д 633

Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы: сборник научных трудов. В 2 ч. Ч. 2 / Коллектив авторов. - Уфа: АЭТЕРНА, 2017. - 340 с.

ISBN 978-5-00109-257-5 ч.2

ISBN 978-5-00109-258-2

Сборник содержит доклады, представленные на Всероссийскую конференцию по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы (23-27 октября 2017 г.), затрагивающие различные аспекты научных исследований в данной области, включая численное моделирование, натурные и лабораторные исследования, разработку и совершенствование техники и технологии АВ и др.

В конференции приняли участие специалисты в области модификации погоды из Москвы, Санкт-Петербурга, Долгопрудного, Нальчика.

На конференцию представлен 91 доклад по следующим секциям:

- Секция 1. «Исследование процессов облако- и осадкообразования» (59 докладов, в том числе 26 стендовых);
- Секция 2. «Методы и технические средства активных воздействий на гидрометеорологические процессы» (24 доклада, в том числе 13 стендовых)
- Секция 3. «Оценка эффективности работ по активным воздействиям на гидрометеорологические процессы» (3 доклада)
- Секция 4. «Экологические аспекты активных воздействий» (5 докладов)

© ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» 2017

© Коллектив авторов, 2017

© ООО «АЭТЕРНА», 2017

Содержание

СЕКЦИЯ 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБЛАКО- И ОСАДКООБРАЗОВАНИЯ

1.1. Аппаратура и методы измерения

Инюхин В.С.

Методология повышения качества сбора и представления радиолокационных данных для определения микроструктуры града 7

Капитанников А.В., Шаповлов А.В., Шаповлов В.А., Атабиев З.М., Пометельников В.А.
Аппаратно-программный комплекс управления активными воздействиями на грозоградные процессы «Мерком» 19

Созаева Л.Т.

Применение ДМРЛ–С для обнаружения опасных явлений погоды: состояние и перспективы развития 35

Абшаев А.М., Абшаев М.Т., Ефремов В.С., Вылегжанин И.С.

Российские метеорологические радиолокаторы для исследований и активного воздействия на облака 42

Абшаев А.М., Абшаев М.Т., Зорин В.А., Кратиров Д.В., Михеев Н.И.

Противоградный комплекс «Ас-Элия» 51

Шаповалов А.В., Стасенко В.Н., Аджиев А.Х., Кравченко Н.А., Лашманов Ю.К., Шаповалов В.А.

Объединение радиолокационной и грозопеленгационной информации для повышения эффективности и заблаговременности обнаружения опасных явлений погоды 61

Калов Х.М., Калов Р.Х.

Лазерно-локационное устройство контроля и регистрации результатов рассеивания облачных образований 67

1.4. Прогноз опасных гидрометеорологических явлений

Кагермазов А.Х., Созаева Л.Т.

О прогнозе последствий сильной конвекции и связанных с ней чрезвычайных ситуаций на юге ЕТР 72

Ершова Т.В.

Термодинамическое состояние атмосферы при опасных конвективных явлениях 77

Алита С.Л., Борисова Н.А., Инюхин В.С., Якшина И.И.

Технология оперативного прогноза селевых потоков и паводков на базе автоматизированного метеорологического радиолокатора для горных и предгорных территорий Северного Кавказа 84

**СЕКЦИЯ 2. МЕТОДЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА
АКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ**

2.1. Активные воздействия на градовые процессы

Абшаев М.Т., Малкарова А.М. Физические основы предотвращения града, результаты и перспективы развития	91
Двоглазов С.М., Бычков А.А., Корнеев В.П., Несмеянов П.А., Петрунин А.М., Частухин А.В. Технические средства воздействия на облака с легкомоторных летательных аппаратов	111
Ашабоков Б. А., Федченко Л. М., Шаповалов А. В. О некоторых подходах к разработке методов управления процессами осадкообразования в конвективных облаках	116
Инюхин В.С., Лиев К.Б., Куцев С.А., Макитов В.С. Районирование территории Кабардино-Балкарской республики по степени градовой активности	127
Петрунин А.М., Корнеев В.П., Колосков Б.П., Бычков А.А., Частухин А.В., Данелян Б.Г. Методические аспекты применения наземных аэрозольных генераторов для искусственного регулирования осадков	133
Доронин А.П., Кулешов Ю.В., Петроченко В.М., Щукин Г.Г. Искусственные облака и туманы как перспективное средство решения хозяйственных и экологических задач	141
Сафаров С.Г., Насибли А.А. Радиолокационное исследование градовых явлений в западной части Азербайджана	149
Амиранашвили А.Г., Дзодзуашвили У.В., Глонти Н.Я., Кайшаури М.Н., Саури И.П., Чаргазия Х.З., Чихладзе В.А. Обновленная Служба борьбы с градом в Кахетии и перспективы развития работ по модификации погоды в Грузии	155
Жарашуев М.В., Циканов Х.А., Гергоков А.Х., Аппаева Ж.Ю. Программный комплекс сопряжения радиолокационных и наземных данных	162
Ватиашвили М.Р. Автоматизированные метеорологические радиолокаторы и характеристики радиолокационной отражаемости облаков и облачных систем при различных единицах измерений	169
Макитов В. С., Инюхин В.С., Жарашуев М. В. Радиолокационные исследования формирования и развития отдельных конвективных ячеек в комплексах многоячеековых градовых процессов	180

Борисова Н.А., Суспицына Ю.В. Перспективы использования электронной базы данных по активным воздействиям в изучении влияния активных воздействий на градовые процессы	187
Акимова И.И., Ресенчук С.Е., Кузьминова А.Г. История становления и развития активных воздействий в Ставропольском крае	192
<i>2.2. Активные воздействия на электрические явления в облаках и другие гидрометеорологические процессы</i>	
Михайловский Ю.П., Синькевич А.А. О методах активных воздействий на электрические явления в облаках	197
Камруков А.С., Пашкевич М.Ю., Березинский Н.А., Трофимов А.В., Шаповалов А.В., Ружин Ю.Я., Архипов В.П., Березинский И.Н., Квочур А.Н., Шереметьев Р.В. Метод создания токопроводящих объемов в атмосфере для инициирования молниевых разрядов	206
Аджиев А.Х., Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Геккиева Ж.М., Казакова С.Т., Кулиев Д.Д., Муратов И.А. Динамика грозовой активности конвективных облаков при их естественном развитии и при активных воздействиях	214
Кудринская Т.В., Куповых Г.В., Редин А.А. Мониторинг электрического поля атмосферы в районе Эльбруса	225
Хучунаев Б.М., Будаев А.Х., Теунова Н.В., Ташилова А.А., Панозтов В.П. Влияние электрического поля на процессы образования кристаллов льда на частицах реагента на основе AgI	232
Тертышников А.В., Козлов В.Н., Куповых Г.В., Удриш В.В. Оценки радиоактивности и электрического поля в Приэльбрусье для планирования работ по ионизации атмосферы	237
Бейтуганов М.Н. Электрические разряды различных типов и молний как причина превращения частиц микропримеси атмосферы в зародыши града	249
Машуков И.Х., Аджиева А.А., Шаповалов В.А. Влияние локальных погодных явлений на изменение напряженности электрического поля атмосферы	257
Машуков И.Х., Шаповалов В.А., Аджиева А.А. Снижение шумов в данных мониторинга хода напряженности электрического поля атмосферы с использованием фильтра Калмана	264

2.3. Активные воздействия на снежные лавины

Аджиев А.Х., Беккиев М.Ю., Болгов Ю.В.

Математическое моделирование динамики снежных лавин

271

СЕКЦИЯ 3. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТ ПО АКТИВНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ НА ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Данелян Б.Г., Кирин Д.В., Петров В.В., Корнеев В.П., Колосков Б.П.

Некоторые результаты исследований эффективности воздействий на облака с помощью самолетных приборных комплексов

284

Борисова Н.А., Геккиева Ж. М., Гергоков А. Х.

Принцип создания электронной базы данных для хранения и использования материалов по активным воздействиям на градовые процессы

290

Ашабоков Б.А., Федченко Л. М., Ташилова А. А.

Метод снижения рисков в сельском хозяйстве, связанных с градобитиями

298

СЕКЦИЯ 4. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ АКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Ким Н.С., Корнеев В.П., Частухин А.В., Щукин Г.Г.

К вопросу экологической безопасности российских технологий активных воздействий на облака

306

Мазуров Г.И., Акселевич В.И.

Эколого-климатологические аспекты опасных природных и техногенных явлений в Красноярском крае

313

Курбаткин В.П., Ушинцева В.Ф.

Об оптимальном соотношении внутри пустынно-степных зон площадей, занятых производственной деятельностью и естественными ареалами

321

Керимов А.М.

Особенности вымывания тяжелых металлов осадками в высокогорье

328

Хучунаев Б.М., Балкарова С.Б., Машоков Р.А.

Анализ исследований наночастиц в окружающих средах, их экологическая опасность и риски

335

МЕТОДОЛОГИЯ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА СБОРА И ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ ГРАДА

Инюхин В. С.

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

Для определения микроструктурных характеристик градовых облаков была разработана методология повышения качества сбора и представления радиолокационных данных, включающая в себя: технические средства сбора и передачи данных, программно-технические средства сопряжения и анализа разнородной информации, модели, способствующие повышению качества представления данных, модифицированные методы измерений, а также различные методики измерений и представления информации.

Рассмотрим вкратце наиболее важную часть методологии – методико-теоретические основы радиолокационного определения микроструктуры града.

Решение обратной задачи метеорадиолокации по определению микрофизических параметров облаков сводится к разрешению интегрального уравнения Фредгольма первого рода

$$\int_0^{\infty} \sigma_2(\lambda, \varepsilon, d)n(d)dd = \eta(\lambda), \quad (1)$$

где $\sigma_2(\lambda, \varepsilon, d)$ - ядро интегрального уравнения.

Для корректного решения этого уравнения необходимо использовать дополнительную информацию о виде функции $n(d)$ и о значениях $\sigma_2(\lambda, \varepsilon, d)$ для реальных облачных частиц.

В результате решения прямой задачи удастся выявить степень влияния диэлектрической неоднородности естественных градовых частиц с различной фазовой структурой на радиолокационные характеристики градового облака.

Измеряемые значения $\eta(\lambda)$ могут быть получены для ограниченного количества длин волн λ . Очевидно, чем больше это число, тем точнее может быть решена обратная задача радиолокации – определение микроструктуры града. Однако одновременное получение радиолокационной информации из одного и того же облачного объема на нескольких длинах волн - задача технически весьма трудная. Поэтому актуальной в настоящий период является проблема корректного решения обратной задачи при использовании одной или двух длин волн.

Радиолокационная модель градового облака

Исследования радиолокационных характеристик градовых осадков, проводимые до настоящего времени, позволили установить связь этих характеристик с некоторыми физическими

параметрами (размером, концентрацией, диэлектрической проницаемостью) града. Однако эти связи не исследовались комплексно, а влияние ряда параметров учитывалось недостаточно. Для града к таким параметрам необходимо отнести температуру и водность его зоны роста, характеристики спектра размеров градовых частиц, плотность градин, степень неоднородности диэлектрических свойств смеси вода-лед в градовой структуре, соотношение градовой и дождевой фракций в двухкомпонентных градовых осадках.

Для повышения точности многоволновой радиолокации при определении микроструктуры града необходимо было разработать физически более обоснованную модель градового облака, в которой, путем численного моделирования радиолокационных характеристик града, определить параметры градовых осадков, оказывающих наибольшее влияние на формирование отраженного сигнала для различных длин волн. В основу модели были положены следующие предположения: градины представляют собой сферические частицы, состоящие из чистого льда (сухой град) или льда с включениями воды (обводненный или губчатый град). В качестве функции распределения градин по размерам было выбрано гамма-распределение. Параметры распределения: среднекубический размер града \bar{d}_3 и параметр формы кривой распределения μ варьировались в процессе исследований в пределах: $0,5 < \bar{d}_3 < 3,0$ см; $0 < \mu < 10$. Поперечники обратного рассеяния и ослабления радиолокационного сигнала рассчитывались в модели по точным дифракционным формулам.

Закономерности рассеяния радиолокационного сигнала сантиметрового диапазона в градовых осадках

Для учета влияния всех факторов на отраженный радиолокационный сигнал проводились расчеты радиолокационной отражаемости и коэффициента ослабления [2, 4, 9, 11, 12]. Рассматривались различные случаи: спектры сухих градин, спектры градин, покрытых пленкой воды, покрытых смесью воды и льда, губчатого и неоднородного града.

На основании детального теоретического исследования зависимости радиолокационных характеристик полидисперсного ансамбля градовых частиц от параметров рассеивающей среды показано, что в наибольшей степени отражаемость и коэффициент ослабления града зависят от среднего размера градин. Изменение d_3 от 0,5 до 4,0 см приводит к увеличению отражаемости на 3-4 порядка и коэффициента ослабления на 2-3 порядка, отражаемость града пропорциональна d^α , и если для области Релея величина α постоянна и равна 6, то для реального града α меняется от 1,8 до 5,5 в зависимости от длины волны и степени обводненности града. Показано также, что изменение η_λ и k_λ града за счет вариаций количества воды в его

структуре составляет 1,5–2,0 порядка величины. При этом установлено, что рост η_λ и k_λ града с увеличением толщины пленки воды на нем происходит до размера града $\bar{d}_3 \leq \lambda/2$, а для града большего размера зависимость становится обратно пропорциональной. Эта же закономерность характерна и для губчатого града.

Для сухого града было установлено, что совокупность более плотных градин рассеивает больше электромагнитной энергии для всех рассмотренных длин волн. Изменение плотности от 0,4 до 0,92 г/см³ приводит к возрастанию η_{10} в 5 - 8 раз с ростом \bar{d}_3 от 0,5 до 3,0 см, а $\eta_{2,0}$ при этом возрастает в 8 - 30 раз.

Для смешанных градовых осадков необходимо учитывать вклад дождевой составляющей при интерпретации радиолокационных измерений. Величина отражаемости дождя обычно меньше отражаемости града на длине волны 10 см. Для более коротких длин волн: $\lambda = 3,2$ см и, в особенности, $\lambda = 2,0$ см отражаемость дождя во много раз может превосходить отражаемость града.

Установлено, что вариации радиолокационной отражаемости града, связанные с изменением μ от 0 до 10, по сравнению со значениями этой характеристики для $\mu = 2$ незначительны и не превышают 30-40% для рассмотренного диапазона длин волн.

В градовом облаке имеются две различных области существования града: растущий град и выпадающий (тающий) град, которые существенно отличаются условиями формирования поверхностной пленки на градинах [2].

Радиолокационная модель растущего града

Соотношения между количеством градин, растущих в различных режимах, а также толщина пленки воды будут определяться температурой и водностью облака. Таким образом, толщина пленки воды на градинах и соотношение сухих и мокрых градин в спектре будет определяться их размерами и параметрами облака. Критическое значение водности облака $\omega_{кр}$, температура окружающей среды θ_∞ и критический радиус градин $R_{кр}$, при котором наступает режим мокрого роста, связаны соотношением [8, 10]:

$$R_{кр} = \left[\frac{4\beta\lambda M \left(\frac{2K}{v}\right)^{1/2} \text{Pr}^{1/3} \theta_\infty}{E\omega_{кр} K(L + C_{жс}\theta_\infty)} \right]^{4/3}, \quad (2)$$

где λ , ν - коэффициенты теплопроводности и кинематической вязкости воздуха соответственно; E - интегральный коэффициент коагуляции градин с облачными каплями; L - удельная теплота кристаллизации воды; $C_{жс}$ - теплоемкость воды; $\beta \approx 0,3$; $M = 1,6$; $K \cong 2 \cdot 10^3 \text{ см}^{1/2} \text{ с}^{-1}$ - числовые коэффициенты. Формула (2) определяет критическое значение радиуса при данных значениях водности и температуры.

На рис. 1 показан спектр града, разделенный на две части: в области А при $d < d_{кр}$ происходит рост сухого града, в области Б при $d > d_{кр}$ - рост мокрого града.

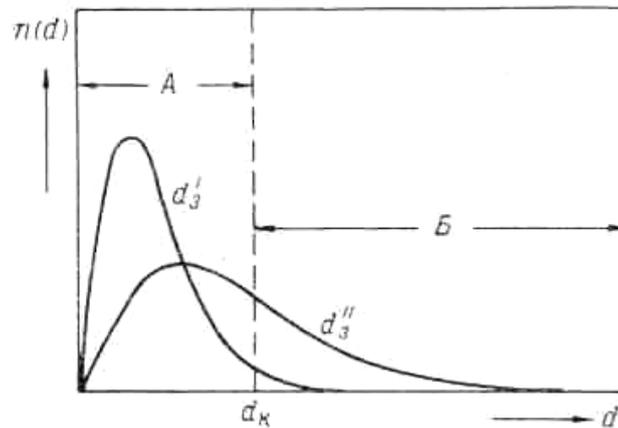


Рис. 1. Соотношение сухих и обводненных градин в двух спектрах, отличающихся среднекубическим диаметром d_3 ($d_3'' > d_3'$) [12].

Формулы для радиолокационной отражаемости и коэффициента ослабления в случае неоднородного града имеют следующий вид [9,11].:

$$\eta = 10^{-6} \left(\int_{r_{\min}}^{r_{кр}} n(r) \sigma_p(r) dr + \int_{r_{кр}}^{r_{\max}} n(r) \sigma_p(r, h) dr \right), \quad (3)$$

$$\gamma = 0,4343 \left(\int_{r_{\min}}^{r_{кр}} n(r) \sigma_{oc}(r) dr + \int_{r_{кр}}^{r_{\max}} n(r) \sigma_{oc}(r, h) dr \right), \quad (4)$$

где σ_p и σ_{oc} - поперечные сечения обратного рассеяния и полного ослабления; $r_{кр}$ - критическое значение радиуса границы, разделяющей сухой и мокрый рост; $n(r)$ - функция распределения града по размерам (гамма-функция (9) с $\mu = 2$).

Основной вклад в суммарную отражаемость и коэффициент ослабления растущего градового облака вносят обводненные градины. Это связано с тем, что в процессе роста обводненными становятся, обычно, наиболее крупные градины в спектре. Сопоставление результатов

моделирования вертикального профиля радиолокационной отражаемости η_{10} и $\eta_{3,2}$ и отношения $\eta_{3,2}/\eta_{10}$ с данными радиолокационных наблюдений за конкретный день показало плохое их совпадение.

Радиолокационная модель выпадающего (тающего) града

В теплой части атмосферы выпадающие градины начинают таять и покрываться пленкой талой воды, которая может при определенных условиях срываться с поверхности, образуя капли дождя. Аэродинамические условия срыва избыточной влаги с поверхности градины определяются скоростью ее обдува, и, следовательно, размером последней. Построение модели выпадающего града создано на результатах, полученных в [3, 4, 5-7].

Радиолокационная модель тающего града должна учитывать [4]:

- образование и рост водяной пленки на поверхности градин;
- срыв пленки и формирование спектра капель;
- изменение обоих спектров в процессе падения;
- формирование и трансформацию радиолокационной отражаемости от смеси град-дождь на различных длинах волн.

В результате расчетов в [4] была получена зависимость толщины пленки воды h от радиуса градины R и пути таяния H . Эта зависимость может быть аппроксимирована формулой вида:

$$h(R, H) = B(H) \cdot R^{-\beta(H)}, \quad (5)$$

где коэффициенты $B(H)$ и $\beta(H)$ определяются для различного пути H .

На рис. 2 приведены графики изменения толщины пленки воды $h(R, H)$ для различного пути таяния H .

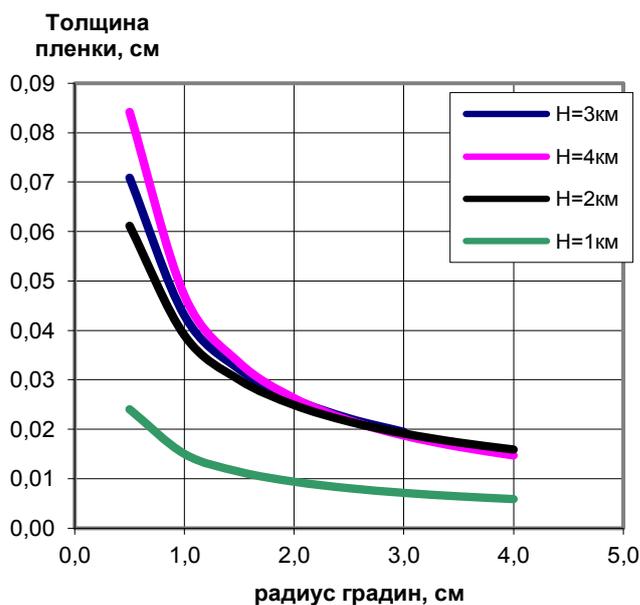


Рис. 2 Графики $h(R, H)$, построенные для различных путей таяния H .

Используя изложенную модель таяния, можно рассчитать величины радиолокационной отражаемости града для различных длин волн и различных H , используя соотношение:

$$\eta_{zp} = 10^{-6} \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \sigma_{zp}(h, r) n_{zp}(r) dr. \quad (6)$$

Так, для $H = 3$ км получены следующие соотношения для отражаемости:

$$\eta_{10} = 5 \cdot 10^{-8} d_3^{4,36}, \quad (7)$$

$$\eta_{5,6} = 4,8 \cdot 10^{-7} d_3^{2,69}, \quad (8)$$

$$\eta_{3,2} = 1 \cdot 10^{-6} d_3^{1,24}. \quad (9)$$

Для $H = 3$ км имеем следующие соотношения для основных параметров микроструктуры града, полученные двухволновым методом:

- для размера града

$$\bar{d}_3 = 2,83 \cdot \left(\frac{\eta_{3,2}}{\eta_{10}} \right)^{-0,31}; \quad (10)$$

- для концентрации града

$$N = 1,91 \cdot 10^5 \eta_{3,2}^{1,39} \cdot \eta_{10}^{-0,39}; \quad (11)$$

- для потока кинетической энергии града

$$\dot{E} = 2,3 \cdot 10^7 \eta_{3,2}^{0,1} \cdot \eta_{10}^{0,9}; \quad (12)$$

- для ледности

$$W = 1,8 \cdot 10^6 \eta_{3,2}^{0,47} \cdot \eta_{10}^{0,53}; \quad (13)$$

- для коэффициента ослабления в граде, $\lambda = 3,2$ см

$$k_{3,2} = 1,1 \cdot 10^6 \eta_{3,2}^{0,81} \cdot \eta_{10}^{0,19}. \quad (14)$$

На практике при радиолокационных исследованиях градовых осадков, а также в практике градозащиты удобно использовать универсальную формулу для расчета размера града в осадках, учитывающую вертикальный угол радиолокационного зондирования (угол места) ε :

$$\bar{d}_3 = A(H) \cdot \left(\frac{\eta_{3,2}}{\eta_{10}} \right)^{\alpha(H)}, \quad (15)$$

где $A(H) = 4,62 - 0,35H$; $\alpha(H) = 0,05 \cdot H - 0,49$; $H = H_0 - r \sin(\varepsilon)$.

В результате выпадения града в теплой части атмосферы часть льда превращается в воду, выпадающую в виде дождя.

В процессе таяния града его радиолокационная отражаемость может изменяться значительно в зависимости от λ и \bar{d}_3 . Отражаемость спектра сорвавшихся капель становится сравнимой с

отражаемостью града для $\lambda = 3,2$ и особенно при $\lambda = 2,0$ см у поверхности земли. Для $\lambda = 10$ см максимальная отражаемость от капель значительно меньше, чем от града.

Радиолокационные методы измерения микроструктуры града

На основании проведенных исследований особенностей рассеяния радиоволн в градовых осадках усовершенствован существующий двухволновый метод радиолокационного определения микрофизических характеристик града, что позволяет с большей точностью проводить измерения на автоматизированном МРЛ.

На основании многолетних исследований града дистанционными и контактными методами и получения эмпирической связи между размером и концентрацией града предложен одноволновый радиолокационный метод оценки размера града.

Обоснована применимость многоволнового автоматизированного радиолокатора для измерения кинетической энергии града. Исследуются погрешности, которые могут возникать при этом за счет присутствия в градовых осадках восходящих или нисходящих потоков воздуха, вариаций параметра формы кривой распределения градовых частиц по размерам в реальных градобитиях.

Проведены исследования по уточнению связи коэффициента ослабления $k_{3,2}$ с отражаемостью η_{10} . Получены аналитические зависимости для дождя, града и смешанных осадков.

Двухволновый метод

Известный двухволновый метод обнаружения града базируется на различиях в частотной зависимости рассеяния радиоволн гидрометеорами разной природы. Исследование микрофизических характеристик града в рамках этого метода производится по данным одновременного измерения радиолокационной отражаемости на двух длинах волн. Однако однозначная количественная интерпретация полученных данных связана с определенными трудностями. Эти трудности обусловлены, прежде всего, сложностью учета большого числа параметров, влияющих на рассеивающие и поглощающие свойства облачной среды. Поэтому корректное решение обратной задачи радиолокации на двух длинах волн может быть проведено лишь при использовании необходимого количества априорной информации. Обоснование использования двухволнового радиолокационного метода для восстановления параметров микроструктуры града проведено в работах М. Т. Абшаева, Ю. А. Дадали и др. При этом полагалось, что толщина поверхностной пленки воды на всех градинах равна константе (0,05 см), а плотность каждой градины равна 0,83 г/см³. Указанный метод, несмотря на столь жесткие предположения, использовался для измерения микрофизических характеристик града во всем объеме облака, хотя известно, что условия

его роста и выпадения могут существенно отличаться друг от друга. На рисунках 3 приведены графики поведения отражаемостей η_{10} и $\eta_{3,2}$, коэффициентов ослабления k_{10} и $k_{3,2}$ и отношения отражаемостей $\eta_{3,2}/\eta_{10}$, полученные для града с толщиной пленки воды $h = 0,05$ см.

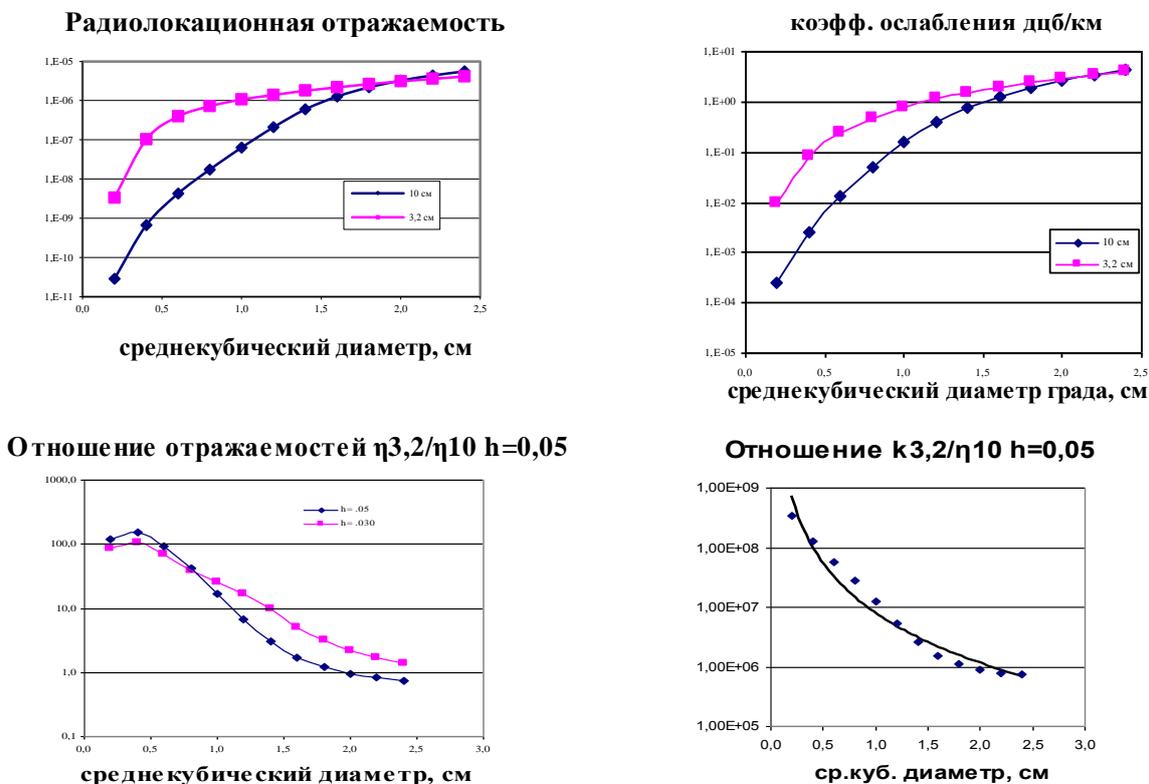


Рис. 3. Поведение отражаемости и коэффициента ослабления

На основании этих данных может быть:

- обоснована применимость двухволнового метода для определения микроструктуры града;
- получены уравнения регрессии, связывающие отражаемости η_{10} и $\eta_{3,2}$, коэффициенты ослабления k_{10} и $k_{3,2}$ и отношения отражаемостей $\eta_{3,2}/\eta_{10}$ с размером града.

Для уточнения двухволнового радиолокационного метода определения размера и концентрации града была использована радиолокационная модель градового облака, описанная выше. По предложенной схеме двухволнового радиолокационного метода более точное определение значений \bar{d}_3 и N достигается за счет привлечения дополнительной информации о расположении зондируемого объема относительно нулевой изотермы.

Чрезвычайно важным остается вопрос о корректном учете ослабления электромагнитных волн при радиолокационных исследованиях микрофизики града. Известно, что при двухволновых исследованиях в большей степени ослабляется сигнал на более короткой длине волны. Для

учета такого ослабления часто используется связь коэффициента ослабления $k_{3,2}$ с отражаемостью η_{10} . В результате численных исследований радиолокационных характеристик было получено, что для дождя связь $k_{3,2} - \eta_{10}$ имеет вид: $k_{3,2} = 2,0 \cdot 10^6 N^{0,2} \cdot \eta_{10}^{0,8}$, где N - концентрация капель; или $k_{3,2} = 9,1 \cdot 10^6 R^{0,42} \cdot \eta_{10}^{0,8}$, где R - интенсивность дождя. Для града без дождя $k_{3,2} = 2,5 \cdot 10^3 N^{0,53} \cdot \eta_{10}^{0,47}$ и для града с дождем, вызванным таянием града, $k_{3,2} = 3,4 \cdot 10^4 N^{-0,9} \cdot \eta_{10}^{0,61 \cdot N^{-0,5}}$.

При автоматизированных радиолокационных измерениях микроструктуры града двухволновый метод может быть легко реализован. При этом на экран компьютера обычно выводятся горизонтальные и вертикальные разрезы поля параметров микроструктуры. На рисунке 4 приводится алгоритм автоматизированного двухволнового метода определения параметров микроструктуры града, получаемых вдоль луча наблюдения.

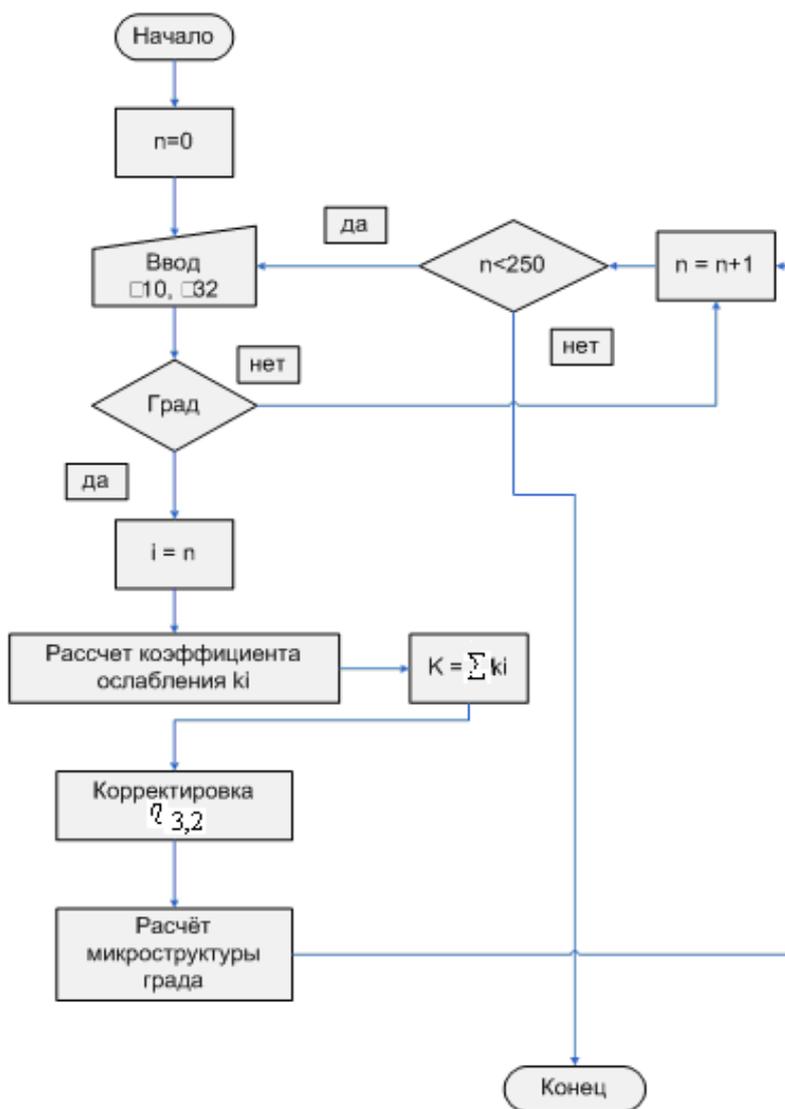


Рис.4. Алгоритм автоматизированных радиолокационных измерений микроструктуры града вдоль луча.

Одноволновый метод

Одноволновые методы индикации града широко использовались в практике противоградовых работ в течение многих лет, фактически с начала их проведения.

Необходимость использования двух длин волн объясняется тем, что значение радиолокационной отражаемости на каждой длине волны является функцией как размера града, так и его концентрации. Переход к одноволновой зависимости может базироваться на различных допущениях и упрощениях, приводящих к увеличению методической погрешности измерения. В некоторых работах авторы принимают допущение о константе концентрации града в облаке. Полученные таким образом одноволновые выражения имеют большую погрешность именно в области крупных градин, поскольку их реальная концентрация в облаке может быть на порядки ниже, чем у градин среднего размера. Наиболее обоснованным выглядит подход, основанный на использовании эмпирической зависимости между размером и концентрацией града в облаке. Такие зависимости могут быть получены как по результатам многолетних двухволновых радиолокационных измерений града [13], так и по результатам прямых самолетных [14,15] или наземных измерений спектров града.

На основании многолетних двухволновых радиолокационных исследований была найдена корреляционная связь размера и концентрации града, растущего в облаке

$$N = 0,31 \cdot d_3^{-3,64}, \quad (16)$$

которая была использована для получения простой одноволновой формулы оценки размера града:

$$d_3 = 1,15 \cdot 10^6 \eta_{10}^{0,79}. \quad (17)$$

Формула (17) может быть использована для оценки среднекубического размера града в зоне его роста. Очевидно, что она дает лишь приближенные значения размера, однако для оперативной оценки размера града при проведении противоградовых проектов такой подход может быть использован. Кроме того, анализ ее показывает, что для больших значений η_{10} , возможно, мы получаем завышенные значения d_3 . По этой причине следует с осторожностью использовать соотношение (17) при отражаемостях больших 70 dBZ.

Измерение кинетической энергии выпадающего града

Одним из основных вопросов экспериментальных исследований градовых процессов является точная количественная оценка интенсивности градовых осадков, позволяющая достаточно однозначно параметризовать ущерб от градобитий. Этим объясняется повышенный интерес к такому параметру градового процесса как кинетическая энергия выпадающего града. Ряд иссле-

дователей (Федерер, Валдвогел, Екклз, Абшаев, Дадали и др.) рассматривают возможности радиолокационного измерения кинетической энергии града. Однако вопрос о точности таких измерений остается открытым. В частности, мало изучено влияние физических параметров градовых осадков на точность радиолокационных измерений потока кинетической энергии града \dot{E} . При радиолокационном измерении \dot{E} эта ошибка не превышает 20 – 25 %. При радиолокационном измерении потока кинетической энергии града определенную погрешность может внести наличие вертикальных потоков воздуха, сопровождающих градобитие. Так за счет увеличения скорости нисходящих потоков воздуха от 0 до 7 м/с поток кинетической энергии града с $\bar{d}_3 = 1$ см увеличивается в 2 - 3 раза, хотя на величине отражаемости это не сказывается. Таким образом, точность радиолокационного измерения \dot{E} будет кроме всего прочего определяться наличием или отсутствием вертикальных потоков воздуха в зоне выпадения градовых осадков.

В работе получена зависимость, связывающая поток кинетической энергии града \dot{E} (Дж/м²с) с отражаемостью на двух длинах волн η_{10} и $\eta_{3,2}$, измеренной у поверхности земли, в виде [17]:

$$\dot{E} = 2,4 \cdot 10^7 \eta_{10}^{0,9} \eta_{3,2}^{0,1} \quad (16)$$

Отличие соотношения (16) от ранее известных расчетных формул заключается в том, что оно получено теоретически исходя из ранее описанной радиолокационной модели градового облака.

Выводы

В докладе рассмотрены наиболее важные части методологии повышения качества измерений микрофизических параметров града - радиолокационная модель градового облака и радиолокационные методы непосредственного измерения микроструктуры града. Радиолокационная модель отражает то обстоятельство, что в градовом облаке имеются две различных области существования града: растущий град и выпадающий (тающий) град, которые существенно отличаются условиями формирования поверхностной пленки на градинах. Рассмотрены следующие радиолокационные методы измерения микроструктуры града: двухволновый метод, одноволновый метод, радиолокационный метод измерения кинетической энергии града.

Список литературы

1. Инюхин В. С. Динамическая модель градового облака // Радиолокационная метеорология и активные воздействия: (сборник статей) – СПб.: ГГО. 2012. С. 145 -162.
2. Инюхин В. С. Закономерности рассеяния радиолокационного сигнала сантиметрового диапазона в градовых осадках // Радиолокационная метеорология и активные воздействия: (сборник статей) – СПб.: ГГО. 2012. С. 133 - 145.
3. Будак И. В., Дьячук В. А., Рудько Ю. С. О генерации капель осадков тающими градинами // Труды УкрНИИ. 1985. № 206. С. 20 - 28.

4. Жекамихов Х. М., Инюхин В. С., Макитов В. С. Трансформация радиолокационных характеристик спектра тающего града // Труды ВГИ. 1989. Вып. 79. С. 83 - 89.
5. Change S., Chen C. S. Water shells on the ice pellets and hailstones. // J. Atmos, Sci. 1974. № 31. P. 1391 - 1394.
6. Rasmussen R. M., Levirani V., Pruppacher H. R. A wind tunnel and theoretical study of the melting behavior of atmospheric ice particles. II: A theoretical study of frozen drops of radius $<500 \mu\text{m}$ // J. Atmos. Sci. 1984. Vol. 41, № 3. P. 374 - 380.
7. Rasmussen R. M., Levirani V., Pruppacher H. R. A wind tunnel and theoretical study of the melting behavior of atmospheric ice particles. III: Experiment and theory for spherical ice particles of radius $>500 \mu\text{m}$ // J. Atmos. Sci. 1984. Vol. 41, № 3. P. 381 - 388.
8. Жекамухов М. К. Некоторые проблемы формирования структуры градины. М.: Гидрометеиздат, 1982. С. 162.
9. Жекамухов М. К., Жекамихов Х. М., Инюхин В. С. Расчет радиолокационной отражаемости градовых облаков в стадии их максимального развития // Труды ВГИ. 1989. Вып. 74. С. 44 - 53.
10. Качурин Л. Г., Гашин Л. И. О плотности и структуре льда, растущего в потоке переохлажденного аэрозоля // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1968. Т.4, № 1. С.93 - 96.
11. Пытьев Ю. П., Инюхин В. С., Толмачев В. В. Некоторые результаты численного моделирования радиолокационных характеристик неоднородного града // Труды ВГИ. 1987. Вып. 67. С. 85 - 90.
12. Розенберг В. И. Рассеяние и ослабление электромагнитного излучения атмосферными частицами. - Л.: Гидрометеиздат, 1972. 348 с.
13. Инюхин В. С. Повторяемость некоторых микрофизических параметров града в сезонах 2009-2010 годов на территории КБР // Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. Нальчик, 24-28 октября, 2011. С. 192-199.
14. Хоргуани В. Г. Микрофизика зарождения и роста града. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 188 с.
15. Auer A. H. Distribution of Graupel and Hail With Size. Monthly weather review. May 1972. Vol. 100. N. 5. PP. 325 - 328.
16. Auer A. H. and Marwitz J. D. 1972: Hail in the vicinity of organized updrafts. J. Appl. Meteor., 11, 748 - 752.
17. Инюхин В. С., Макитов В.С. Возможности радиолокационных методов измерения кинетической энергии выпадающего града. Труды ВГИ, вып. 94. с 112-122.

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНЫМИ ВОЗДЕЙСТВИЯМИ НА ГРОЗОГРАДОВЫЕ ПРОЦЕССЫ "МЕРКОМ"

**Капитанников А.В.², Шаповалов А.В.¹, Шаповалов В.А.¹,
Атабиев З.М.³, Пометельников В.А.²**

¹ ФГБУ "Высокогорный геофизический институт", г. Нальчик

² ФГБУ "Северо-Кавказская ВС", г. Нальчик

³ ФГБУ "Краснодарская ВС", г. Лабинск

В работе представлено описание программного обеспечения АПК «МЕРКОМ», который предназначен для решения задач наблюдения за конвективными процессами, штормооповещения, регулирования осадков, противогодовой защиты. АПК обеспечивает высококачественное отображение радиолокационной информации, удобство и надежность использования на практике. Реализована трехмерная графика и объединение радиолокационной информации от группы метеорологических радиолокаторов.

АПК «МЕРКОМ» разработан с учетом предложений и замечаний ведущих специалистов по активным воздействиям (АВ) на облака и АМЦ аэропортов. Специалистами Северо-Кавказской ВС предложены алгоритмы оперативной калибровки РЛС по осадкам и критерии выбора объектов АВ, которые позволяют сократить расход противогодовых изделий при предотвращении града.

Программа вторичной обработки данных радиолокатора МРЛ-5 позволяет выводить на экран горизонтальные и вертикальные разрезы облачности на любом уровне, все стандартные радиолокационные карты, предусмотренные действующими руководящими документами (РД), а также параметры для оценки градоопасности ячеек и трехмерное отображение облаков и градовых очагов. При обнаружении в пределах защищаемой территории градовых процессов, оператор на изображении градовой ячейки вводит контуры площадки, или может быть включен режим автоматического формирования площадки. Площадка АВ передается в модуль «Электронный планшет», где автоматически рассчитываются оптимальные параметры пусков ракет с ближайших пунктов АВ с учетом наличия средств АВ и с учетом запретных секторов.

Координаты выработанных площадок засева и пуски ПГИ сохраняются в базе данных.

Программа «Мерком» позволяет анализировать в оперативном и архивном режимах характеристики наблюдаемого процесса. При анализе градового процесса формируется карта градовых дорожек.

Кроме двумерных горизонтальных и вертикальных разрезов, градовое облако отображается в трехмерном виде, что является обязательным атрибутом современных АРМ.

Обеспечено функционирование автоматизированных МРЛ-5 в составе региональной радиолокационной метеорологической сети ЮФО и СКФО. Обеспечено повышение качества радиолокационного обеспечения работ по АВ и штормоповещению в РФ.

Регион Северного Кавказа отличается большим количеством опасных конвективных процессов, здесь их повторяемость составляет более 22% от всех на территории РФ. Опасные явления погоды (ОЯП) дистанционно обнаруживают с помощью метеорологических радиолокаторов (МРЛ и ДМРЛ) и при точной калибровке они дают высокую оправдываемость метеоявлений. Следует отметить, что ограничения и недостатки радиолокационных метеорологических наблюдений с одного МРЛ снижают эффективность идентификации ОЯП при оперативной работе и могут привести к неправильной интерпретации метеорологической обстановки. Минимизировать недостатки информации с одного МРЛ (ДМРЛ) и расширить возможности использования радиолокационной информации в синоптическом масштабе позволяет радарная метеорологическая сеть.

В работе представлено описание аппаратно-программного комплекса «МЕРКОМ», который предназначен для решения задач противоградовой защиты, регулирования осадков, штормоповещения с использованием радиолокаторов МРЛ-5. В настоящее время на базе МРЛ-5, оснащенных АПК «МЕРКОМ», и ДМРЛ-С, оснащенных ПО «ГИМЕТ-2010», развивается региональная радиолокационная метеорологическая сеть ЮФО и СКФО.

Для решения задач АВ на градовые облака АПК «Мерком» установлены на МРЛ-5 следующие командно-диспетчерских пунктов (КДП) противоградовых служб Росгидромета: Черкесск, Отрадная, Чамлыкская, Попутненский, Новокубанский (Армавир), Западный (Веселый), Псынабо (КБР, Урванский район).

Преобразование аналогового видео МРЛ-5 в 12-разрядный цифровой код осуществляется с помощью высокотехнологичного быстродействующего контроллера на программируемых ПЛИС (рис.1).

Контроллер управляет включением-выключением МРЛ-5, выполнением программы сканирования пространства, обменом данным с персональным компьютером, на котором осуществляется накопление, анализ, визуализация и архивация радиолокационной метеорологической информации.



Рис.1. Внешний вид контроллера комплекса «Мерком».

Краткие характеристики АПК по обработке радиолокационной информации приведены в таблице 1.

Таблица 1

Технические характеристики	Ед. измер	Пределы значений
1	2	3
1. Радиолокационный обзор пространства:		
Максимальная дальность обзора	км	230
Продолжительность цикла обзора МРЛ-5	мин	3,5
Скорость вращения антенны МРЛ-5	об/мин	6±0.5
Число углов обзора в цикле	шт	17,23
Точность установки антенны по углу места и азимуту	град	±0,2
Дискретизация по дальности	м	500
Дискретизация по азимуту	гр	1.0
Дискретизация по углу места переменная	гр	переменная
Автоматический контроль аппаратуры МРЛ-5		да
Дистанционное включение аппаратуры МРЛ-5		да
Режим автоматического дежурства		да
Съем информации		одновременно с двух каналов
2. Преобразование радарных сигналов:		
Число разрядов АЦП	шт	12
Протяженность элементарных ячеек дальности	м	125
Число интервалов дальности	шт	1000
Контроль шума приемников		автоматич.

Программа вторичной обработки данных радиолокатора МРЛ-5 позволяет выводить на экран горизонтальные и вертикальные разрезы облачности на любом уровне, все стандартные радиолокационные карты, предусмотренные действующими РД, а также параметры для оценки градоопасности ячеек и трехмерное отображение облаков градовых очагов. На рис. 2 приведено главное окно программы «Мерком» с наблюдаемым градовым процессом 07.06.2012.

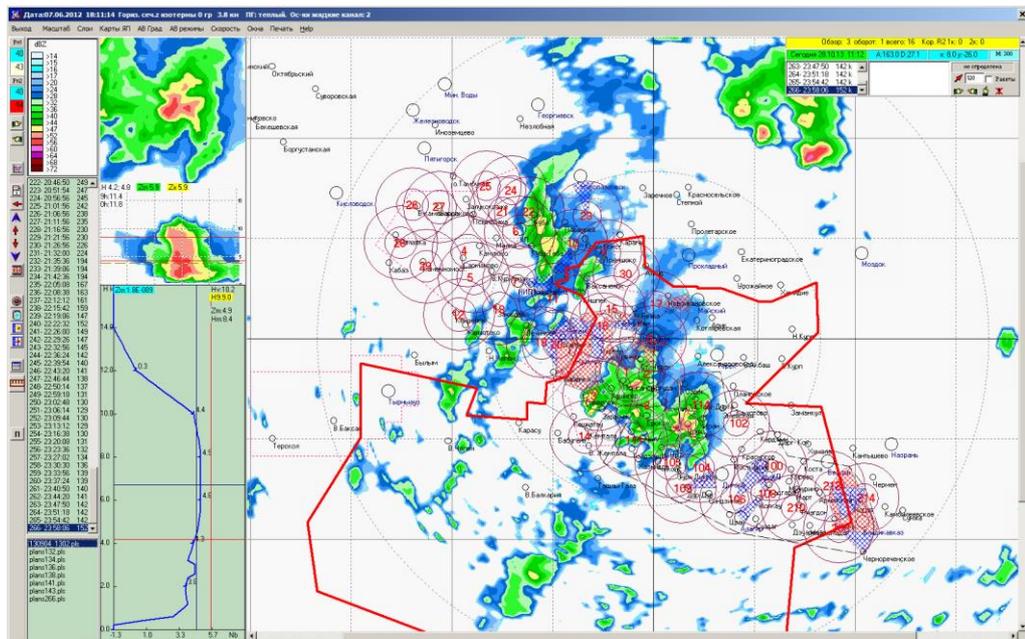


Рис.2. Главное окно программы «Мерком» с наблюдаемым градовым процессом.

На рис.3 приведен модернизированный КДП «Отрадная» Краснодарской ВС, оснащенный АПК «Мерком».



Рис. 3. Модернизированный КДП «Отрадная» Краснодарской ВС.

При нажатой кнопке «П» и выделении облака на горизонтальном разрезе с нажатой левой кнопкой мышки выводится на экран таблица параметров согласно руководству [1] (таблица 1, стр. 12). Расчет параметров осуществляется по формулам Г.1-Г.40 (стр. 59-70) приложения Г РД.

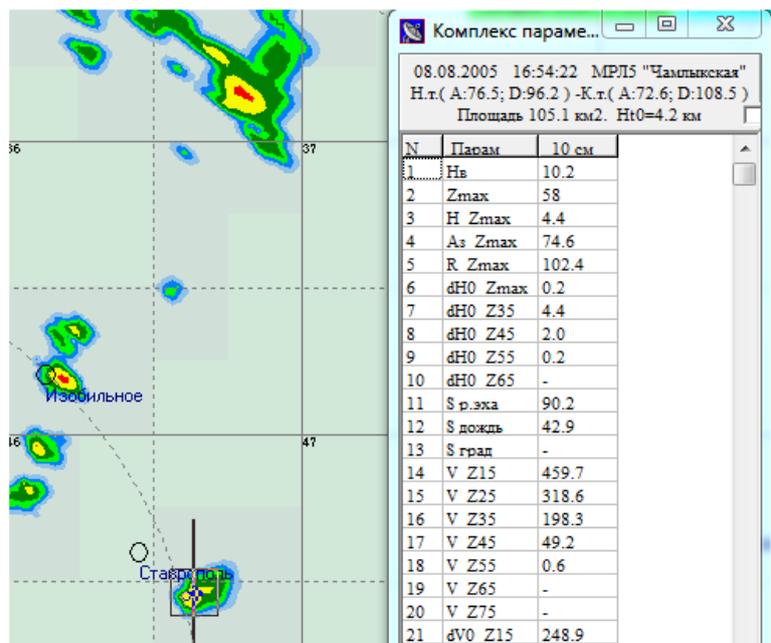


Рис.4. Комплекс параметров для определения категории объектов АВ.

Обмен информацией между МРЛ и уровнями радиолокационной сети осуществляется с использованием стандартных и унифицированных каналов связи, протоколов и интерфейсов:

- интерфейсы и протоколы глобального обмена информацией – Интернет;
- арендованные каналы связи различных операторов связи;
- радиоканалы, реализуемые с помощью различных технологий радиосвязи;
- спутниковые каналы связи, различных операторов связи.

При обнаружении в пределах защищаемой территории градовых процессов, оператор визуально вводит контуры площадки. Процедура ввода контура площадки завершается нажатием кнопки «Закончить ввод площадки». После этого площадка передается на «Электронный планшет», где автоматически рассчитываются оптимальные пуски ракет с ближайших пунктов АВ с учетом наличия средств АВ и учетом запретных секторов.

После того как площадка была передана в автоматизированную систему «Планшет», она сохраняется. С помощью открытия панели правой кнопкой мыши и строки «Список Площ» в диалоговом окне можно выбрать любую площадку из архива.

Программа «Мерком» позволяет анализировать в архивном режиме характеристики наблюдаемого процесса, в частности, руководитель АВ к отчету формирует карту градовых дорожек (рис.5).

Градовое облако может быть отображено в трехмерном виде, и руководитель АВ может в объемном виде оценить навес радиоэхо, превышение Z45 над нулевой изотермой и другие характеристики (рис.6).

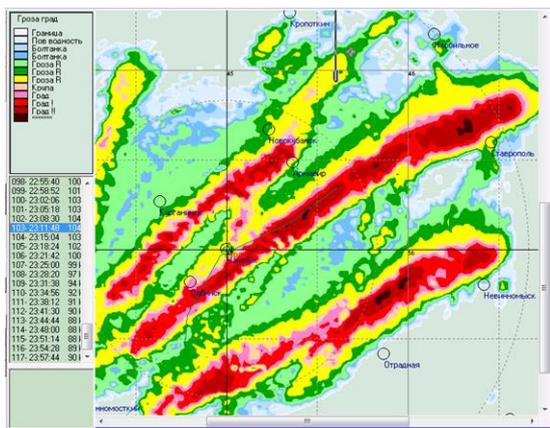


Рис.5. Карта градовых дорожек, построенная в программе «Мерком».

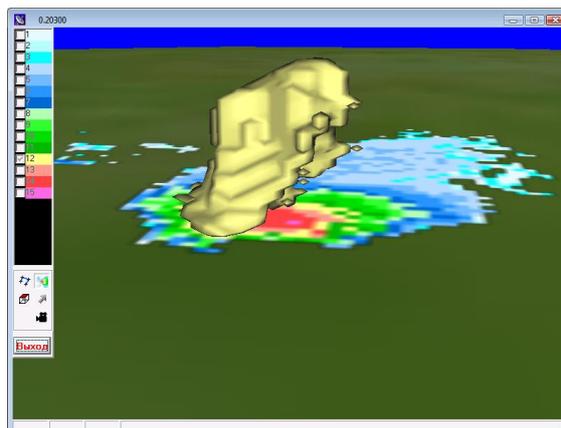


Рис.6. Трехмерное изображение градового облака в программе «Мерком».

Модуль «Электронный планшет» является составной частью автоматизированной системы МЕРКОМ и представляет комплекс программ, предназначенный для выработки, отображения, накопления, хранения, передачи команд на воздействие в работах по модификации погоды наземными средствами доставки реагентов (ракетный способ).

Поставляемая пользователю на его рабочее место информация о площадке внесения реагента с системы МЕРКОМ, выработка отображения, накопления, хранения, передачи команд на воздействие удовлетворяют требованиям действующего РД.

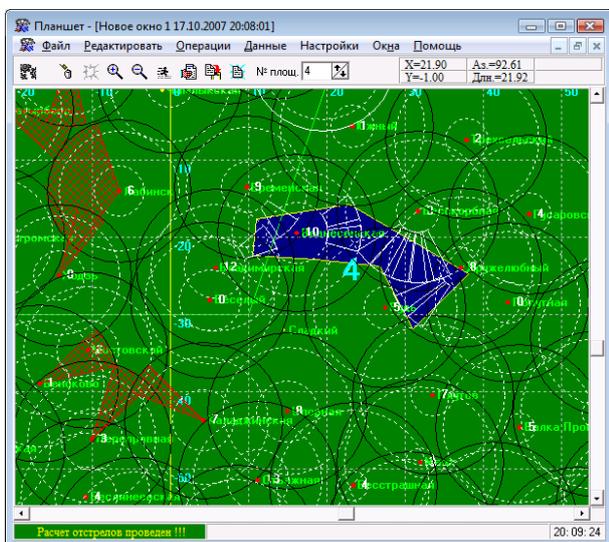


Рис.7. Модуль «Электронный планшет» комплекса «Мерком».

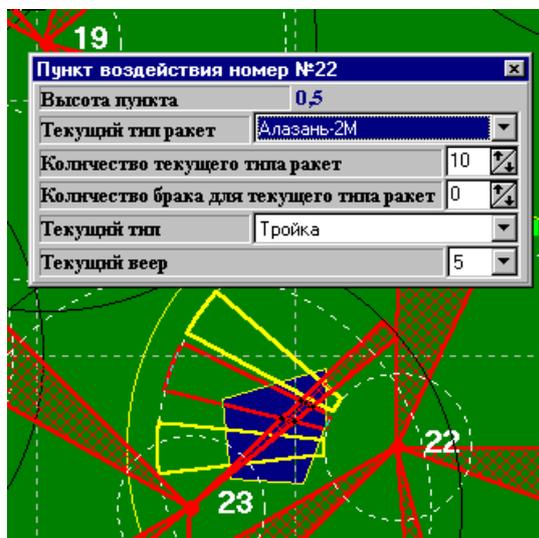


Рис.8. Расчет выстрелов в программе «Электронный планшет».

1. Одноволновый метод классификации радиоэха кучево-дождевых облаков по градоопасности

В основу метода положена гипотеза, дающая представление о необходимых условиях выпадения на землю твердых осадков. На качественном уровне это можно интерпретировать следующим образом:

Предполагается, что при наличии восходящего потока подъем воздушной массы как в тёплой, так и в холодной частях атмосферы осуществляется по одному и тому же закону (6°C на 1 км). При этом, поднимаясь в теплой части, воздушная масса будет охлаждаться, выше уровня конденсации появятся капли, которые, пройдя уровень нулевой изотермы, будут замерзать, превращаясь со временем в градины с определенной отрицательной температурой. Минимальная температура градины (T_{\min}) будет зависеть от предельной высоты, на которую она поднимется относительно уровня нулевой изотермы ($H_{\text{под}}$), в виде:

$$T_{\min} = -\gamma_{\text{ва}} \cdot H_{\text{под}}, \quad (1)$$

где $\gamma_{\text{ва}}$ вертикальный градиент температуры внутри облака, равный 6°C на 1 км .

Достигнув определенных размеров, градины будут опускаться. Допускается, что в холодной части облака их температура практически меняться не будет. Ниже уровня нулевой изотермы, градины начнут нагреваться и таять. Прирост температуры градины (ΔT) на пути от высоты H_0 до поверхности земли, будет зависеть от высоты нулевой изотермы над уровнем моря в виде:

$$\Delta T = \gamma_{\text{ва}} \cdot H_0 \quad (2)$$

Температура градины на поверхности земли ($T_{\text{гр}}$) будет определяться в виде:

$$T_{\text{гр}} = T_{\min} - \Delta T \quad (3)$$

Вид осадков, выпадающих на землю, будет зависеть от $T_{\text{гр}}$. Если $T_{\text{гр}} > 0^{\circ}$, то будет дождь. Если $T_{\text{гр}} = 0^{\circ}$, то будет крупа. Если $T_{\text{гр}} < 0^{\circ}$, то будет град.

Изложенная схема представлена на рис.9. При необходимости учета зависимости вида осадков от высоты места выпадения над уровнем моря ($H_{\text{у.м.}}$) расчет $T_{\text{гр}}$ проводится по формуле:

$$T_{\text{гр}} = T_{\min} - (\Delta T - \gamma_{\text{ва}} \cdot H_{\text{у.м.}}) \quad (4)$$

Формулу (4) целесообразно использовать при высотах местности более 500 м .

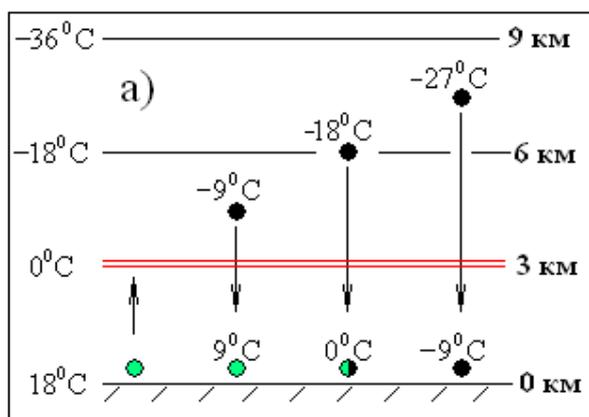


Рис.9. Схематическая зависимость вида осадков от предельной высоты, достигаемой той или иной градиной. Зеленые кружки обозначают жидкое состояние, черные – твердое состояние, комбинированные - вероятно и то и другое состояние; двойная красная линия – высота 0°C .

Для проверки гипотезы проанализированы 1149 ячеек. Ячейки были зафиксированы несколькими МРЛ-5 в 10 см диапазоне в разных регионах Северного Кавказа. Для каждой ячейки, достигшей в процессе развития значения радиолокационной отражаемости 45 dBZ, определялись максимальная высота области, ограниченной изолинией 45 dBZ (H_{45}), высота изотермы 0°C (H_0), вид выпадавших из них осадков. Вид осадков определялся путем оперативного объезда, опроса очевидцев, детального обследования в случаях выпадения града с ущербом. Результаты проверки представлены в таблице 1.

Таблица 1

Распределение мощных конвективных ячеек в соответствии с параметром $2H_0$

Осадки	Всего	$H_{45} \geq 2H_0$	$H_{45} < 2H_0$
Град с ущербом	88(100%)	88(100%)	0
Град без ущерба	239(100%)	175(73%)	64(27%)
Без града	822(100%)	77(9%)	745(81%)

В группу со значением $H_{45} < 2H_0$ попало подавляющее большинство (91%) ячеек, не давших твердых осадков, (27%) ячеек, давших твердые осадки преимущественно в виде крупы и, что самое главное, не попадает ни одной ячейки, давшей град с ущербом.

В группу со значением $H_{45} \geq 2H_0$ попадает 100% ячеек давших град с ущербом, 73% ячеек давших твердые осадки преимущественно в виде редкого, мелкого (до 1 см) града без ущерба и 9% ячеек, не давших твердых осадков.

Адаптируя полученные выводы к радиолокационным наблюдениям, можно считать, что необходимым условием выпадения из конвективной ячейки града, способного нанести ущерб сельскохозяйственным посевам, является достижение верхней границы изоконтур, ограниченного изолинией Z_{45} , высоты, равной удвоенному значению высоты нулевой изотермы ($2H_0$) и более. Если при этом максимальная радиолокационная отражаемость достигает значения большего 55 dBZ, то выполняется и достаточное условие выпадения града. При этом изоконтур радиолокационной отражаемости 45 dBZ ограничивает зону зарождения и роста града, где происходит образование зародышей града и их начальный рост, а изоконтур радиолокационной отражаемости 55 dBZ ограничивает зону локализации града, где локализуется град, включая и зону его выпадения.

Таким образом, градовыми можно считать ячейки, у которых $Z_{\max} > 55$ dBZ, а область, ограниченная изолинией 45 dBZ, достигает высоты $2H_0$ и при этом на земле фиксируется выпадение града. Интенсивность выпадающего града будет увеличиваться по мере увеличения значения Z_{\max} и превышения относительно $2H_0$ области, ограниченной изолинией 45 dBZ.

Очевидно, что в развивающейся ячейке, прежде чем область, ограниченная изолинией 45 dBZ, будет обнаружена на высоте $2H_0$, на этой высоте сначала должны последовательно наблюдаться области 35 и 40dBZ. Исходя из этого:

- ячейки, у которых $Z_{max} < 45\text{dBZ}$, а область 35 dBZ достигает высоты $2H_0$, можно считать *потенциально-градоопасными*. При этом степень их градоопасности будет возрастать по мере появления на уровне $2H_0$ области, ограниченной контуром 40 dBZ.
- ячейки, у которых $Z_{max} < 55\text{dBZ}$, а область 45dBZ достигает высоты $2H_0$, можно считать *градоопасными*.

Радиолокационные критерии идентификации ОВ, основанные на анализе радиолокационной структуры вертикального разреза конвективной ячейки представлены в таблице 2.

Таблица 2

Критерии распознавания ОВ различных категорий

Z_m - максимальная отражаемость ячейки на длине волны $\lambda = 10$ см; H_{35} - H_{45} - высота верхней границы изоконтуров $Z_{10}=35$ и 45 dBZ над уровнем моря

Категория ОВ	Градо-опасность	Критерии градоопасности	
I (потенциально градоопасные)	0.2	$35 \leq Z_m < 40\text{dBZ}$	$H_{35} > 2H_0$
	0.4	$40 \leq Z_m < 45\text{dBZ}$	$H_{40} > 2H_0$
II (градоопасные)	0.6	$45 \leq Z_m < 50\text{dBZ}$	$H_{45} > 2H_0$
	0.8	$50 \leq Z_m < 55\text{dBZ}$	
III (градовые)	0.9	$55 \leq Z_m < 60\text{dBZ}$	
IV (градовые-сверхмощные)	1.0	$60 \leq Z_m < 65\text{dBZ}$	

Карта интенсивных осадков, являющаяся основным отчетным документом проведенного воздействия, рассчитывается автоматически по критериям согласно таблице 3 для каждого воздействия после сбора информации о фактических осадках и окончательной корректировки потенциала АСУ. При необходимости карта редактируется с помощью графического редактора.

Таблица 3

Критерии распознавания осадков

Интенсив-е осадки					
N	цвет	порог1	порог2	контур	обозначение.
1		3.50	5.10	1	ливень
2		5.10	5.50	1	ливень-крупн
3		5.50	5.90	1	град мелкий
4		5.90	6.50	2	град крупный
5		6.50	9.20	2	град катастр

Пример карты представлен на рис. 10.

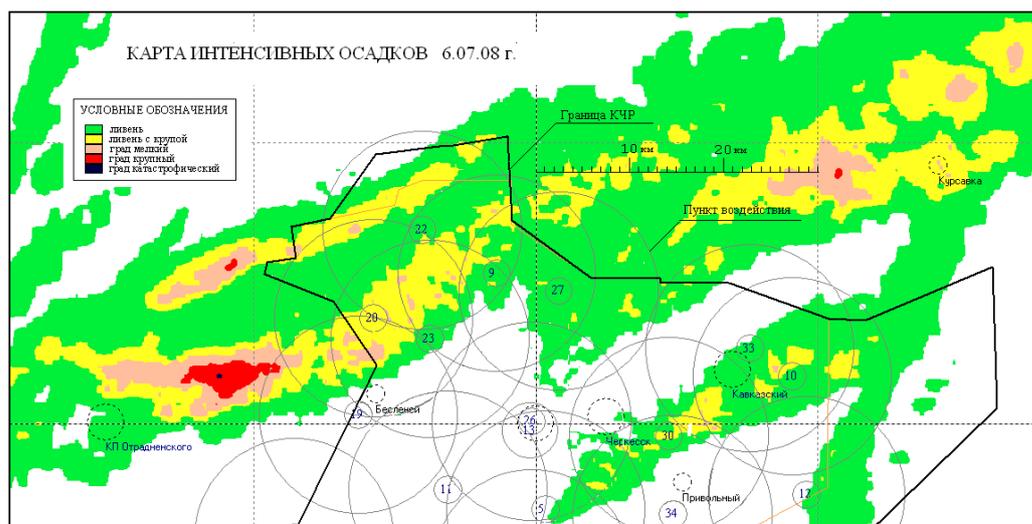


Рис.10. Карта интенсивных осадков.

Использование метода в системе градозащиты предусматривает:

1. Применение РЛС 10 см диапазона.
2. Применение АСУ с продолжительностью цикла обзора около 3 мин. и отображением радиолокационной отражаемости в виде контуров, следующих через пол порядка.
3. Контроль в *оперативном режиме* калибровки системы РЛС и АСУ.
4. Наличие достоверной информации о нулевой изотерме.

2. Расчет высоты нулевой изотермы по данным высокогорных метеостанций.

Учитывая нерегулярность атмосферного зондирования, возможное несоответствие уровня нулевой изотермы её фактическому значению на момент радиолокационных наблюдения за счет изменения синоптической ситуации за время, прошедшее после зондирования, инструментальной или другой ошибки зондирования, разработана методика для расчета H_0 по данным высокогорных пунктов наблюдения «Чегет» и «Рокский перевал» с использованием значений температуры воздуха за сроки наблюдений в 0 часов, 6 часов и в 12 часов. Расчетная формула получила следующий вид:

$$H_0 = H_{ст} + Y \frac{(t_0 + t_6 + k \cdot t_{12})}{3} \quad (5)$$

где $H_{ст}$ – высота нахождения метеорологической станции; Y -величина, обратная градиенту температуры; t - температура воздуха в срок наблюдения 0^h , 6^h , 12^h соответственно; k - индивидуальный коэффициент для региона (может меняться в пределах 0,1-1,0). При этом для расчета H_0 по данным «Чегета» и «Рокского перевала» в формуле 5 используются следующие значения:

Значения расчетных коэффициентов Y и k для метеостанций «Чегет» и «Рокский перевал»

Пункт наблюдения	Нст (км)	Y	k
«Чегет»	3.0	0.167	0.5
«Рокский перевал»	2.05	0.167	1.0

Данные «Чегета» целесообразно использовать (рис. 11) в регионах КБР и КЧР, а данные «Рокского перевала» в регионе РСО-Алания в тех случаях, когда данные ведомственного радиозондирования отсутствуют или по ходу наблюдения возникли сомнения в корректности N_0 . В этом случае ведомственное значение N_0 сравнивается с расчетным и если они не совпадают, то используется то значение N_0 , которое более соответствует наблюдаемой структуре радиоэха (при выпадении града высота изоконтур 45 dBZ должна быть не менее $2N_0$). При отсутствии градовых ячеек целесообразно использовать среднее значение N_0 .

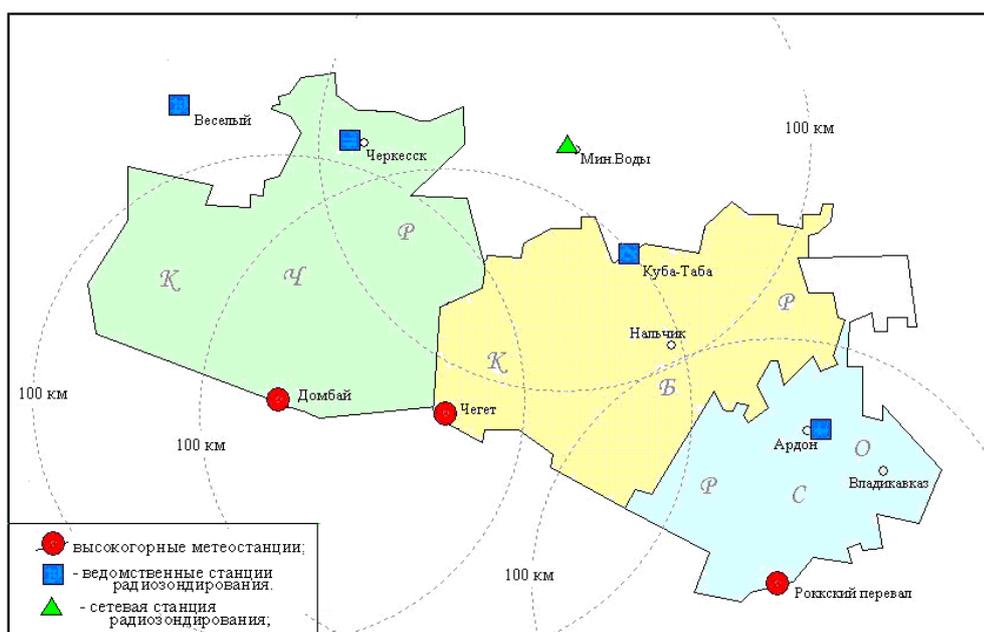


Рис. 11. Расположение аэрологических пунктов зондирования атмосферы и метеорологических пунктов (станции) наблюдений.

Примечание: Для компенсации возможных несоответствий уровня нулевой изотермы её фактическому значению, целесообразно для первичной оценки параметров использовать уровни $1.9N_0$ и $1.4N_0$ вместо $2N_0$ и $1.5N_0$, то есть, ввести 10% поправку.

3. Корректировка потенциала АСУ по осадкам.

Для определения количественных изменений потенциала АСУ и учета их при анализе измеряемых параметров непосредственно в процессе наблюдения используются достаточно простые правила, обеспечивающие контроль и коррекцию потенциала АСУ практически при каждом отдельно взятом процессе.

Базируется на следующих положениях:

3.1. Радиолокационная отражаемость на 10 см для ливневых осадков в виде дождя или дождя с крупой $Z < 55$ dBz. При выпадении града радиолокационная отражаемость > 55 dBz.

3.2. По статистическим данным диаметру мелкого града (около 1-1.5 см) соответствует $Z < 60$ dBz; диаметру крупного града (около 2-2.5 см) соответствует $Z < 65$ dBz; катастрофическому граду (более 3 см) соответствует $Z > 65$ dBz.

3.3. Град не может образоваться в теплой части ячейки.

Для оценки в оперативном режиме изменений потенциала АСУ и учета их при анализе измеряемых в процессе наблюдения параметров используются следующие источники информации.

а) Наличие достоверной информации о времени и месте выпадении осадков в виде дождя или дождя с крупой (как правило, с ПВ). В этом случае анализируется ближайший по времени обзор. Если старший контур накрывает место выпадения, а в структуре радиоэха объекта присутствует изоконтур 55 dBz, то на основании п.3.1 делается вывод о завышенном потенциале АСУ и потенциал уменьшается до тех пор, пока не пропадет изоконтур 55 dBz. Значение нового потенциала используется для анализа всех ячеек данного процесса.

Если старший контур не накрывает место выпадения или в структуре радиоэха объекта не присутствует изоконтур 55 dBz, то данная информация об осадках не используется для калибровки.

В целом этот способ наиболее надежный, так как сам факт выпадения дождя устанавливается практически однозначно. Применим только в случаях завышения потенциала, обнаружить занижение потенциала этим способом нельзя.

Главное достоинство данного способа - он не может ухудшить ситуацию, так как в любом случае, убирая изоконтур 55 dBz, действие совершается в нужном направлении.

б) Структура радиоэха ячейки. В этом случае при анализе каждого поступающего обзора отслеживается появление радиоэха ячейки, в структуре которого присутствует изоконтур 55 dBz. Через выявленный объект делается характерный вертикальный разрез. Направление разреза задается двумя точками (Z_{\max} и вершина изоконтура 45 dBz). Структура радиоэха при этом отображается на фоне 3-х горизонтальных линий ($H_0, 1.5H_0, 2H_0$). Отбираются те ячейки, у ко-

торых высота, ограниченная изоконтуром 45 dBZ, меньше $1.5N_0$. (идеально, когда область, ограниченная изоконтуром 45 dBZ, полностью располагается в теплой части или очень близко к N_0). Используя предшествующие обзоры, устанавливается стадия развития ячейки (рост или диссипация). В случае диссипации данная ячейка не используется для калибровки. Если ячейка находится в стадии роста, а до появления изоконтур 55 dBZ изоконтур 45 dBZ не превышал $1.5N_0$, то на основании п.3.3 делается вывод о завышенном потенциале АСУ и потенциал уменьшается до тех пор, пока не пропадет изоконтур 55 dBZ. Ведь не может же в развивающемся облаке фиксироваться град в теплой части, прежде чем не будет обнаружен в холодной.

В дальнейшем значение нового потенциала используется для анализа всех ячеек данного процесса и при расчете карты суммарных осадков. Применим только в случаях завышения потенциала. Обнаружить занижение потенциала этим способом нельзя.

Главное достоинство данного способа – он не заменяет при работе с материалом, который не подкреплён ни какой дополнительной информацией о фактических осадках.

в) Наличие достоверной информации о максимальном диаметре выпадающего града, о времени и месте его выпадения. В этом случае анализируется ближайший по времени обзор. Если старший контур покрывает место выпадения, то рассчитывается Z_{max} данной ячейки, который в зависимости от диаметра града, сравнивается с соответствующей отражаемостью, указанной в п. 3.2. Если Z_{max} превышает значение статистической отражаемости, то потенциал уменьшается до тех пор, пока отражаемости не совпадут. Если Z_{max} меньше значения статистической отражаемости, то потенциал АСУ повышается до тех пор, пока отражаемости не совпадут. Совпадение отражаемостей подтверждает соответствие потенциала данным осадкам.

В дальнейшем значение нового потенциала используется для анализа всех ячеек данного процесса и при расчете карты суммарных осадков. Главное достоинство данного способа – он позволяет оценить не только завышение, но и занижение потенциала АСУ.

г) Наличие достоверной информации об отсутствии на земле следов от града при градовой структуре радиоэха. Как правило, такая информация может появиться после детального обследования района предполагаемого выпадения града. В этом случае из всех обзоров, сформировавших градовую дорожку, выделяется обзор, в котором зафиксирована максимальная отражаемость и потенциал уменьшается до тех пор, пока не пропадет изоконтур 55 dBZ. Значение нового потенциала используется для анализа всех ячеек данного процесса и при расчете карты суммарных осадков.

В целом многолетний опыт показал, что:

- Для работы с метеобъектами проводить абсолютную калибровку не обязательно, вполне достаточно провести относительную калибровку по осадкам.
- Как правило, приходится уменьшать потенциал.

- Необходимость в повышении потенциала случалась крайне редко.
- Величина завышения потенциала во многом зависит от уровня подготовки руководителя воздействия и, не учитывая аномальные случаи, колеблется в пределах 2- 5 dBz.
- Корректировка потенциала в большинстве случаев проводилась после детального анализа всей собранной за время реализации процесса информации. Т.е. воздействие могло проводиться с завышенным потенциалом, а карта осадков, категории ОВ определялись с использованием нового потенциала. Как результат практически не было случаев недооценки процесса и, как правило, рассчитанные карты осадков не противоречили реальной картине.
- Практически при прохождении каждого процесса появлялась возможность хотя бы раз проверить корректность потенциала, получая тот или иной тип информации, из числа описанных выше. Гораздо реже удавалось проверить потенциал несколько раз, используя несколько типов информации.
- Недостатком данного подхода к корректировке потенциала относится его зависимость от местных предметов, сигнал от которых может накладываться на полезный сигнал. Учитывая это, для корректировки потенциала АСУ предпочтительно использовать информацию, собранную на равнинной местности.
- Данный подход вполне возможно использовать на радиолокационной сети, приводя показания разных РЛС к общему знаменателю.

4. Корректировка высоты радиоэха по осадкам.

1. Обнаружив на расстоянии 30-80 км от РЛС ячейку, из которой по фактическим данным выпадает мелкий редкий град, изменяя ширину луча РЛС, выставить высоту изоконтур 45 dBZ на уровень 2Но (при выпадении града высота изоконтур 45 dBZ должна быть не менее 2Но, а при выпадении мелкого града на уровне 2Но).

2. Если при сопоставлении радиолокационных материалов двух РЛС отражаемости от одного и того же облака совпадают, а высоты не совпадают, то используется большее значение высоты.

5. Восстановление радиолокационного сигнала на дальностях, превышающих 100км.

Определены представленные в таблице 5 усредненные поправки по потенциалу МРЛ в зависимости от расстояния, которые используются для корректировки значений радиолокационной отражаемости и высоты радиоэха конвективных облаков для диапазонов дальностей в интервале от 120 до 200 км с шагом 10 км.

Полученные поправки включены в программу вторичной обработки радиолокационных данных МЕРКОМ для автоматического учета и корректировки сигналов объектов АВ, удаленных от МРЛ на расстояния более чем 100 км.

Таблица 5

Округленные значения поправок к потенциалу МРЛ в зависимости от расстояния до ОВ

D, км	Округленные значения поправок (Δn), дБ
120	0
130	1
140	2
150	3
160	4
170	5
180	6
190	7
200	8

Помимо этих поправок при работе на расстояниях более 100 км необходимо учитывать набегающие погрешности при измерении дальности и горизонтальных углов. На рис.12 и 13 показаны значения этих погрешностей и способ их определения.

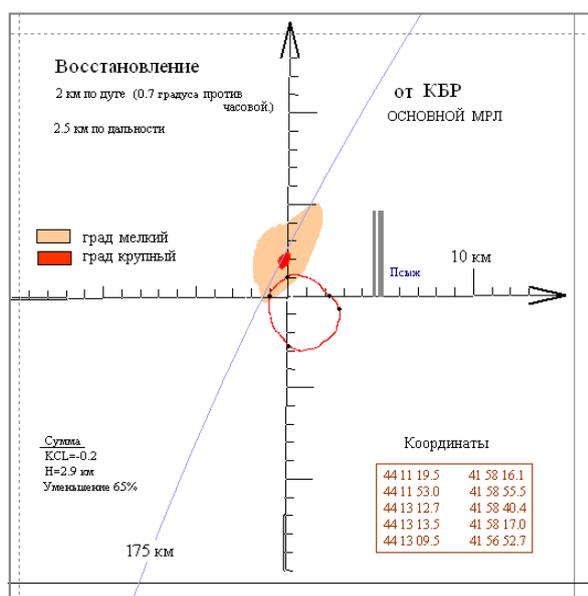


Рис.12. Поправки на дальности более 100 км. (Основной МРЛ)

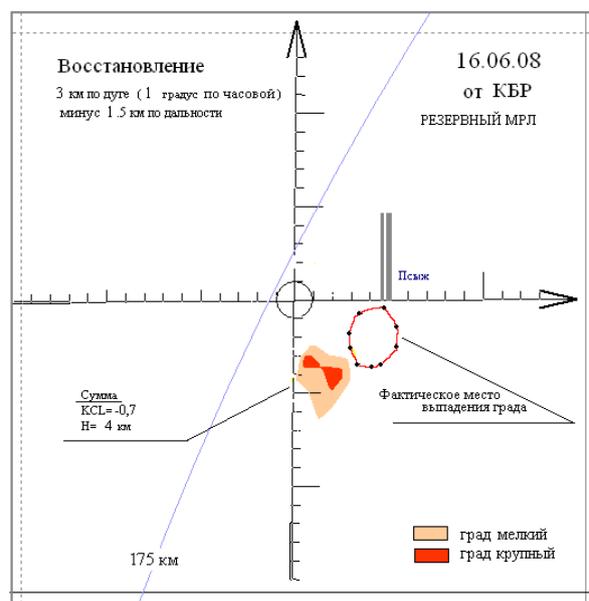


Рис.13. Поправки на дальности более 100 км. (Резервный МРЛ)

Координаты (широта, долгота) места локального выпадения града инструментально определялись сразу после выпадения града (пока не растаял) и накладывались на суммарную карту интенсивных осадков.

Для использования поправок в оперативной работе изоконтуры нужного радиоэхо наносятся на прозрачную пленку, которая поворачивается относительно начала развертки РЛС по дуге и сдвигается по радиусу в соответствии с полученными поправками.

Заключение

Развитие АПК «Мерком» позволило:

1. Внедрить в практику геофизического мониторинга и работ по АВ новых эффективных методов, алгоритмов и программ обработки радиолокационной метеорологической информации, позволивших:

- существенно повысить качество радиолокационного обеспечения производственных работ по АВ и штормоповещению в Южном и Северо-Кавказском федеральных округах РФ;

- значительно сократить расход противорадиолокационных ракет за счет сокращения в 2-3 раза количества обрабатываемых объектов.

2. Обеспечить режим функционирования МРЛ-5 в составе радиолокационной метеорологической сети.

3. Обеспечить комплексное использование в оперативной работе доступной радиолокационной информации.

Следует отметить, что АПК "Мерком" позволяет руководителю воздействия контролировать и оптимизировать противорадиолокационные операции в отличие от АСУ «МРЛ», в которой руководитель воздействия не может вмешиваться в процесс выработки команд на воздействие (начало воздействия, окончание воздействия, место внесения реагента, количество ракет), так как их вырабатывает только компьютерная программа. Это способствует значительному увеличению расхода весьма дорогих противорадиолокационных ракет и делает практически невозможным проведение работ в дотационных республиках Северного Кавказа.

Список литературы

1. Руководящий документ РД 52.37.731. Организация и проведение противорадиолокационной защиты.- 2010с.
2. РД 52.04.320-91. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5. - СПб.: Гидрометеиздат, 1993. - 264 с.
3. Базлова Т.А. и др. Метеорологические автоматизированные радиолокационные сети. – С-Пб.: Гидрометеиздат, 2002.- 331с.
4. Довиак Р.Дж., Зрнич Д. Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения. - Л.: Гидрометеиздат, 1988. -512 с.

ПРИМЕНЕНИЕ ДМРЛ–С ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПОГОДЫ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Созаева Л.Т.

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

Метеорологическая радиолокационная сеть СССР развивалась с середины 60-х годов до начала 80-х годов прошлого века и имела в своем составе радиолокаторы МРЛ-1, МРЛ-2 и МРЛ-5. Но, со временем сеть пришла в упадок, радиолокационная техника морально устарела, выработала свой технический ресурс и появилась необходимость ее замены на современные радиолокационные системы.

В тоже время радиолокационная метеорология продолжала активно развиваться. Были разработаны современные метеорологические радиолокаторы с двойной поляризацией в Великобритании, Франции, Германии, Нидерландах, Финляндии и США для различных частотных диапазонов (S, C, X). Эти радиолокаторы использовались не только для исследовательских целей, но еще внедрились в национальные сети штормооповещения этих стран.

В России по техническому заданию Росгидромета был разработан доплеровский метеорологический радиолокатор нового поколения ДМРЛ-С с двойной поляризацией. На территории страны до 2020г. планируется установить около 140 комплектов современных доплеровских радиолокаторов ДМРЛ-С.

Радиолокаторы серии МРЛ позволяли проводить измерения только одной радиолокационной отражаемости. Тем не менее, по радиолокационной отражаемости были разработаны методы измерения осадков, идентификации гроз и града. Далее были внедрены доплеровские радиолокаторы: к измерениям радиолокационной отражаемости были добавлены радиальная доплеровская скорость и ширина доплеровского спектра. На основе этих измерений получили развитие методы идентификации таких опасных явлений погоды как сдвиг ветра, турбулентность, смерчи и торнадо. Однако, в сложных метеорологических ситуациях, эти две части информации дают лишь неполную картину типа осадков, например, различий между градом и сильным дождем.

Введение режима двойной поляризации расширяет информацию о микроструктуре облаков и осадков, и позволяет получить дополнительную информацию о размерах частиц, их форме, ориентации, а также агрегатном состоянии частиц осадков. Это связано с тем, что радиолокаторы с двойной поляризацией одновременно передают и принимают горизонтально и

вертикально поляризованные электромагнитные волны, что позволяет измерять не только отражаемость Z_h , но еще и поляризационные характеристики: Z_{DR} – дифференциальную отражаемость, ρ_{hv} – коэффициент взаимной корреляции, K_{DR} – удельный фазовый сдвиг, L_{DR} – коэффициент линейной деполяризации.

Рассмотрим некоторые методы исследования облаков, используемые в мировой практике на базе радиолокаторов с двойной поляризацией.

1. Метод отражаемость – дифференциальная отражаемость.

Этот метод основан на совместном измерении отражаемости Z_h и дифференциальной отражаемости Z_{DR} , отображении их в Z_h - Z_{DR} пространстве и используется для выявления областей, где резко происходит переход дождь-град.

На рис. 1. приведены результаты исследования градового облака в Оклахоме от 13.06.2002 г. в Z_h - Z_{DR} пространстве для предградовой (слева) и градовой (справа) стадий развития [1].

Синяя кривая соответствует границе дождь-град, определенной на основе построения графика частоты встречаемости каждой пары Z_h - Z_{DR} по радиолокационным данным [2]. Красная кривая соответствует границе, которая является результатом моделирования закономерностей рассеяния гидрометеоров по данным наблюдений дисдрометра [3].

На рис.1 слева все значения пары Z_h - Z_{DR} лежат в области только дождя. На рисунке справа измерения указывают на наличие сильного града. Значения пары данных справа от кривых (рисунок справа) являются результатом обратной связи между Z_h - Z_{DR} . Увеличение Z_h указывает на рост размера града, что в свою очередь вызывает его падение. И, так как при падении град хаотически распределен в пространстве, то значение дифференциальной отражаемости уменьшается и стремится к нулю. Высокие значения отражаемости и малые значения дифференциальной отражаемости ($Z_h=60\text{dBZ}$ и $Z_{DR}=0$) означают наличие града, на что правильно указывают оба алгоритма. Измеренные пары с $Z_h \sim 55 \text{ dBZ}$ и $Z_{DR} \sim 2-2.5\text{dB}$ также, вероятно, содержат град, потому что они отступают на рисунке слева, характерном только для дождя. Пары данных вдоль этих границ являются границей только-дождь. Точки между красной и синей линиями являются проблемными. Для того чтобы правильно интерпретировать эти точки был использован дополнительный параметр - линейное деполяризационное отношение L_{DR} [4]. Оказалось, что сигналы L_{DR} различны для чистого дождя и дождя с другими частицами и чувствительны к плотности преобладающих частиц. Как правило, $L_{DR} < -25 \text{ dB}$ ниже уровня нулевой изотермы ассоциируется с дождем. Эмпирическая граница дождя в Z_h - Z_{DR} пространстве была установлена на основе этой особенности L_{DR} . В качестве порогового значения для точек только-дождь было выбрано значение $L_{DR} = 25 \text{ дБ}$.

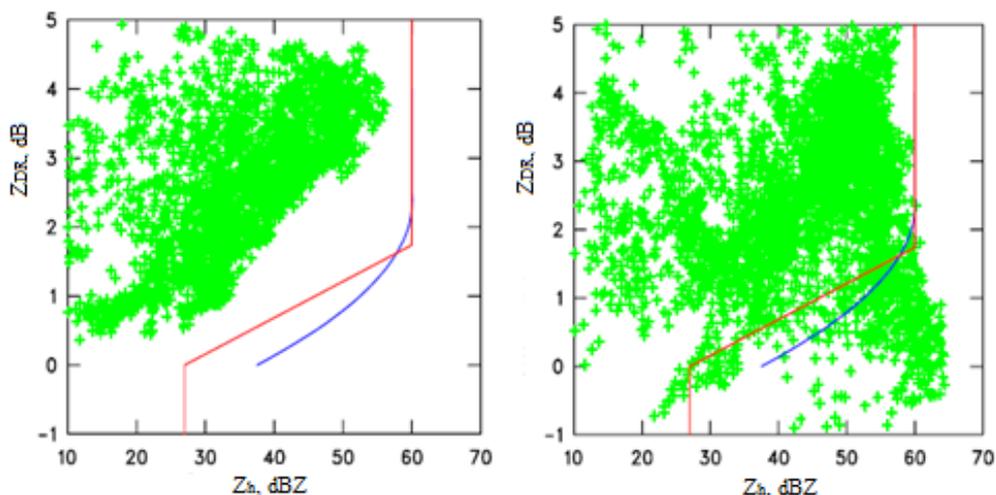


Рис. 1. Дифференциальная отражаемость в предградовой и градовой стадиях развития облака в Оклахоме от 13.06.2002г. Синяя кривая по [2], красная ломанная по [3].

Такой выбор был основан на результатах моделирования рассеяния электромагнитных волн [5] и данных наблюдений [6,7,8]. Кривая границы дождя была установлена на глаз и аппроксимирована формулой: $Z_h = 47 (Z_{DR})^{0,14}$. Сравнение границы дождя в Z_h - Z_{DR} пространстве по данным [4] с границами дождя, полученными с помощью [2,3] отображено на рис. 2.

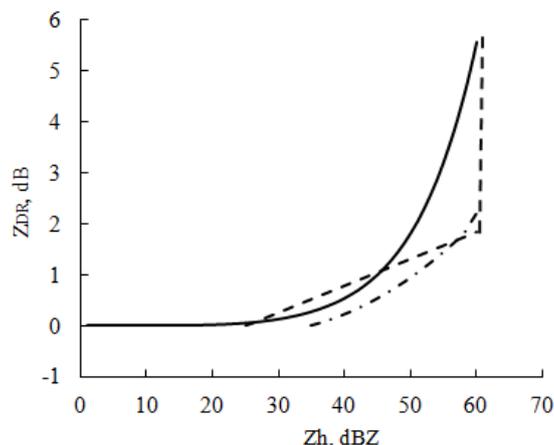


Рис. 2. Границы дождя для облака 13.06.2002г. Пунктирная линия по [2], штрихпунктирная по [3], сплошная линия по $Z_h = 47 (Z_{DR})^{0,14}$.

Таким образом, ни Z_h , ни Z_{DR} не могут однозначно отличить чистый дождь от смеси дождя с крупой или градом. Только использование линейного деполяризованного отношения L_{DR} вносит ясность в метод отражаемость - дифференциальная отражаемость.

2. Метод классификации гидрометеоров на основе нечеткой логики

Информация о поляриметрических радиолокационных измерениях для преобладающих типов гидрометеоров была обобщена в виде набора данных, состоящих из нечетких соотношений (табл.1) [9,10]. Эти нечеткие соотношения были получены из опубликованных данных

радиолокационных исследований в S – диапазоне, но некоторые из них были экстраполированы из исследований, касающихся различных диапазонов, включая C –диапазон. В таблице 1 представлены следующие поляризметрические параметры: Z_h – отражаемость, Z_{DR} – дифференциальная отражаемость, ρ_{hv} – коэффициент взаимной корреляции, K_{DR} – удельный фазовый сдвиг, L_{DR} – коэффициент линейной деполяризации, δ_{hv} – компонент обратного рассеяния дифференциального фазового сдвига.

Набор данных измерений поляризметрических РЛС можно использовать в качестве входных данных для классификации гидрометеоров на основе метода нечеткой логики [11].

Таблица 1

Классификация гидрометеоров по данным поляризационных измерений (данные K_{DR} отличаются примерно в 2 раза для C – диапазона)

Тип гидрометеоров		Z_h dBz	Z_{DR} dB	K_{DR} deg/ km	L_{DR} dB	ρ_{hv}	δ_{hv} deg
Дождь	Rain ($D_0 < 1\text{mm}$)	<28	0-0,7	0-0,03	<-32	>0,97	$ \delta_{hv} < 1$
Дождь	Rain ($D_0 > 1\text{mm}$)	28-60	0,7-4	0,03-10	-32 - - 25	>0,95	$ \delta_{hv} < 1$
Снег, сухой, высокой плотности	Snow crystals, dry, high density	<35	0-6	0-0,6	<-28	>0,95	-
Снежные скопления, сухие	Snow aggregate, dry	<35	0-1	0-0,2	<-25	>0,95	-
Снежные скопления, мокрые	Snow aggregate, wet	<45	0,5-3	0-0,5	-20 - - 10	0,5-0,9	$-5 < \delta_{hv} < 10$
Крупа, сухая, низкой плотности	Graupel, dry, low density	20-35	-0,5-1	-0,5-0,5	<-25	>0,95	$ \delta_{hv} < 1$
Крупа, мокрая, высокой плотности	Graupel, wet, high density	30-50	-0,5-2	-0,5-1,5	-30 - - 20	>0,95	$ \delta_{hv} < 1$
Град, сухой	Hail, dry ($D_0 > 5\text{mm}$)	45-60	-1-0,5	-0,5-0,5	-26 - 18	>0,95	$ \delta_{hv} < 1$
Мелкий град, обводненный	Hail, wet, small ($D_0 < 20\text{mm}$)	50-60	-0,5-0,5	-0,5-0,5	>-24	0,92-0,95	$ \delta_{hv} < 1$
Крупный град, обводненный	Hail, wet, large ($D_0 > 20\text{mm}$)	55-65	-1-0,5	-1-1	>-20	0,9-0,92	$5 < \delta_{hv} < 15$
Дождь и мелкий обводненный град	Rain/small wet hail	45-60	-0,5-6	0-10	>-25	<0,95	$ \delta_{hv} < 15$
Дождь и крупный обводненный град	Rain/large wet hail	55-65	-0,5-3	0-10	>-22	<0,92	$5 < \delta_{hv} < 15$

Алгоритм нечеткой логики состоит из трех частей: фаззификатор, логический вывод и дефаззификатор.

На этапе фаззификации четкие величины преобразуются в нечеткие множества. Характеристикой нечеткого множества выступает функция принадлежности (Membership Function) и степень принадлежности к нечеткому множеству («0» означает отсутствие принадлежности к множеству, «1» – полную принадлежность). Степени принадлежности определяются различными функциями принадлежности – треугольной, трапецевидной, бета – функцией и т.д. По каждому входному параметру (Z_h , Z_{DR} , ρ_{hv} , K_{DR} , L_{DR}) и для каждого типа гидрометеоров (дождь, град и т.д.) создается множество: функция принадлежности и степень его принадлежности данному множеству от «0» до «1». Например, на 10 см радаре, функции принадлежности для гидрометеора чисто «мелкий град, обводненный» присваивается «0» (отражаемость менее 55dBZ), что указывает на отсутствие града. Значение функции принадлежности увеличивается линейно от «0» до «1», что соответствует увеличению Z_h от 55 до 65 dBZ. Для Z_{DR} функции принадлежности присваивается «0» и «1», что соответствует значения Z_{DR} от -1 до -0,5 dB.

На этапе логического вывода степень принадлежности исследуемого явления j типу гидрометеоров определяется как произведение степеней принадлежности для каждой входной величины:

$$RS_j = B_j^{Z_h}(Z_H) B_j^{Z_{DR}}(Z_{DR}) B_j^{Z_h}(Z_H) B_j^{K_{DR}}(K_{DR}) B_j^{\rho_{hv}}(\rho_{hv}) B_j^{L_{DR}}(L_{DR}),$$

где B_j^X - функция принадлежности гидрометеоров j -типа для X измерения радиолокационного параметра.

На этапе дефаззификации выбирается четкая выходная величина, которая лучше всего представляет результирующее нечеткое множество. Четкий вывод дает индекс, соответствующий определенному типу гидрометеоров.

В настоящее время метод нечеткой логики широко применяется за рубежом для классификации гидрометеоров и восстановления микрофизических свойств облаков и осадков. Так, сотрудники университета штата Колорадо применили алгоритм нечеткой логики для классификации следующих 10 типов гидрометеоров: 1 – мелкий дождь, 2 – дождь, 3 – сухие кристаллы, низкой плотности, 4 – сухие кристаллы высокой плотности, 5 – обводненные кристаллы, 6- сухой снег, 7 – мокрый снег, 8 – мелкий град, 9 – крупный град, 10 – дождь с градом [11]. В их распоряжении был полный набор поляриметрических измерений: Z_h , Z_{DR} , ρ_{hv} , K_{DR} , L_{DR} . Было исследовано 4 градовых облака. Одно из них, 22 июня 1995 года в Колорадо быстро развивалось и поднялось на высоту 12,5 км. Потом облако начало опускаться и из него пошел сильный дождь и град до 3-4 см. Интенсивная часть облака находилось на расстоянии 45-50 км к северо-востоку от радара около 17:30:29 по местному времени. Радар сканировал облако

около часа, через каждые 2 мин. В то же время самолет Т-28, на борту которого был установлен спектрометр гидрометеоров, совершил несколько пролетов сквозь облако. Сплошная линия на рис. 2 соответствует следу полета самолета Т-28. Полеты проходили на высотах от 2,5 до 3,5 км над уровнем земли. По трассе полета самолета проводился полный набор поляриметрических измерений.

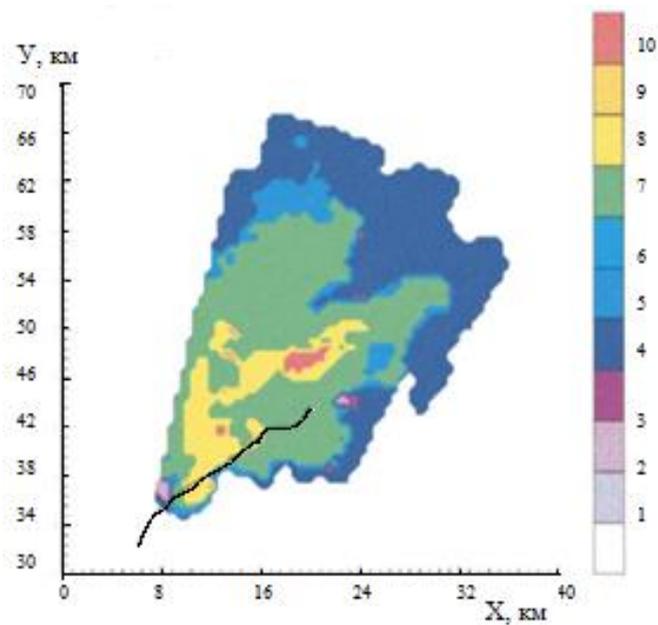


Рис.3. Классификация гидрометеоров градового облака 22 июня 1995 года.

На рис. 3 показаны результаты классификации гидрометеоров на основе метода нечеткой логики, палитра справа соответствует типу гидрометеоров, принятых в работе [11]. Сравнение результатов классификации гидрометеоров по поляриметрическим данным с данными спектрометра, установленного на борту самолета, показали хорошее согласие (рис.4.).

Время	17:29:15	17:29:27	17:29:31	17:29:34	17:29:50
Самолетные наблюдения	град + дождь мелкий град	мокрый снег + дождь	мокрый мелкий град	мокрый снег	
Классификация по нечеткой логике	град + дождь мелкий град	снег мелкий град	мелкий град	снег	

Рис.4. Сравнение результатов классификации гидрометеоров с данными наблюдений вдоль трассы самолета во время первого проникновения в облако 22 июня 1995 г.

Таким образом, методы отражаемость – дифференциальная отражаемость и нечеткой логики на практике позволяют классифицировать гидрометеоры с достаточно высокой точностью и могут быть автоматизированы и внедрены в АСУ «ДМРЛ-С».

Список литературы

1. Brandes, E. A., and A. V. Ryzhkov, 2004: Hail detection with polarimetric radar. Preprints, 11th Conf. on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, Hyannis, MA, Amer. Meteor. Soc., CD-ROM, P5.10.
2. Leitao, M. J., and P. A. Watson, 1984: Application of dual linearly polarized radar data to prediction of microwave path attenuation at 10–30 GHz. *Radio Sci.*, 19, 209–221.
3. Aydin, K, T. A. Seliga, and V. Balaji, 1986: Remote sensing of hail with a dual linear polarization radar. *J. Climate and Appl. Meteor.*, 25, 1475–1484.
4. Zhaoxia Zeng, Sandra E. Yuter, Roberta A., Houze J.R., and David E. Kingsmill: Microphysics of the Rapid Development of Heavy Convective Precipitation. Manuscript received 10 February 2000, in final form 22 November 2000
5. Bringi, V. N., J. Vivekanandan, and J. D. Tuttle, 1986: Multiparameter radar measurements in Colorado convective storms. Part I: Hail detection studies. *J. Atmos. Sci.*, 43, 2564–2577.
6. Jameson, A. R., and D. B. Johnson, 1990: Cloud microphysics and radar. *Radar in Meteorology*, D. Atlas, Ed., Amer. Meteor. Soc., 323–340.
7. Herzegh, P. H., and A. R. Jameson, 1992: Observing precipitation through dual polarization radar measurements. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 73, 1365–1374.
8. Chandrasekar, V., and R. J. Keeler, 1993: Antenna pattern analysis and measurements for multiparameter radars. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 10, 674–683.
9. Michael I. Mishchenko, Joachim W. Hovenier, Larry D. Travis, 1999: *Light Scattering by Nonspherical Particles: Theory, Measurements, and Applications*. — Academic Press, 690 с.
10. Straka, J. M., Zrnica, D. S., Ryzhkov, A. V., and Askelson, M. V. (1999). Bulk hydrometeor classification and quantification using multiparameter data: Synthesis of relations. *J. Appl. Meteorol.*, submitted.
11. Liu, H. and Chandrasekar, V.: Classification of hydrometeors based on polarimetric radar measurements: Development of fuzzy logic and neuro-fuzzy systems, and in situ verification, *J. Atmos. and Oceanic Technol.*, 17 (2), 140–164, 2000

РОССИЙСКИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ РАДИОЛОКАТОРЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ И АКТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОБЛАКА

Абшаев А.М.¹, Абшаев М.Т.¹, Ефремов В.С.², Вылегжанин И.С.²

¹ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

²ОАО «Лианозовский электромеханический завод», г. Москва

1. В последние десятилетия для исследования облаков, штормоповещения, метеобеспечения авиации и активного воздействия на облака в Российской Федерации и странах СНГ в основном применяется двухволновый радиолокатор МРЛ-5, оснащенный системами автоматизации обработки радиолокационной информации Метеоячейка, АКСОПРИ, АСУ Антиград, Мерком и АСУ-МРЛ.

В связи с физическим износом МРЛ-5, отработавших по 25 - 40 лет, НПЦ Антиград осуществляет его модернизацию на базе программно-технического комплекса (ПТК) АСУ-МРЛ. Аппаратная часть АСУ-МРЛ (рис. 1) обеспечивает глубокую модернизацию МРЛ-5 путем замены его отработавших ресурсы аналоговых блоков и узлов на новые цифровые устройства: блоки управления МРЛ и электроприводом антенны синхронизатор, приемник с СВЧ твердотельным малошумящим усилителем, датчики угловой информации, аппаратуру первичной и вторичной обработки информации. Модернизированный радиолокатор МРЛ-5М имеет высокую надежность функционирования всех узлов, повышенный на 4 дВ метеорологический потенциал, расширенный от 75 до 100 дВ динамический диапазон приемника, повышенную точность позиционирования антенны (0,05 градуса), пониженное энергопотребление и продленный срок службы.



Рис. 1. Аппаратные средства ПТК «АСУ-МРЛ».

ПТК «АСУ-МРЛ» применяется в ряде стран, параллельно решая задачи управления противогодовыми операциями, штормооповещения и метеобеспечения авиации [2] и обеспечивает:

- дистанционное управление МРЛ – включение-выключение в режиме автоматических дежурных наблюдений, контроль состояния, автоматический обзор пространства по программируемой сетке углов от 0 до 85°;

- получение, обработку, визуализацию 32 различных метеорологических карт и архивирование радиолокационной информации об облаках и осадках двухволновых радиолокаторов МРЛ-5 и WSR-74, доплеровских радиолокаторов ДМРЛ-С, ДМРЛ-10 WRM-200, доплеровских радиолокаторов ТРЛК «Сопка-2» и ДМРЛ-10;

- интеграцию с данными метеоспутников и гронопеленгаторов LS8000 с получением синтезированных карт облачности и метеоявлений (рис. 2).

В режиме противогодовой защиты ПТК «АСУ-МРЛ» обеспечивает [1] автоматизацию противогодовых операций:

- получение 32 различных метеорологических карт, измерение 90 одномерных, двумерных и трехмерных параметров облаков;

- распознавание годовых облаков и категорий объектов воздействия;

- локализацию места засева с учетом структуры годовых облаков;

- оптимальный выбор ракетных пунктов и выработку команд на ракетный засев объектов воздействия (рис. 2);

- документирование параметров объектов воздействия и материалов воздействия (первичной радиолокационной информации, характеристик облаков, фрагментов засева, таблиц стрельб, таблиц взаимодействия с органами авиации и др.).

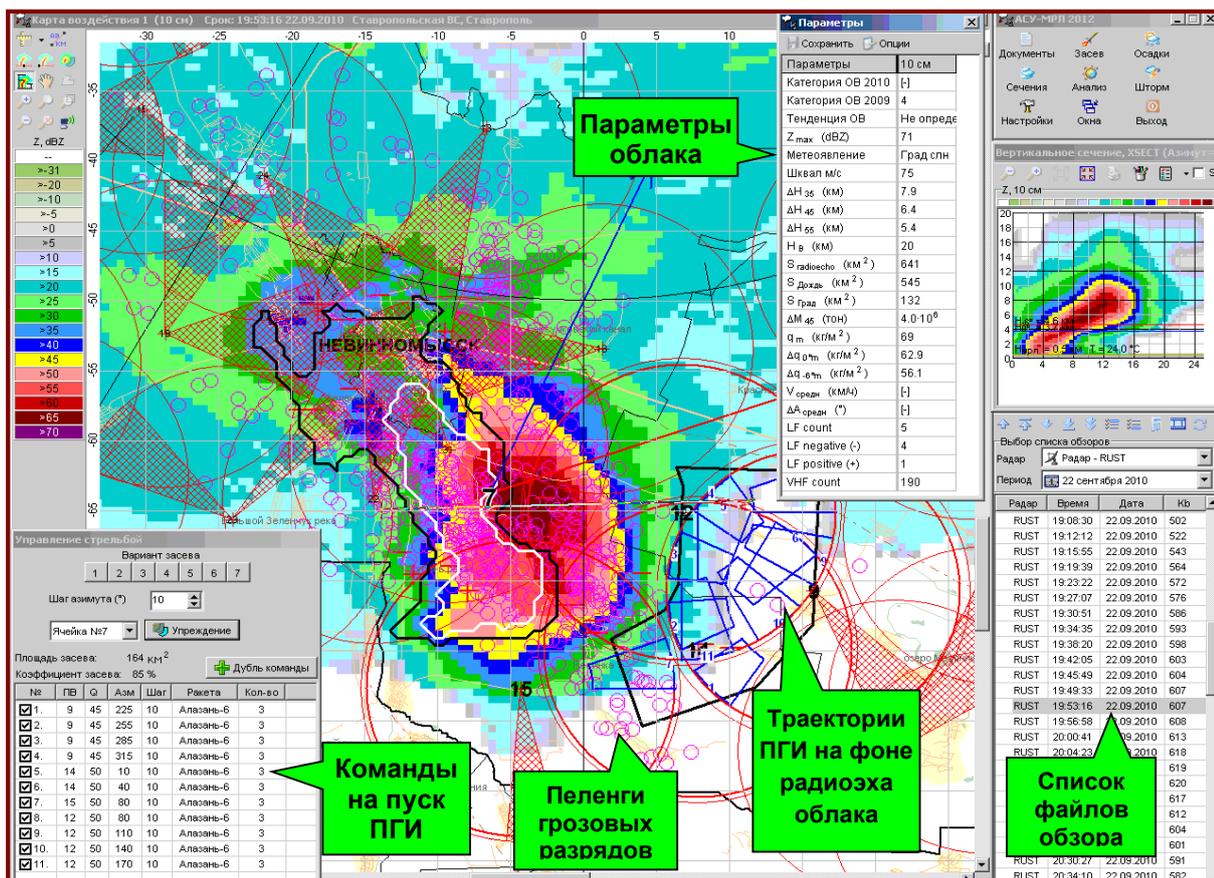


Рис. 2. Карта воздействия с командами на ракетный засев мощного градового облака, пеленгами грозовых разрядов. Кружки – внутриоблачные грозовые разряды, крестики и тире – разряды облако-земля положительной и отрицательной полярности, соответственно.

В режиме штормооповещения ПТК «АСУ-МРЛ» дополнительно обеспечивает:

- распознавания явлений погоды, определение направления и скорости их перемещения, подготовку бланк-карты и штормовой таблицы с координатами опасных для полетов авиации явлений (гроза, град, турбулентность) и т.д.;
- подготовку, кодирование в международные коды «FM-94 BUFR», «FM-20 RADOB», «OPERA», «BALTRAD» и передачу пакетов информации в сеть штормооповещения и метеобеспечения авиации;
- подготовку, передачу и отображение на автоматизированном рабочем месте авиадиспетчера пакетов информации об опасных явлениях погоды в кодах кодирования EuroControl «ASTERIX CAT008» и «Строка-Ц» [1].

2. В последние годы АО Лианозовский электромеханический завод концерна Алмаз-Антей по техническим заданиям Росгидрометом, созданы и производятся метеорологические радиолокаторы нового поколения:

- многопараметровый доплеровский радиолокатор ДМРЛ-С с рабочей длиной волны 5,3 см и двойной поляризацией [4];

– трассовый радиолокационный комплекс (ТРЛК) Сопка-2 с рабочей длиной волны 11 см, антенной фазированной решеткой и доплеровский обработкой сигналов, в который встроен метеорологический канал [3];

– доплеровский радиолокатор ДМРЛ-10 с рабочей длиной волны 10 см [5].

2.1. На базе ДМРЛ-С [4] создается Российская государственная сеть штормооповещения, метеообеспечения авиации и геофизического мониторинга. Его программное обеспечение (ПО) Гимет-2010 разработано ВГИ и позволяет получить следующие продукты (карты):

- горизонтальные сечения облачности на любой высоте (CAPPI);
- конические сечения облачности на любом угле сканирования (PPI);
- вертикальные сечения облаков в любом направлении (HSECT);
- максимальной радиолокационной отражаемости (Z_{MAX});
- высот максимальной отражаемости (H_{ZMAX});
- верхней и нижней границ радиоэхо (TOPS, BASE);
- интенсивности и количества осадков (SRI и RAIN);
- вертикально интегрированной водности (VIL);
- метеоявлений (облачность, дождь, ливни, гроза, град, смерч и т.д.);
- контуров опасных явлений погоды;
- видимости в осадках;
- обледенения в облаках;
- доплеровские характеристики (V и W);
- поляризационные характеристики (Z_{DR} , L_{DR} , K_{DP} , $|\rho_{HV}|$);
- классы гидрометеоров (HCLASS).

Применение ПО АСУ-МРЛ для обработки данных ДМРЛ-С позволяет в дополнение к перечисленным выходным продуктам добавить карты размера и кинетическая энергия града (HAIL-1), степени повреждения и ущерба сельхозкультур от града (HAIL-2), категорий объектов воздействия на градовые процессы (SEED-OBJ), карту воздействия на градовые процессы (SEED) и обеспечивает управление противоградовыми операциями. Однако достаточно ощутимое ослабление радиоволн 5,3 см диапазона в градовых облаках ограничивает применение ДМРЛ-С для проведения противоградовых работ.

2.2. Доплеровский метеорологический радиолокатор ДМРЛ-10 предназначен для обеспечения противоградовых работ с параллельным решением задач штормооповещения и метеообеспечения авиации.

ДМРЛ-10 снабжен [5] легкой пластиковой параболической антенной (рис. 3), цифровым двухканальным приемником и твердотельным транзисторным передатчиком, состоящим

из 16 блоков с функцией мягкого отказа (т.е. отказ нескольких блоков не нарушает работоспособности ДМРЛ-10). Это многократно повышает надежность передатчика по сравнению с передатчиками на базе электровакуумных приборов (магнетронов, клистронов и т.д.). В ДМРЛ-10 излучаются и обрабатываются сложные сигналы с большой длительностью импульса (до 100 мкс) и внутриимпульсной модуляцией, что позволило сократить излучаемую импульсную мощность в 50 - 100 раз. Это дает возможность исключить систему наддува волноводного тракта и высоковольтные блоки с напряжениями выше 380 В и значительно повышает эксплуатационные характеристики локатора. Модульное построение ДМРЛ-10 позволяет максимально полно использовать возможности оборудования, в том числе, для модернизации старых МРЛ 10 см диапазона.

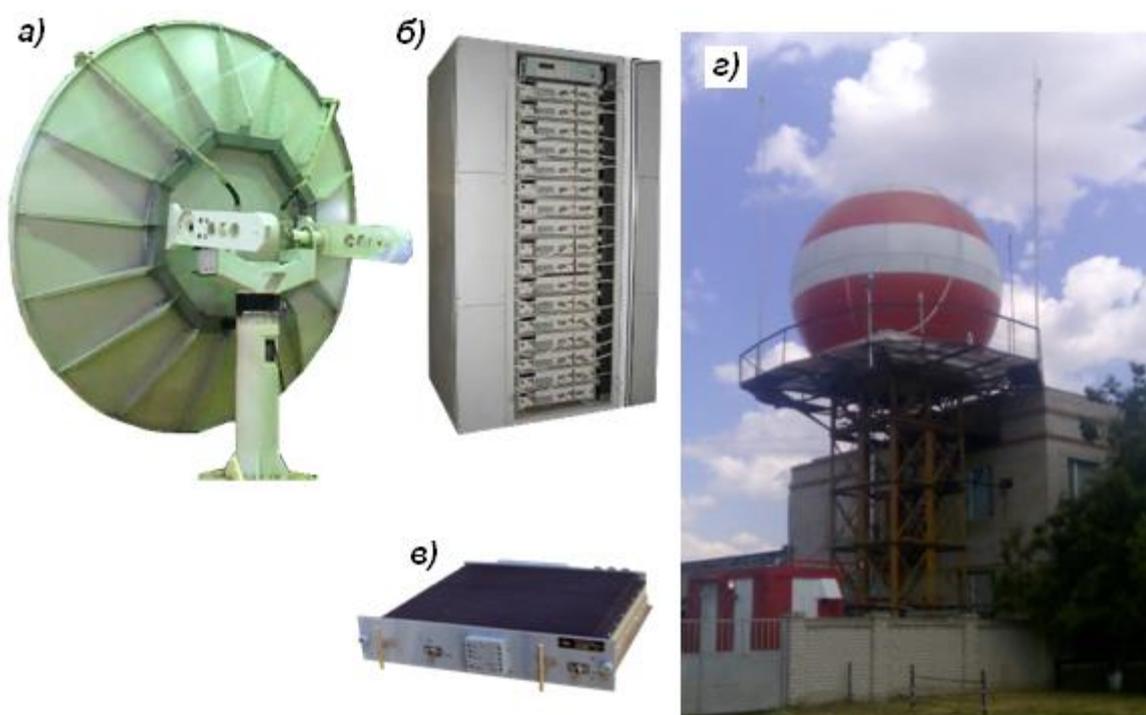


Рис. 3. Антенна (а), передающее (б) и приемное (в) устройства ДМРЛ-10 и общий вид на позиции Зеленокумск (г).

ДМРЛ-10 комплектуется абонентскими пунктами локальных пользователей, необходимым оборудованием для передачи данных, эксплуатационной документацией, автономным источником электропитания (по отдельному заказу), ИБП и ЗИП. Имеется возможность интеграции с системами активных воздействий.

Встроенная система первичной обработки информации (РОИ) и ПО вторичной обработки информации (ВОИ) ДМРЛ-10, созданное на основе дальнейшего развития ПО АСУ-МРЛ позволяют получить все выходные продукты, необходимые для управления противорадовыми операциями и штормооповещения, в том числе:

- визуализацию в реальном масштабе времени карт распределения отражаемости, скорости, ширины доплеровского спектра на различных высотах по типу псевдо-CAPPI;
 - расчета и отображения вертикального профиля скорости, направления ветра до высоты верхней границы радиоэха и других доплеровских продуктов;
 - отображения интенсивности и количества осадков за любой интервал времени;
 - обнаружения и классификации облаков и осадков и связанных с ними опасных явлений погоды (град, гроза, ливни, смерчи, шквалы и т.д.);
 - выдачи информации для активных воздействий на градовые и другие облачные процессы с целью предотвращения града и сопутствующих опасных явлений (гроза, шквал, смерч, ливневые осадки), искусственного регулирования осадков;
 - отображения скорости и направления перемещения облачных систем;
- выдачи радиолокационной информации в необходимых кодограммах.

2.3. Доплеровский ТРЛК Сопка-2 [3] с рабочей длиной волны 11 см имеет антенную фазированную решетку (рис. 4), которая обеспечивает электронное сканирование пространства по 32 углам (до 45°) и вращается по азимуту со скоростью 6 об/мин. Встроенный в него метеорологический канал дает возможность получения трехмерной картины полей отражаемости, радиальной скорости гидрометеоров и ширины доплеровского спектра через каждые 10 сек. Такой быстрый скан обуславливает серьезные преимущества ТРЛК Сопка-2 при исследовании и проведении активного воздействия на быстропротекающие облачные процессы. Принцип работы твердотельных приемопередающих устройств ДМРЛ-10 и ТРЛК Сопка-2 идентичны по идеологии передачи и обработки сложных сигналов [5].

ПО вторичной обработки информации метеоканала ТРЛК Сопка-2 также создано на основе развития и адаптации ПО АСУ-МРЛ и обеспечивает выдачу всех перечисленных выше выходных продуктов необходимых для управления активным воздействием на градовые процессы и решения задач штормооповещения и метеообеспечения авиации [1].

2.4. В таблице 1 представлены основные технические характеристики радиолокаторов МРЛ-5М, ДМРЛ-10 и ТРЛК Сопка-2, рекомендуемых для применения в противоградовых службах. Из этой таблицы следует, что метеорологический потенциал ДМРЛ-10 на 1 дВ выше, чем у МРЛ-5М, хотя импульсная мощность почти в 100 раз меньше, чем у МРЛ-5М.

При замене параболической антенны ДМРЛ-10 на антенную фазированную решетку со скоростью вращения по азимуту 2-3 об./мин. Получился бы идеальный вариант радиолокатора противоградовой защиты. Но это пока сдерживается высокой стоимостью антенной фазированной решетки.

Основные технические характеристики МРЛ-5М, ДМРЛ-10 и ТРЛК Сопка-2

Характеристики	МРЛ-5М	Метеоканал ТРЛК Сопка-2	ДМРЛ-10
Диапазон рабочих частот, МГц	2950 ± 15	2700-2850	2700 – 3100
Параметры антенны:			
– тип	Параболоид	фазир. решетка	параболоид
– диаметр, м	4,5		4,5
– коэффициент усиления, дВ	40	41	39
– ширина луча	1,5	1,05 x 2,15	1,75
– уровень боковых лепестков, дВ	минус 23	минус 26	минус 29
Параметры передатчика:			
– тип передатчика	магнетрон.	транзисторный	транзисторный
– импульсная мощность, кВт	500	40	6
– длительность импульса, мкс	1 и 2	1-100	1-84
– эквивален. мощность импульса, кВт	500	3500	500 при сж. 1/100
– частота зондирования, Гц	250	375	300-3000
Параметры приемника:			
– тип	с МШУ	с МШУ	2 канала с МШУ
– коэффициент шума, дБ, не более	3	2	3
– динамичес. диапазон приемника, дБ	100	не менее 105	не менее 105
Пространственное разрешение, м	250	250	150
Коэффициент подавления отражений от местных предметов, дБ	нет	не менее 40	не менее 50
Метеорологический потенциал	270	271	274
Потребляемая мощность с учетом системы жизнеобеспечения, кВт, не более	8	30	10

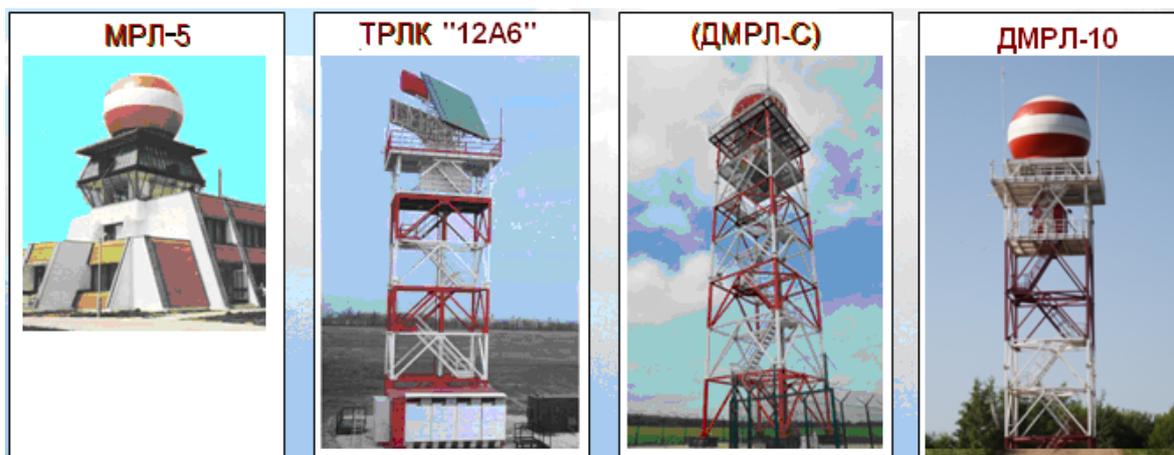


Рис. 4. Российские метеорологические радиолокаторы.

Сравнение результатов наблюдения пространственной структуры, значений параметров облаков, а также карт метеоявлений, карт размера и кинетической энергии града, полученных с помощью ДМРЛ-10 и МРЛ-5М, показывают хорошее согласие (рис. 5-6). Согласуются также радиолокационные и наземные данные о размере и кинетической энергии града. Например, по данным ДМРЛ-10 в Железноводске обнаружен град размером более 5 см, что и наблюдалось фактически (см. рис. 7).

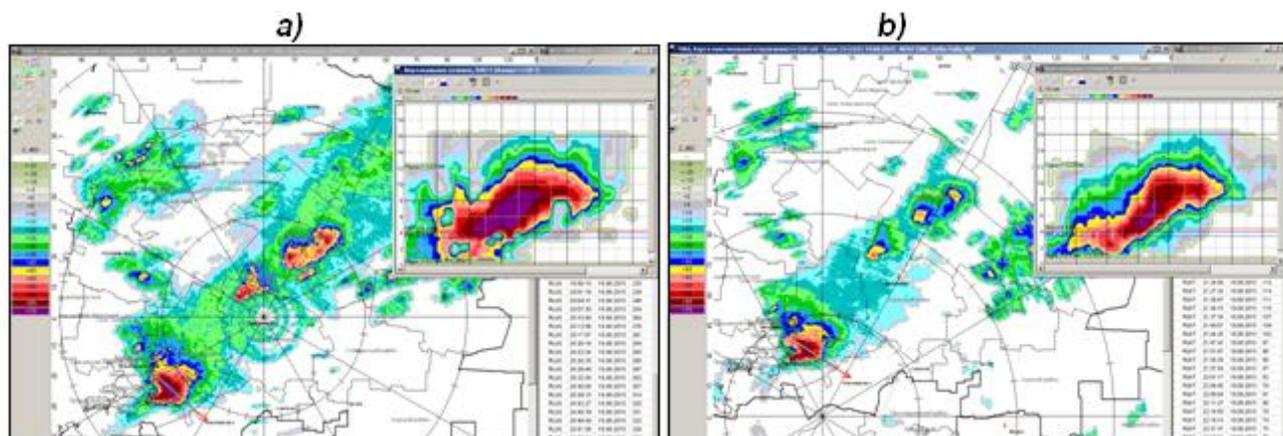


Рис. 5. Карты максимальной отражаемости и вертикальных сечений суперячейкового градового облака: а) – на ДМРЛ-10 в 21¹⁴; б) – МРЛ-5М 21¹³ 19.08.2015.

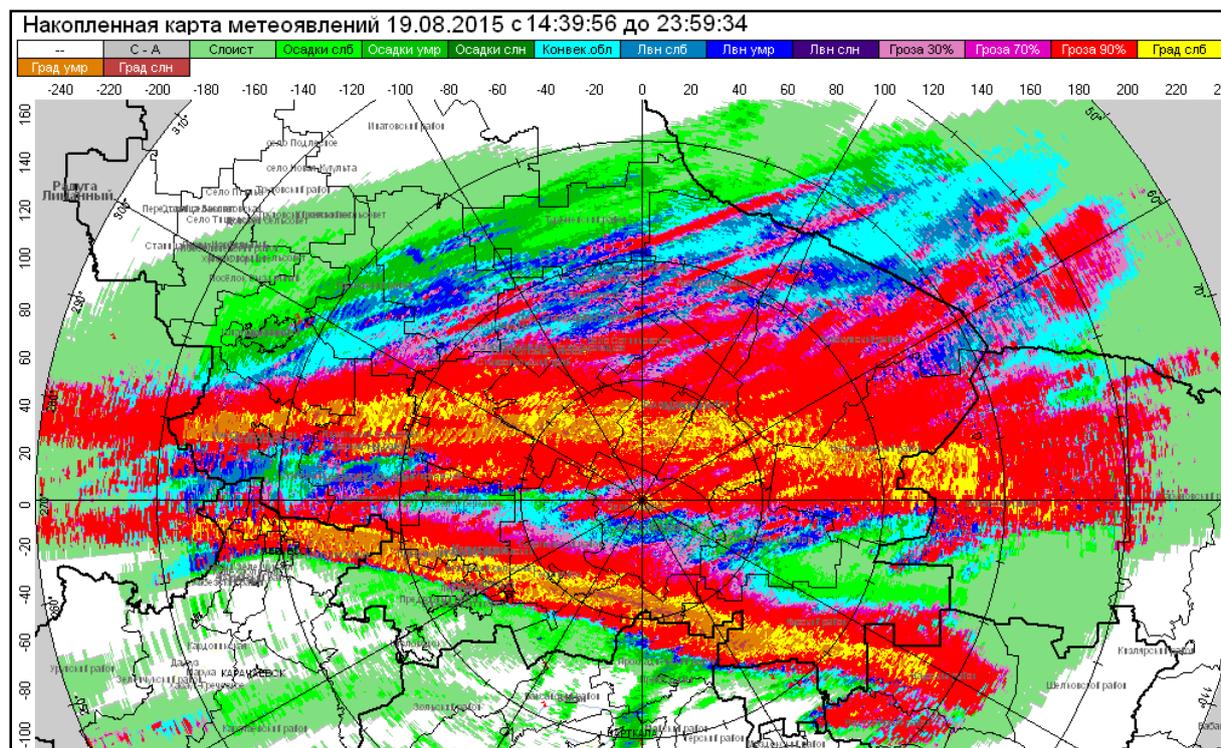


Рис. 6. Накопленная карта метеорологических явлений, полученная на ДМРЛ-10. На удаленностях более 150 км отмечается занижение степени их опасности из-за того, что радиолуч даже при угле 0° из-за кривизны земли не охватывает нижнюю и среднюю часть облаков [2].

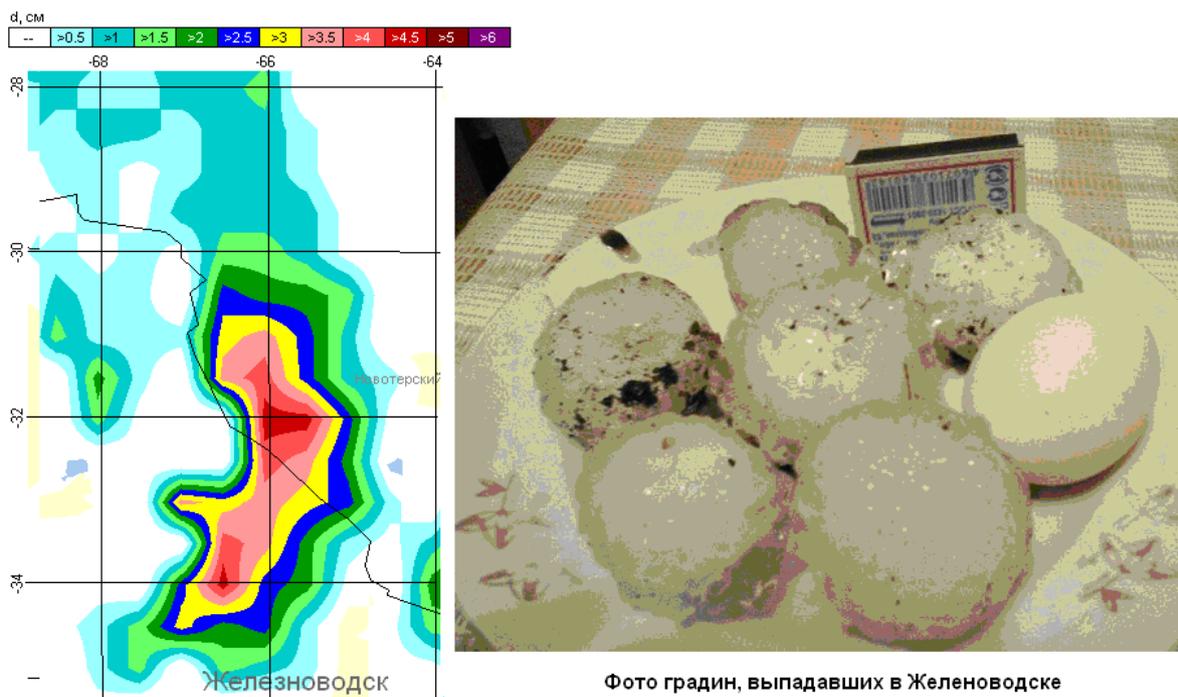


Рис. 7. Размер града по радиолокационным и наземным данным.

Заключение

Современные российские метеорологические радиолокаторы вполне обеспечивают требования широкого круга потребителей радиолокационной информации, занимающихся исследованиями облаков, решением задач штормооповещения, метеообеспечения авиации и активного воздействия на облака с целью предотвращения града и искусственного регулирования осадков. Эффективность их применения будет повышаться по мере дальнейшего развития алгоритмов и программ обработки их информации в соответствии с требованиями различных потребителей.

Список литературы

1. Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Котелевич А.Ф., Сирота Н.В. Автоматизированная система обработки радиолокационной информации для целей штормооповещения и активного воздействия на облачные процессы // Труды XXVII Симпозиума по радиолокационному зондированию природных сред. – СПб. - 2011. – С. 211 - 225.
2. Абшаев М.Т., Абшаев А.М. Возможности и ограничения радиолокационных метеорологических измерений // Тр. II Всерос. конф. Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды, Военно-Космическая Академия им. А.Ф. Можайского. – СПб. – 2012. – Т. 1 – С. 276 – 289.
3. Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Малкарова А.М., Тезадов С.М., Ефремов В.С., Вылегжанин И.С., Соловьев А.Г., Оприков Е.М. Метеорологический канал ТРЛК с электронным сканированием пространства // Тезисы Всерос. конф. по физике облаков и АВ на гидрометеорологические процессы. – Нальчик, 2011. – С. 97-100.

4. Абшаев М.Т., Вовшин Б.М., Вылегжанин И.С., Ефремов В.С., Жуков В.Ю., Мельничук Ю.В. Стасенко В.Н., Шаповалов А.В., Щукин Г.Г. Когерентный МРЛ с поляризационной селекцией сигнала для оснащения сети Росгидромета // Сборник трудов XXVII Всерос. симпоз. Радиолокационное исследование природных сред. – СПб. 2011. – С.

5. Ефремов В.С., Вылегжанин И.С. Рекламный проспект ДМРЛ-10. – 2015. – 2 с.

ПРОТИВОГРАДОВЫЙ КОМПЛЕКС «АС-ЭЛИЯ»

Абшаев А.М.¹, Абшаев М.Т.¹, Зорин В.А.², Кратиров Д.В.³, Михеев Н.И.³

¹ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

²ОАО «Научно-исследовательский институт полимерных материалов», г. Пермь

³Научно-производственное предприятие «ИРВИС», г. Казань

Применение ранее созданных противоградовых комплексов на практике показало [1], что они не в полной мере обеспечивают выполнение требований технологии активного воздействия (АВ) на градовые процессы вследствие:

- недостаточного темпа засева быстротечных сверхмощных градовых облаков, связанного с применением пусковых установок (ПУ) с ручным наведением, малым числом направляющих и длительностью перезарядки ПУ в грозовую обстановку;
- недостаточной льдообразующей эффективности противоградовых изделий (ПГИ);
- низкой точности полета ПГИ, связанной с влиянием приземного ветра;
- большого радиуса «мертвой» зоны (без засева) вокруг ПУ, что приводит к увеличению числа ракетных пунктов воздействия (ПВ), чтобы они могли перекрывать «мертвые» зоны соседних ПВ.

Для решения этих проблем создан противоградовый комплекс «Ас-Элия», в составе малогабаритного ПГИ «Ас» и автоматизированной ПУ «Элия-2» (рис. 1).



Рис. 1. Автоматизированный противогорадовый комплекс «Ас-Элия».

1. Краткие сведения о ПГИ «Ас»

ПГИ «Ас» разработано НПП «ИРВИС» (г. Казань) под научным руководством и по техническому заданию НПЦ «Антиград» на основе льдообразующего твердого топлива (ЛТТ), созданного в ОАО «НИИПМ» (г. Пермь). Серийное производство корпусных деталей осуществляется НПП «ИРВИС», а изготовление зарядов, сборка и поставка ПГИ – ОАО «НИИПМ».

ПГИ «Ас» имеет принципиально новую конструкцию с активно-реактивным стартом и маршевым двигателем, работающим на всей траектории полета от момента старта до точки самоликвидации корпуса [3-5]. Отличительной особенностью изделия является применение ЛТТ [4-6], что обеспечило объединение функций реактивной тяги и генерации кристаллизующего аэрозоля, упрощение конструкции ПГИ, многократное уменьшение габаритно-массовых характеристик, увеличение массы полезной нагрузки и получение пологих траекторий полета с повышенной протяженностью пути эффективного засева облаков на требуемой высоте и в требуемом облачном слое. Истечение продуктов горения и кристаллизующего аэрозоля происходит через сопло ПГИ. При этом формирование кристаллизующего аэрозоля в узкой струе реактивных газов обеспечивает повышение их объемной концентрации и формирование оптимального спектра льдообразующего аэрозоля.

Для сокращения влияния приземного ветра на точность полета предусмотрен стартовый газогенераторный ускоритель, обеспечивающий скорость старта ПГИ около 85 ± 5 м/с. Корпус газогенератора остается в ПУ, что сокращает полетную массу изделия. Основные характеристики ПГИ «Ас» в сравнении с лучшими аналогами приведены в табл. 1.

Технические характеристики ПГИ «Ас» в сравнении с лучшими аналогами

Технические характеристики	Алазань-6	Алазань-9	Лоза	Ас
Калибр, мм	82,5	60	55	57
Полетная длина изделия, мм	1402	1200	910	520
Полетная масса, кг	8,8	4,5	2,8	1,41
Стартовая скорость, м/с	26	50	65	85 ± 5
Эффективный радиус действия, км	10,5	10,5	7,5	10,7 ± 0,6
Длина пути засева в требуемом слое, км	7,0	6,0	4,5	9,0 ± 0,5
Масса реагента, г	630	400	400	830
Количество AgI, г	26,4	36,0	40	16,6
Выход льдообразующих частиц: – при температуре -10 °С – при температуре -6 °С	6.6·10 ¹⁵ 2·10 ¹⁵	6.6·10 ¹⁵ 10 ¹⁵	1,2·10 ¹⁶	1,6·10 ¹⁶ 4,7·10 ¹⁵
Продолжительность засева облаков, с	30 ± 3	40 ± 4	30	47 ± 4
Система обеспечения безопасности	взрывом	взрывом	взрывом	без ВВ
Масса ВВ, г	240	130	100	0
Надежность системы самоликвидации	0,995	0,9995	0,955	0,9995

Достоинствами ПГИ «Ас» являются:

- повышенный в 2 - 3 раза по сравнению с аналогами выход активных льдообразующих ядер (ЛОЯ), что позволяет повысить эффективность противорадовой защиты (ПГЗ) и сократить расход ПГИ;
- повышенный радиус действия и более пологие, чем у аналогов, траектории обеспечивают засев требуемого по технологии ПГЗ [1] слоя облаков;
- уменьшенный в 3 раза радиус «мертвой» зоны вокруг пусковой позиции (около 1,5 км) по сравнению с аналогами, позволяющий сократить требуемое число ракетных ПВ примерно в 1,5 раза и снизить себестоимость противорадовых работ;
- дробление пластикового корпуса отработавшего ПГИ на безопасные осколки без применения взрывчатых веществ (ВВ) за счет резкого повышения давления в камере сгорания на конечном этапе работы двигателя. Это позволяет снизить класс опасности ПГИ, сократить запретные сектора и упростить транспортировку;
- малые габариты и масса ПГИ «Ас» обеспечивают удобство эксплуатации (переноски, заряжания и разряжения ПУ) и снижение транспортных расходов. Его масса в 6,2 раза меньше, а масса реагента в 1,3 раза больше чем у ПГИ «Алазань-6»;
- складывающееся оперение позволяет увеличить число направляющих ПУ «Элия-2» до 36 (при тех же габаритах пакета направляющих помещается 16 ПГИ «Алазань-6», имеющих

жесткое оперение, или 20 ПГИ «Алазань-9»). Большое число направляющих повышает боезапас ПУ, позволяет резко сократить частоту зарядки ПУ при проведении АВ, а также число ПУ на ракетных пунктах;

- в конструкции ПГИ предусмотрен цанговый замок с калиброванным усилием срыва, обеспечивающий старт изделия после набора необходимой тяги. Это исключает рутинные операции по калибровке усилия срыва в направляющих ПУ;

- простота зарядки и стопорения ПГИ позволяет сократить время зарядки ПУ в условиях острого дефицита времени. Для заряжания ПГИ «Ас» требуется протолкнуть в направляющие трубы ПУ «Элия-2» до упора и застопорить сразу 6 ПГИ одной штангой;

- применение защитной крышки на пусковых трубах позволяет защитить ПГИ от воздействия дождя и солнца и содержать ПУ в заряженном состоянии – в состоянии постоянной готовности;

- высокая стартовая скорость ПГИ «Ас» резко сокращает влияние приземного ветра на точность полета в заданном направлении.

ПГИ «Ас» успешно выдержала межведомственные испытания. Проверка надежности функционирования проведена в ФКП «Приволжский государственный боеприпасный испытательный полигон».

Проверка льдообразующей эффективности выполнена в аэродинамической трубе ФГБУ «НПО «Тайфун» (рис. 2) в январе 2005 г. и июне 2014 г.

Испытания льдообразующей эффективности полноразмерных ПГИ «Ас», снаряженных составом ЛТТ «ПЛС-126», проведенные зимой 2005 г., показали, что при скорости обдува 80-100 м/с выход активных ЛОЯ с 1 ЛТТ достигает $4,0 \cdot 10^{16}$ при температуре -10°C и $4,7 \cdot 10^{15}$ при температуре -6°C (рис. 3).

Испытания, проведенные в июне 2014 г., на моделях с уменьшенным в 4 раза зарядом состава «ПЛС-2», которым снаряжена первая промышленная партия ПГИ «Ас», показали, что выход ЛОЯ с одного изделия при температуре -10°C составляет $1,3 \cdot 10^{16}$, а при -6°C – около $2,0 \cdot 10^{15}$. Примерно в 1,5-2 раза больше выход ЛОЯ у модернизированного (с целью уменьшения температурной зависимости скорости горения) состава «ПЛС-2-214».

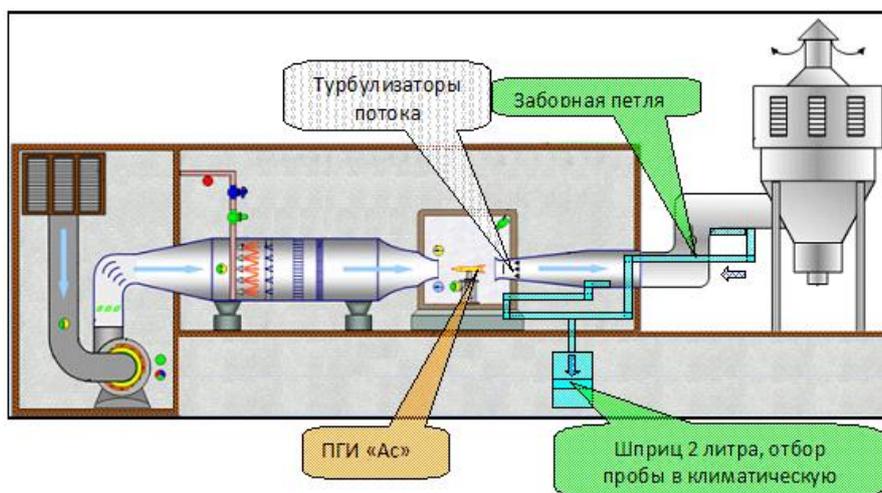


Рис. 2. Схема аэродинамического стенда ФГБУ «НПО «Тайфун».

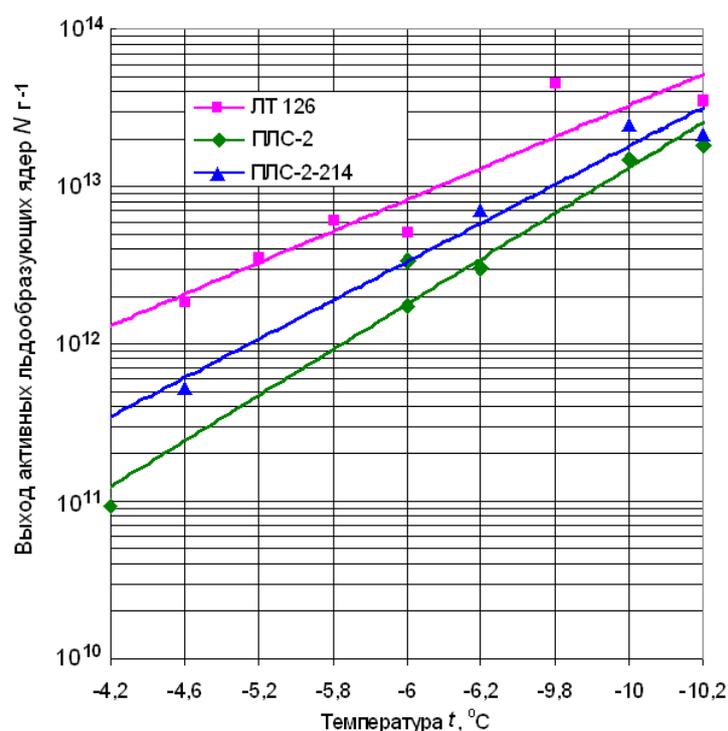


Рис. 3. Выход активных льдообразующих ядер с 1 г льдообразующего топлива по результатам испытаний в аэродинамической трубе НПО «Тайфун»: ЛТ-126 по данным испытаний в январе 2005 г.; ПЛС-2 и ПЛС-2-214, проведенных 10-11.06.2014 г.

Испытания по дроблению корпуса, проведенные в бронированной песочной камере в ОАО «НИИПМ», показали, что в случае применения шашки ВВ массой 30 г корпус превращается в пыль. Однако по согласованию с ВС Росгидромета было принято решение о дроблении корпуса без применения ВВ. В этом случае, как показано на рис. 4, максимальный осколок имеет массу 130 г, который опускается со скоростью до 20 м/с. Его кинетическая энергия (49 Дж) не превышает кинетическую энергию градины диаметром 5 см.



Рис. 4. Фрагменты дробления корпуса ПГИ «Ас» без применения ВВ.

Заключительные испытания по проверке соответствия ПГИ «Ас» требованиям ТЗ и функционирования при пусках с ПУ «Элия-2» и «Элия-МР» после воздействия дождя, СВЧ облучения и 10-кратного пере заряжания, а также проверке удобства эксплуатации проведены на противогорадовом полигоне ФГБУ «ВГИ».

Для расчета траекторий ПГИ «Ас» разработана математическая модель, которая позволяет исследовать влияние приземной температуры и ветра (бокового, встречного и попутного). Траектории ПГИ приведены на рис. 5, из которого следует что радиус действия ПГИ «Ас» варьирует в зависимости от высоты стартовой позиции и высоты засева в пределах $10,7 \pm 0,6$. При этом обеспечиваются пологие траектории с длиной пути засева $9 \pm 0,5$ км, проходящем в 1 км облачном слое и радиусом «мертвой» зоны $1,5 \div 2,0$ км в зависимости от угла пуска.

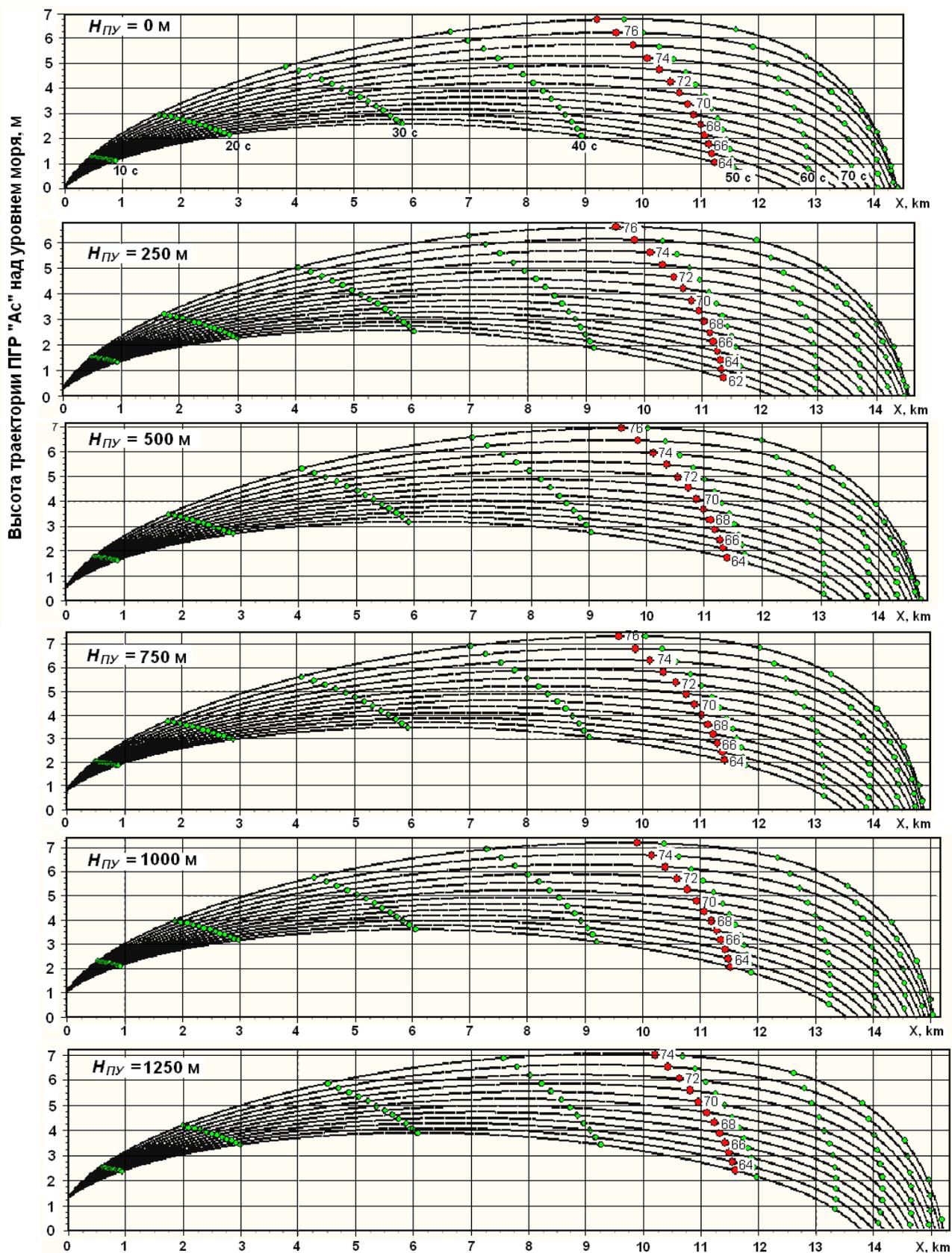


Рис. 5. Траектории ПГИ «Ас» при разных углах пуска с указанной высоты над уровнем моря. $H_{пy}$ – высота позиции. Красным цветом указаны точки самоликвидации, а рядом углы пуска.

2. Краткие сведения о ПУ «Элия-2»

При проведении АВ на сверхмощные крупномасштабные суперячейковые и многоячейковые градовые процессы требуется массивированный засев [1], обеспечиваемый скорострельностью и количеством ПУ на ПВ, количеством направляющих ПУ, оперативностью перезарядки ПУ и оперативностью пуска ПГИ. На практике ПГЗ, зачастую, даже при наличии на каждом ПВ двух 12 ствольных ПУ «ТКБ-040» требуемый темп засева не достигается. Это усугубляется перерывами в засеве объектов воздействия (ОВ) из-за длительного времени перезарядки ПУ (6 - 8 мин). Из-за недозасева ОВ не достигается желаемый эффект. Это вынуждает приводить многократные повторные засева, но, несмотря на перерасход ПГИ, зачастую, не удается полностью предотвратить градобитие при мощных и сверхмощных градовых процессах.

Для обеспечения требований технологии АВ, автоматизации противоградовых стрельб и их документирования НПЦ «Антиград» создана многоствольная автоматизированная ПУ «Элия-2», могущая обеспечить высокий темп засева ОВ (пуск 15 ПГИ за 1 мин) без перезарядки во время АВ.

ПУ «Элия-2» состоит из опорно-поворотного устройства, пакета направляющих, электропривода азимуту и угла возвышения с датчики углового положения и содержит контроллер управления, два радиомодема для дальней и ближней связи, систему автономного электропитания. Она обеспечивает пуск ПГИ с активно-реактивным стартом («Ас», «Алан-3») и реактивным стартом («Алазань-6», «Алазань-9»). Для пуска этих ПГИ, имеющих разные конструкции и калибры, предусмотрено три варианта сменных пакетов направляющих. Пакет направляющих для пуска ПГИ «Ас» содержит 36 направляющих (табл. 2), выполненных из тонкостенных труб из нержавеющей стали длиной 1800 мм (рис. 1), необходимой для разгона ПГИ до 80 м/с, а для пуска ПГИ «Алазань-6» и «Алазань-9» – из швеллеров.

Встроенные радиомодемы дальней (до 100 км) и ближней (до 0,1 км) связи, программируемый контроллер обеспечивает беспроводное управление ПУ, ее наведение по азимуту и углу возвышения, и серийный пуск ПГИ с исключением действий персонала в условиях суровой погоды.

Абсолютные цифровые датчики углового положения и система автоматического наведения на солнце обеспечивают высокую точность горизонтирования, ориентирования ПУ и пуска ПГИ с точностью $\pm 0,5$ градуса, наличие 36 стволов – возможность засева крупномасштабных ОВ, а простота и оперативность зарядки ПУ - удобство эксплуатации.

Система электропитания на базе аккумуляторов и зарядного устройства на солнечной батарее, обеспечивает автономное электропитание ПУ, и возможность ее применения в труднодоступных районах, где отсутствует линия электропередачи.

Встроенная мини метеостанция с датчиками давления, температуры и влажности воздуха позволяет исключить температурный разброс траектории засева облаков путем введения соответствующей коррекции. Необходимость этого обусловлена тем, что в дни с градовыми процессами температура воздуха на стартовой позиции может варьировать от 5 до 40 °С. С повышением температуры скорость горения зарядов двигателей и пиротехнических составов реагента увеличивается, время горения сокращается. Это приводит к температурному разбросу скорости полета ПГИ, радиуса его действия и высоты траектории. Такой температурный разброс характерен всем типам ПГИ.

Таблица 2

Технические характеристики ПУ «Элия-2» и ее аналогов

Параметры ПУ	ТКБ-040	Алан-МЗ	Элия	Элия-МР	Элия-2
Калибр, мм	83	70	57, 61, 83	83	57, 61, 83
Число направляющих, шт.	12	36	49, 36, 16	12	36, 20, 16
Габариты, мм:					
– длина;	2350	2900	2250	2000	1900
– ширина;	2320	1655	1700	1450	1077
– высота.	1980	1420	1700	1200	1200
Масса с пультом управления, кг	670	1300	650	340	190±10
Скорость наведения, град/с:	ручное,	10 ± 0,5	10 ± 0,5	ручное	20 ± 2,0
Скорострельность ракет/мин	6	15	12	6	15
Управление	Ручное	Полуавтом.	Полуавтом.	Ручное	Автомат.

ПУ «Элия-2» может работать в режиме автоматического управления по командам, поступающим по радиомодему дальней связи от системы «АСУ-Элия», управляющей сетью удаленных ПУ «Элия-2», а также в режиме полуавтоматического управления по командам с пульта дистанционного управления [7]. В обоих режимах контроллер ПУ обеспечивает управление радиомодемами ближней и дальней связи, прием и исполнение команд, включая наведение ПУ по угловым координатам, пуск серии ПГИ (от 1 до 36 шт.), регистрацию даты, времени и координат пуска ПГИ.

Порядок применения и противоградового комплекса «Ас-Элия» изложен в [3].

Заключение

1. Опытная эксплуатация противоградового комплекса «Ас-Элия» в ФГБУ «Северо-Кавказская ВС» в 2016 г. показала, что он может обеспечить:

– выполнение требований технологии ПГЗ по оперативному массированному засеву мощных и крупномасштабных градовых облаков;

- повышение точности засева ОБ за счет снижения влияния приземного ветра, благодаря высокой стартовой скорости ПГИ «Ас»;
- сокращение запретных секторов и повышение безопасности применения ПГИ «Ас» благодаря отсутствию в ней ВВ;
- сокращение числа ПВ и ПУ благодаря малому радиусу «мертвой» зоны ПГИ «Ас» и высокой скорострельности ПУ «Элия-2»;
- снижение себестоимости ПГЗ за счет более низкой себестоимости ПГИ «Ас».

2. Автоматизированное управление, контроль исполнения и документирование даты, времени и координат пуска ПГИ позволяют реализацию наукоемкой автоматизированной технологии ПГЗ, сократить в перспективе численность персонала ПВ, расширение площади ПГЗ и экспорта российской технологии ПГЗ.

3. Опытная эксплуатация комплекса выявила недостаточную надежность функционирования ПГИ «Ас» и необходимость проведения мер по ее повышению.

Список литературы

1. Абшаев А.М., Абшаев М.Т., Бареева М.В., Малкарова А.М. Руководство по организации и проведению противорабовых работ. – Нальчик: Печатный двор, 2014. – 506 с.
2. Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Кузнецов Б.К. Автоматизированная противорабовая ракетная пусковая установка / Патент RU № 2267914, 2009.
3. Абшаев М.Т., Абшаев А.М. РД 52.37.821. Порядок применения малогабаритного противорабового комплекса «Ас» для FD на метеорологические и другие геофизические процессы. – Нальчик: Печатный двор, 2015. – 78 с.
4. Абшаев М.Т., Байсиев Х.-М.Х., Кузнецов Б.К., Михеев Н.И., Зорин В.А. Противорабовая ракета // Патент RU № 2130164. Бюллетень изобретений № 30, 2002.
5. Абшаев М.Т., Михеев Н.И., Кратиров Д.В., Зорин В.А. Концепция создания ракет нового поколения для АВ на облака. – Изв. РАН. Энергетика. 2005. № 6. – С. 114-120.
6. Егорычев С.М., Зорин В.А., Нурзянова Х.Н. особенности компоновки новых пиротехнических составов льдообразующего аэрозоля для средств АВ на облака // Доклады научно-прак. конф., посв. 40-летию работ по защите от града. – Нальчик, 2011. – С. 262-264.
7. Abshaev M.T., Abshaev A.M., Kuznetsov B.K., etc. New advances in automation of antihail rocket technology // 10th WMO Conf. Weather Mod. – Bali, Indonesia. – 2011.

ОБЪЕДИНЕНИЕ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ И ГРОЗОПЕЛЕНГАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ И ЗАБЛАГОВРЕМЕННОСТИ ОБНАРУЖЕНИЯ ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПОГОДЫ

Шаповалов А.В.¹, Стасенко В.Н.², Аджиев А.Х.¹, Кравченко Н.А.³, Лашманов Ю.К.³,
Шаповалов В.А.¹

¹ ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

² НИЦ «Планета», г. Москва

³ Ставропольский ЦГМС, г. Ставрополь

В Российской Федерации в настоящее время эксплуатируются несколько типов метеорологических радиолокаторов сантиметрового диапазона: «ДМРЛ-С», «МРЛ-5» и другие. Данные радиолокационных наблюдений одного МРЛ обеспечивают предупреждение о появлении конвективного явления с заблаговременностью 1–3 ч, а сети МРЛ, обзоры которых перекрываются или стыкуются друг с другом, дают возможность прогнозировать некоторые явления на срок до 12 ч.

Доплеровский метеорологический радиолокатор ДМРЛ-С предназначен:

- для отображения карт различных метеорологических данных (отражаемости, скорости, ширины спектра, а также в режиме двойной поляризации: дифференциальной отражаемости, фазы, коэффициента кросскорреляции и линейного деполаризационного отношения) на различных высотных уровнях;
- расчета и отображения вертикального профиля скорости, направления ветра до высоты верхней границы обнаружения метеообъектов и других доплеровских продуктов;
- построения и отображения карты интенсивности осадков за любой интервал времени;
- определения опасных явлений погоды (град, гроза, шквальные усиления ветра, интенсивный дождь и снег, сильная турбулентность);
- отображения скорости и направления перемещения облачных систем;
- выдачи радиолокационной информации в информационную сеть в необходимых форматах, определенных ВМО или государственными структурами.

Существенным отличием ДМРЛ-С от существующих аналогов является применение технологии сжатия импульсов с уровнем боковых лепестков ниже 60 дБ.

В ВГИ разработано программное обеспечение анализа и отображения радиолокационной информации МРЛ-5 и ДМРЛ-С для операционных систем Linux и Windows. Программное

обеспечение выполняет функции автоматизированного сбора, обработки, анализа, представления, накопления и хранения радиолокационной информации об облаках и связанных с ними явлениях.

Информация, получаемая с помощью ПО вторичной обработки, отображается по выбору оператора в виде следующих карт:

- карты горизонтальных сечений на любой высоте через 0,1 км (CAPPI) для всех получаемых продуктов (радиолокационной отражаемости, радиальной доплеровской скорости; ширины спектра; дифференциальной отражаемости; дифференциальной фазы; коэффициента кросскорреляции);
- карты наклонных сечений (PPI);
- карты максимальной радиолокационной отражаемости;
- карты явлений погоды;
- карты вертикальных сечений облаков в любом направлении (RHI);
- карты интенсивности и количества осадков;
- карты вертикально интегрированной водности (VIL) и другие.

Актуальной задачей является объединение данных нескольких МРЛ в региональном масштабе. При этом, как отмечалось, возрастает заблаговременность штормовых предупреждений. На рис.1 приведено окно визуализации программного обеспечения объединения радиолокационной информации, разработанное авторами, проходящее проверку в двух региональных центрах. Карта радиолокационной отражаемости (также и других продуктов) формируется из совместного анализа объемных данных нескольких станций в высоком пространственном разрешении (1,0 -0,5 км). Охват территории в развитом ПО существенно больше чем у одного локатора, и с вводом новых ДМРЛ еще более возрастет.

Последние десятилетия характеризуются бурным развитием трехмерной компьютерной графики практически во всех сферах деятельности людей. В частности, быстрыми темпами развивается и внедряется в практику трехмерное представление информации с метеорологических радиолокаторов.

В ВГИ на основе библиотеки OpenGL разработано адаптированное для задач физики облаков программное обеспечение трехмерной графики, которое предназначено для объемной интерпретации широкого спектра геофизической информации и данных численного моделирования (рис. 2).

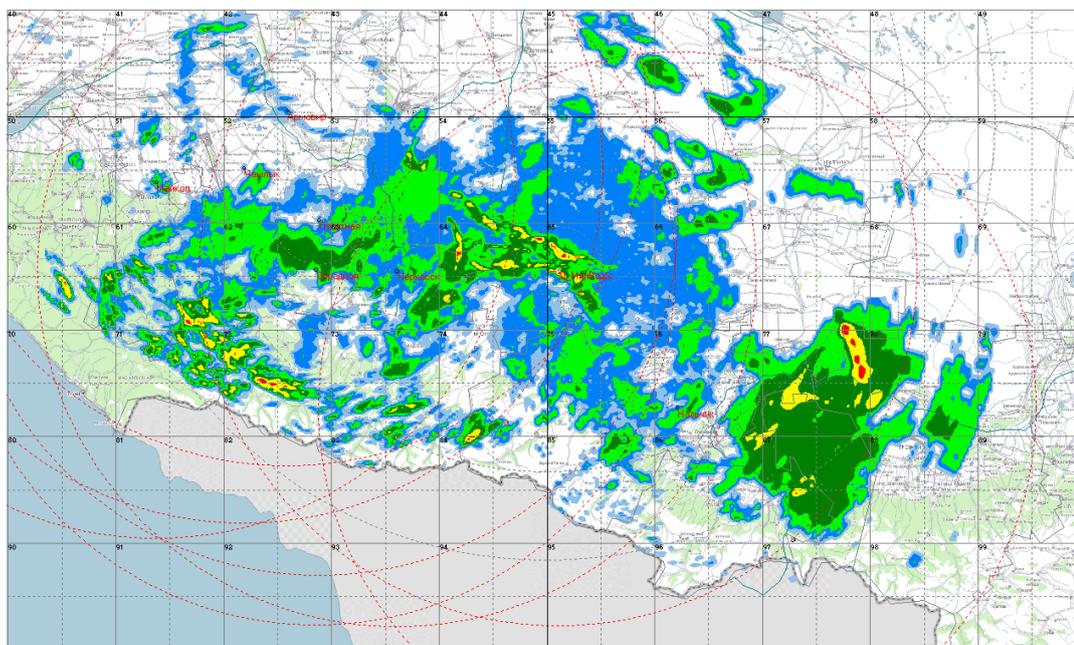


Рис. 1. Карта максимальной радиолокационной отражаемости с сети МРЛ и ДМРЛ ЮФО и СКФО (карта построена по данным 8-и радиолокаторов).

Программное обеспечение визуализации радиолокационной метеорологической информации позволяет получать новые представления о мощных грозовых облаках, их структуре, взаимодействии развивающихся конвективных ячеек. В частности, построение трехмерного изображения облака в виде изоповерхностей радиолокационной отражаемости дает возможность увидеть облако как объемный объект, оценить его особенности, проследить связь с орографией [4].

Шкала градаций отражаемости дает возможность изменять внешний порог отображения и последовательно просматривать положение вложенных уровней, или увидеть все уровни одновременно, например, в вертикальном или горизонтальном разрезе облака.

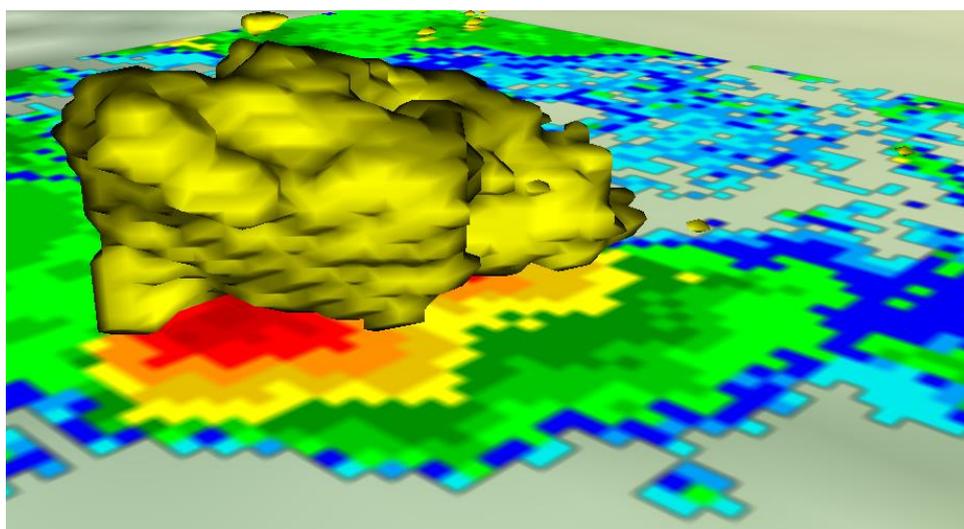


Рис. 2. Трехмерная структура градового облака по данным автоматизированного МРЛ-5 Северо-Кавказской военизированной службы.

Нанесение дополнительных слоев геоинформационных данных позволяет выводить вспомогательную информацию (пункты воздействия, метеостанции, населенные пункты).

Трехмерные сцены представляют информацию в таком виде, который облегчает пользователю формирование представления об объемных характеристиках метеорологического объекта. Программа визуализации радиолокационной информации позволяет выделять взаимодействующие конвективные ячейки на ранней стадии развития и улучшает понимание метеорологической обстановки для целей текущего прогноза.

Радиолокаторы позволяют обнаруживать грозы вероятностным методом по косвенным признакам. Непосредственно грозовое излучение регистрируют радиоприемники, т.к., гроза излучает в широком диапазоне длин волн. Современные автоматизированные системы грозопеленгации в отличие от грозоотметчиков и грозорегистраторов решают задачи определения направления и установления местоположения разрядов [3,73,93].

Система грозопеленгации, установленная на Северном Кавказе, состоит из четырех грозопеленгаторов LS8000 фирмы Vaisala и центрального пункта приема и обработки информации от грозопеленгаторов. Регистраторы расположены вблизи населенных пунктов: г. Черкесск, с. Кызбурун, г. Ставрополь и г. Зеленокумск в Северо-Кавказском федеральном округе. Данные с этих сенсоров, с помощью спутниковой связи передаются на центральный пункт приема и обработки информации, расположенный в г. Нальчике, в здании Высокогорного геофизического института. Комплекс LS8000 предназначен для автоматического обнаружения и измерения координат грозовых очагов в зоне установки и на прилегающей территории, и может использоваться как в автономном режиме, так и в составе региональной системы из нескольких аналогичных комплексов, объединяемых специальной системой связи или через Интернет.

В процессе работы комплекс решает следующие задачи:

- Обнаружение молниевых разрядов.
- Измерение пеленга, дальности, времени приёма и оценка электромагнитных параметров разрядов.
- Отображение грозовой обстановки в зоне ответственности на экране монитора с привязкой к карте местности.
- Автоматическая выдача информации о координатах и параметрах грозовых очагов потребителям в сеть.
- Документирование, архивирование, статистическая обработка полученной информации.

Радиус зоны ответственности комплекса более 1000 км. Относительная погрешность определения дальности не более 10%, пеленга не более 30 мин. (значения параметров приведены для равнинной местности и могут уточняться с учетом рельефа); оперативность менее 1 с.

На рис.3 приведены результаты пеленгации разрядов молний на территории Северного Кавказа за июнь 2014 года по данным системы LS8000.

В центре обработки метеорологических данных при ВГИ анализируется также спутниковая информация. Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии "Планета", обеспечивает передачу информации по сети Росгидромета в центры сбора и обработки данных в реальном масштабе времени. В ВГИ организован канал приема спутниковой информации, развиваются программы комплексной обработки получаемой информации.

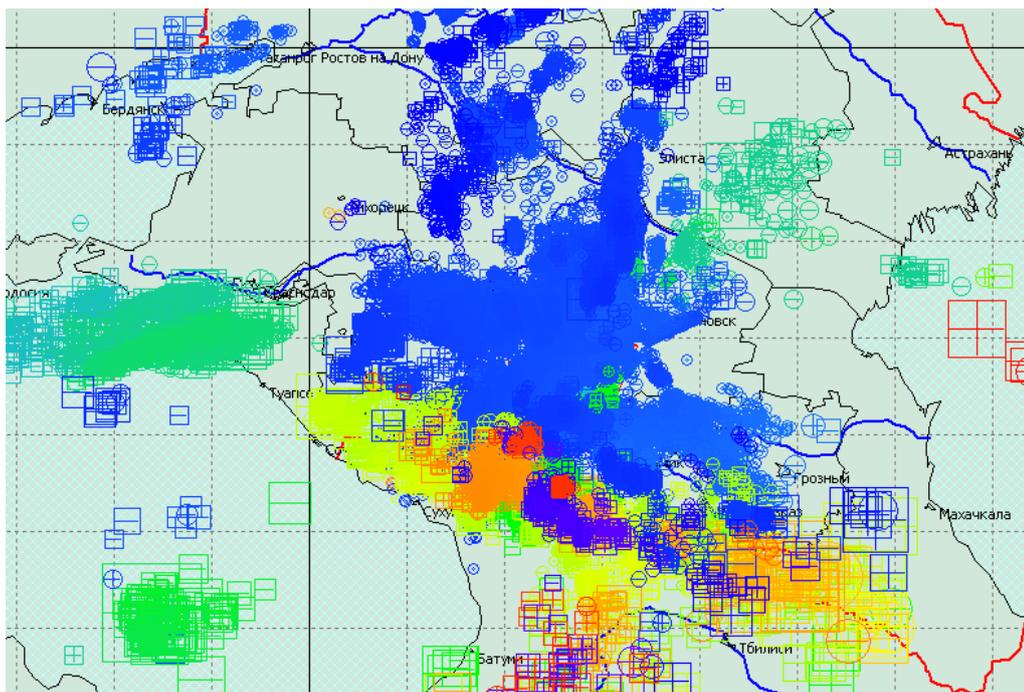


Рис. 3. Разряды на территории Северного Кавказа за июнь 2014 года по данным системы LS8000.

Примеры совместной обработки радиолокационных и грозопеленгационных данных приведены на рис. 4 – 5, на которых приведена одна и та же облачная система.

На рис. 4 приведена радиолокационная карта Z_{max} от фронтальной полосы гроз по данным ДМРЛ-С «Ставрополь» и высокочастотные разряды с грозопеленгатора LS8000. Внутриоблачные разряды наблюдается несколько впереди по направлению перемещения радиоэхо(пурпурные крестики, рис.4) с подветренной стороны, разряды молний отмечаются ближе к зоне осадков или максимальной отражаемости [3].

Экспериментально наблюдаемое на рис.4 наличие значительного положительного заряда (соответственно, разрядов) на переднем фланге, хорошо коррелирует с данными, полученными при численном моделировании грозовых облаков [1,2], в которых отмечается наличие мощного поля в натекающей верхней части облачности.

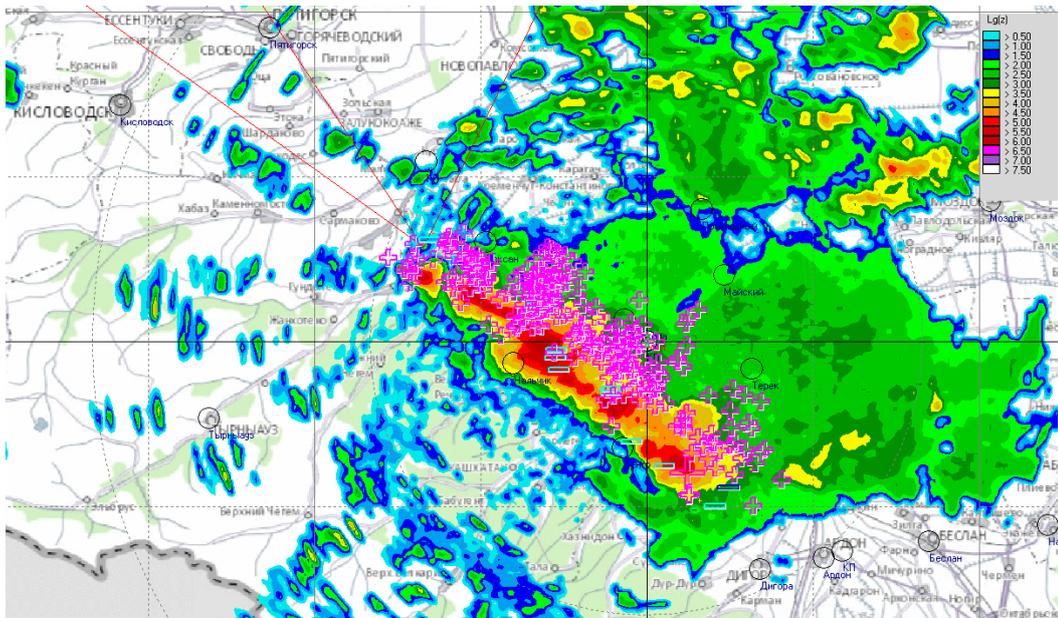


Рис. 4. Фронтальная полоса гроз по данным ДМРЛ-С «Ставрополь» и грозопеленгатора LS8000 (ВГИ, г. Нальчик). (03.07.2014_19:30 GMT).

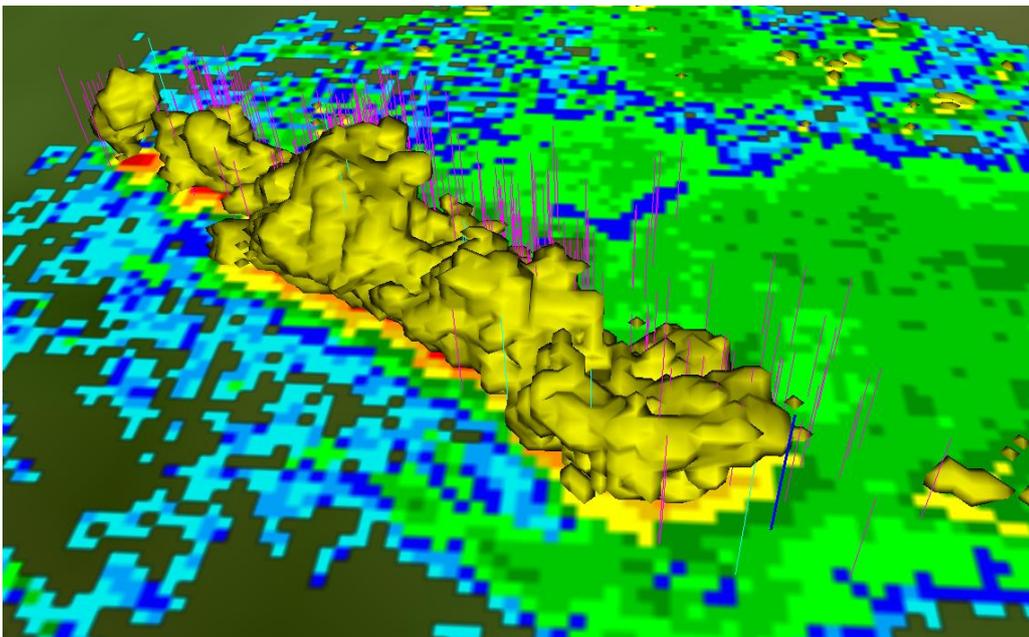


Рис. 5. Фронтальная полоса гроз 03.07.2014_19:30 GMT с внутриоблачными разрядами в трехмерном виде.

Таким образом, комплексная обработка информации метеорологических радиолокаторов и систем грозопеленгации представляется крайне актуальной, такой подход требует развития математических методов обработки, алгоритмов и программных средств анализа и визуализации.

Программное обеспечение объединения и анализа радиолокационной, грозопеленгационной и спутниковой информации при внедрении позволит повысить надежность предупреждений об опасных гидрометеорологических процессах в региональном масштабе и их заблаговременность.

Список литературы

1. Ашабоков Б.А., Бейтуганов М.Н., Куповых Г.В., Шаповалов А.В., Продан К.А., Шаповалов В.А. Численное моделирование электрических характеристик конвективных облаков//Известия вузов. Северо-Кавказский регион. – 2012, №6..
2. Ашабоков Б.А., Шаповалов А.В., Кулиев Д.Д., Продан К.А., Шаповалов В.А. Численное моделирование термодинамических, микроструктурных и электрических характеристик конвективных облаков на стадии роста и максимального развития//Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2013. Т. 56. № 11-12. С. 900-907.
3. Стасенко В.Н. Радиолокационное исследование электроактивных зон в конвективных облаках//Метеорология и гидрология, 2006, № 1
4. Шаповалов А.В., Шаповалов В.А. Трехмерная визуализация геофизической информации для решения прикладных задач// Наука. Инновации. Технологии. 2014. № 1. С. 65-73.

ЛАЗЕРНО-ЛОКАЦИОННОЕ УСТРОЙСТВО КОНТРОЛЯ И РЕГИСТРАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ РАССЕЙВАНИЯ ОБЛАЧНЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

Калов Х.М., Калов Р.Х.

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

Для контроля результатов рассеивания облачных образований нами предложен и испытан лазерно-локационный комплекс [1], включающий в себя следующие устройства:

1. Оптико-механический тракт и блок накачки, состоящий из лазерного излучателя ИЗ-25-1 с удвоителем частоты излучения и датчиком синхроимпульса, приспособленным для юстировки макета и блока охлаждения излучателя; двух фотоэлектронных умножителей; двух телескопов, снабженных системами поляризационных, абсорбционных (цветных и нейтральных) фильтров; монтажного поворотного стола; юстировочного стола.

2. Входной тракт, состоящий из логарифмического усилителя (ЛУ), устройства выборки и хранения аналогового сигнала (УВХ) и усилителя мощности (УМ).

3. Двухканальный регистратор аналоговых сигналов (ДРАС). Сигналы с выходов приемного блока поступают на входы двухканального регистратора аналоговых сигналов, каждый канал которого состоит из аналого-цифрового преобразователя (АЦП), оперативного запоминающего устройства (ОЗУ) и схем управления работой.

Лазерно-локационный комплекс может быть использован в наземных условиях и на борту летательных аппаратов.

Определение результатов активных воздействий (АВ) основано на анализе результатов взаимодействия оптического излучения с рассеивающей аэрозольной (облачной) средой. Лазерно-локационная установка позволяет осуществлять посылку световых импульсов лазерного излучения длительностью до 20 наносекунд и прием обратнорассеянного излучения. При помощи приемной аппаратуры производится регистрация так называемого упругого рассеяния светового излучения, т. е. регистрируется свет той же длины волны, что и зондирующего светового излучения. Выбор именно упругого рассеяния для анализа результатов АВ обусловлен тем, что интенсивность упругого рассеяния в аэрозольной среде на несколько порядков превосходит интенсивность других типов рассеяния. Это обстоятельство позволяет при ограниченной мощности используемого лазера получить максимально возможную дальность зондирования.

Для определения оптических свойств зондируемого объема был использован анализ формы эхо-сигналов обратного рассеяния. Такой подход позволяет проводить сравнительно простые относительные измерения сигнала обратного рассеяния и отказаться от сложной и дорогостоящей калибровки лазерного локатора. При анализе результатов зондирования облаков и туманов во внимание не принималось молекулярное рассеяние, так как его вклад на несколько порядков меньше вклада аэрозольного рассеяния.

Следует выделить два принципиально различных варианта зондирования атмосферы: 1) локатор находится непосредственно в облаках и туманах, подвергаемых АВ; 2) излучатель находится вне оптически плотного атмосферного образования, например, при пролете самолета с лидаром над слоем облаков, подвергаемых АВ.

Эти два случая резко различаются по подходам к анализу форм эхо-сигналов. В первом варианте световой зондирующий импульс практически полностью рассеивается на расстоянии всего в несколько десятков метров. Действительно, по закону Бугера, мощность оптического излучения Φ , прошедшего сквозь слой рассеивающей среды толщиной l , с коэффициентом ослабления оптического излучения ε , равна [2]: $\Phi = \Phi_0 e^{-\varepsilon l}$, где Φ_0 — мощность входящего излучения.

С учетом того, что при зондировании среды оптическое излучение проходит одни и те же аэрозольные образования дважды – в прямом и обратном направлениях, мощность оптического излучения только за счет ослабления в атмосфере уменьшается в $e^{2\epsilon l}$ раз. Например, при $\epsilon l = 3$, $e^{2\epsilon l} = 403$. Максимальное расстояние, с которого лидар, находящийся в облаке, получает эхо-сигнал, примерно соответствует метеорологической оптической дальности. Для облаков с коэффициентом ослабления 50 км^{-1} , эта дальность составляет 60 м. Следовательно, глубина проникновения зондирующего оптического излучения в оптически плотную среду практически совпадает с дальностью видимости в этой среде. Эхо-сигнал лазерного локаатора, находящегося в облаке, имеет вид одиночного импульса, длительностью до 1 микросекунды, причем с уменьшением оптической плотности облачного образования (коэффициента ослабления ϵ) эта длительность возрастает. Таким образом, по изменению длительности одиночного импульса при пролете самолета через исследуемую область, подвергнутую активному воздействию, можно судить о степени просветления соответствующего метеорологического образования.

Совершенно иной тип эхо-сигнала регистрируется лазерным локаатором во втором варианте, когда он находится в чистой атмосфере, вне облачного образования. Это происходит при полете самолета с лидаром на борту над или под облаками. В этом случае лидар регистрирует как первоначальный относительно слабый импульс значительной длительности – до нескольких микросекунд, так и ряд импульсов от аэрозольных образований, лежащих на трассе зондирования. Самый последний большой импульс соответствует слою, в котором зондирующее излучение окончательно рассеивается. При активном воздействии на облачный слой его граница в зоне воздействия смещается, а глубина проникновения лазерного излучения в облаке увеличивается. Изменение этих двух параметров и позволяет судить о результатах АВ на облачные образования в случае нахождения самолета в чистой атмосфере.

При проведении наземных испытаний лазерно-локационное устройство устанавливается на земле, работа ведется по нижней поверхности облака. Определяется расстояние до облаков, динамика нижней границы, энергетический потенциал прибора, глубина проникновения зондирующего луча в облако, дальность видимости по трассе и другие параметры, позволяющие оценить работоспособность прибора и правильность заложенных при его реализации принципов.

Бортовые испытания проводятся в двух вариантах:

- работа через боковые иллюминаторы; в этом варианте проверяется работоспособность аппаратуры при энергообеспечении от бортовых источников питания, а также замеряется реальное энергопотребление; при полете выше верхней границы облаков и при боковом крене самолета (Як-40) $25 - 30^\circ$ проводятся те же работы, что и при наземных испытаниях, но по верхней кромке облаков;

- работа через световые люки в днище самолета: проверяется работоспособность в штатной ситуации.

Методика наземных испытаний следующая. Аппаратура устанавливается на земле в закрытом помещении, имеющем световое окно, которое обеспечивает достаточный обзор по азимуту и углу места. В качестве контрольных средств используются метеорологические средства оборудования полигона (измерители прозрачности, измерители высоты облаков). Испытания проводятся при различных метеорологических ситуациях — при наличии тумана, при низкой и высокой облачности. Контроль правильности определения дальности видимости в атмосфере ведется при работе по горизонтальным трассам в слабом тумане или дымке (при метеорологической дальности видимости, равной 200 - 500 м). Проверяется совпадение результатов измерений с помощью разработанной аппаратуры, проводится необходимая коррекция. Затем лазерно-локаторное устройство переводится на работу по наклонным трассам и вертикально в зенит. Измеряется расстояние до нижней кромки облаков, результаты контролируются штатными средствами.

Методика при работе через боковые иллюминаторы следующая. Аппаратура, предварительно испытанная и откалиброванная в наземных условиях, устанавливается на борт самолета-лаборатории. Ведутся измерения прозрачности атмосферы по трассам, параллельным поверхности земли и перпендикулярным траекториям движения самолета. Необходимо, чтобы самолет двигался в разрывах между облаками, при этом определяется прозрачность атмосферы в разрывах и в облаке, а также дальность до боковых кромок облаков. Ведется проверка работоспособности аппаратуры на борту в режиме длительного использования.

При работе через световые люки в днище самолета-лаборатории аппаратура, отъюстированная в наземных условиях, устанавливается на борт самолета. Зондирование ведется в надир. Метеоситуация – приземный туман. Самолет движется над полигоном на высоте около 1000 м. Во время первых пролетов контролируется работоспособность аппаратуры; в момент пролета над точкой расположения штатной наземной аппаратуры производится сверка результатов; при необходимости производится подстройка. На экране постоянно выводятся в графическом виде результаты дальности видимости по трассам над слоем тумана и в самом слое.

Проведены натурные испытания аппаратуры на борту самолета-лаборатории. Приведем некоторые результаты бортового варианта. Работы велись на длине волны 0,532 мкм, причем в первом канале (на рис. 1 – «Канал 0») плоскость пропускания поляроида была параллельна плоскости поляризации лазерного излучения, а во втором («Канал 1») - перпендикулярна ей. Аппаратура была установлена по правому борту самолета-лаборатории, поэтому при полете над облаками с креном на правый борт около 30° велось зондирование верхней кромки облака.

В качестве иллюстрации данной ситуации приводятся результаты натуральных экспериментов (рис. 1). На расстоянии 300-330 м регистрируется сигнал от облака, имевшего сначала двухслойную структуру, затем, при дальнейшем полете, однослойную, причем произошло исчезновение ближнего слоя и увеличение дальности видимости вплоть до второго слоя, что, очевидно, аналогично ситуации с искусственным рассеянием слоистой облачности. Это подтверждает возможность аппаратуры регистрировать рассеяние облака в реальном эксперименте с активным воздействием.

Проводились также работы по фиксированию реальных воздействий на облако с помощью пиропатронов ПВ-26 и противорадиолокационных ракет. В одном случае воздействие проводилось с борта самолета, а в другом - с земли. При измерениях в зоне активного воздействия фиксируются увеличение дальности видимости в 5 - 10 раз (от 10 - 20 до 100 м) и расслоение облачности.

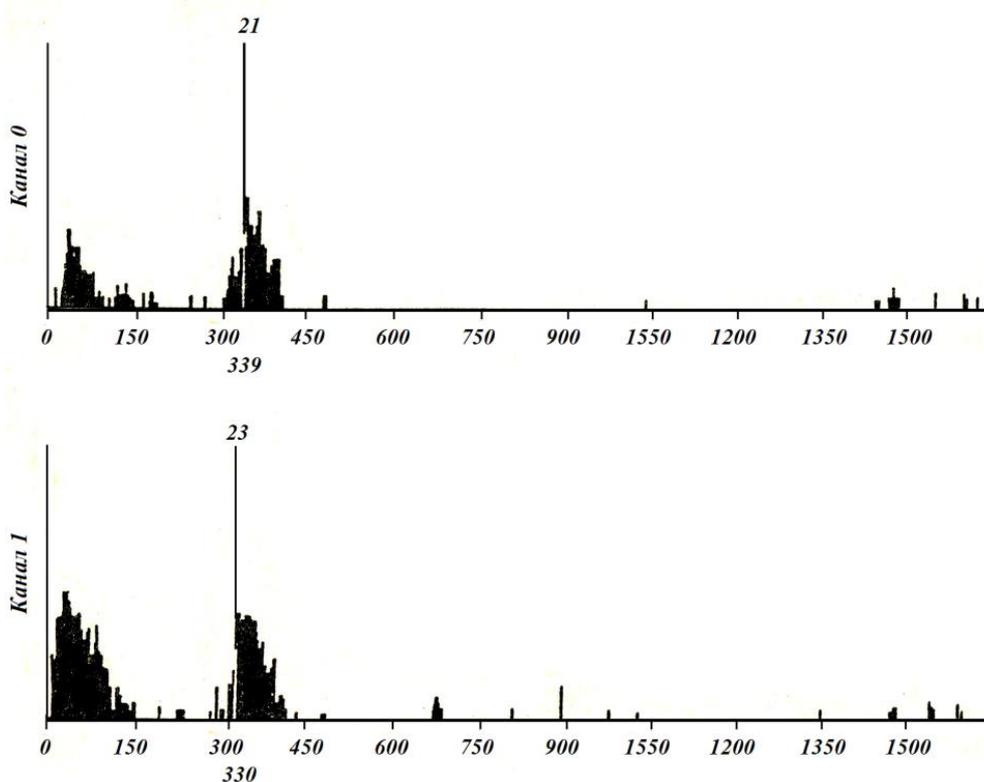


Рис. 1. Пример регистрации сигнала от облака двухслойной структуры, подвергнутого активным воздействиям.

Список литературы

1. Ашкинадзе Д.А., Белобровик В.И., Сергеев Н.М. Разработка и создание действующего макета устройства контроля и регистрации результатов активных воздействий на туманы и слоистую облачность. Отчет по НИР, 1989. 109 с.
2. Качурин Л.Г. Физические основы воздействия на атмосферные процессы. Л.: Гидрометеиздат, 1978. 455 с.

О ПРОГНОЗЕ ПОСЛЕДСТВИЙ СИЛЬНОЙ КОНВЕКЦИИ И СВЯЗАННЫХ С НЕЙ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА ЮГЕ ЕТР

Кагермазов А.Х., Созаева Л.Т.

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» г. Нальчик

Введение

В последние годы в информационном обеспечении методов прогнозирования опасных явлений погоды, связанных с конвективными процессами в атмосфере происходят существенные изменения. Интенсивное развитие вычислительных средств, информационных технологий (интернет) и, как следствие, оперативная доступность результатов расчетов глобальных моделей атмосферы открывает новые возможности для развития методов прогноза опасных явлений погоды.

В данной работе предлагается новый подход для прогноза развития ливневых осадков и паводков, основанный на использовании выходных данных Глобальной модели атмосферы, с последующим применением регрессионного анализа. Предлагаемый подход можно использовать для регионов с реками, максимальный сток которых обусловлен выпадением интенсивных осадков (ливневых дождей).

Материалом для проведения исследования послужили фактические данные об опасных явлениях с 2009 по 2016г.г., предоставленные Северо-Кавказским Гидрометцентром и данные, доступные в официальном сайте Росгидромета [1]. По собранному материалу была создана база данных опасных явлений погоды. Были отобраны даты с ливневыми осадками и паводками. Для анализа использовались количество осадков (мм) и значение превышения уровня воды в руслах рек над ординаром (см) (над средним многолетним уровнем в данном пункте) соответствующие выбранным датам.

Для расчета предикторов, используемых в прогнозе этих опасных явлений погоды, предлагается использовать выходную продукцию Глобальной системы прогнозов Национального центра экологических прогнозов США (GFS NCEP) [2].

Основные свои черты Глобальная модель приобрела в начале 90-х годов после обобщающих работ авторов [3-5]. Глобальная модель атмосферы высокого пространственного разрешения (T254) имеет дискретность по времени 3 часа для заблаговременности прогноза 0-180 ч. и 12 часов для заблаговременности 180-384 часа. В последнем случае расчеты проводятся

на гауссовой сетке (768x384), что приблизительно соответствует горизонтальному разрешению 0,5° широтно-долготной сетки. По вертикали толща атмосферы (от поверхности земли до высоты изобарической поверхности 0,27 гПа) разделена на 64 слоя, к серединам которых предписаны основные счетные Sigma – уровни. Координатная сетка по вертикали неоднородна: имеет место сгущение в нижних слоях, где 1,5 км пограничный слой атмосферы описывают 15 счетными уровнями и 24 уровнями выше 100 гПа. Орография построена на основе глобальной цифровой модели рельефа Геологической службы США с горизонтальной сеткой в 30 угловых секунд (примерно 1 км).

Линейные регрессионные модели для прогноза осадков и паводков. В результате проведенных исследований [6-8] было получено, что на формирование явлений конвективной природы (град, ливень и т.д.) оказывают наибольшее влияние следующие параметры атмосферы:

- скорость упорядоченного подъема воздуха на уровне 700мб (V700);
- суммарная удельная влажность в слое от поверхности земли до 500 гПа (SQZ5);
- энергетическая характеристика подоблачного слоя (DSS);
- средний дефицит влажности в слое от уровня конденсации до высоты 5 км от поверхности земли (TDSR5);
- термодинамический индекс неустойчивости атмосферы Миллера (TTMI).

По каждому опасному явлению (даты с ливневыми осадками) были получены: фактические значения количества осадков и соответствующие параметры атмосферы.

Для выявления и описания зависимости между количеством осадков QL (зависимой переменной), наблюдаемой при ливнях и параметрами атмосферы была использована линейная регрессионная модель вида:

$$QL = a \cdot V700 - b \cdot SQZ5 + c \cdot DSS + d \cdot DTRS5 + e \cdot TTMI + const, \quad (1)$$

где a, b, c, d, e – коэффициенты; $const$ – свободный член.

Параметры атмосферы ($V700, SQZ5, DSS, TDSR5, TTMI$), рассчитанные по выходным данным Глобальной системы прогнозов [2], рассматривались в качестве независимых переменных.

Главным фактором, характеризующим паводки, является значение превышения уровня воды в руслах рек над ординаром. С другой стороны, условия для схода паводка, формируются за определенный период времени - более или менее одной недели. Поэтому в качестве предикторов, связанных с паводками, было использовано количество осадков за 7, 6, 5, 4, 3, 2 дней до паводков и в день их появления [2]. Оказалось, что наиболее пригодным для прогноза

паводков, является количество осадков за три дня до паводка (Q_3 , см) и количество осадков в день появления паводка (Q_p , см).

Поэтому, линейная регрессионная модель прогноза паводков была построена в виде уравнения:

$$H = a \cdot Q_3 + b \cdot Q_p + const, \quad (2)$$

где H (см) – фактическое значение превышения уровня воды над ординаром (независимая переменная); a , b – коэффициенты; $const$ – свободный член.

Регрессионный анализ сводится к определению коэффициентов и свободного члена уравнения, расчету параметров, характеризующих статистическую значимость и практическую применимость модели.

Для учета климатических особенностей территории данные для прогноза ливней были сгруппированы в соответствии со следующими зонами юга ЕТР и Северного Кавказа:

- Центральная часть (Ставропольский край, Карачаево-Черкесия, КБР, Осетия, Чеченская Республика);
- Западная часть (Черноморское побережье Северного Кавказа, Краснодарский край, Адыгея);
- Восточная часть (Дагестан, Ингушетия, Калмыкия, Чечня).

Модели прогноза паводков были построены для условий Центральной и Восточной части Северного Кавказа, в связи с отсутствием данных по паводкам для Западной части Северного Кавказа.

Для отмеченных климатических зон Северного Кавказа построены уравнения регрессии, которые можно использовать для прогнозирования количества осадков при сильных ливнях (мм):

Центральная часть:

$$QL = -0,386 \cdot V700 - 1,033 \cdot SQZ5 - 2,33 \cdot DTRS5 + 2,030 \cdot TTMI - 14,411 \quad (3)$$

Западная часть:

$$QL = 0,427 \cdot DSS + 7,205 \cdot DTRS5 + 6,318 \cdot TTMI - 295,63 \quad (4)$$

Восточная часть:

$$QL = -0,397 \cdot V700 + 0,955 \cdot SQZ5 - 1,343 \cdot TTMI + 77,859. \quad (5)$$

Из уравнений (3) – (4) видно, что они отличаются свободными членами и набором независимых переменных и коэффициентов при них, что указывает на то, что климатические особенности заметно влияют на генезис ливней. Ливни на Черноморском побережье меньше зависят от крупномасштабной циркуляции атмосферы (отсутствует параметр $V700$) и больше связаны с локальными условиями.

Для различных климатических зон Северного Кавказа получены уравнения регрессии, по которым можно прогнозировать значения превышения уровня воды над ординаром H (см), наблюдаемые при сильных ливнях (мм):

Центральная часть:

$$H = 11,796 \cdot Q_c - 1,243 \cdot Q_i - 44,451 \quad (6)$$

Восточная часть:

$$H = 1,040 \cdot Q_c - 13,896 \cdot Q_i + 513,031 \quad (7)$$

В уравнениях (6) и (7) также коэффициенты при независимых переменных отличаются друг от друга, что указывает на различия формирования паводков в зависимости от климатических характеристик данного региона.

Для уравнений (3)-(5) коэффициенты детерминации R , характеризующие тесноту связи между переменными в регрессионной модели, оказались равными: $R=0,57$ (заметная линейная связь), $R=0,81$ (высокая линейная связь) и $0,86$ (высокая линейная связь) для соответствующих климатических зон. Коэффициенты R -квадрат, характеризующие качество модели оказались равными: $0,32$, $0,65$ и $0,73$ также для соответствующих климатических зон. Как правило, данный показатель также должен превышать $0,5$. Для Центральной части Северного Кавказа регрессионная модель описывает 32% случая, что связано, скорее всего, со значительным градиентом климатических условий, обусловленных перепадом высоты местности.

Для уравнений (6) и (7) коэффициент детерминации R принимает значения $76,4\%$ и $89,6\%$ для Центральной и Восточной части Северного Кавказа соответственно, т.е. теснота связи между значениями превышения уровня воды над ординаром и суммой осадков за три предшествующих дня и в текущий день появления паводка высокая.

Коэффициент R -квадрат объясняет 58% и 80% соответственно вариации значения превышения уровня воды над ординаром совместной вариацией суммы осадков за три предшествующих дня и в текущий день появления паводка.

Выводы

Показатели, характеризующие статистическую значимость и практическую применимость регрессионных уравнений (коэффициент детерминации, коэффициент R –квадрат, анализ остатков и т.д.) свидетельствуют о том, что по уравнениям (3) – (7) можно адекватно прогнозировать количество осадков при сильных ливнях и значение превышения уровня воды над ординаром в руслах рек Северного Кавказа.

Новая технология прогноза опасных конвективных явлений погоды и сопутствующих им чрезвычайных ситуаций, основанная на использовании выходной продукции Глобальной

системы прогнозов Национального центра экологических прогнозов США (GFS NCEP) показала свою работоспособность. В соответствии с концепцией MOS (Model Output Statistics) Выходных Статистик Моделей, могут быть реализованы статистические схемы прогноза и для других опасных явлений (град, сель, сильный ветер).

Список литературы

1. <http://meteoinfo.ru/archive-forecast-main>
2. <http://www.emc.ncep.noaa.gov>
3. Kalnay E., Kanamitsu M., and Baker W.E., Global numerical weather prediction at the National Meteorological Center. // Bull. Amer. Meteor. Soc. – 1990. – Vol.71. – P. 1410–1428.
4. Kanamitsu, M., Description of the NMC global data assimilation and forecast system.// Wea. and Forecasting. – 1989. – Vol. 4. – P. 335–342.
5. Kanamitsu, M., Alpert J.C., Campana K.A., Caplan P.M., Deaven D.G., Iredell M., Katz B., Pan H.-L., Sela J., and White G.H., Recent changes implemented into the global forecast system at NMC. // Wea. and Forecasting. – 1991. – Vol. 6. – P. 425–435.
6. Кагермазов А.Х., Федченко Л.М. Использование статистических методов для прогноза градовых процессов и их характеристик. Метеорология и гидрология, 1988г. №4, Стр. 41-50.
7. Кагермазов А.Х., Федченко Л.М. Факторный анализ данных радиозондирования при градовых и безградовых ситуациях. Метеорология и гидрология, 1988г. №7, Стр. 115-118.
8. Кагермазов А.Х., Сиротенко Л.А. Результаты апробации программных модулей расчета метеопараметров и компьютерного прогноза града по данным аэрологического зондирования на Северном Кавказе. Известия Вузов Северо-Кавказский Регион. Физика атмосферы. Спецвыпуск 2010г. Стр. 49-53.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ АТМОСФЕРЫ ПРИ ОПАСНЫХ КОНВЕКТИВНЫХ ЯВЛЕНИЯХ

Ершова Т.В.

ФГБОУ ВО «Томский государственный педагогический университет», г. Томск

К атмосферным рискам относятся такие опасные конвективные явления как шквальный ветер, молнии, ливневые дожди, град и смерч. В Томской области по данным метеорологических станций за год регистрируется в среднем 22 дня с грозой, в отдельные годы это число колеблется от 15 до 30 [2]. На метеорологической станции Томск в 2005 г. было зарегистрировано рекордное число дней с грозой – 39. А максимальное число дней с грозой (40 дней) в Томской области отмечалось в Колпашево в 2001 г. Град регистрируется метеорологическими станциями реже, чем раз в год. В Томской области в среднем за год от удара молнии погибает один человек. Из-за молнии и града происходят случаи повреждения самолётов. Например, в мае 2010 г. молния ударила в пассажирский самолёт Москва–Томск [6]. В результате был поврежден фюзеляж самолёта, а также полностью разрушен верхний разрядник статического электричества. Летом 2006 г. в Томской области от шагового напряжения при молнии погибло стадо коров.

Оценивая атмосферные риски для определенной территории, необходимо учитывать плотность населения, промышленную и сельскохозяйственную освоенность территории. В Томской области половина всего населения (около 600 тыс. чел.) проживает в областном центре и окрестностях, а большая часть территории – это практически не заселенное Васюганское болото с точечными поселениями вдоль рек, газовыми и нефтяными месторождениями, линиями трубопроводов и электропередач. Для сравнения, регион Северного Кавказа в Российской Федерации является лидером по числу дней с опасными конвективными явлениями и, соответственно, последствиями для общества и экономики. Например, только за один теплый сезон на отдельных метеорологических станциях Северного Кавказа может быть зарегистрировано до 60 дней с грозой [1] и 14 дней с градом. Это густозаселенная и освоенная сельскохозяйственная территория, а также рекреационный регион страны. Широкую огласку в средствах массовой информации (СМИ) получают случаи опасных конвективных явлений погоды и последствий, которые произошли именно в густонаселенных районах. Примером может служить широко обсуждаемый грозовой фронт в конце мая 2017 г. в Московском регионе, когда в СМИ сообщили о многочисленных последствиях шквального ветра [10]. Жертвами урагана стали 16 человек, было ранено более 70 человек. По данным МЧС в Москве рухнуло более 17 тысяч деревьев, были повреждены кровли почти 300 многоэтажных жилых и административных зданий. Из-за падения деревьев и

различных конструкций повреждения получили более 2 тысяч автомобилей. Произошла задержка 130 электричек и 23 поездов дальнего следования, а также были отменены четыре аэроэкспресса в аэропорт Внуково. В мае–июне 2017 г. опасные конвективные явления с серьезными последствиями были зарегистрированы практически по всей стране – от Северо-Кавказского региона до Сибири.

В последние 70 лет расширяются возможности исследований дискретных конвективных явлений на основе данных аэрологических зондирований атмосферы; метеорологических радиолокаторов, расположенных, в основном около аэропортов; систем местоопределения молний и спутниковой информации. Но несмотря на все существующие технические возможности вопросы прогноза опасных конвективных явлений с высокой оправдываемостью и предупреждения населения о возможном шквальном ветре или разрушительном граде с максимальной заблаговременностью остаются открытыми. Можно перечислить несколько причин сложности прогнозирования опасных конвективных явлений. Во-первых, достаточно редкая сеть метеорологических и аэрологических станций на территории России, особенно, в Сибирском регионе. Расстояния в сотни километров между метеорологическими и аэрологическими станциями не позволяют оперативно зафиксировать сформировавшееся кучево-дождевое облако и опасные явления, связанными с ним. Конвективные ячейки «проскакивают» незамеченными между станциями Росгидромета. Во-вторых, сетевое аэрологическое зондирование в 00 и 12 часов всемирного скоординированного времени (BCB) для Томской области практически не совпадает со временем максимальной неустойчивости атмосферы и развитием кучево-дождевых облаков. В-третьих, спутниковые данные сложно соотнести с данными аэрологического зондирования, т.к. они относятся к разным промежуткам времени суток. Результаты исследований В.П. Горбатенко и др. [3] по верификации параметров неустойчивости атмосферы по данным спектрорадиометра MODIS, установленного на космической платформе Terra, с данными аэрологического зондирования, показали, что успешно прогнозировать сильные шквалы возможно, только сочетая данные искусственных спутников Земли, результаты численных прогностических моделей, данные МРЛ и оперативных синоптических карт.

Сравнение термодинамических индексов по данным аэрологического зондирования и восстановленных индексов по спутниковым данным [4], показали, что наиболее согласованными являются индексы $TOTL$ и K_{IND} для 12 часов BCB. В качестве территории исследования была выбрана Камчатка, т.к. данную территорию спутник Terra сканирует во время, близкое к срокам аэрологического зондирования в 00 и 12 часов BCB.

Цель данного исследования – сравнительный анализ трёх термодинамических параметров атмосферы при грозах и редких смерчах в Сибирском регионе (Томской и Новосибирской областях) с данными для Европейской части России.

Материалом исследования послужила информация о случаях с грозами для шести метеорологических станций России: Александровское и Колпашево в Томской области, Новосибирск, Курск, Воронеж и Нижний Новгород. Метеорологическая информация о регистрации гроз представлена на сервере Института космических исследований РАН «Погода России» [11]. Три станции в Европейской части России выбраны из-за физико-географического сходства по высоте станций над уровнем моря (не более 200 м.н.у.м.) и среднего числа дней с грозой за год (не более 28 дней с грозой). Данные радиозондирования в дни с грозой за период с 2000 по 2014 гг., были взяты на сайте американского университета Вайоминг (Wyoming) [13]. Отметим, что для шести станции России, только начиная с 2005 г. данные радиозондирования были достаточно полные. Учитывая суточный ход конвективных явлений в атмосфере [5, 7] для Томской и Новосибирской областей, целесообразно привлекать только данные за 12 часов ВСВ, что соответствует 18 часам местного времени в Томской и Новосибирской областях. Для Нижнего Новгорода, Воронежа и Курска 12 часов ВСВ – это 15 часов местного времени.

На территории Томской области находится две станции, проводящие как метеорологические наблюдения, так и радиозондирование (*табл. 1*): в селе Александровское на севере области действует крупное подразделение ГУ «Томский ЦГМС» (государственного учреждения «Томский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды») и в Колпашево в центре Томской области расположена Колпашевская зональная гидрометеорологическая обсерватория (КЗГМО). В Новосибирске метеорологическая станция и аэрологическая станция расположены в 10 км друг от друга. Поэтому для Новосибирска данные о факте грозы были доступны по наблюдениям метеорологической станции Огурцово, а данные радиозондирования – по станции Новосибирск. Для представленного исследования было выбрано шесть пар станций «метеостанция – станция радиозондирования». Отметим, что данные аэрологической станции Новосибирска активно используются при прогнозе конвективных процессов и явлений для аэропорта Богашево в Томске при юго-западных перемещениях воздушных масс.

Таблица 1

Метеорологические и аэрологические станции в Западной Сибири (Томская и Новосибирская области) и Европейской части страны

Территория	Метеорологические станции		Аэрологические станции	
	Номер и название станции	Географические координаты	Номер и название станций	Географические координаты
Западная Сибирь	23955 Александровское	60°26' с. ш. 77°52' в. д.	23955 Александровское	60°26' с. ш. 77°52' в. д.
	29231 Колпашево	58°18' с. ш. 82°54' в. д.	29231 Колпашево	58°18' с. ш. 82°54' в. д.
	29638 Огурцово (Новосибирск)	54°52' с. ш. 83°00' в. д.	29634 UNNN Новосибирск	54°57' с. ш. 83°06' в. д.

Европейская часть России	34009 Курск	51°39' с. ш. 36°11' в. д.	34009 Курск	51°76' с. ш. 36°16' в. д.
	34123 Воронеж	51°42' с. ш. 39°13' в. д.	34122 Воронеж	51°65' с. ш. 39°25' в. д.
	27459 Нижний Новгород	56°16' с. ш. 44°00' в. д.	27459 Нижний Новгород	56°26' с. ш. 44°00' в. д.

Прогнозирование конвективных процессов и явлений в атмосфере является одной из сложнейших синоптических задач. Основная проблема заключается в том, что кучево-дождевые облака дискретны как по времени, так и в пространстве. Так, например, для аэропорта Толмачева (Новосибирск) оправдываемость прогнозов фронтальных гроз изменяется от 55 % по методу Седлецкого до 77 % для внутримассовых гроз по методу Кокса [9]. Для аэропорта Богашёво в Томске прогноз таких конвективных явлений, как гроза, град и ливни, составляется по методу Н.И. Глушковой – В.Ф. Лапчевой. Все указанные расчётные методы основаны на анализе таблиц и графиков и получении альтернативных ответов, например, «будет гроза» или «не будет». Методы прогноза опасных явлений, связанных с кучево-дождевой облачностью, были разработаны на фактическом материале более полувека назад, и в дальнейшем, не обновлялись и не уточнялись по современным данным. Поэтому одной из первоочередных задач является параметризация термодинамических параметров неустойчивости атмосферы при опасных конвективных явлениях для исследуемой территории Западной Сибири. Для Томской и Новосибирской областей существующие методы прогноза гроз требуют усовершенствования на основе современных данных радиозондирования и спутниковой информации.

По данным аэрологического зондирования рассчитываются около 20 комплексных термодинамических характеристик (индексов) состояния атмосферы в разных слоях атмосферы или на разных уровнях [13]. Как показали предыдущие исследования [3–5, 7], для прогноза опасных конвективных явлений лучше подходят три индекса неустойчивости атмосферы – $LIFT$, K_{INX} и $TOTL$, рассчитанные для срока 12 ВСВ.

Интенсивные грозы, шквалы и град формируются в атмосфере при значительной энергии неустойчивости во всём слое облакообразования, когда в средней и верхней тропосфере температурные градиенты существенно превышают величину влажноадиабатического градиента. Эту характеристику состояния атмосферы отражает значение индекса $LIFT$ (°C), или индекса подъема [5, 7]:

$$LIFT = T_{500} - T_{parcel}, \quad (1)$$

где T_{500} – температура окружающей среды на уровне 500 гПа, °C; T_{parcel} – температура поднимающейся частицы, при среднем давлении, температуре и точке росы в слое 500 метров над поверхностью.

Параметр K_{INX} (°C) является показателем для оценки степени развития конвекции на основе вертикального градиента температуры и вертикальной протяженности слоев высокой влажности, и рассчитывается по формуле:

$$K_{INX} = (T_{850} - T_{500}) + TD_{850} - (T_{700} - TD_{700}), \quad (2)$$

где T_{700} – температура на уровне 700 гПа, °C; TD_{700} – температура точки росы на уровне 700 гПа, °C.

Другим параметром, оценивающим не только статическую нестабильность атмосферы, но и влажность на уровне 850 гПа является параметр $TOTL$ (°C):

$$TOTL = (T_{850} - T_{500}) + (TD_{850} - T_{500}), \quad (3)$$

где T_{850} – температура на уровне 850 гПа, °C; TD_{850} – температура точки росы на уровне 850 гПа, °C.

Сравнивая значения индексов неустойчивости атмосферы при регистрации метеорологических станциями гроз, можно отметить сходство индексов для европейской части России и Сибирского региона (табл. 2). Средние значения индекса $LIFT$ всегда отрицательные, т.к. поднимающийся перегретый влажный воздух всегда теплее окружающего воздуха. Параметр K_{INX} близок к +30 °C, что показывает значительный вертикальный температурный градиент и повышенную влажность между слоями 850, 700 и 500 гПа, что является необходимым условием для возникновения конвективной облачности и молнии. Параметр $TOTL$ превышает +46 °C, что характеризует значительную разность по температуре поверхностей 500 и 850 гПа.

Таблица 2

Термодинамические показатели атмосферы по данным радиозондирования в 12 час. ВСВ при регистрации гроз на метеорологических станциях за период 2000–2014 гг.

Регион	Станции	Термодинамические параметры		
		LIFT, °C	K_{INX} , °C	TOTL, °C
Западная Сибирь	Александровское (Томской обл.)	-0,3	27,1	47,5
	Колпашево (Томская обл.)	-0,3	26,8	46,8
	Новосибирск	-2,1	30,4	49,3
Европейская часть России	Воронеж	-0,9	29,4	47,8
	Курск	-1,1	31,8	48,5
	Нижний Новгород	-0,3	29,6	48,1

Зарегистрированные или сфотографированные очевидцами смерчи являются достаточно редким явлением на территории малонаселенной Западной Сибири, поэтому даже единичные зарегистрированные случаи смерча необходимо анализировать. Сильный маломасштабный вихрь в виде столба или воронки, направленный от облака к подстилающей поверхности образуется всего за несколько секунд, происходит значительный скачок атмосферного давления в несколько гектопаскалей, в результате возникают огромные скорости ветра. В Сибири смерчи не достигают разрушительной силы, которая способна «взорвать» дом, опрокинуть мост или поднять вверх автомобиль, но сорвать кровлю с крыш или переместить предметы сибирский смерч может. Разлетающиеся осколки зданий и конструкций наносят значительный ущерб и приводят к травмам и гибели людей. Примером могут служить зарегистрированные очевидцами смерчи в мае 2017 г. в Алтайском крае [12] и в июне 2012 г. в Ханты-Мансийском автономном округе – Югра [8]. В Алтайском крае смерч был зафиксирован очевидцами 30 мая 2017 г. около села Гришковка. Ближайшие метеостанции зафиксировали грозы, ливневые дожди и усиление ветра до 34 м/с. В момент образования смерча в регионе сложилась непростая погодная обстановка: грозовой фронт оттеснил волну летнего тепла на восток и открыл путь весенней прохлады с северо-запада. Из-за непогоды в Алтайском крае остались без электроэнергии 19 населенных пунктов, ветер в Барнауле срывал крыши домов, были повалены деревья [12]. На ближайших аэрологических станциях в этот день в 12 часов ВСВ запуск радиозонда или не производился, например, как в Барнауле, или данные были не полные, например, в Павлодаре и Барабинске, радиозонд поднялся только до высот 3821 и 3141 метров соответственно.

Более полные аэрологические данные были представлены в день смерча 12 июня 2012 г. в Ханты-Мансийске. Смерч возник над рекой Иртыш и медленно продвигался к Ханты-Мансийску. Мощная воронка была видна очевидцам за десятки километров. Огромный вихрь сопровождался сильнейшими ливнями. Всего за пару часов многие улицы Ханты-Мансийска превратились в полноводные реки, были подтоплены дома в низинах. Был нанесен ущерб крупнейшему в стране биатлонному центру. Анализ термодинамического состояния атмосферы, по данным ближайшей к смерчу аэрологической станции Ханты-Мансийск, показал, что индекс $LIFT$ составил $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, K_{INX} был $+33\text{ }^{\circ}\text{C}$, а $TOTL$ $+51\text{ }^{\circ}\text{C}$. Отметим, что накануне 11 июня на станции Ханты-Мансийск и ближайших станциях Тобольск и Александровское индексы неустойчивости атмосферы достигали критических значений: $LIFT$ доходил до $-9\text{ }^{\circ}\text{C}$, K_{INX} достиг $+39\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $TOTL$ составлял $+55\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В результате проведенного исследования были определены значения трёх термодинамических индексов ($LIFT$, K_{INX} и $TOTL$) в сроки радиозондирования, близкие по времени к случаям грозы и смерча за период с 2000 по 2014 гг.

Список литературы

1. Аджиев А.Х., Аджиева А.А., Тумгоева Х.А. Мониторинг грозовых явлений на Северном Кавказе // Известия КБНЦРАН. – №3 (23). – 2008. – С.104–110.
2. Горбатенко В.П. Синоптические условия образования гроз над Томской областью // Материалы Международной конференции «Климатология и гляциология Сибири», Томск, 20–23 октября 2015 г. – Томск: НИ ТГУ. – 2015. – 24–26 с.
3. Горбатенко В.П., Кречетова С.Ю., Беликова М.Ю., Нечепуренко О.Е. Сравнение индексов неустойчивости атмосферы, восстанавливаемых по данным радиозондирования и спектрорадиометра MODIS в дни с грозами, над территорией Западной Сибири // Метеорология и гидрология. – 2015. – № 5. – С. 10–19.
4. Горбатенко В.П., Нечепуренко О.Е., Кречетова С.Ю., Беликова М.Ю. Верификация параметров неустойчивости атмосферы, восстановленных по данным спектрорадиометра Modis/Terra данными аэрологического зондирования // Оптика атмосферы и океана. – 2016. – Т. 29. – № 7. – С. 603–607.
5. Ершова Т.В., Горбатенко В.П. Характеристики атмосферы при грозах и ливнях // Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, Нальчик, 24–28 октября 2011 г. – Нальчик: ООО «Печатный двор». – 2013. – С. 233–243.
6. Ершова Т.В., Петухова О.В. Молнии и последствия от них на территории Томской области за период 1990–2011 гг. // Труды VII Всероссийской конференции по атмосферному электричеству. Санкт-Петербург. 24–28 сентября 2012. – С. 75–76.
7. Ершова Т.В. Термодинамические характеристики атмосферы при грозах // Доклады Всероссийской открытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, посвященная 80-летию Эльбрусской высокогорной комплексной экспедиции АН СССР, Нальчик, 7–9 октября 2014. – Ч.2. – Нальчик: ООО «Печатный двор». – 2015. – С. 288–293.
8. Найшуллер М. Г., Лукьянов В. И., Васильев Е. В. Аномальные гидрометеорологические явления на территории Российской Федерации // Метеорология и гидрология. – 2012. – № 9. – С. 114–121.
9. Токарева Ю.В. Опасные явления погоды для авиации и расчетные методы их прогноза, используемые в филиале Новосибирского ЗАМЦ. [Электронный ресурс]. URL: <http://method.hydro-met.ru/event/dec05/doklad1/doklad1.html> (дата обращения : 26.05.2017).
10. Новости НТВ [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ntv.ru/novosti/1813384/> (дата обращения 05.06.2017).

11. Сервер «Погода России». Лаборатории информационной поддержки космического мониторинга (SMIS IKI RAN) [Электронный ресурс]. URL: <http://meteo.infospace.ru> (дата обращения: 05.06.2017).
12. Gismeteo.ru Новости. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.gismeteo.ru/news/stihiynye-yavleniya/23843-polucheno-video-smercha-v-altayskom-krae/> (дата обращения 06.06.2017).
13. University of Wyoming. Department of atmospheric science. [Электронный ресурс]. URL: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> (дата обращения: 05.06.2017).

**ТЕХНОЛОГИЯ ОПЕРАТИВНОГО ПРОГНОЗА СЕЛЕВЫХ ПОТОКОВ
И ПАВОДКОВ НА БАЗЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО
РАДИОЛОКАТОРА ДЛЯ ГОРНЫХ И ПРЕДГОРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ
СЕВЕРНОГО КАВКАЗА**

Алита С.Л., Борисова Н.А., Инюхин В.С., Якшина И.И.
ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

С точки зрения прогнозирования селей и паводков любого генезиса основополагающими характеристиками русловой системы реки являются ее максимальная пропускная способность, и устойчивость поверхности русел к эрозии. Под максимальной пропускной способностью понимается предельная величина расхода стока, который еще не приводит к выходу реки из берегов или к эрозионному течению в руслах. Для описания характера взаимодействия потока и поверхности русла используется такое понятие как транспортирующая способность потока. В работе [6] дано следующее определение транспортирующей способности потока: *транспортирующая способность потока это предельный массовый расход наносов (кг/с), который способен транспортировать поток без изменения формы русла.* Транспортирующему расходу всегда строго соответствует некоторая мутность потока, называемая транспортирующей мутностью. Как показано в работах [3, 4, 5] для расчета транспортирующей мутности существует ряд эмпирических формул. Все эти формулы согласно [9] можно представить в обобщенном виде:

$$s_{\text{тр}} = k \cdot \frac{u^m}{h^n \cdot w^a}, \quad (1)$$

где $s_{\text{тр}}$ – транспортирующая мутность потока, $\text{кг}/\text{м}^3$; k – безразмерный эмпирический коэффициент, зависящий от физико-геометрических параметров частиц наносов; u – скорость потока, $\text{м}/\text{с}$; h – глубина потока, м ; w – средняя гидравлическая крупность частиц наносов, $\text{м}/\text{с}$; m, n, a – безразмерные эмпирические коэффициенты.

Как известно из практических наблюдений, степень мутности и удельный вес стока, прямо пропорциональны его интенсивности. Следовательно, рост механического воздействия на русло реки обусловлен не только увеличением расхода стока, но и увеличением его плотности. При определенных условиях наступает момент, когда напряжения в материале поверхности русел под воздействием потока в некоторых местах начинают превышать предельно допустимые величины. Это приводит к обрушению почвогрунтов слагающих поверхности русел в поток, и еще большему увеличению его плотности. При наличии запаса транспортирующей способности потока, этот процесс может привести к превращению ливневого стока в селевой. Селевые потоки по своему составу подразделяются на потоки низкой плотности, $1100 - 1400 \text{ кг}/\text{м}^3$ (наносоводные), потоки высокой плотности, $1700 - 2000 \text{ кг}/\text{м}^3$ (грязевые) и $2100 - 2500 \text{ кг}/\text{м}^3$ (грязекаменные) [2]. Поток, перенасыщенный взвешенными и влекомыми наносами, начинает отлагать их на дне русла, тем самым снижая его пропускную способность и повышая вероятность наводнения.

Данный доклад посвящен описыванию технологии прогнозирования перехода ливневого стока в селевой, основанной на расчете поверхности русел на прочность по касательным напряжениям. В качестве исходной информации для прогнозирования используются данные о текущей степени увлажненности почвогрунтов и данные об осадках, выпадающих на водосбор в виде полей осадков получаемых в результате радиолокационных измерений.

При движении потока по руслу, поверхность русла, оказывает на него тормозящее воздействие, следствием чего является возникновение касательных напряжений, в поверхностных слоях русла. Величину этих напряжений в окрестности створа с координатой x можно рассчитать по формуле [8]:

$$\tau(x) = g \cdot I(x) \cdot \rho(x) \cdot R(x), \quad (2)$$

где τ – величина касательных напряжений в створе, $\text{н}/\text{м}^2$; g – ускорение силы тяжести, $\text{м}/\text{с}^2$; I – гидравлический уклон в данном месте; ρ – плотность потока, $\text{кг}/\text{м}^3$; R – величина гидравлического радиуса в данном створе, м .

С учетом транспортирующей мутности потока выражение (2) можно представить в виде [8]:

$$\tau(x) = g \cdot I(x) \cdot (\rho_0 + s_{\text{тр}}(x)) \cdot R(x), \quad (3)$$

где ρ_0 – плотность воды, кг/м³; $s_{\text{тр}}$ – транспортирующая мутность потока в окрестностях данного створа, кг/м³.

Таким образом, на данном локальном участке русла переход обычного ливневого стока в наносоводный и далее в грязевой и грязекаменный сток будет происходить при отрицательном значении величины:

$$\delta_{\tau}(x) = [\tau] - \tau(x). \quad (4)$$

где $\delta_{\tau}(x)$ – разность между предельно допустимым и текущим значением касательного напряжения на данном участке русла, н/м²; $\tau(x)$, $[\tau]$ – соответственно текущее значение касательного напряжения на данном участке русла и предельно допустимое касательное напряжение для всего русла, н/м².

Величину предельно допустимого касательного напряжения для данного русла можно оценить исходя из наибольшего зарегистрированного расхода ливневого стока имевшего место за весь исторический период наблюдений. Для этого в выражение (3) следует подставить значение гидравлического радиуса при установившемся максимальном ливневом стоке:

$$R(x) = \frac{u_{0\text{max}}^2(x)}{C^2 \cdot I}, \quad (5)$$

где $u_{0\text{max}}(x)$ – скорость наибольшего установившегося ливневого руслового стока имевшего место за весь период; C – коэффициент Шези. После подстановки (5) в (3) получим формулу для оценки предельно допустимой величины касательных напряжений:

$$[\tau] = \eta \cdot g \cdot I \cdot (\rho_0 + s_{\text{тр max}}(x)) \cdot \frac{u_{0\text{max}}^2(x)}{C^2 \cdot I}, \quad (6)$$

где η – безразмерный эмпирический коэффициент, лежащий в пределах от 1 до 2; $s_{\text{тр max}}(x)$ – транспортирующая мутность потока в условиях максимального ливневого стока рассчитываемая по формуле (1) при соответствующих значениях глубины и скорости потока, кг/м³.

Альтернативным способом определения значений предельно допустимых касательных напряжений может являться способ визуального наблюдения за русловыми потоками при помощи сети видеокамер описанный в работе [7]. Для этого, в момент визуального определения перехода ливневого стока в грязевой или грязекаменный необходимо зафиксировать параметры потока, имеющие место в данный момент в данном русле. Далее по формуле (3) произвести расчет значений предельно допустимых касательных напряжений для всех участков русла. Полученные значения касательных напряжений можно использовать в дальнейшем как предельно допустимые.

Для всего русла вероятность перехода ливневого стока в селевой (P) будет коррелировать со значением индикатора выражаемого интегралом Δ_τ :

$$P \sim \Delta_\tau = \frac{1}{L} \int_0^L \delta_\tau(x) \cdot dx, \quad (7)$$

где L – длина русла, м. Чем меньше значение Δ_τ , тем выше вероятность перехода ливневого стока в наносоводный или селевой. С учетом (4) выражение (7) можно записать в виде:

$$\Delta_\tau = [\tau] - \frac{1}{L} \int_0^L \tau(x) \cdot dx. \quad (8)$$

Величина индикатора Δ_τ измеряется в н/м², и характеризует текущий запас прочности поверхности русла.

Авторами был произведен ряд численных экспериментов по расчету механического воздействия дождевого стока на русловую систему реки Нальчик. В качестве исходных данных использовалось поле слоя осадков выпавших на водосбор реки 8. 7. 2012 года, рисунок 1. Целью этих экспериментов была оценка степени влияния на величину касательных напряжений следующих параметров: интенсивности осадков, степени увлажнения водосбора (объемной влажности почвогрунтов), величины слоя русловых наносов находящихся в руслах на момент начала выпадения осадков. В таблице 1 приведены исходные параметры поля осадков и водосбора использованные в численных экспериментах.

Таблица 1

Параметры поля осадков и водосбора

Наименование параметра	Значение	Ед. изм.
Средний слой осадков на водосборе	11,2	мм
Время выпадения осадков	6	час
Осредненная объемная влажность почвогрунтов	50	%
Осредненный коэффициент фильтрации для всего водосбора	1	мм/час
Осредненная толщина начального слоя наносов в руслах	0,1	м
Осредненная толщина впитывающего слоя на водосборе	0,5	м
Осредненная пористость почвогрунтов	30	%
Максимальное удельное электрическое сопротивление почвогрунтов	80000	Ом/м
Минимальное удельное электрическое сопротивление почвогрунтов	6000	Ом/м
Осредненная плотность русловых наносов	2500	Кг/м ³
Осредненная гидравлическая крупность взвешиваемых наносов	0,0005	м/с

Первая серия численных экспериментов заключалась в варьировании от 0 до 1 величины средней объемной влажности почвогрунтов θ . Результаты представлены на рисунке 2.

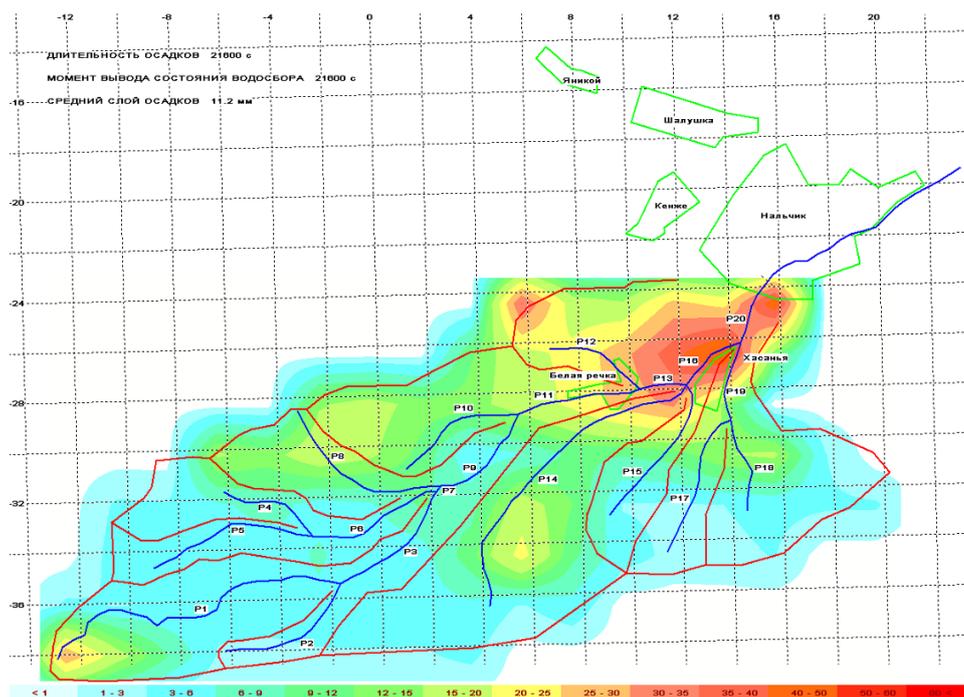


Рис.1. Поле слоя осадков 8.07.2012 года.

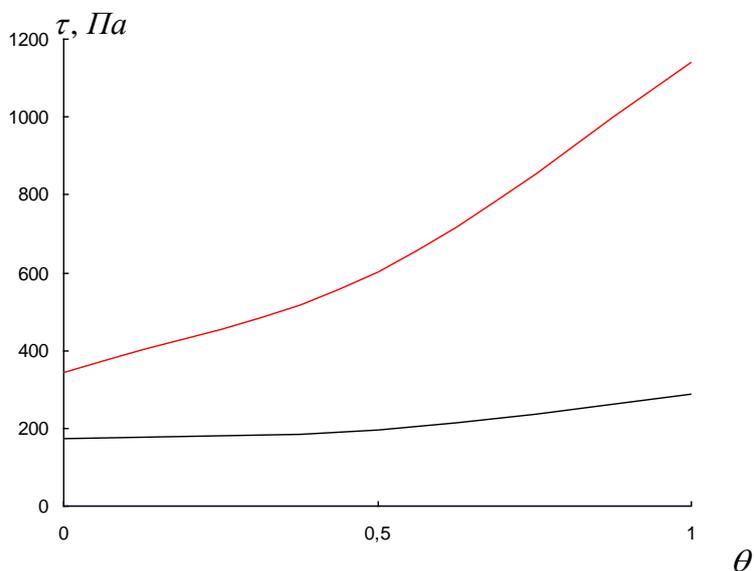


Рис.2. График зависимости средних (черная линия) и максимальных (красная линия) касательных напряжений τ на поверхности русел от величины объемной влажности почвогрунтов.

Как и следовало ожидать, с ростом объемной влажности почвогрунтов падает их впитывающая способность, что приводит к росту доли поверхностного стока. Рост поверхностного

стока увеличивает боковой приток в русла и как следствие приводит к увеличению интенсивности руслового стока. Глубины и скорости потоков в руслах возрастают, провоцируя рост нагрузки на поверхность русел и увеличение касательных напряжений.

Вторая серия численных экспериментов заключалась в варьировании от 0 до 0,5 м среднего слоя наносов Z находящихся в русловой системе на момент начала дождя. Результаты данной серии представлены на рисунке 3.

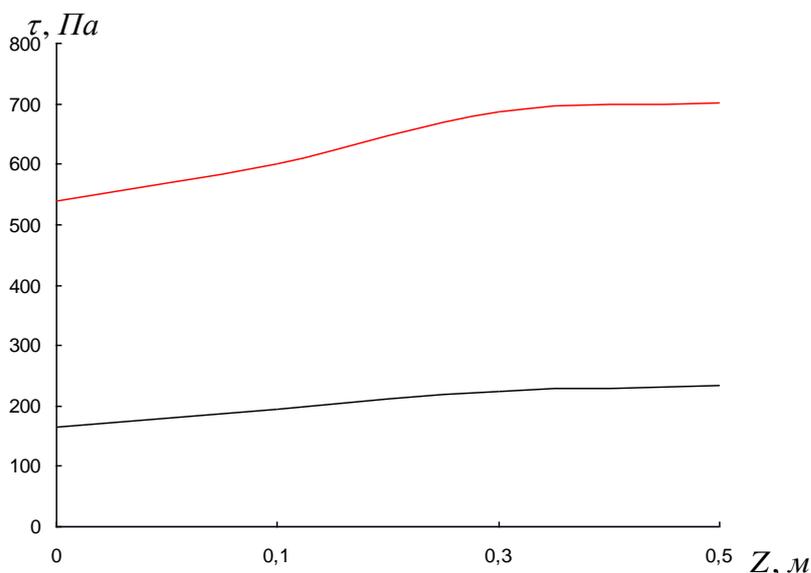


Рис.3.График зависимости средних (черная линия) и максимальных (красная линия) касательных напряжений τ на поверхности русел от величины слоя русловых наносов.

В характере зависимости, представленной на рисунке 3, явно прослеживается насыщение при величине слоя наносов больше 0,3 м. Это связано со значением максимальной транспортирующей способности потока при данном режиме осадков. Начиная с определенной величины слоя наносов, у потока не хватает кинетической энергии, чтобы взвесить все наносы, находящиеся в активном слое русла. Это приводит к тому, что плотность потока перестает увеличиваться, и как следствие, перестают увеличиваться касательные напряжения в руслах.

Третья серия численных экспериментов заключалась в варьировании от 1 до 11 мм/час величины средней интенсивности осадков r . Результаты данной серии представлены на рисунке 4.

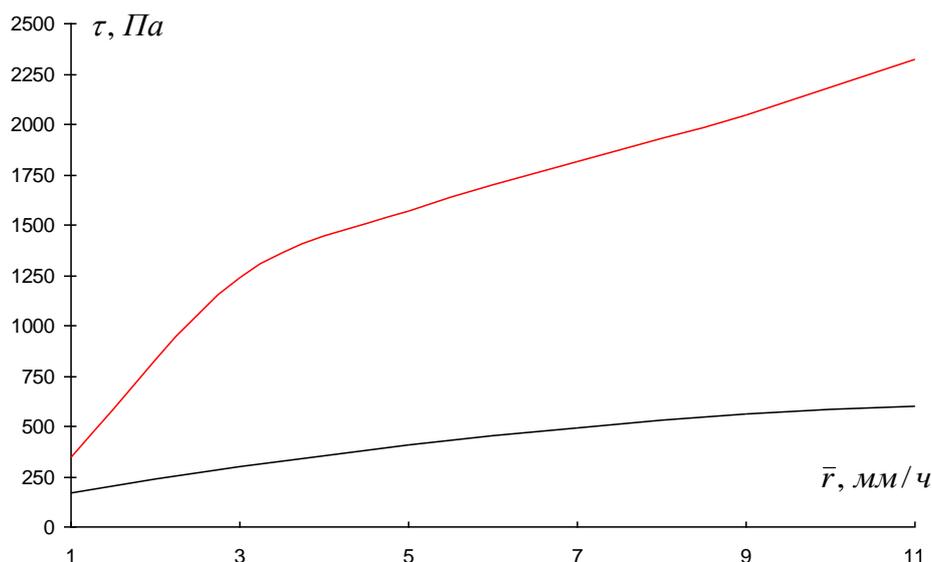


Рис.4. График зависимости средних (черная линия) и максимальных (красная линия) касательных напряжений τ на поверхности русел от величины средней интенсивности осадков.

По условиям численного эксперимента увеличение интенсивности достигалось путем сокращения времени выпадения осадков. Как и следовало ожидать, рост средней интенсивности осадков при сохранении их общего количества провоцирует значительное увеличение касательных напряжений на поверхности русел.

Заключение

Анализ результатов численных экспериментов показал адекватность предлагаемой технологии оперативного прогнозирования селей и паводков основанной на оценке устойчивости русел по касательным напряжениям.

Список литературы

1. Алита С.Л. Оцифровщик топографических карт. //Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016614739.
2. Виноградов Ю. Б. Перспективы создания системы методов расчета характеристик селевых потоков. // Доклады всероссийского гидрологического съезда. – 2006. – Секция № 5. – С. 175 – 178.
3. Ефремов А. В. О расчетных формулах взвешивающей (транспортирующей) способности потока. // Сборник «Вопросы гидротехники». – Ташкент, Изд. АНУзбССР. – 1955. – С. 159 – 165.
4. Замарин Е. А. Транспортирующая способность и допускаемые скорости течения в каналах. – М. – Л.: Гострансиздат, 1951. – 82 с.
5. Ибад-Заде Ю. А. Движение наносов в открытых руслах. – М.: Стройиздат, 1974. – 352 с.

6. Караушев А. В. Теория и методы расчета речных наносов. – Л.: Гидрометеоздат, 1977. – 272 с.

7. Машуков Х. М., Зекореев Р. Х., Камбиев М. М. Автоматизированная система для мониторинга селевой и паводковой опасности. // Труды ВГИ. – Вып. 97. – 2013. – С. 24 – 26.

8. Отчет о научно-исследовательской работе «Разработка технологии оперативного прогноза селевых потоков и наносоводных паводков на базе автоматизированного метеорологического радиолокатора для горных и предгорных территорий Северного Кавказа» (итоговый) № гос. рег. 01201158410, Нальчик 2013, 88 с.

9. Koistinen J., Puhakka T. Can we calibrate radar with raingauges. – Geophysica, 1986, v. 22, No. 1 – 2, p. 119 – 129.

СЕКЦИЯ 2. МЕТОДЫ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

2.1. Активные воздействия на градовые процессы

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ГРАДА, РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Абшаев М.Т. ¹, Малкарова А.М. ²

¹ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

²УСНП Росгидромета, г. Москва

1. Физические основы предотвращения града

1.1. Тенденция повышения частоты, масштаба и экстремальности опасных явлений погоды и рост числа чрезвычайных ситуаций, связанных с ними, отмечающиеся в последние 50 лет во всем мире, ведет к тому, что учет наносимого ими ущерба и разрушений может стать одним из факторов устойчивого развития современной экономики. Это повышает актуальность развития проблемы прогноза, мониторинга и предотвращения негативных последствий стихийных природных процессов.

Одним из наиболее сложных опасных процессов являются градовые процессы (ГП), которые отличаются высокой локальной плотностью энергии и порождают целую цепь опасных

явлений (гроза, ливневые паводки и наводнения, шквалы и смерчи). Сокращение продолжительности существования и разрушение мощных ГП может обеспечить успешное ослабление и прекращение перечисленных опасных явлений.

1.2. По особенностям структуры и динамики развития ГП делятся на одноячейковые, многоячейковые и переходного типа [3, 26], в которых конвективные ячейки (КЯ) имеют разное пространственное строение и длительность существования, обусловленные различиями в пространственной структуре ветра.

Облачные системы *однойячейковых ГП* состоят из множества одновременно существующих малоподвижных изолированных и не взаимодействующих между собой КЯ, имеющих разные стадии развития. Они развиваются в малоградиентных полях пониженного и повышенного давления в дни с малыми скоростями ветра во всем слое облакообразования ($V_{ВП} < 30$ км/ч) и малыми ($\gamma < 10^{-3} \text{ с}^{-1}$) сдвигами ветра. КЯ имеют осесимметричное строение и короткое время существования, так как образующиеся в них осадки выпадают прямо на питающие восходящие потоки и подавляют их.

Облачные системы *многоячейковых ГП* состоят из нескольких одновременно существующих КЯ, находящихся на разных стадиях развития. В зависимости от пространственной структуры ветра в атмосфере могут реализоваться упорядоченные и неупорядоченные ГП [3]. *Неупорядоченные многоячейковые ГП* развиваются в дни, когда направление ветра в атмосфере изменяется с высотой, а его скорость значительна на всех высотах. Такая структура ветра обуславливает асимметрию КЯ, находящихся на периферии облачной системы, разное направление наклона и навеса их радиоза и разные направления и скорости перемещения. *Упорядоченные многоячейковые ГП* имеют фронтальное происхождение и развиваются в дни, когда направление ветра в слое облакообразования почти не меняется, а его скорость растет с высотой со сдвигом ветра от 10^{-4} до $5 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Наличие такого сдвига ветра обуславливает асимметричность КЯ и их более продолжительное существование, так как, выпадающие осадки лишь частично тормозят питающие их восходящие потоки. Они представляют собой класс хорошо организованных по структуре и динамике развития ГП, облачная система которых обычно состоит из трех и более несимметричных взаимодействующих между собой КЯ и периодически обновляется за счет развития новых КЯ на наветренном фланге облачной системы, а диссипация старых КЯ происходит на подветренном фланге.

ГП переходного типа также относятся к классу хорошо организованных, имеющих различные модификации – промежуточных между упорядоченными многоячейковыми и суперячейковыми. Они развиваются в дни с высокой конвективной неустойчивостью и повышенным

влажностью атмосферы, когда ветер одного направления нарастает с высотой, но в приземном слое имеет направление, отличное от ветра в среднем слое облакообразования [3].

Облачная система суперячейковых ГП обычно состоит из одной сверхмощной КЯ, которая обычно формируется при прохождении фронтов окклюзии по типу холодного в дни, когда ветер в нижнем слое тропосферы имеет одно направление, а в среднем и верхнем слое облакообразования другое – с разворотом с юго-восточного на юго-западный (в Северном полушарии). Такая структура ветра благоприятствует пространственному разделению области восходящих потоков и выпадающих осадков. Это исключает подавление восходящих потоков осадками и обеспечивает длительное существование суперячейки. Суперячейковые ГП являются наиболее долгоживущими и мощными благодаря наличию на наветренном фланге обширной струи мощного восходящего потока, указателем которого является навес радиоэха протяженностью от 5 до 20 км [3, 20, 21, 26].

Следует отметить также, что по особенностям строения КЯ и направлениям перемещения ГП подразделяются еще на два типа [3]:

- ГП с правосторонним развитием, имеющие область восходящего потока и область нового роста на правом наветренном фланге и движущиеся вправо от ведущего потока, характерные для Северного полушария, но отмечающиеся и в Южном полушарии;
- ГП с левосторонним развитием, имеющие область восходящего потока и область нового роста на левом наветренном фланге и движущиеся влево от ведущего потока, чаще встречающиеся в Южном полушарии, но отмечающиеся и в Северном полушарии.

Исследования тонкой структуры КЯ многоячейковых и суперячейковых ГП показало [3, 20, 26], что они имеют многоклеточное строение. Каждая мощная градовая КЯ состоит из множества мелкомасштабных структур, формирующихся за счет развития на наветренном фланге фидерных облаков, радиоэхо которых по мере зарождения сливается с основным радиоэхо КЯ и имеет свою траекторию перемещения в нем.

1.3. Таким образом, многообразия типов ГП осложняется многоклеточным строением каждой КЯ, входящей в облачную систему. Следовательно, ГП можно отнести к фрактальным системам со сложным энергетическим взаимодействием всех их элементов, трудно поддающимся теоретическому моделированию.

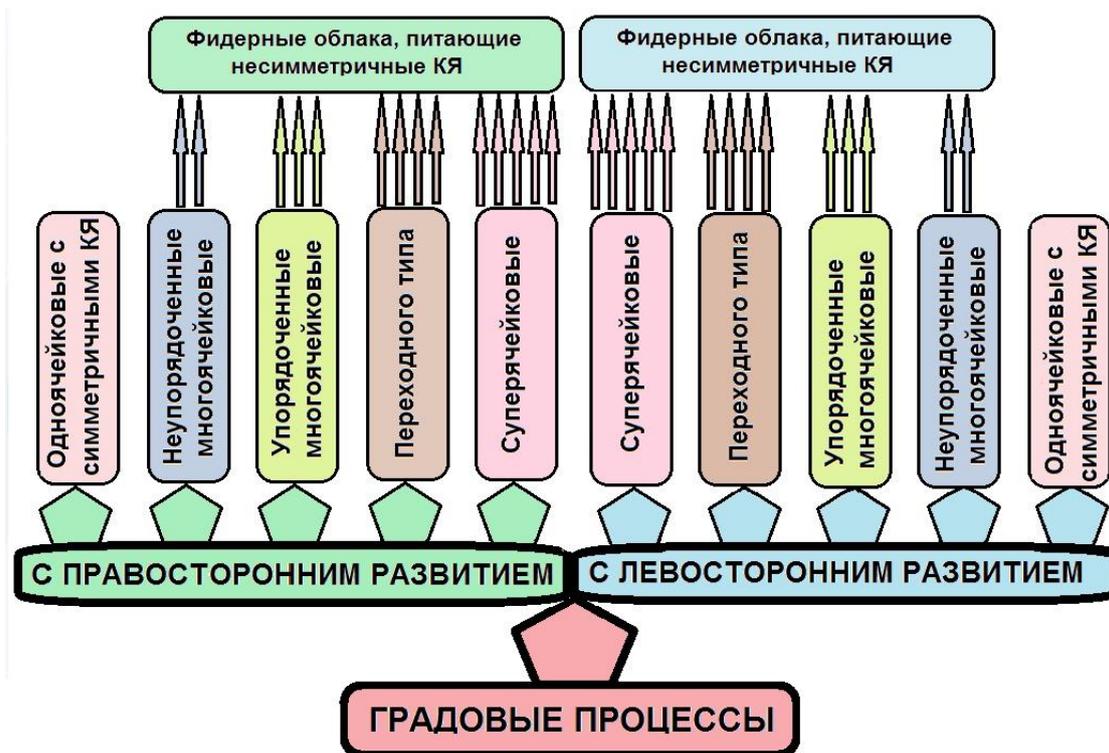


Рис. 1. Схема фрактальной системы градовых процессов, развивающихся в различных аэро-синоптических условиях в Северном и Южном полушариях.

Существующие теоретические модели ГП [8, 24 и многие др.] рассматривают, как правило, развитие и эволюцию одноклеточного процесса облако-осадкообразования (т.е. процесса, связанного с развитием одного термика или одной струи восходящего потока). Достигнут существенный прогресс в части получения пространственной структуры такого облака, описания микрофизических процессов конденсационного и коагуляционного роста частиц, формирования осадков, процессов зарядания облачных частиц и формирования электрической структуры. Тем не менее, современные теоретические модели ГП не могут пока адекватно описать многообразие типов ГП, их фрактальность и отмеченную выше тонкую структуру КЯ, поэтому существующие методы противорадовой защиты (ПГЗ) базируются в основном на концептуальных моделях ГП, полученных на основе радиолокационных, авиационных, спутниковых, лабораторных и наземных исследований и наблюдений.

1.4. Энергетика градовых облаков столь велика, что прямое энергетическое воздействие на них не возможно [17]. Поэтому методы предотвращения града базируются на активном воздействии (АВ) на уязвимое звено в механизме его образования с тем, чтобы небольшое физическое, химическое или механическое воздействие могло изменить естественный ход физических процессов. Такими звеньями являются конвективная, фазовая и коллоидальная неустойчивость облаков.

Конвективная неустойчивость облаков и туманов обусловлена тем, что градиент понижения температуры с высотой в облаке превышает влажно-адиабатический градиент. Это приводит к тому, что объем воздуха, искусственно смещенный вверх, продолжает с ускорением подниматься, а смещенный вниз – с ускорением опускается еще ниже. Поэтому создание в них импульсов нисходящих потоков по данным теоретических [12] и экспериментальных [13, 14] исследований приводит к развитию нисходящих потоков, приводящих к динамическому разрушению мощных конвективных облаков типа Cu Cong.

Фазовая неустойчивость облаков и туманов обусловлена тем, что упругость насыщающего водяного пара над льдом меньше, чем над водой. Вследствие этого в переохлажденных облаках и туманах, ледяные частицы растут, а капли испаряются [19], ускоряя процесс осадкообразования. Этот эффект используется для предотвращения града и искусственного увеличения осадков путем засева облаков кристаллизующими аэрозолями (обычно на основе AgI), гранулами твердой углекислоты (CO₂) или жидкими хладореагентами (азот, пропан и др.).

Коллоидальная неустойчивость облаков (и туманов) обусловлена тем, что более крупные капли падают быстрее, сталкиваются и захватывают мелкие. Для реализации этого эффекта в облака вводятся гигроскопические частицы, которые формируют капли растворов, над которыми упругость насыщения водяного пара ниже, чем над каплями чистой воды, что также способствует повышению концентрации крупных капель.

Перечисленные выше физические эффекты положены в основу методов предотвращения града, искусственного увеличения осадков и рассеяния туманов. В целях оптимального использования этих эффектов для предотвращения града предложены шесть концепций:

Концепция полной кристаллизации переохлажденной части облака, исключая коагуляционный рост града за счет жидкокапельной фракции. Но, практическая реализация этой концепции требует непомерно большого расхода реагента, особенно в случае суперячейковых облаков, в которых количество парообразной влаги, вносимой в единицу времени обширной зоной восходящих потоков, сравнимо с количеством воды текущей в реках типа Волга, Дунай.

Концепция конкуренции, предусматривающая искусственное увеличение концентрации ледяных частиц (потенциальных зародышей градин) в 10^3 раз и более с целью замедления роста града и исключения формирования крупных градин из-за предполагаемой нехватки жидко-капельной влаги (Сулаквелидзе [16]). Предполагалось, что в градовых облаках число естественных зародышей града ограничено, а наличие «зоны аккумуляции» крупных капель, формирующейся за счет цепного процесса роста и разбрызгивания по Ленгмюру, позволит при

внесении кристаллизующих реагентов создать столь высокую концентрацию искусственных зародышей града, что их рост будет ограничен из-за нехватки жидкокапельной влаги.

Однако зоны зарождения и роста града располагаются в интервале температуры от -10 до -25 °С, где большинство крупных капель замерзают и не могут участвовать в цепном процессе размножения. Это подтвердили авиационные исследования, проведенные в рамках Национального градового эксперимента (NHRE) в США [26] и Швейцарского эксперимента «Grossversuch-IV» [25], в которых «зоны аккумуляции» крупных капель не были обнаружены.

В этих исследованиях было также получено, что естественная концентрация ледяной и снежной крупы в зонах зарождения и роста града составляет $10^3 - 10^4$ в м^3 при общей массе около $1 \text{ г}/\text{м}^3$ [26, 27]. Это означает, что естественная концентрация зародышей града всегда избыточна, однако это не предотвращает рост некоторой части зародышей до опасных размеров, так как рост града носит *избирательный характер* [3, 27], в результате чего менее 1% зародышей вырастают в градины.

Предположение об ограниченной водности зоны роста града [16], в результате чего может быть предотвращен рост града при высокой концентрации искусственных зародышей также не приемлемо, так как мощный восходящий поток непрерывно вносит капельную влагу в область роста града, но только часть этой влаги превращается в осадки. По данным многочисленных исследований осадкообразующая эффективность градовых облаков не превышает 17 – 30% [26, 27, 28 и др.]. Она особенно низкая в суперячейковых облаках. Поэтому увеличение концентрации зародышей града скорее может привести к повышению осадкообразующей эффективности облака и увеличению массы образующегося града, так как жидкокапельная водность непрерывно и в избытке пополняется восходящими потоками.

Концепция укрупнения капель с последующим замораживанием, предложенная Бартишвили, Ломинадзе и др. в 1964 [9], предусматривала комбинированный засев облаков: гигроскопическими частицами в теплой части облака, кристаллизующими частицами в переохлажденной части. Предполагалось, что гигроскопические частицы стимулируют укрупнение капель в теплой части облака, выпадение их части и в результате этого может достигнуто уменьшение водности переохлажденной части облака и ухудшение условий роста града. Часть аномально крупных капель, образовавшихся на искусственных гигроскопических частицах, может быть перенесена в верхнюю переохлажденную часть облака, где внесение кристаллизующего реагента их заморозит, повышая концентрацию зародышей града.

В части укрупнения капель и вымывания водности восходящего потока эта концепция близка к концепции ускорения осадкообразования, рассматриваемой ниже. Реализация этой

концепции требует проведения воздействия на первичные процессы осадкообразования. Однако рекомендуемое авторами место внесения гигроскопического реагента – в зоне максимальной отражаемости вблизи основания облака, а кристаллизующего – в зоне роста града не могло дать желаемого эффекта, так как в обеих этих зонах уже содержатся крупные частицы, и идет интенсивный процесс естественного осадкообразования.

Концепция понижения траектории растущих градин с целью ухудшения условий их роста, предложенная Browning and Foote [21], предусматривает стимулирование раннего образования зародышей града с тем, чтобы их рост проходил на более низких уровнях, где меньше содержание жидкой воды. Она базируется на том, что, не пройдя через область максимальных восходящих потоков, градины не могут вырасти до больших размеров. Для реализации этой концепции требуется большой расход гигроскопического реагента. Попытка практической реализации концепции с помощью шашек с гигроскопическим реагентом ЮАР, предпринятая во Франции [20], пока не привела к желаемому результату.

Концепция динамического воздействия, предложенная Вульфсоном и Левиным [12], предусматривает подавления восходящего потока, без которых не возможен рост града. Для реализации этой концепции предлагается использование энергии конвективной неустойчивости облаков путем инициирования в них импульсов нисходящих потоков, которые будут усиливаться в конвективно-неустойчивой атмосфере. При этом инициирование импульсов нисходящих потоков предлагалось осуществлять с помощью:

- ударных волн и продуктов ликвидации артиллерийских снарядов, подрываемых в верхней части радиоэха конвективных облаков;
- сброса с вершины облаков грубодисперсных порошков;
- пролетом реактивного самолета при больших углах тангажа;
- зависания вертолета над вершиной конвективных облаков.

Эксперименты по артиллерийскому обстрелу (Абшаев и Черенкова, 1967, Бибилашвили и Калов [10]) и сбросу грубодисперсных порошков (Гайворонский и Серегин [13], Колосков и Корнеев [14]) показали возможность разрушения локальных мощно-кучевых облаков. При этом эффективность воздействия тем выше, чем больше энергия неустойчивости атмосферы. Однако опыты по разрушению зрелых градовых облаков не дали положительного результата вследствие недостаточности масштаба вносимого динамического возмущения. Кроме того при воздействии на такие облака важен выбор места воздействия. Воздействие в области сильных восходящих потоков и их тыловой части приводит к появлению локальных просветов радиоэха, но не к разрушению градового облака в целом [6, 10].

В [6] предложен динамический метод, основанный на массированном засеве фидерных облаков, питающих материнское градовое облако, готовыми центрами коагуляции, которые стимулируют быстрое осадкообразование, вымывание облачной воды, преждевременное выпадение осадков и подавление слабых в этой области восходящих потоков. В качестве материала для засева предложено использовать грубодисперсные порошки или разбрызгивать воду. Засев предлагается осуществлять с помощью самолетов типа БЕ-200, который может загружать до 12 т грубодисперсных порошков или воды (которую он может набирать при скольжении по поверхности водоема) и обеспечивать порционный или непрерывный сброс вдоль траектории полета над вершинами фидерных облаков.

Численное моделирование [6] показало, что оптимальным размером вводимых центров коагуляции являются частицы диаметром около 30 мкм. При введении в вершины фидерных облаков 1000 кг такого аэрозоля обеспечивается полное вымывание облачной воды за 4 ÷ 5 минут и стимулируется выпадение в $10^4 - 10^5$ раз большего количества осадков. Такое количество осадков может подавить слабые восходящие потоки и привести к быстрому динамическому разрушению фидерных облаков, являющихся областями будущего градообразования в зрелых градовых облаках. Это подтверждают многочисленные эксперименты [13, 14] по успешному разрушению мощно-кучевых облаков путем сброса грубодисперсных порошков даже в гораздо меньших количествах. Разрушение фидерных облаков в свою очередь может лишить дальнейшего квазинепрерывного обновления зрелых градовых облаков и привести к прерыванию выпадения града.

Концепция ускорения осадкообразования, предложенная в 1966 г. (Абшаев [3, 5]), предусматривает стимулирование более раннего и быстрого, чем при естественном ходе процесса образования осадков в областях будущего градообразования, преждевременное выпадение которых может привести к вымыванию водности этих областей, аэродинамическому торможению и подавлению слабых восходящих потоков и ликвидации условий градообразования.

Концентрация зародышей града в зонах зарождения и роста града достигает $10^3 \div 10^4 \text{ м}^{-3}$ [27] и превышает концентрацию градин не менее чем в 100 раз, так как рост града носит избирательный характер. Условием избирательности по данным доплеровских измерений скоростей восходящих потоков и гравитационного падения градин в зоне роста является баланс скоростей гравитационного падения градин V_g и восходящего потока W_m и их нарастания во времени [3, 5]:

$$V_g(x, y, z, t) \leq W_m(x, y, z, t), \quad (1)$$

$$\frac{\partial V_g(x, y, z, t)}{\partial t} \approx \frac{\partial W_m(x, y, z, t)}{\partial t}. \quad (2)$$

Необходимым условием роста градин является их длительное время нахождения в благоприятных условиях (в восходящем потоке в области отрицательных температур и повышенной влажности). Это возможно только в области нарастающих во времени скоростей восходящих потоков, удерживающих растущие градины в зоне роста.

При нарушении указанного баланса скоростей зародыши града или растущие градины будут либо выброшены из зоны роста града вверх (при $V_g \ll W_m$), либо выпадут из нее (при $V_g > W_m$). Поэтому только некоторые зародыши града могут дорасти до больших размеров. Это зависит от начальных размеров, места появления и последующих траекторий движения зародышей. Поздно появившиеся мелкие зародыши могут быть выброшены в верхнюю часть облака, а рано появившиеся и быстро растущие зародыши не могут удерживаться восходящим потоком, и выпадают, что подтверждается выпадением отдельных крупных капель из навеса радиоэха градовых облаков.

Избирательность роста града является *слабым звеном* в цепи градообразования. Даже небольшое ускорение (или замедление) роста частиц за счет воздействия может нарушить указанный баланс скоростей, и, следовательно, нарушить условия роста града и привести к предотвращению их роста.

Ускорение осадкообразования стимулируется путем создания в точках и линиях засева начальной концентрации искусственных кристаллизующих частиц порядка $5 \cdot 10^{10} \div 10^{11} \text{ м}^{-3}$ [1 - 3], полагая, что через 1 - 2 мин в объеме их распространения концентрацию ледяных кристаллов будет порядка 10^8 м^{-3} , неминуемо приводящей к их агрегации. Последующее обзернение агрегатов кристаллов облачными каплями может привести к образованию больших концентраций снежной крупы.

Это подтверждают результаты экспериментов по засеву переохлажденного тумана микродозами кристаллизующего реагента в поточной камере холода ВГИ [15]. В этих экспериментах получено, что через 2 – 4 мин после внесения в камеру микродоз (1 мг) хладореагентов (жидкий азот, углекислота, пропан) или кристаллизующих реагентов при концентрации кристаллов в переохлажденном тумане $N_{кр} \approx 10^5 \text{ м}^{-3}$ начинается агрегация кристаллов. Агрегация интенсивно проходит при $N_{кр} = 10^6 \div 10^7 \text{ м}^{-3}$ и имеет два максимума при температуре -13 и -5 °С, соответствующих максимумам скоростей роста и естественного размножения кристаллов. Через 2 минуты после внесения реагента при температуре -13 °С и через 4 минуты при -5 °С отмечается появление агрегатов кристаллов размером до сотен мкм, и в дальнейшем их бурный рост за счет обзернения. При этом 1 г льдообразующего состава при температуре -10 °С дает около 10^{10} агрегатов, а при -6 °С около $2 \cdot 10^9$ агрегатов, соответственно, но не $10^{12} \div 10^{13}$

отдельных кристаллов, как это принято считать при оценке льдообразующей эффективности реагентов.

Исследования в аэродинамической трубе [30] показали более быстрый рост агрегатов кристаллов по сравнению с ледяными шариками такого же размера. Это обусловлено тем, что коэффициент захвата облачных капель агрегатами кристаллов за счет их продуваемости может в десятки раз превышать коэффициент захвата равновеликих сплошных ледяных шариков, и уменьшается по мере уменьшения пористости агрегатов. Эти эксперименты показали, что малая плотность агрегатов компенсируется высоким значением коэффициента захвата и дает возможность быстрого (за 3 – 5 минут) обзрения агрегатов и превращения их в крупу.

Результаты натурных экспериментов по АВ на облака с целью предотвращения града и увеличения осадков в проектах NHRE, XIPLEX и других показали [26, 27], что любой засев твердой углекислотой или пиротехническими шашками с AgI приводит к агрегации кристаллов из-за большой их начальной концентрации. Натурные авиационные и радиолокационные исследования взаимодействия льдообразующих реагентов с облачной средой, проведенные в Канаде [22, 23] показали, что основным (но не единственным) источником зародышей града являются фидерные облака, развивающиеся на наветренном фланге зрелого градового облака.

По данным авиационных наблюдений [22] в засеянных фидерных облаках отмечается резкое повышение концентрации ледяных кристаллов и их агрегация с последующим обзрением облачными каплями, а не медленный процесс их сублимационного роста. Крупа мм размеров в засеянных облаках образуется в более высоких концентрациях и на более низких высотах за 6 – 8 минут, чем в аналогичных незасеянных (контрольных) облаках, где такая крупа образуется через 20 – 24 минут и в меньших концентрациях. Первое радиоэхо засеянных облаков появляется через 8 минут после засева, а незасеянного – через 16 минут. Время от первого радиоэха до выпадения осадков интенсивностью около 1 мм/час ($c Z \approx 25 \text{ dBZ}$) у засеянных облаках составляет около 8 минут, а у незасеянных – 13 минут [22].

Такое ускорение формирования крупы может нарушить баланс скоростей, необходимый для поддержания ее в зоне роста. Крупа в засеянных фидерных облаках выпадает, не вступая в процесс градообразования.

Схема реализации рассмотренных концепций предотвращения града, выработанная группой экспертов ВМО по физике, химии и облаков и модификации погоды представлена на рис. 2.

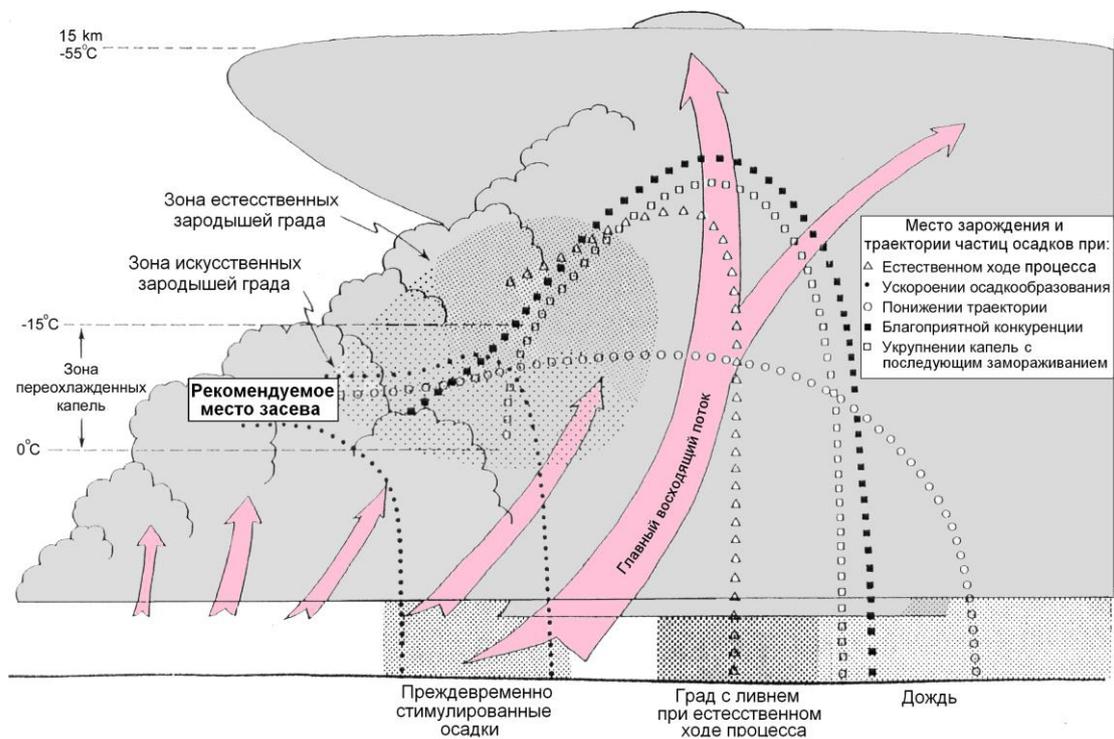


Рис. 2. Место зарождения и траекторий частиц осадков при естественном ходе образования града и при реализации различных концепций воздействия [29].

Следует отметить, что все они (кроме первой) тесно взаимосвязаны, а концепция ускорения осадкообразования является наиболее общей, так как предусматривает:

- создание гигантской концентрации искусственной крупы на ранних стадиях развития до формирования естественных зародышей града может наилучшим образом способствовать их конкуренции по Г.К. Сулаквелидзе [16];
- вымывание облачной воды в областях будущего градообразования преждевременными осадками, предусматриваемое методом Бартишвили и др. [9];
- раннее укрупнение частиц, может привести к понижению траектории их роста по Brownling and Foote [21];
- преждевременное выпадение осадков, может привести к динамическим эффектам подавления неокрепших восходящих потоков за счет создания импульса нисходящих потоков по Вульфсону и Левину [12]. Возникающие при этом динамические эффекты могут значительно превышать, эффекты, получаемые при сбросе упаковок цемента, которые по экспериментальным данным Гайворонского и Серегина [13], Колоскова и Корнеева [14] эффективно разрушают мощно-кучевые облака;
- стимулирование динамических эффектов быстрого развития конвективных облаков за счет высвобождения скрытой теплоты фазовых переходов по J. Simpson [31] и инициирование конкуренции КЯ за энергию неустойчивости по Farley and Orville [24].

Кроме этого аргументами в поддержку концепции ускорения осадкообразования являются еще два серьезных фактора:

- во-первых, целью любого засева облаков и туманов кристаллизующими и гигроскопическими реагентами является стимулирование укрупнения облачных частиц с целью запуска механизма их коагуляционного роста и ускорение осадкообразования за счет реализации фазовой и коллоидальной неустойчивости дисперсной среды;

- во-вторых, быстрое осадкообразование в морских облаках, связанное с наличием в них крупных гигроскопических частиц морской соли, практически исключает выпадение града над морскими акваториями. Следовательно, естественный механизм предотвращения града реализуется через быстрое осадкообразование.

2. Основные положения автоматизированной ракетной технологии ПГЗ

2.1. Физический принцип воздействия: Ускорение осадкообразования в областях будущего градообразования развивающихся и зрелых градовых облаков путем их массированного засева кристаллизующими реагентами [2, 3] с целью:

- вымывания областей нового роста (зон формирования и зарождения града) преждевременными осадками и динамического подавления слабых в этих областях восходящих потоков;
- создания благоприятных условий конкуренции естественных зародышей града с искусственными, созданными на ранних стадиях градообразования одновременно с естественными.

Ускорение осадкообразования стимулируется путем создания в фидерных облаках столь высокой начальной концентрации искусственных кристаллизующих частиц (порядка 10^{11} м⁻³ и более), которая неминуемо ведет к агрегации кристаллов, обзернение облачными каплями и быстрому формированию снежной крупы.

2.2. Концептуальные модели объектов воздействия (ОВ): Осесимметричные и несимметричные КЯ одноячейковых, многоячейковых, суперячейковых и переходного типа градовых облаков с правосторонним и левосторонним развитием.

Независимо от типа ГП АВ с целью прерывания и предотвращения градобитий проводится в областях нового роста на зону формирования условий градообразования и зону зарождения, т.е. во всех случаях на объемы с идентичной микрофизикой. АВ на зону роста и зону выпадения града не проводится ввиду неэффективности.

Засаеваемые области нового роста расположены:

- в одноячейковых ГП – во вновь развивающихся КЯ;
- в суперячейковых ГП – на наветренном фланге навеса радиоэха, где происходит обновление процесса в виде квазинепрерывного распространения за счет развития фидерных облаков;

– в многоячейковых – на наветренном фланге навеса радиоэха и областях первого радиоэха новых КЯ, развивающихся на наветренном фланге.

2.3. *Схемы засева ОВ*: Дифференцированы с учетом особенностей строения ГП с правосторонним и левосторонним развитием и стадией развития ОВ, типом ГП и характера распространения процесса градообразования в пространстве (дискретно, непрерывно, дискретно-непрерывно).

Прерывание дискретного распространения процесса градообразования в одноячейковых ГП осуществляется путем засева высоко зарождающихся новых КЯ на стадии их первого радиоэха и не позднее 2 - 4 мин после его зарождения.

Прерывание дискретно-непрерывного распространения процесса градообразования в многоячейковых ГП осуществляется путем засева вновь зарождающихся КЯ и последующее прерывание выпадения града из зрелой градообразующей КЯ. Это обусловлено тем, что новая КЯ через несколько мин после зарождения ее первого радиоэха может достигнуть градовой стадии, и породит следующую КЯ, и это будет периодически повторяться в течение всего периода эволюции упорядоченного многоячейкового ГП.

Прерывание процесса непрерывного распространения градообразования в суперячейковых ГП осуществляется путем засева обновляющейся фронтальной части их навеса радиоэха и ближайших к ней фидерных облаков. Засев проводится с учетом пространственной ориентации навеса радиоэха (рис. 3):

- на правом наветренном фланге в случае КЯ с правосторонним развитием;
- на левом наветренном фланге в случае суперячеек с левосторонним развитием.

В случае неупорядоченных многоячейковых ГП с направлениями навеса радиоэха КЯ влево и вправо от ведущего потока (в зависимости от их местоположения в облачной системе) место засева определяется реальным направлением навеса радиоэха каждой КЯ.

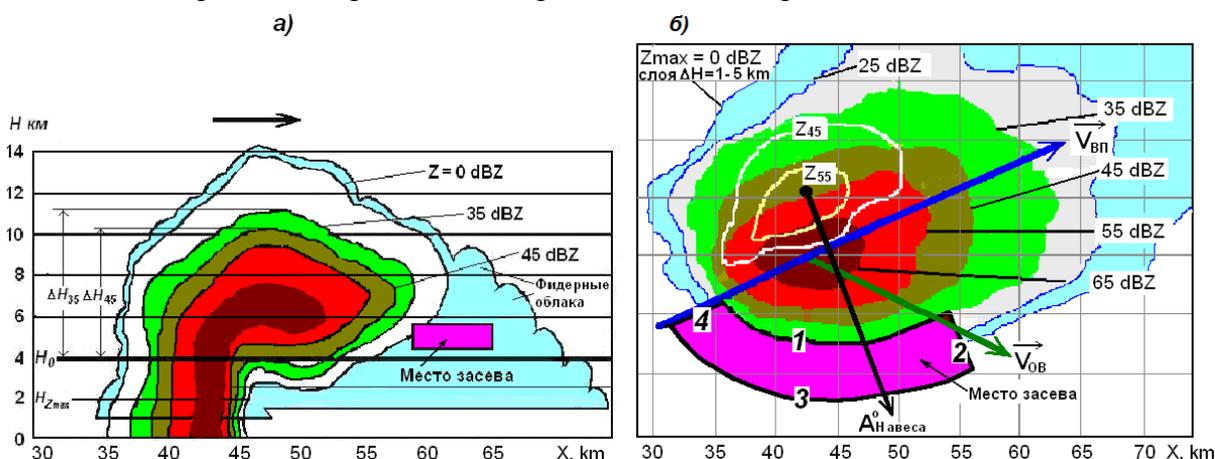


Рис. 3. Схема засева суперячейкового градового процесса с правосторонним развитием: А) на вертикальном сечении; б) на двухуровневом горизонтальном сечении.

2.4. *Методы распознавания градовых и градоопасных облаков и критерии засева:* Одноволновый и двухволновый радиолокационные методы, основанные на измерениях одномерных, двумерных и трехмерных параметров облаков [3].

2.5. *ОВ* в целях унификации схем засева независимо от типа ГП делятся на 4 категории [3]: ОВ I категории – потенциально градоопасная КЯ, первое радиоэхо или максимум радиоэха которой зарождается в слое от 0 до 5 км над уровнем изотермы 0 °С и имеет тенденцию развития; ОВ II категории – градоопасная КЯ, имеющая тенденцию развития; ОВ III категории – градовая КЯ, из которой по радиолокационным данным выпадает град; ОВ IV категории – сверхмощная градовая КЯ, из которой по радиолокационным данным, выпадает крупный интенсивный град.

2.6 *Место засева:* Область высоко зарождающееся первого радиоэха потенциально-градоопасных КЯ (ОВ I категории); фронтальная часть градоопасных КЯ (ОВ II категории); фронтальная часть навеса радиоэха и его наветренный фланг зрелых градовых облаков (ОВ III и IV категорий). Засев осуществляется по всей площади горизонтального сечения области будущего градообразования, которая в зависимости от типа ГП и стадии его развития может достигать от 10 до 200 км².

2.7. *Высота засева:* Облачный слой с температурой от -6 °С до -10 °С, соответствующей порогу кристаллизующего действия применяемых реагентов и благоприятной для роста, агрегации и размножения кристаллов. В случае зарождения первого радиоэха новых градоопасных КЯ и навеса радиоэха зрелых градовых ячеек выше этого слоя засев осуществляется на уровне нижней границы первого радиоэха и навеса радиоэха, ограниченном изолинией $Z_{10} = 15$ dBZ.

2.8. *Время засева:* Засев должен осуществляться в течение времени от 1 до 2 мин после идентификации ОВ.

2.9. *Дозировка реагента:* Начальная концентрация кристаллов должна быть не менее 10^{11} м⁻³. Расстояние между точечными и линейными источниками засева не более 0,5 - 1,0 км друг от друга, чтобы обеспечить слияние объемов засева за счет турбулентной диффузии за время не более 1 мин [1, 2].

При этом по данным теоретического моделирования [2, 3] в течение первых 5 мин после засева происходит серьезная трансформация всех микрофизических параметров облачной среды (полей температуры, плотности водяного пара, размера облачных капель, жидкокапельной водности и т.д.), формирование и конденсационный рост ледяных кристаллов до размеров, когда начинается их агрегация (60 - 80 мкм), увеличение ледности за счет обеднения капельной водности облака и т.д.

Влияние засева на ход микрофизических процессов снижается по мере увеличения турбулентности в объеме засева, и эффекты засева исчезают тем быстрее, чем больше коэффициент турбулентной диффузии (т.е. облако быстрее «забывает» засев).

Увеличение начальной концентрации льдообразующих частиц до $5 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ по данным теоретического моделирования приводит к резкому повышению реакции облака на засев. При наблюдающейся в реальных условиях водности и турбулентности начальная концентрация льдообразующих ядер $n_0 \geq 10^{11} \text{ м}^{-3}$ является ключевой для повышения эффективности предотвращения града [1 - 3].

Для повышения эффективности предотвращения градообразования в мощных и быстротечных ГП рекомендуется осуществлять массированный засев за счет более частого внесения ПГИ или повышения льдообразующей эффективности ПГИ.

2.10. *Кратность и периодичность засева:* ОВ I категории следует засеивать однократно, ОВ II категории – двукратно через 7 мин, ОВ III категории слабой и средней мощности – трехкратно через каждые 7 минут, мощные ОВ III категории и ОВ IV категории – четырехкратно через каждые 3,5 мин (т.е. в каждом цикле радиолокационного обзора пространства).

2.11. *Средства засева:* Ракетные противогодавые комплексы «Алазань» и «Ас».

2.12. *Управление засевом* осуществляется с помощью АСУ, обеспечивающей обнаружение конвективной облачности, измерение комплекса одномерных, двумерных и трехмерных параметров облаков, распознавание ОВ, выработку команд на ракетный засев и контроль физической эффективности засева.

Порядок применения автоматизированной ракетной технологии ПГЗ изложен в [3] и в следующих основных руководящих документах (РД) Росгидромета:

- РД 52.37.731-2010. Организация и проведение противогодавой защиты;
- РД 52.37.732-2010. Методы оценки эффективности АВ на градовые процессы и порядок отчетности о проведении противогодавой защиты;
- РД 52.37.672 2006. Методические указания. Экспресс оценка предотвращенного ущерба в период противогодавой защиты;
- РД 52.37.601-2012. Наставление по ракетно-артиллерийскому обеспечению АВ гидрометеорологические и другие геофизические процессы;
- РД 52.37.710-2012. Порядок применения модернизированного противогодавого комплекса «Алазань» для АВ на метеорологические и другие геофизические процессы;
- РД 52.37.821-2015. Порядок применения малогабаритного противогодавого комплекса «Ас» для АВ на метеорологические и другие геофизические процессы;

- РД 52.37.615-2015. Порядок обеспечения безопасности работ по АВ на метеорологические и другие геофизические процессы;
- РД 52.37.856-2016. Программы работ и порядок отчетности о проведении АВ на метеорологические и другие геофизические процессы и явления
- Инструкция по организации и проведению противоградовых стрельб на территории Российской Федерации.

3. Результаты применения технологии

Противоградовые работы с применением автоматизированной ракетной технологии ПГЗ проводятся в наиболее градоопасных районах Северного Кавказа на площади 2,54 миллиона га. Защита осуществляется Краснодарской, Ставропольской и Северо-Кавказской Военизированными службами (ВС) Росгидромета под научно-методическим руководством ФГБУ «ВГИ», который ежегодно проводит курсы подготовки специалистов, инспекции ВС с выработкой рекомендаций по совершенствованию системы ПГЗ, анализ случаев пропуска градобитий на защищаемой территории (ЗТ) и аномального функционирования технических средств, принимает меры по устранению их причин, совершенствует технологию и разрабатывает новые технические средства ПГЗ, а также РД по их применению.

Оценка эффективности этих работ проводится методом исторического ряда путем сравнения площадей градобитий, степени повреждений сельхозкультур и стоимости урожая до защиты и в период защиты [7]. Эта оценка показала, что *физическая эффективность ПГЗ* в Российской Федерации повышалась по мере совершенствования технологии и технических средств, и достигла в среднем 87%, т.е. ущерб от града на ЗТ сокращается в 7,7 раза (рис. 4).

Суммарный экономический эффект повышался за счет повышения эффективности ПГЗ и стоимости сельхозпродукции и в 2016 г. достиг 4,3 млрд. руб. (рис. 4), окупив расходы в 9,2 раза. Оценка экономической эффективности ПГЗ проведена без учета того, что на Северном Кавказе около 50% агропромышленной продукции дают приусадебные хозяйства. Если учесть этот фактор, то экономическая эффективность и окупаемость затрат увеличатся в два раза. Кроме того не учтено, что технология ПГЗ приводит к сокращению (в 2,0 - 2,5 раза) продолжительности сопровождающих град ливневых осадков, гроз и шквалов, наносящих ущерб сравнимый с ущербом от града.

Аналогичные результаты получены в странах СНГ и Аргентине, где применяются российские технологии и технические средства ПГЗ, на площади около 3,2 млн. га.

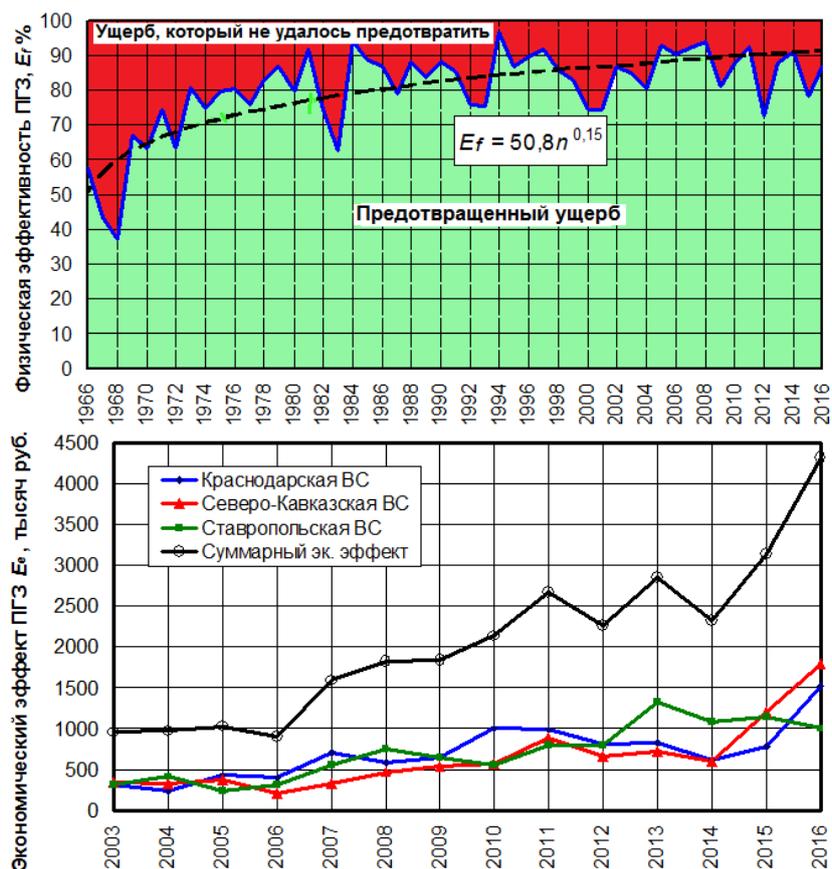


Рис. 4. Физическая и экономическая эффективность противоградовых работ в РФ.

Однако наряду с этими успехами следует отметить, что на защищаемых территориях отмечаются случаи градобития, наносящих серьезный ущерб.

Основными причинами этого являются:

- недостаточная изученность градовых процессов;
- большая длительность (6 – 8 мин) срабатывания механизма ускорения осадкообразования, инициируемого кристаллизующими реагентами;
- организационно-технические причины: наличие на ЗТ многочисленных запретных секторов и непростреливаемых участков;
- недостаточная льдообразующая эффективность применяемых противоградовых изделий (ПГИ), недостаточная скорострельность применяемых ракетных установок;
- малая протяженность зоны предварительной обработки облаков со стороны их преимущественного вторжения, нехватка ПГИ и устарелость технического оснащения.

Совокупное влияние перечисленных организационно-технических причин систематически приводит к недозасеву мощных градовых облаков (особенно их наветренного фланга, где проходят начальные стадии градообразования). В результате этого эффект воздействия на мощные суперячейковые градовые облака, зачастую, сводится к уменьшению размера и интенсивности града, сужению полосы града без прерывания его выпадения.

Анализ результатов ПГЗ показывает также, что по мере совершенствования технологии и повышения льдообразующей эффективности применяемы ПГИ отмечается снижение расхода ПГИ (рис. 5). Среднегодовой расход ПГИ на защиту 100 тысяч га в период 1967 - 1988 годы (рис. 5а), составлял около 1107 шт. и варьировал в зависимости от градоопасности региона. В период 2001 – 2016 гг. после перехода на применение ПГИ «Алазань-5» и «Алазань-6», имеющих повышенные льдообразующую эффективность и радиус действия, расход ПГИ сократился более чем в два раза. Еще более значимое уменьшение расхода ПГИ отмечается в Молдавии (рис. 5б). В период 1966 - 1988 гг. среднегодовой расход ракет «Облако», «ПГИ-М» и «Алазань-2М» на 100 тысяч га ЗТ составлял в среднем 911 шт., а в период 1999 - 2014 гг. расход ПГИ «Алазань-6», «Loza» и «Алазань-«2МБ», снаряженных австрийским льдообразующим составом «AU» сократился до 281 шт. (в 3,2 раза).

Это подтверждает правильность рекомендаций, полученных на основе результатов теоретического моделирования цепи физических процессов, сопровождающих ракетный засев конвективных облаков [1, 2], и оптимизации дозировки реагентов с доведением начальной концентрации активных ЛОЯ до 10^{11} м⁻³. согласно которым расход ПГИ будет сокращаться с повышением их льдообразующей эффективности.

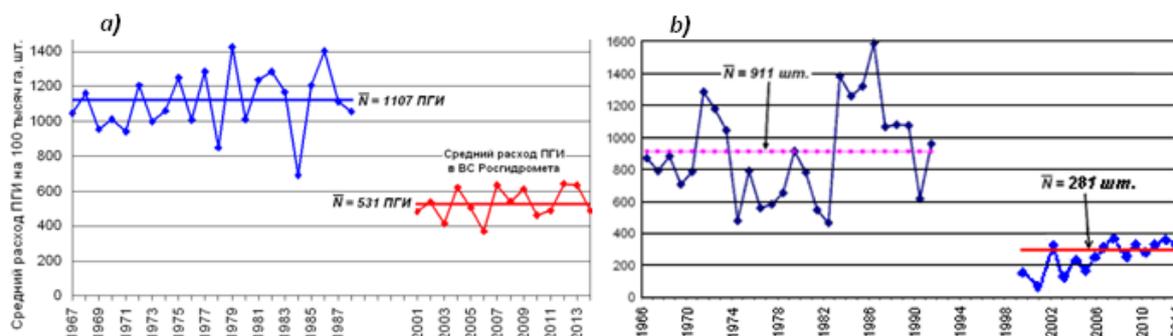


Рис. 5. Средний расход ПГИ на защиту 100 тысяч га: а) на Северном Кавказе; б) в Молдавии.

Заключение

Для дальнейшего повышения эффективности и снижения себестоимости ПГЗ необходимо внедрение новых технологических достижений (новые критерии распознавания градовых и градоопасных облаков, новые схемы их засева и т.д. [3]), а также проведение технической модернизации системы ПГЗ на базе новых технических средств:

- автоматизированный радиолокационный комплекс управления противоградовыми операциями «АСУ-МРЛ»;
- противоградовые ракеты нового поколения «Ас» и «Алазань-9»;
- автоматизированная ракетная установка «Элия-2» [4];

– программно-технический комплекс управления сетью удаленных ракетных установок «АСУ-Элия» [3];

– новый доплеровский радиолокатор градозащиты 10 см диапазона «ДМРЛ-10»;

– программно-технический комплекс «АСУ-Град» [3].

Внедрение этих новшеств может устранить перечисленные выше организационно-технические причины пропуска града на ЗТ, создать автоматизированную ракетную систему ПГЗ «АСУ-Град» с реализацией малолюдной технологии (без постоянного обслуживающего персонала ракетных пунктов) и устранением субъективных ошибок.

Список литературы

1. Абшаев А.М., А.М., Абшаев М.Т., Садыхов Я.А. О распространении искусственного аэрозоля в мощных конвективных облаках // Метеорология и гидрология, 2003, № 9. С. 28-35.

2. Абшаев А.М., Абшаев М.Т., Жекамухов М.К. Моделирование ракетного засева градовых облаков // Труды научно-практ. конф., посв. 40-летию начала произ. работ по защите от града, 2011. – Нальчик. – С. 147-171.

3. Абшаев А.М., Абшаев М.Т., Барекова М.В., Малкарова А.М. Руководство по организации и проведению противоградовых работ. – Нальчик, Печатный двор, 2014. – 508 с.

4. Абшаев А.М., Абшаев М.Т., Зорин В.А., Кратиров Д.В., Михеев Н.И. Малогабаритный противоградовый комплекс «Ас-Элия» // См настоящий сборник.

5. Абшаев М.Т., Дадали Ю.А. Некоторые вопросы воздействия на градовые процессы // Труды ВГИ, 1973. Вып. 22. С. 104-116.

6. Абшаев М.Т., Жакамухов Х.М. О вымывании облачной воды грубодисперсным аэрозолем // Труды Всерос. конф. по физике облаков и АВ на гидрометпроцессы. СПб: Гидрометеиздат, 2005. С. 131-142.

7. Абшаев М.Т., Малкарова А.М. Оценка эффективности предотвращения града. – СПб.: Гидрометеиздат, 2006. – 287 с.

8. Ашабоков Б.А., Шаповалов А.В, Федченко Л.М.. Математическое моделирование градовых облаков // Труды научно-практической конф., посвященной 40-летию начала производ. работ по защите от града. – Нальчик, 2011. – С. 137-144.

9. Бартишвили И.Г., Бартишвили Г.С., Гудушаури Ш.Л., Ломинадзе В.П. К вопросу комбинированного воздействия на теплую и переохлажденную часть облака с целью предотвращения града // Труды ЗакНИГМИ, 1967. Вып. 2. – С. 7-22.

10. Бибилашвили Н.Ш., Гораль Г.Г., Калов Х.М., Экба Я.А. Исследование разрушения конвективных облаков взрывом и продуктами ликвидации противоградовых снарядов // Труды ВГИ, 1981. Вып. 47. – С. 36-44.

11. Бухникашвили А.В., Гайворонский И.И., Карцивадзе А.И. и др. Методика АВ на градовые процессы и результаты опытов в Алазанской долине // Труды Всес. сов. по АВ на градовые проц. – Тбилиси, 1964. – С. 76-87.

12. Вульфсон Н.И., Левин Л.М. Разрушение развивающихся кучевых облаков с помощью взрывов // Изв. АН СССР, ФАО, Т. 8, № 2, 1972. – С. 156-166.

13. Гайворонский И.И., Зацепина Л.П., Серегин Ю.А. Результаты опытов воздействия на конвективные облака // Изв. АН СССР, ФАО, 1970, Т. 6. Вып. 3. – С. 252-258.

14. Колосков Б.П., Корнеев В.П., Щукин Г.Г. Методы и средства модификации облаков. – СПб, 2012. – 341 с.

15. Кондратенко В.А. Определение льдообразующей эффективности некоторых хладореагентов и пиротехнических композиций // Труды ВГИ, 1987. Вып. 69. С. 23-28.

16. Сулаквелидзе Г.К. Ливневые осадки и град. –Л.: Гидрометеиздат, 1967. - 412 с.

17. Федоров Е.К. АВ на метеорологические процессы // Вестник АН СССР, 1962. – № 9. – С. 73-78.

18. Barge B.L., Bergwall F., Goyer G.G., Renick J.H. Fine scale structure of convective storms – Implications for cloud seeding in Alberta. – Atmospheric Sci. Report 76-3, Alberta Weather Modif. Board. Red deer, Alberta, 1976. – 19 p.

1. Bergeron T. Of the physics of clouds and precipitation // Proc. Conf. Int. Union Geodesy and Geophysics, Lisbon, 1933. Part II. – P. 156-178.

2. Berthoumieu J.F. The concept of cloud base seeding with hygroscopic salts flares for hail prevention and rain precipitation. An actualization // Proc 9th Int. Sci. Conf. WMO, 2003. Casablanca. P. 263-267.

3. Browning K. A. and Foote G. B. Airflow and hail growth in supercell storms and some implications for hail suppression. Quart. J. Roy. Met. Soc. V. 102, 1976. P. 499-533.

4. English, M. Results of hail suppression research in Alberta, Canada // Prep. 11th Conf. Weather Modification Amer., Met. Soc., 1987. Edmonton, Alta. P. 98-101.

5. Krauss T. Aircraft Seeding Technology & Outstanding Issues in Hail Suppression // WMO Meeting on Hail Suppression. Nalchik, 2003. – P. 57-61.

6. Farley R.D., Wu Ting, Orville H.D., Hui Chen. The Numerical Simulation of Hail Suppression Experiments // Sixth WMO Sci. Conf. on Weather Modif. Paestum, Italy, 1994. Vol. 1. P. 161-166.

7. Federer B., Waldvogel A., Schmidt W. et al. Main results of Grossversuch-4 // J. Climate Appl. Met. 1986. Vol. 25. P. 917 - 957.

8. Foote G.B, Browning K.A., Borland K.A., Chengnon S.A., ets. Hail: A review of hail science and hail suppression. – Edited by Brant Foote and Charles Knight. – Met. Mon., Vol. 16, No 38. Amer. Met. Soc. Boston, Mass., 1977. – 277 p.

9. Heymsfield A. I. and Hjemsfeld M. R. Processes of hydrometeor development in Oklahoma convective clouds // J. Atm. Sci., 1984. Vol. 41, No 19. P. 2811-2835.
10. Marwitz I.D. Precipitation efficiency of thunderstorms on the High Plains // J. Res. Atm., 1972. No 6. P. 245-247.
11. Report of the Meeting of experts to review the present status of hail suppression. – WMO. Weather Modif. Program. Hail Suppression Research. – Nalchik, Russia, 2003. – 140 p.
12. Rasmussen R.M., Lew I.K., Pruppacher H.R. A wind tunnel investigation of the riming model ice crystal aggregations // Proc. of the 9th Int. cloud phys. conf. Tallinn, USSR, 1984. Vol. 1. P. 151-155.
13. Simpson J, Brier J.M., Simpson R.H. Storm fury Cumulus Seeding Experiment 1965: Statistical analysis and main result // J. Atmos. Sci, 1967. Vol. 24. – P. 508-521.

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОБЛАКА С ЛЕГКОМОТОРНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

**Двоеглазов С.М., Бычков А.А., Корнеев В.П., Несмеянов П.А.,
Петрунин А.М., Частухин А.В.**

АНО «Агентство АТТЕХ», г. Москва

Введение

В настоящее время в России в работах по искусственному регулированию осадков самолетным методом используются пиротехнические стационарные генераторы САГ-ПМ, САГ-26 и пиротехнические, отстреливаемые с борта самолета патроны ПВ-50М и ПВ-26-01, снаряжаемые активным реагентом - йодистым серебром.

Пиротехнические генераторы САГ-ПМ применяются с пусковым устройством КУСАГ-П на самолете Ан-2, а САГ-26 с пусковым устройством типа АСО-2И и УВ-26 на самолетах Ан-26, Ан-28, ИЛ-18, М-101Т «Гжель».

Пиропатроны ПВ-26-01 применяется с пусковым устройством типа АСО-2И и УВ-26 на самолетах Ан-26 (Ан-30), ИЛ-18, М-101Т «Гжель», Як-42Д «Росгидромет».

Пиропатроны ПВ-50М использовались ранее на самолетах Ан-12 и Су-30.

Недостатком перечисленных выше технических средств является их высокая стоимость - как пиротехнических изделий САГ-ПМ, САГ-26 и ПВ-26-01, так и пусковых устройств АСО-2И, УВ-26 и КДС-155, которые были разработаны для решения специальных задач Военно-воздушных сил РФ и затем адаптированные к использованию в работах по искусственному регулированию осадков на самолетах гражданской авиации типа Ан-26, Ан-30 Ан-2, Як-42, Ил-18.

Следует отметить, что основная часть используемых в работах по АВ самолетов перестала выпускаться до 90-х годов (Ан-26, Ан-30 Ан-2, Ил-18) и в настоящее время обслуживание данных самолетов практически прекращено из-за отсутствия запчастей. Самолет Як-42, который в настоящее время имеется в единичном экземпляре, несмотря на высокие показатели по полезной нагрузке и продолжительности полёта, для работ по АВ на облака обходится очень дорого, при этом требуется использование сложной наземной инфраструктуры.

Таким образом, возникает актуальная задача по внедрению в практику АВ на облака серийно выпускаемых и применяемых в российской авиации легкомоторных самолётов российского производства, типа «Корвет», «Фермер-2», «Цикада», а также зарубежного производства, типа «Cessna», «Beechcraft King Air» и т.п., оборудованных разработанным в АНО «Агентство АТТЕХ» самолетным аэрозольным комплексом САГ-26-КС.

Применение данного комплекса с использованием «безгильзовых» активных элементов, снаряжаемых в кассеты со стволами многоразового применения, позволит с меньшими затратами выполнять засев облаков льдообразующим аэрозолем на основе йодистого серебра как в вершину, так и под основание облака.

Состав, технические характеристики и результаты испытаний комплекса

Основные элементы самолетного аэрозольного комплекса «САГ-26-КС»:

- кассета аэрозольного генератора (рис. 1);
- 32 стационарных активных элемента «Дождь-С» (рис. 2), для создания горизонтальных трасс аэрозоля по траектории полета самолета или 32 сбрасываемых активных элементов «Дождь-К» (рис. 3), для создания вертикальных трасс аэрозоля;
- пульт управления запуском активных элементов "ПУ-САГ", рис. 4.

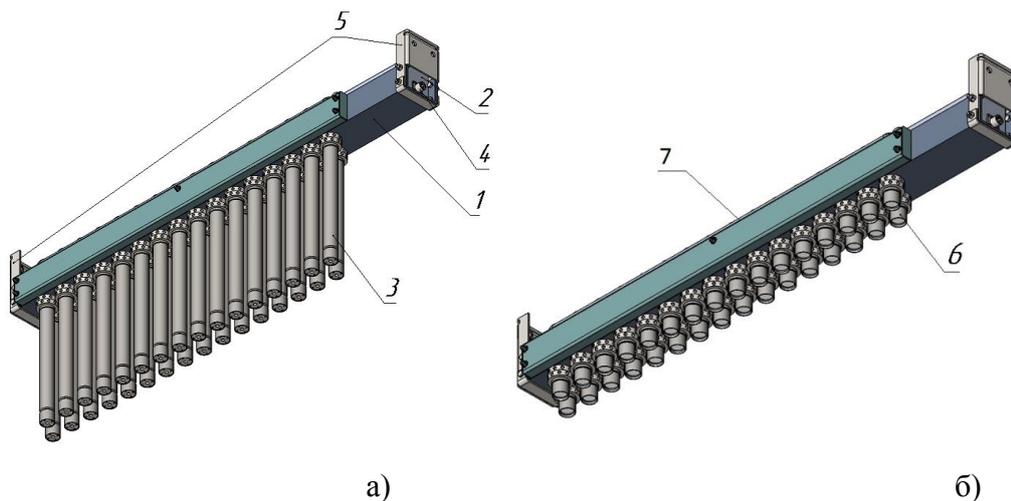


Рис. 1. Общий вид кассет самолетного комплекса САГ-26-КС: снаряжаемых стационарными (а) и сбрасываемыми (б) активными элементами.

1 - корпус кассеты; 2 – контроллер; 3 – «ствол-С» многоразового применения для стационарных активных элементов; 4 - электроразъем связи с пультом управления; 5 - узлы крепления кассет к самолету; 6 - «ствол-К» для сбрасываемых активных элементов, 7- контактная группа.

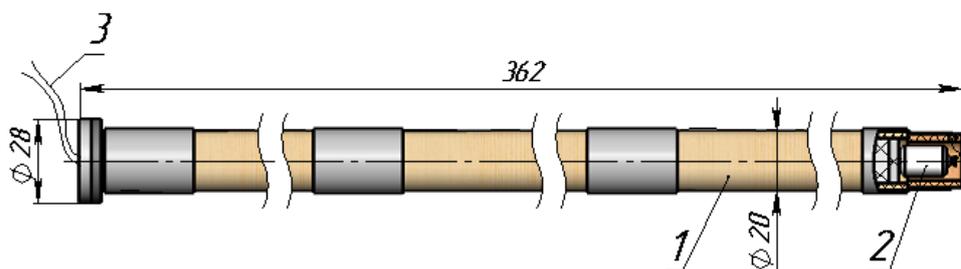


Рис. 2. Активный элемент «Дождь-С». 1 – шашка пиротехнического состава льдообразующего аэрозоля; 2 - воспламенительный заряд; 3 – провод для присоединения к контактам кассеты.

Стационарные активные элементы «Дождь-С» размещаются в «стволах С» кассеты. При подаче электрического импульса с пульта дистанционного управления на контакты кассеты воспламенительный заряд инициирует горение шашки пиротехнического состава льдообразующего аэрозоля, который, истекая через сопловую крышку ствола, создает горизонтальную трассу аэрозоля по траектории полета самолета.

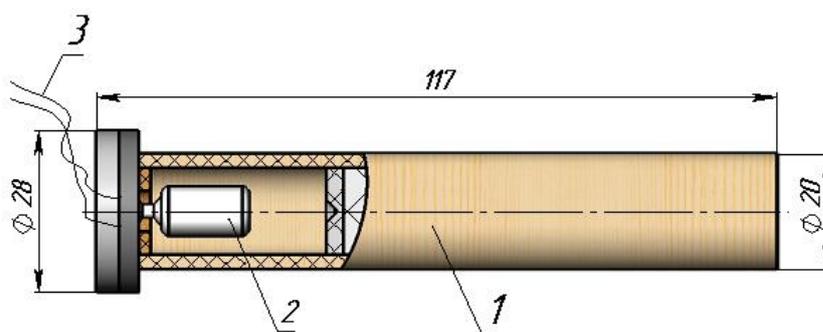


Рис.3. Сбрасываемый активный элемент «Дождь-К».

1 – шашка пиротехнического состава льдообразующего аэрозоля; 2 - воспламенительный заряд; 3 – провод для присоединения к контактам кассеты.

Сбрасываемый активный элемент «Дождь-К» размещается в «стволах-К» кассеты. При подаче электрического импульса с пульта дистанционного управления на контакты кассеты, воспламенительный заряд инициирует горение шашки пиротехнического состава льдообразующего аэрозоля и сброс активного элемента из «ствола-К». Сброшенный с самолета активный элемент «Дождь-К», свободно падая, при горении шашки пиротехнического состава создает вертикальную трассу аэрозоля.



Рис.4. Пульт дистанционного управления «ПУ-САГ».

Пульт дистанционного управления располагается в кабине самолета и обеспечивает возможность оператору управлять работой по любой из установленных программ (запуск по одному, или сериями одновременно по два или по три активных элемента с паузами до 6 минут) от 1 до 12 кассет - САГ.

На рисунках 5 и 6 показан самолет МВ-500 с установленным на нем аэрозольным комплексом САГ-26-КС при проведении наземных испытаний.



Рис.5. Самолет МВ-500 с установленными на законцовках крыльев кассетами - САГ.



Рис. 6. Наземные испытания самолета МВ-500 с установленным аэрозольным комплексом САГ-26-КС.

В 2017 г. проведены:

- Испытания активных элементов «Дождь-С» на соответствие требованиям технических условий на испытательном полигоне завода-изготовителя;
- Испытания льдообразующей эффективности активных элементов на аэродинамическом стенде ФГБУ "Центральная аэрологическая обсерватория";
- Наземные испытания самолета МВ-500 с установленным на нем самолетным аэрозольным комплексом САГ-26-КС на аэродроме ООО «Фирма МВЕН» (г. Казань).

Сравнительный анализ основных характеристик выпускаемых промышленностью генераторов льдообразующего аэрозоля САГ-26 и пиропатронов ПВ-26-01 с активными элементами «Дождь-С» и «Дождь-К» комплекса САГ-26-КС показывает, что применение комплекса в работах по АВ на облака позволит значительно снизить затраты на их выполнение.

В таблице 1 представлены основные технические характеристики генератора САГ-26, пиропатрона ПВ-26-01, активного элемента «Дождь-С» и «Дождь-К» и их стоимость.

Основные технические характеристики генератора САГ-26, пиропатрона ПВ-26-01, активного элемента «Дождь-С» и «Дождь-К» и их стоимость

Наименование расходуемого изделия	Диаметр активного элемента, мм	Высота, мм	Масса, кг	Масса состава (АД-1), кг	Время работ, с	Выход част. с изделия при - 10	Стоимость изделия, руб.
Патрон ПВ-26-01	24,1	80	0,075	0,032	40	$2,4 \cdot 10^{14}$	1357
Активный элемент «Дождь-К»	20	117	0,08	0,043	50	$3,0 \cdot 10^{14}$	500
Генератор САГ-26	20	258	0,26	0,092	240	$1,0 \cdot 10^{15}$	2398
Активный элемент «Дождь-С»	20	362	0,22	0,138	360	$1,5 \cdot 10^{15}$	1500

Выводы

Создаваемый самолетный комплекс «САГ-26-КС» для воздействия на облака с легкомоторных самолетов с использованием «безгильзовых» активных элементов с пиротехническим составом льдообразующего аэрозоля, снаряжаемых в кассеты со стволами многоразового применения позволит:

- значительно снизить затраты на приобретение расходуемых активных элементов в работах по АВ на облака, в сравнении со штатными генераторами САГ-26 и пиропатронами ПВ-26-01;
- снизить в 3 раза стоимость пусковых устройств (кассет) с пультом управления, в сравнении с существующими устройствами типа АСО-2И (УВ-26).

О НЕКОТОРЫХ ПОДХОДАХ К РАЗРАБОТКЕ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ ОСАДКООБРАЗОВАНИЯ В КОНВЕКТИВНЫХ ОБЛАКАХ

Ашабоков Б.А.^{1,2}, Федченко Л.М.¹, Шаповалов А.В.¹

¹ ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

² Институт информатики и проблем регионального управления КБНЦ РАН, г. Нальчик

В результате анализа состояния физики облаков и активных воздействий на них в работе [3] было показано, что развитие данного научного направления в последние десятилетия замедлилось. Причина этого явления, как отмечено в этой же работе, заключается в том, что настоящий период времени является переходным для данного научного направления - завершается

этап изучения «элементарных» процессов в облаках и происходит переход к этапу изучения закономерностей образования и развития облаков в целом с учетом их системных свойств. Следует отметить, что в агрегировании результатов исследований завершающегося этапа развития физики облаков, которое возможно на основе математических моделей облаков, достигнуты заметные успехи: удалось разработать многомерные модели облаков, включая и модели с детальным учетом процессов. Достижения в этом направлении делают возможным получение существенных фундаментальных результатов в физике облаков. Достаточно полный обзор работ по численному моделированию облаков можно найти в работах [4,9,10].

Важно заметить, что переход физики облаков к следующему этапу развития является естественным, т.к. помимо «элементарных» процессов в облаках существует еще множество факторов другой природы, влияющих на образование и развитие облаков. Среди них есть такие факторы, роль которых в образовании и развитии облаков нельзя считать изученной на достаточном уровне, есть даже и такие, роль которых не понята до конца. Рассматривая облака как сложные физические системы, установлены наиболее важные из этих факторов. К этим факторам можно отнести, например, взаимодействие процессов в облаках и взаимодействие облаков с атмосферой [3].

Сложным и неоднозначным является и состояние технологий, используемых для активного воздействия на процессы осадкообразования в облаках. Они до сих пор опираются на концепции, предложенные в 50-60-х годах 20-го столетия, а не на методы, полученные в результате строгих исследований образования и развития облаков в естественных условиях и при активном воздействии. Важно отметить, что, несмотря на такое состояние этих технологий, работы по активному воздействию на облака ведутся в широких масштабах. В частности, нами был проведен анализ концепции ускорения осадкообразования, на которую опирается так называемая Российская технология воздействия на градовые процессы. Оказалось, что ни одно из положений концепции не выполняется. Более того, модели облако - и осадкообразования, на которых основана данная концепция, далеки от реальных. Тем не менее, уже достаточно длительный период времени противорадовые работы проводятся на основе данной концепции.

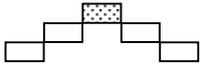
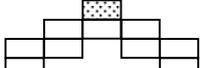
Таким образом, получение новых знаний о закономерностях образования и развития облаков и разработка эффективных и научно обоснованных методов активного воздействия на них в настоящее время стали чрезвычайно актуальными проблемами физики облаков и активных воздействий на них. В связи с этим исследования по физике облаков и активным воздействиям на них в последние годы в ВГИ организованы и ведутся с учетом такого состояния данного научного направления.

В частности, начаты исследования роли отмеченных выше факторов в процессах облако- и осадкообразования. К работам данного направления можно отнести работу [5], в которой исследовано влияние структуры поля ветра в атмосфере на процессы облако- и осадкообразования. Что касается роли взаимодействия процессов в облаках в их образовании и развитии, то ее изучение должно быть основано на использовании специальных моделей. Из работ, посвященных данному вопросу, можно отметить работу [6], которая посвящена исследованию влияния деформации полей термодинамических параметров в облаке на формирование микроструктуры градовых облаков.

В настоящей работе обсуждаются некоторые подходы к разработке методов активного воздействия на облака, которые развиваются в ВГИ. Важно отметить, что до настоящего времени развитию методологии и методов решения данной проблемы, которое связано с изучением поведения чрезвычайно сложной динамической системы (конвективного облака) в зависимости от различных вариантов внесения частиц реагента, уделяется мало внимания. Задача заключается в нахождении области в облаке, в которую следует вносить частицы реагентов (термодинамические и микрофизические условия в которой благоприятны для активного воздействия), концентрации этих частиц, моментов начала и завершения засева облаков для достижения цели воздействия. Все подходы к решению данной проблемы должны быть основаны на использовании численных моделей облаков. В таблице 1 приведены результаты исследования влияния на градоопасность облака различных вариантов внесения искусственных кристаллов. Для оценки градоопасности облака использовалось число крупных градин, образующихся в облаке за время его эволюции. Расчеты проводились на основе двумерной модели градовых облаков.

Таблица 1

Эффект воздействия в зависимости от объема и геометрии области внесения реагента

Номер варианта	Форма источника	Интенсивность источника ($\text{м}^{-3}\text{с}^{-1}$)	Градоопасность облака (%)	Эффект воздействия (%)
1		10^6	14,8	85,2
2		10^6	8,2	91,8
3		10^6	4,5	95,5
4		10^6	8,3	91,7
5		10^6	8,1	91,9
6		10^6	10,1	89,9

Из таблицы можно заметить, что увеличение объема засеваемой области по сравнению с первым вариантом незначительно влияет на эффект воздействия, т.е. с точки зрения получения максимального эффекта с наименьшими затратами реагента более эффективно использование точечного источника реагента.

Наиболее распространенным подходом к разработке методов активного воздействия на облака является моделирование различных вариантов внесения частиц реагента в облако и выбор наиболее эффективного из них с точки зрения достижения цели воздействия. Варианты внесения реагента в облако могут различаться значениями параметров источника частиц реагента, который вводится в модель облака. В зависимости от используемого способа внесения реагента в облако источник может быть точечным, линейным или может иметь более сложную форму. Отметим еще, что для проведения исследований на основе данного подхода используются самые различные модели облаков.

В качестве примера на рисунке 1 приведены результаты моделирования активного воздействия на градовое облако путем внесения искусственных кристаллов. Рассматривались случаи, когда источник кристаллов располагался в различных точках облака. Расчеты проводились на основе двумерной модели микрофизических процессов в градовых облаках с заданной термогидродинамикой. Результаты расчетов показали, что воздействие точечным источником в область с умеренными восходящими потоками (точка А на рисунке 1) приводит к уменьшению числа крупных градин, образующихся в облаке за время его эволюции (примерно на 30% по сравнению с их числом без воздействия). В случае, когда источник искусственных кристаллов располагался в области, отмеченной точкой В, имело место более заметное уменьшение общего числа крупных градин – примерно на 60%. Наиболее эффективным с точки зрения уменьшения градоопасности облака оказался вариант, когда источник располагался в точке D, которая находится на изотерме -10C^0 в зоне умеренных восходящих потоков. Внесение источника искусственных кристаллов в эту точку привело к уменьшению градоопасности облака на 90%.

В случае, когда источник кристаллов находится в точке С, наблюдается увеличение числа крупных градин по сравнению с их числом без воздействия, т.е. воздействие приводит к отрицательному эффекту.

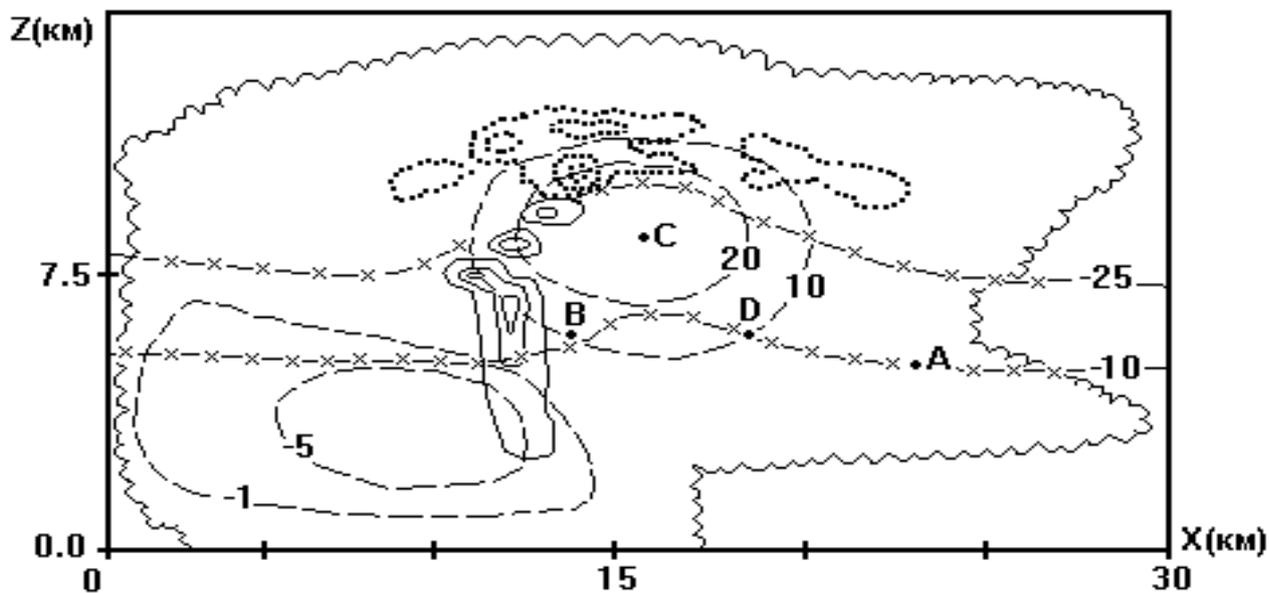


Рис.1. Структура облака для момента времени $t=18$ мин: _____ изолинии концентрации крупных градин [$r \geq 1$ см]; изолинии концентрации кристаллов с $d = 2 - 5$ мм; -x-x-x- изолинии температуры, соответствующие $-10C^0$ и $-25C^0$; - - - - - изолинии скорости вертикальных потоков.

На рисунке 2 приведен вертикальный разрез облака в один и тот же момент времени (40 мин), полученный с помощью трехмерной модели. Рисунок 5.а соответствует развивающемуся в естественных условиях облаку, рисунок 5.б - засеянному кристаллизующим реагентом на 30-й минуте развития. Приведены изолинии радиолокационной отражаемости (dBZ). В результате активного воздействия значительно изменились микроструктурные характеристики облака и радиолокационная отражаемость в области внесения искусственных кристаллов.

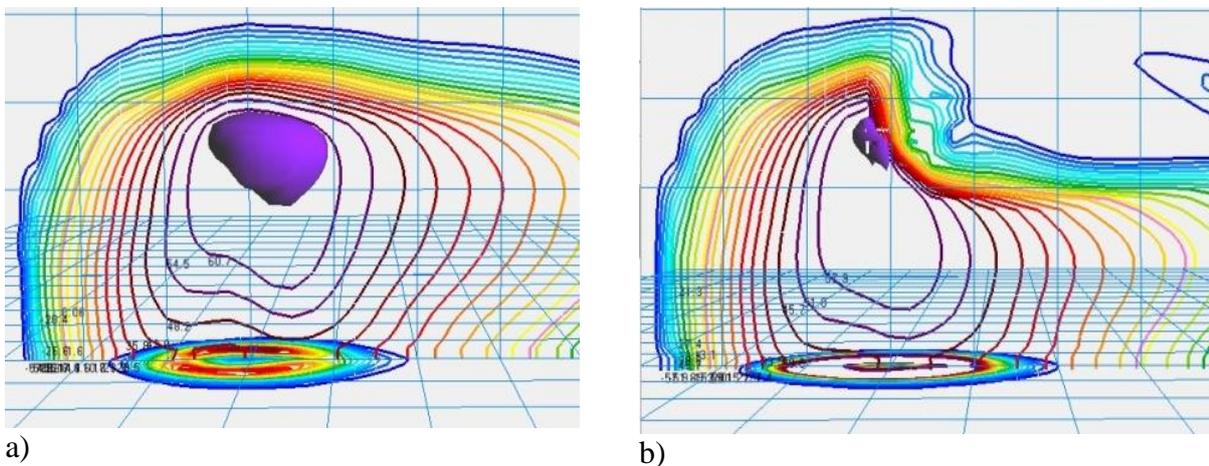


Рис. 2. Изолинии отражаемости при естественном развитии облака (а). Внутри находится зона локализации крупных ледяных частиц. Изолинии отражаемости облака при засеивании кристаллизующим реагентом (б). Зона крупных ледяных частиц практически исчезла.

Для сравнения приведем результаты моделирования воздействия на градовое облако по концепции ускорения осадкообразования [1]. Источник кристаллов, как и предусмотрено в концепции, является линейным и расположен на уровне изотермы -6°C . Вносилось такое их количество, которое обеспечивало требуемую концентрацию ледяных кристаллов. Кроме этого, была заполнена вся область, в которую вносится реагент, т.е. в расчетах положения концепции соблюдались, хотя на самом деле они не могут выполняться.

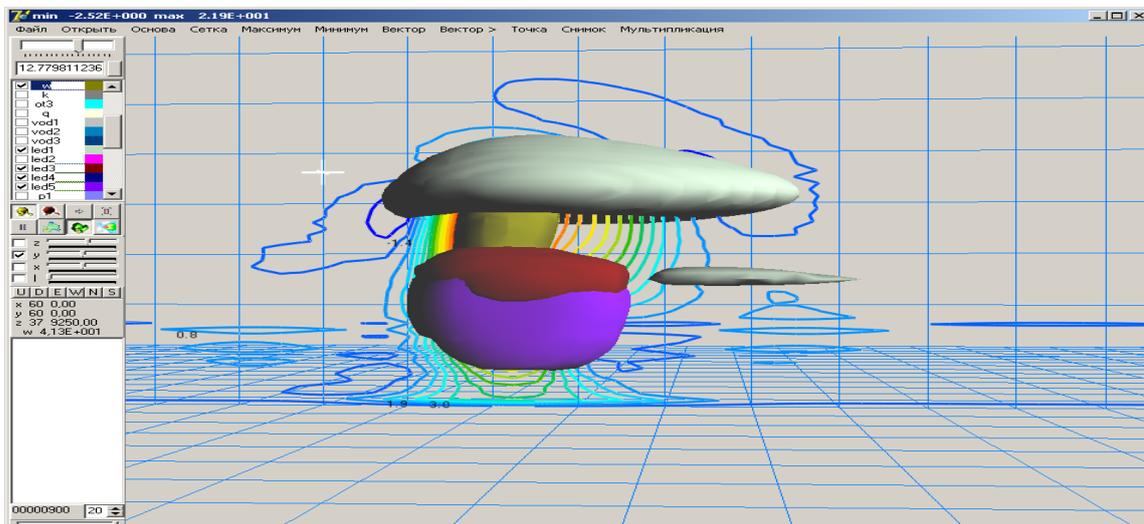
На рисунке 3 изображено облачко, состоящее из искусственных кристаллов. Они были внесены в облако на 30 мин его развития.

Анализ результатов расчетов также показывает, что облако искусственных кристаллов не трансформируется с течением времени, что указывает на то, что:

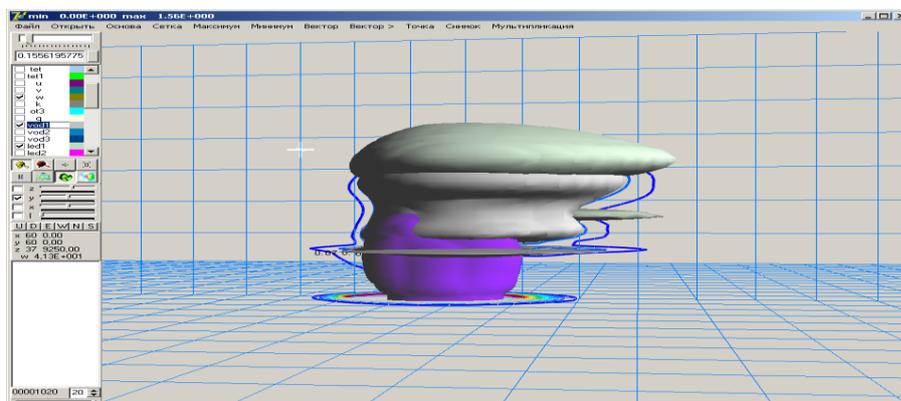
- кристаллики льда не взаимодействуют между собой, так как термодинамические и микрофизические условия в зоне внесения кристаллов не способствуют их росту, т.е. в этой зоне они не могут достигнуть таких размеров, которые необходимы для «запуска» процесса агрегации. Это указывает на невозможность заполнения области засева частицами реагента в течение 2-3 мин. после начала воздействия, как это предположено в концепции;

- параметры и структура поля скорости воздушных потоков в зоне внесения кристаллов не способствуют расширению облака искусственных кристаллов, его форма практически не меняется с течением времени.

Таким образом, структура поля воздушных потоков в области, в которую вносятся частицы реагента согласно концепции, не способствует попаданию искусственных кристаллов в ту область облака, где они могли бы взаимодействовать с облачной средой и предотвратить образование градин опасных размеров. В результате градовое облако развивается по такой траектории, которая не отличается от траектории его развития в естественных условиях, т.е. активное воздействие по данной концепции практически не влияет на развитие облака.



T=30 min. Изображено облачко, состоящее из частиц реагента. Воздействие не имеет эффекта.



T=40 min. Через 20 минут реагент «цепляет» облако (полоска ледяных кристаллов в средней части облака). С земли реагент быстрее попадет в облако.

Рис. 3. Результаты моделирования активного воздействия на градовое облако по концепции ускорения осадкообразования.

Данный подход к разработке методов управления процессами осадкообразования в облаках, основанный на переборе различных вариантов внесения частиц реагента, не лишен недостатков. Одним из них является необходимость использования небольших размеров пространственной сетки при проведении расчетов, т.к. при больших ее размерах область облака, в которую следует вносить реагент, можно не «заметить». Другая проблема связана с тем, что интенсивность внесения реагента в облако может меняться во времени. Особенно ощутимыми эти трудности будут в случае, когда размеры области, которую следует засеивать для управления процессами осадкообразования, будут небольшими (облака засушливых и полусушливых регионов).

Другим подходом к разработке метода управления осадкообразованием в облаках, развиваемым в институте, является рассмотрение данной проблемы в рамках теории оптимального управления. Данный подход реализован в случае градовых облаков (для задачи предотвращения образования в облаках градин опасных размеров) [3,7]. Задача оптимального управления эволюцией микроструктуры градовых облаков была поставлена для системы уравнений, описывающих микрофизические процессы в облаках на фоне заданной термогидродинамики [3]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial f_1}{\partial t} + V_x \frac{\partial f_1}{\partial x} + (V_z - V_1) \frac{\partial f_1}{\partial z} &= \left[\frac{\partial f_1}{\partial t} \right]_k + \left[\frac{\partial f_1}{\partial t} \right]_a + \left[\frac{\partial f_1}{\partial t} \right]_d + \left[\frac{\partial f_1}{\partial t} \right]_3 + \frac{\partial}{\partial x} K \frac{\partial f_1}{\partial x} \\ &+ \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial f_1}{\partial z} + I_1, \\ \frac{\partial f_2}{\partial t} + V_x \frac{\partial f_2}{\partial x} + (V_z - V_2) \frac{\partial f_2}{\partial z} &= \left[\frac{\partial f_2}{\partial t} \right]_a + \left[\frac{\partial f_2}{\partial t} \right]_3 + \frac{\partial}{\partial x} K \frac{\partial f_2}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial f_2}{\partial z} + I_2 + u \end{aligned} \quad (1)$$

$$0 \leq x \leq L_x, 0 \leq z \leq L_z, 0 \leq m < \infty, t > 0,$$

где $f_1(x, z, m, t)$ и $f_2(x, z, m, t)$ функции распределения по массам капель и ледяных частиц в облаке в момент времени t в точке (x, z) . Слагаемые $I_1(x, z, m, t)$, $I_2(x, z, m, t)$ и $u(x, z, m, t)$ в правых частях уравнений описывают источники капель и кристаллов. При этом $I_2(x, z, m, t)$ описывает образование кристаллов в естественных условиях, а $u(x, z, m, t)$ – их образование при внесении на облако кристаллизующего реагента. Включением источника искусственных кристаллов осуществляется управление эволюцией микроструктуры облака. Остальные слагаемые в правых частях уравнений описывают изменение функции $f_1(x, z, m, t)$ за счет процессов коагуляции, аккреции, дробления и замерзания капель и функции $f_2(x, z, m, t)$ за счет аккреции и замерзания переохлажденных капель, а также изменение этих функций за счет турбулентного переноса.

На границах пространственной области выполняются условия

$$\begin{aligned} f_1(x, z, m, t) = f_2(x, z, m, t) &= 0 && \text{при } x=0, x=L_x, z=L_z, \\ \partial f_1(x, z, m, t) / \partial z = \partial f_2(x, z, m, t) / \partial z &= 0 && \text{при } x=0, x=L_x. \end{aligned} \quad (2)$$

Функции распределения капель и ледяных частиц в начальный момент времени известны

$$\begin{aligned} f_1(x, z, m, 0) &= f_1^0(x, z, m) \\ f_2(x, z, m, 0) &= f_2^0(x, z, m) \end{aligned} \quad (3)$$

Управлением в задаче является функция $u(x, z, m, t)$, описывающая источник ледяных частиц. Исходя из того, что в реальных ситуациях воздействию подвержена в каждый момент времени только некоторая часть облака, запишем $u(x, z, m, t)$ в следующем виде точечного источника:

$$u(x, z, m, t) = u_0(m, t) \cdot \delta(x - x_0(t)) \cdot \delta(z - z_0(t)), \quad (4)$$

где $x_0(t)$ и $z_0(t)$ – координаты области управления по осям OX и OZ соответственно, $u_0(m, t)$ – интенсивность источника искусственных ледяных кристаллов, распределение которых задано, δ – дельта функция. Для $u_0(m, t)$, $x_0(t)$ и $z_0(t)$ очевидны ограничения:

$$\begin{aligned} u_0(m, t) &\geq 0, \\ x_0(t) &\in [0, L_x], \\ z_0(t) &\in [h_1, h_2], \end{aligned}$$

где h_1 и h_2 – нижняя и верхняя границы области реализации льдообразующей активности реагента (при $z < h_1$ кристаллы не образуются вследствие высокой температуры, а при $z > h_2$ имеется большое количество естественных кристаллов).

На рисунке 4 приводится вид оптимального управления, полученного для конкретного градового облака.

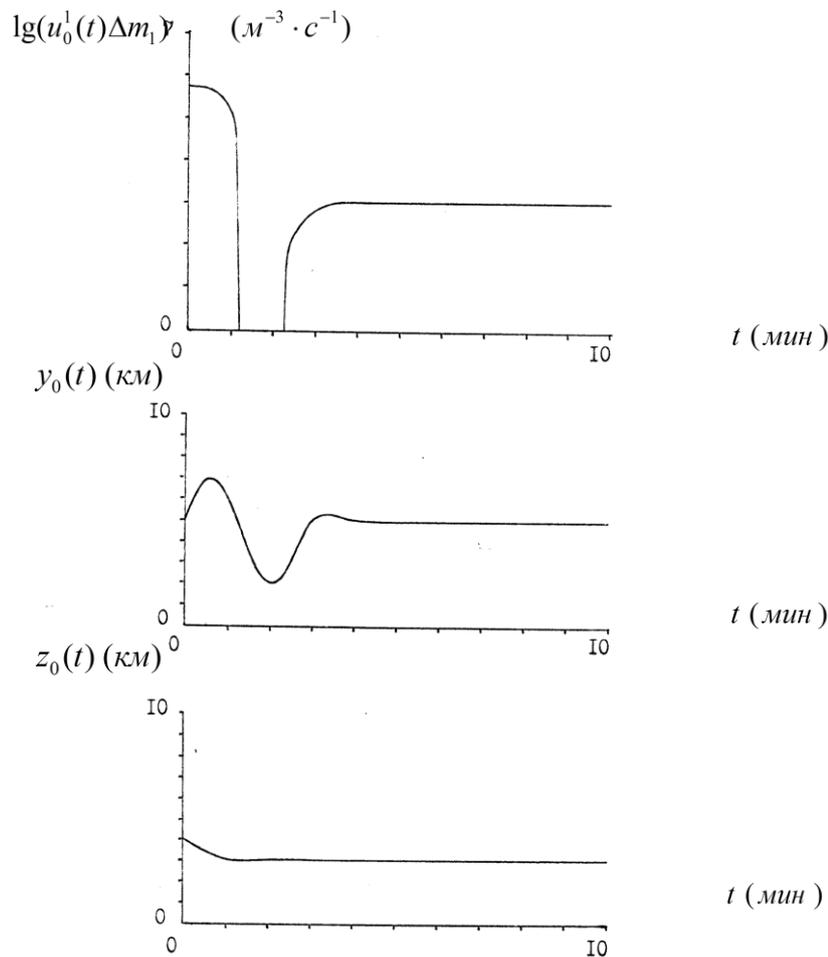


Рис.4. Вид оптимальных функций $u_0^1(t)$, $y_0(t)$ и $z_0(t)$.

Траектория развития облака будет зависеть от управления (4), а его качество определяется степенью достижения цели воздействия. Решение задачи (1) - (3) с заданной функцией управления (4) воспроизводит эволюцию системы облачных частиц для конкретного вида управления. При $u(x, z, m, t) = 0$ имеем естественный ход процесса. В качестве функционала, используемого для оценки степени достижения цели воздействия, использовалось число крупных градин, образующихся в облаке за время эволюции $[0, T]$:

$$F[f_2, u] = \int_0^{L_x} \int_0^{L_z} \int_{m_k}^{\infty} \int_0^T f_2(x, z, m, t) dx dz dm dt, \quad (5)$$

где m_k – масса градины, достигающей поверхности земли и способной принести ущерб.

Тогда задача оптимального управления микроструктурой облака формулируется следующим образом: для управляемой системы (1) - (3) найти допустимый вид управляющей функции (4), доставляющей минимум функционалу (5):

$$F[f_2, u] \rightarrow \min. \quad (6)$$

Поскольку и функции распределения $f_1(x, z, m, t)$ и $f_2(x, z, m, t)$ облачных частиц, описывающие состояние объекта распределения (микроструктуры облака), и управление $u(x, z, m, t)$ имеют распределенный характер, то имеем задачу оптимального управления с распределенными параметрами [8].

Следует отметить, что, несмотря на трудности реализации данного подхода, он является весьма эффективным и дает интересные результаты [7].

Третьим подходом к разработке методов управления процессами осадкообразования в облаках, развиваемым в настоящее время в ВГИ, является подход, основанный на использовании теории бифуркации. Данный подход, по нашему мнению, существенным образом может расширить возможности решения данной проблемы. Отметим, что под бифуркацией понимается переход динамической системы в новое качественное состояние при малом плавном изменении одного или нескольких параметров [2]. В задаче разработке метода воздействия на градовые облака, например, в качестве параметров бифуркации будут выступать параметры источника, характеризующие его положение в облаке и интенсивность внесения искусственных кристаллов, а также параметры функции распределения по размерам искусственных кристаллов. Задача заключается в нахождении таких значений этих параметров (бифуркационных параметров), при которых облако переходит из градового состояния в не градовое состояние.

Исследования в данном направлении, т.е. исследования для нахождения точек бифуркации проводятся в двух направлениях. В первом из них для нахождения этих точек используется модель с распределенными параметрами, т.е. отмеченная выше модель микрофизических процессов в градовых облаках с заданной термогидродинамикой. Второе направление основано на использовании модели с сосредоточенными параметрами, которая получается в результате преобразования методом Галеркина используемой в первом направлении модели микрофизических процессов в градовых облаках. Использование модели с сосредоточенными параметрами к нахождению точек бифуркации связано с тем, что данный подход в настоящее время лучше отработан, чем первый. В результате сравнительного анализа этих подходов будет определен более эффективный из них и на его основе будут проведены исследования по разработке методов управления процессами осадкообразования в конвективных облаках. При этом планируется переход к более сложным моделям облаков, например, к трехмерной модели с детальным учетом процессов.

В заключение отметим, что изложенные подходы разработке методов управления процессами осадкообразования в облаках являются универсальными, т.е. их можно использовать как для разработки методов предотвращения градобитий, так и методов регулирования осадков.

Список литературы

1. Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Барекова М.В., Малкарова А.М. Руководство по организации и проведению противогородовых работ.- Нальчик: «Печатный двор», 2014.- 508с.
2. Андронов А. А., Леонтович Е. А., Гордон И. М., Майер А. Г. Теория бифуркаций динамических систем на плоскости. М.: Наука, 1967.
3. Ашабоков Б.А., Федченко Л.М., Тапасханов В.О., Шаповалов А.В. и др. Физика градовых облаков и активных воздействий на них: состояние и направления развития. – Нальчик: «Печатный двор», 2013.-216с.
4. Ашабоков Б.А., Шаповалов А.В. Конвективные облака: численные модели и результаты моделирования в естественных условиях и при активном воздействии. – Нальчик: Издательство КБНЦ РАН, 2008.–254 с.
5. Ашабоков Б.А., Федченко Л.М., Шаповалов А.В., Езаова А.Г. Результаты моделирования влияния структуры ветра в атмосфере на процессы облакообразования // Известия КБНЦ РАН. 2014. № 4 (60). С. 21-28.
6. Ашабоков Б.А., Федченко Л.М., Шаповалов А.В., Шоранов Р.А. Численные исследования образования и роста града при естественном развитии облака и активном воздействии // Метеорология и гидрология, 1994. № 1.- С.41-48.
7. Ашабоков Б.А., Шаповалов А.В. Численная модель управления формированием микроструктуры градовых облаков // Известия АН, ФАО т. 32, №3,1996.
8. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф. Математическая теория оптимальных процессов.// М.: «Наука». 1976.- стр.392.
9. Straka, J. Cloud and Precipitation Microphysics: Principles and Parameterizations. Cambridge: Cambridge University Press. 2009. - 408 P.
10. Khvorostyanov, V.I., Curry, J.A. Thermodynamics, Kinetics, and Microphysics of Clouds. Cambridge University Press. 2014. - 777 P.

РАЙОНИРОВАНИЕ ТЕРРИТОРИИ КАБАРДИНО-БАЛКАРСКОЙ РЕСПУБЛИКИ ПО СТЕПЕНИ ГРАДОВОЙ АКТИВНОСТИ

Инюхин В.С., Лиев К.Б., Кушев С.А.

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

В последние годы отмечается устойчивая тенденция увеличения числа интенсивных градобитий практически во всех градоопасных регионах планеты. Кроме этого, существенно расширяется и география выпадения града. Катастрофические градобития отмечаются там, где выпадал только мелкий град или же вообще не отмечалось выпадений града. Ущерб, наносимый градом в районах интенсивного земледелия, исчисляется сотнями миллионов долларов в год. Потери от града в крупных городах иногда достигают таких же значений за одно градобитие. Так, в 1995 году в Далласе ущерб от градобития составил 1.1 миллиарда долларов, в 1990 году интенсивное градобитие в Денвере нанесло ущерб в 900 миллионов, 800 миллионов составил ущерб от града в Сиднее в 1999 году и около 500 миллионов в Мюнхене в 1984 году [5].

Как известно, наиболее градоопасными территориями Российской Федерации являются Краснодарский край и республики Северного Кавказа. Расположение района в сложных физико-географических условиях, близость бассейна Черного моря, лежащего на пути западных вторжений, способствует формированию неустойчивой воздушной массы с повышенным увлажнением, что является оптимальным условием для активизации конвективных процессов и развития мощных градовых облаков. Когда к этим факторам добавляется проникновение арктической воздушной массы с севера, возникают уникальные синоптические условия, формирующие холодные фронты с экстремальным контрастом температур. Именно в такие дни отмечаются градовые облака, с которыми связаны катастрофические градобития. Учитывая, что эти районы являются территориями с интенсивной сельскохозяйственной деятельностью, вопросы распределения ущерба от града и повторяемости его выпадения приобретают особую значимость.

С другой стороны, в соответствии с Федеральным законом «О развитии сельского хозяйства» неблагоприятными для производства сельскохозяйственной продукции признаются территории, на которых вследствие природно-климатических условий, состояния почвы, а также социально-экономических факторов уровень доходов сельскохозяйственных товаропроизводителей ниже, чем в среднем по сельскому хозяйству. Порядок и критерии отнесения территорий к неблагоприятным для производства сельскохозяйственной продукции определяется этим же законом. В нем к неблагоприятным для производства сельскохозяйственной продукции территориям на основе климатических условий относят только сильные засухи и переувлажнения почвы.

Росгидромет полагает необходимым определить районы с интенсивными и частыми градобитиями как территории с неблагоприятными для производства сельскохозяйственной продукции на основе климатических условий.

В связи с этим, целью данной работы является выявление территорий с высокой градовой активностью в Кабардино-Балкарской республике по данным многолетних радиолокационных исследований проводимых в Высокогорном геофизическом институте (ВГИ) в последние годы. Основу экспериментального материала составили результаты многочасовых непрерывных радиолокационных наблюдений градовых процессов, проводимых с использованием автоматизированной системы сбора, обработки и анализа радиолокационных данных MeteoX [4]. Определение областей локализации града в облаке (градового очага) и его выпадения у земли реализуются в соответствии с двухволновым методом индикации града по значениям отношения радиолокационной отражаемости на двух длинах волн (в нашем случае $\lambda_1=3.2$ см и $\lambda_2=10$ см) [4].

Для каждого градового процесса строилась карта выпадения града. На основе таких карт формировались интегральные карты выпадения града за каждый год наблюдений. На рис. 1 представлены карты градоопасности за 2011г., 2012г., 2013г. и карта средней градоопасности за указанные три года наблюдений.

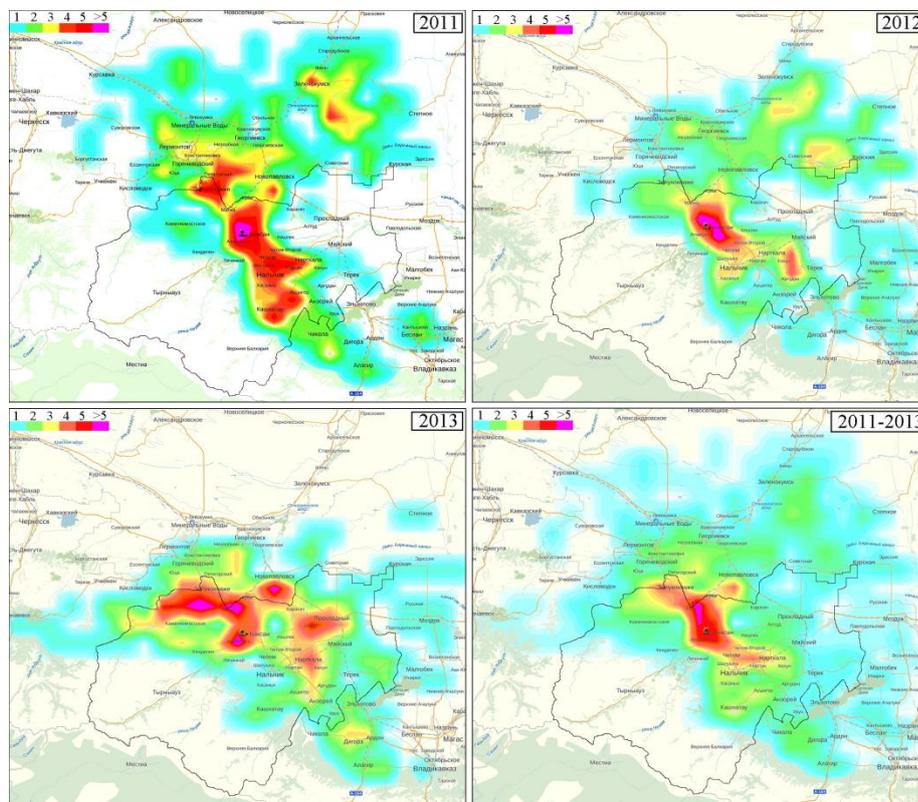


Рис.1. Карты сезонной градоопасности за 2011 – 2013 годы и карта средней градоопасности за указанные три года.

Как видно из рис. 1, в 2011 году град выпадал преимущественно двумя параллельными главному Кавказскому хребту полосами. Первая – на севере в Ставропольском крае от района г. Зеленокумск до Ростовановского водохранилища на границе с КБР. Вторая более мощная – на юге от района Минеральных Вод до селений Дур-Дур и Карман РСО Алания. Эта полоса проходит через населенные пункты Пятигорск, Залукокоаже, Малка, Баксан, Чегем, Шалушка, Нальчик, Хасанья, Аушигер, Кашхатау, Чикола, Алагир. Такая траектория градовых облаков хорошо известна из литературных источников [2,3]. Практически речь идет о наиболее повторяющейся траектории, характерной, как для суперячейковых, так и для отдельных долгоживущих ячеек многоячейковых градовых процессов. С различными вариациями эта траектория проходит от Кисловодска до Владикавказа. Как видно из рис.1, она и в последующие годы определяет места частых градобитий. Больше всего случаев выпадения града в 2011 году было, в предгорных зонах Зольского, Баксанского, Чегемского, Черекского районах. В равнинной части республике града почти не наблюдалось.

За период с июня по август 2012 года по району наблюдений отмечено 16 дней с градом. При этом чаще всего град выпадал в Баксанском, Урванском, Лескенском районах и в предгорной части Чегемского района.

В сезоне 2013 года в районе наблюдений отмечен 21 день с градом. Из рис.1 видно, что в 2013 году с мая по август наибольшая часть зон выпадения града пришлась на Зольский, Баксанский, Урванский и Прохладненский районы Кабардино-Балкарии, а также на Кировский район Ставропольского края и Дигорский район РСО-Алания. Причем максимум повторяемости, расположенный в Зольском районе, связан с другой группой типичных траекторий градовых облаков, описанной в [4]. Это траектории градовых ячеек, первое радиозоо которых обычно регистрируется в междуречье верховий Малки и Кубани. Подавляющее большинство из таких облаков в процессе своего развития выходят на равнинные районы Кабардино-Балкарии и Ставропольского края, нанося существенный ущерб сельскохозяйственным культурам.

Среднее значение повторяемости зон выпадения града по всем трем годам наблюдений, представленное на рис.1, показывает, что площадь территории КБР, где град выпадает 3 и более раз за сезон составляют около 1325 км² или 18,6% от общей площади земель сельскохозяйственного значения. Наиболее градоопасным в этот период являлся Зольский район, особенно его северная часть. Следует отметить, что среднесезонное количество выпадений града в эти годы убывало с северо-запада на юго-восток.

Аналогичным образом были обработаны данные за период с 2003 по 2015 годы. На рис.2 представлена карта интегральной градоопасности региона исследования за указанный период.

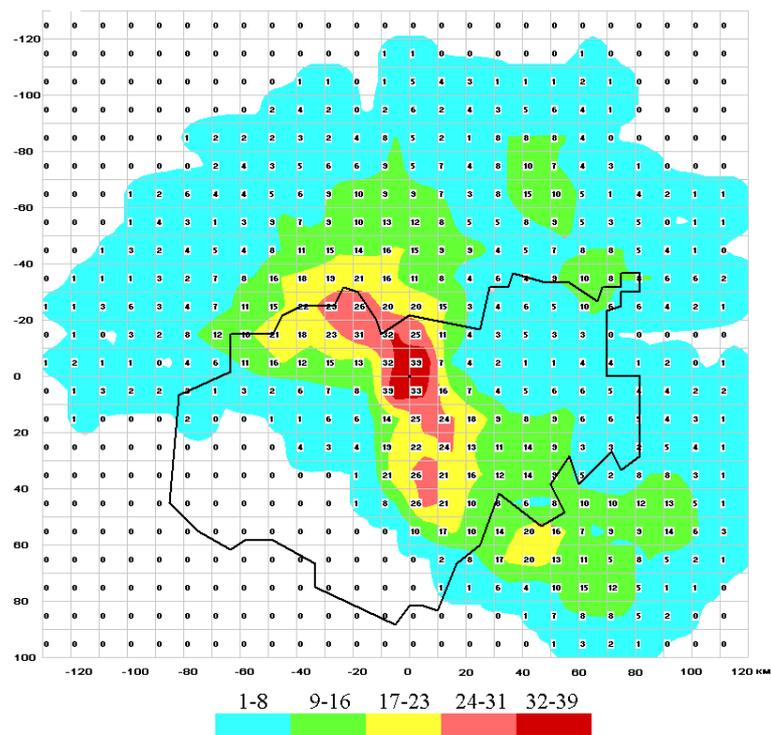


Рис.2. Карта интегральной градоопасности региона исследования за период с 2003 по 2015 годы. В каждом квадрате сетки указано число выпадений града.

Рис. 2 дает полное представление о распределении мест выпадения града по территории исследования в период с 2003 по 2015 г. Рисунок отражает общую тенденцию формирования градовых облаков преимущественно в горной зоне республики, и дальнейший выход на предгорную и равнинную части в процессе своего развития. При этом именно в предгорной зоне наблюдается максимум повторяемости выпадений града за указанный период. В степных районах республики выпадений града значительно меньше.

Наибольший практический интерес представляет наложение результатов, представленных на рис.2 на административную карту Кабардино-Балкарии. В этом случае представляется интересная возможность для оценки степени градоопасности каждого из районов республики. Учитывая то, что поля выпадения града могут быть получены только с использованием радиолокационной информации, выполненный анализ является единственной возможностью оценить степень градоопасности каждого административного района, и выявить критерии отнесения территорий к неблагоприятным для производства сельскохозяйственной продукции.

На рис. 3. приводится карта интегральной градоопасности региона исследования на фоне административного деления Кабардино-Балкарии.

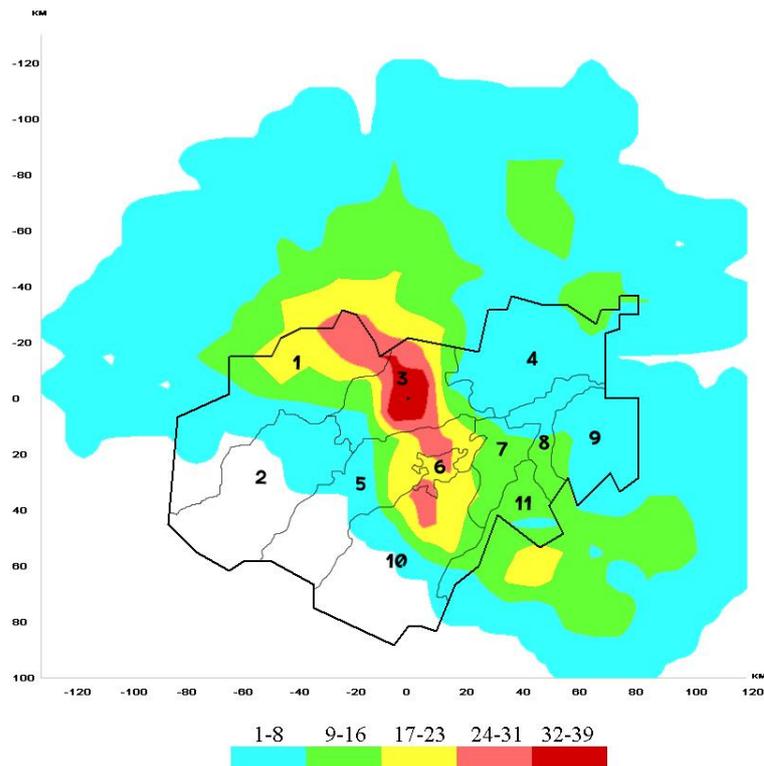


Рис.3. Карта интегральной градоопасности региона исследования за период с 2003 по 2015 годы на фоне административного деления Кабардино-Балкарской республики. Цифрами на карте обозначены районы республики: 1 – Зольский, 2- Эльбрусский, 3- Баксанский, 4 – Прохладненский, 5 – Чегемский, 6 - г.о. Нальчик, 7 – Урванский, 8 – Майский, 9 – Терский, 10 – Черекский, 11- Лескенский

Сопоставительный анализ рисунков 2 и 3 показывает, что максимум повторяемости выпадения града в указанный временной период приходился на территорию центральной части Баксанского района. Именно здесь отмечались квадраты с наибольшим количеством выпадения града. Здесь следует сразу же отметить, что речь идет о количестве выпадений града на данную территорию, а не о числе дней с выпадением града. В течение одного дня наблюдений над одной и той же территорией могут пройти несколько градовых ячеек. В этом случае локализатор регистрирует несколько случаев выпадения града. Как видно из рис.2 и 3 высокие значения градоопасности отмечаются также в северной части Черекского района и в городском округе Нальчика.

Рисунки 2 и 3 дают в основном качественное представление о распределении мест выпадения града над территорией исследования. Для более объективного анализа степени градоопасности каждого конкретного района республики в данной работе предлагается введение коэффициента градоопасности K_i , который определяется отношением числа выпадений града к общей площади района, подверженной градобитиям. Другими словами, речь идет только о площади, на которой за время исследования отмечался хотя бы один случай выпадения града.

Значение K_i делится на число лет в выборке экспериментального материала, чтобы коэффициент был нормирован к сезонной градоопасности и не зависел от размеров выборки. В таблице 1 для каждого района республики приводятся значения количества выпадений града за исследуемый период, коэффициент градоопасности K_i и отношение коэффициента градоопасности каждого района к его среднему значению по республике K_i/K_{cp} .

Таблица 1

Градоопасность административных районов Кабардино-Балкарской республики

N	Административные районы	Кол-во выпадений града	Коэффициент градоопасности K_i	K_i/K_{cp}
1	Баксанский район	217	0,26	2,18
2	Зольский район	281	0,13	1,11
3	Лескенский район	80	0,16	1,30
4	Майский район	32	0,08	0,69
5	Прохладненский район	64	0,05	0,40
6	Терский район	57	0,06	0,53
7	Урванский район	58	0,15	1,21
8	Чегемский район	69	0,12	1,00
9	Черекский район	144	0,16	1,33
10	Эльбрусский район	21	0,04	0,29

Как видно из таблицы наибольшее число выпадений града отмечалось в Зольском районе республики, однако наибольшее значение K_i имеет Баксанский район. Именно на территории этого района и отмечался максимум числа выпадений града, согласно рисунков 2 и 3. Среднее значение K_i по всем десяти районам республики K_{cp} составляет 0.12. Естественно предположить, что среднее значение K_i может служить критерием отнесения территории к районам с интенсивными и частыми градобитиями, т.е. к районам с неблагоприятными условиями для производства сельскохозяйственной продукции. Как видно из таблицы 1, коэффициент градоопасности K_i Баксанского района более чем в 2 раза превышает среднее значение по республике. В то же время для наименее градоопасной территории Эльбрусского района это значение в три раза меньше, чем среднее по республике.

Таким образом, на основе многолетних радиолокационных наблюдений градовых процессов удалось выявить наиболее градоопасные районы Кабардино-Балкарской республики. Полученные карты интегральной градоопасности района исследования за период с 2003 по 2015 г. показали, что максимум повторяемости выпадения града в указанный временной период приходился на территорию центральной части Баксанского района. Введенный в работе коэффициент

градоопасности может быть использован в качестве критерия для оценки территорий с неблагоприятными условиями для производства сельскохозяйственной продукции.

Список литературы

1. Инюхин В.С., Суслов В. В. Алгоритмы автоматизированного распознавания и анализа радиоэха облаков // Труды ВГИ, 2010. – Вып. 96. – С. 89-100.
2. Газаева З.А., Макитов В.С. Распределение траекторий перемещения многоячейковых градовых процессов на Северном Кавказе // Труды ВГИ. 1991. Вып. 80. С. 93–99.
3. Инюхин В.С., Кущев С.А., Лиев К.Б., Макитов В.С. Радиолокационные исследования распределения зон формирования первого радиоэха градовых облаков // Известия РАН. Физика Атмосферы и Океана, 2016, том 52, № 6, с. 1–8
4. Makitov V. Radar measurements of integral parameters of hailstorms used on hail suppression projects, *Atmospheric Research*, 83, 380-388, 2007.
5. Roman Hohl, Hans-Heinrich Schiesser, Ingeborg Knepper 2002, The use of weather radars to estimate hail damage to automobiles: an exploratory study in Switzerland, *Atmospheric Research* 61 (2002) 215– 238

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ НАЗЕМНЫХ АЭРОЗОЛЬНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ДЛЯ ИСКУССТВЕННОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ОСАДКОВ

**Петрунин А.М.¹, Корнеев В.П.¹, Колосков Б.П.¹, Бычков А.А.¹,
Частухин А.В.¹, Данелян Б.Г.²**

¹ АНО «Агентство АГТЕХ», г. Москва

² ФГБУ «ЦАО», г. Долгопрудный

Работы по активным воздействиям (АВ) на переохлажденные облака с целью предотвращения выпадения града, рассеивания облаков, искусственного увеличения осадков (ИУО) были начаты в середине прошлого века. Основным способом воздействия является доставка в облака льдообразующих аэрозолей или хладагентов, которые при попадании в переохлажденную часть облака приводят к формированию дополнительных ледяных кристаллов в облаке, которые в дальнейшем служат зародышами осадков.

Обычно получение льдообразующих аэрозолей осуществляется при термической возгонке льдообразующих реагентов типа йодистого серебра AgI. Это происходит, например, при сжигании ацетоновых растворов или пиротехнических составов с AgI.

В настоящее время в мировой практике активных воздействий на облака с целью искусственного регулирования осадков (ИРО) и предотвращения выпадения града широко используются наземные аэрозольные пиротехнические и ацетоновые генераторы, диспергирующие льдообразующий аэрозоль на основе йодистого серебра (рис.1).

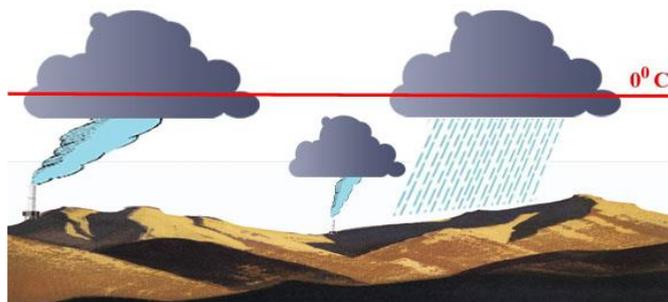


Рис. 1. Схема воздействия наземными аэрозольными генераторами.

Наземные генераторы используются в основном для воздействия на орографические облака в предгорных и горных районах с целью увеличения осадков и в работах по борьбе с градом. Чаще всего генераторы устанавливаются с наветренной стороны, где наблюдаются наиболее сильные восходящие потоки. Подъем воздуха вдоль горных склонов и конвекция обеспечивают подъем льдообразующего аэрозоля до уровня, где реагент проявляет свою активность. Несомненным достоинством применения наземных генераторов при проведении АВ на облака является их простота и относительная дешевизна по сравнению с самолетными и ракетно-артиллерийскими способами засева облаков.

Наземные генераторы широко применяются в таких странах, как Марокко, США, Куба, Испания, Франция, Канада, Бразилия, Аргентина и др. В частности, в Марокко, США и на Кубе наземные генераторы используются в программах по ИУО, во Франции, Испании, Бразилии, Аргентине – в противогорадовых работах. В настоящее время противогорадовые работы с использованием наземных генераторов успешно проводятся в провинциях Zaragosa и Lerida (Испания) и в провинции Santa Catarina (Бразилия). Результаты проведенных работ свидетельствуют о том, что в разных странах использование наземных генераторов для воздействия на градовые облака позволяет снизить риски на 40–50%, а при вызывании дополнительного количества осадков произвести их увеличение на 20–70% [1,2,3,4].

Ниже рассматриваются вопросы планирования и оценки эффективности проведения работ по ИРО и предотвращению града с использованием наземных генераторов.

На этапе планирования работ по ИРО и борьбе с градом решается задача для конкретной территории и конкретных метеорологических условий, выбираются технические средства и схемы воздействия, оценивается экономическая эффективность и, как следствие, целесообразность проведения планируемых работ.

Планирование работ по ИРО и градозащите включает в себя следующие этапы:

- анализ географического положения и орографических особенностей района проведения работ;
- анализ синоптико-климатических характеристик региона и данных об облаках и осадках на территории работ;
- обоснование и выбор периода проведения работ по ИРО и градозащите;
- выбор средств воздействия и разработка возможного алгоритма работ;
- численное моделирование процессов АВ на различные типы облаков;
- оценка экономической эффективности и целесообразности проведения работ по ИРО и градозащите на выбранной территории;
- оценка экологических последствий проведения работ по АВ на облака.

Общая схема планирования работ по ИРО и борьбе с градом показана на рис. 2.

Анализ многочисленных проектов по АВ на облака, а так же результатов расчетов показывают, что эффективность применения наземных аэрозольных генераторов зависит от учета географического положения и орографических особенностей района проведения работ, знание которых позволяет правильно рассчитать поле ветра в пограничном слое и восходящие потоки.

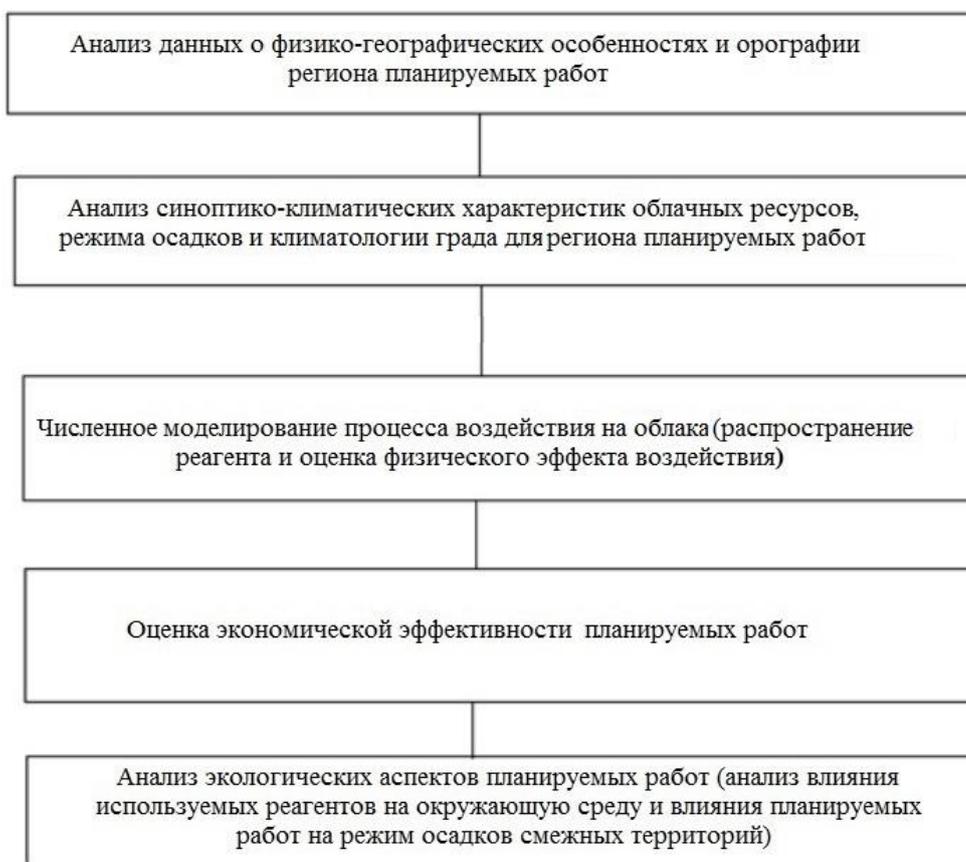


Рис.2. Схема планирования работ по ИРО и борьбе с градом.

Анализ синоптико-климатических характеристик региона и данных об облаках и осадках на территории работ включает в себя исследования:

- среднегодового количества осадков за выбранный период (желательно 20-30 лет) и изменчивости осадков от года к году;
- годового хода осадков и среднего месячного количества осадков по каждому месяцу;
- среднего количества дней с осадками и градом по каждому месяцу;
- среднего количества рабочих дней по каждому месяцу.
- среднего количества аэрозольных жидкостных и (или) пиротехнических генераторов по каждому месяцу;
- среднемесячной температуры воздуха;
- преобладающего направления ветра в дни с осадками и градом;
- типа облачности;
- температуры верхней границы облаков.

Анализ вышеперечисленных синоптико-климатических характеристик позволяет сделать заключение о наиболее подходящем периоде для проведения активных воздействий на облака с целью ИРО и предотвращению града.

В работах по ИРО и градозащите предполагается использовать российские наземные аэрозольные пиротехнические НАГ-07М (рис. 3а) и жидкостные генераторы НАГ-07А (рис. 3б), которые производят непрерывное диспергирование льдообразующего аэрозоля йодистого серебра в приземном слое [5]. Основные технические характеристики генераторов приведены в Таблице 1.



(а)



(б)

Рис. 3. Наземный аэрозольный генератор НАГ-07М (а) и НАГ-07А (б).

Основные характеристики генераторов

№ п/п	Наименование параметра	Значение для НАГ-07М	Значение для НАГ-07А
1.	Расход реагента	Не менее 1380 г/час	1,1 л/час
2.	Расход AgI, г/час	Не менее 110	8,8
3.	Время непрерывной работы генератора, час	8	16
4.	Выход льдообразующего аэрозоля при минус 10°C, част/сек, не менее	10^{13}	10^{12}
5.	Управление	Дистанционное	Ручное

Как известно, решающим фактором при проведении АВ на переохлажденную облачность для получения положительного эффекта воздействия является внесение в неё достаточного количества льдообразующих аэрозольных частиц [7].

Выше было отмечено, что эффективность применения наземных аэрозольных генераторов зависит от орографии местности, поля ветра в пограничном слое и восходящих потоков. В связи с этим для каждого региона, где проводится работа по АВ, необходимо проводить исследования процесса переноса льдообразующего аэрозоля при работе генераторов с учетом реальной орографии местности и метеорологических условий.

Для изучения распространения аэрозоля в атмосфере от наземных генераторов, выбора мест их расположения с учетом орографии местности и синоптических условий используется разработанная в АНО «Агентство АТТЕХ» трехмерная численная модель «SeedDisp» [6].

Модель «SeedDisp» позволяет проводить численное моделирование переноса реагента в подоблачном слое при АВ на облака с помощью разных типов аэрозольных генераторов, обеспечивающих диспергирование реагента на разных высотах в подоблачном слое.

Модель позволяет определить как осуществляется перенос реагента в подоблачном слое, достигает ли реагент нижней границы облака и какова при этом его концентрация при проведении АВ различными типами генераторов, использующих в качестве реагента йодистое серебро.

Результаты расчетов переноса льдообразующего реагента при различных метеорологических условиях и орографии местности позволяют сделать вывод, что для создания над защищаемой территорией на уровне конденсации однородного поля льдообразующего аэрозоля с концентрацией, позволяющей успешно проводить активные воздействия на облака с целью ИУО или борьбы с градом генераторы необходимо расставлять перпендикулярно ветровому переносу на расстоянии от 4 до 12 км друг от друга и на удалении 8-30 км от мишени или защищаемой территории в зависимости от скорости ветрового переноса. При этом плотность размещения наземных генераторов должна составлять, ориентировочно, один генератор на 50 км^2 .

Анализ различных схем размещения генераторов, используемых в мировой практике АВ (квадрат, ромб и т.д.), показал, что наиболее рациональной является гексагональная схема (рис.4), в которой генераторы размещаются в центрах описанных вокруг гексаэдров окружностей радиуса R . Так, при расстоянии между соседними генераторами $A = 7$ км (радиус $R = 4$ км) площадь, обслуживаемая одним генератором, будет составлять около 50 км^2 .

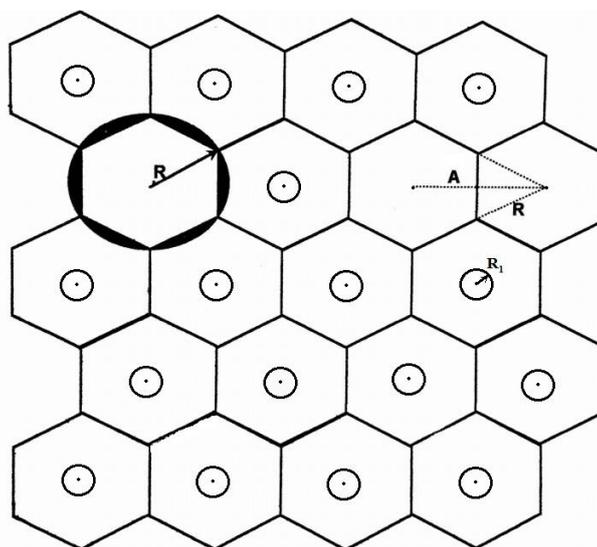


Рис.4. Схема расстановки наземных аэрозольных генераторов.

При использовании данной схемы расположения генераторов будут включаться только те генераторы, которые по результатам расчета переноса реагента по численной модели «SeedDisp» и радиолокационной информации о перемещении облачных систем обеспечивают поле льдообразующих частиц необходимой концентрации над мишенью.

Для иллюстрации засева облаков на рис. 5 приведен пример полученных с помощью модели «SeedDisp» результатов численного моделирования распространения льдообразующих частиц (частиц/м³) в горизонтальной и вертикальной плоскостях при воздействии наземными аэрозольными генераторами йодистого серебра НАГ-07М.

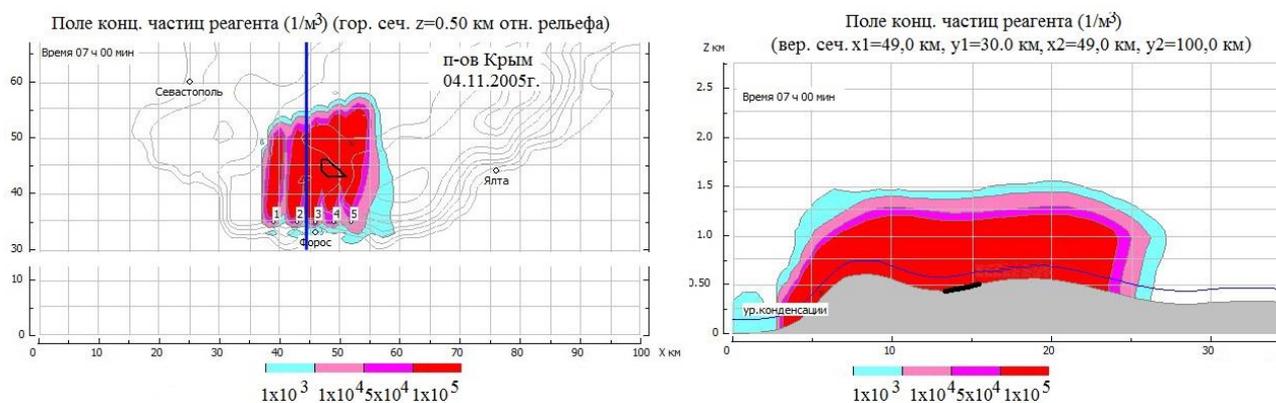


Рис. 5. Концентрации льдообразующих частиц (частиц/м³) в горизонтальной и вертикальной плоскостях через 1 час после начала воздействий НАГ-07М.

Немаловажным вопросом при проведении АВ на облака наземными аэрозольными генераторами является экологическая безопасность. Загрязнение окружающей среды при воздействиях на облачные процессы наземными генераторами йодистого серебра связано в основном с загрязнением атмосферного воздуха, почвы и воды продуктами сгорания пиротехнических составов или растворов с льдообразующим реагентом. Эти продукты сгорания, вносимые наземными генераторами при воздействиях на облачные процессы с целью предотвращения выпадения града или увеличения осадков над заданными территориями, частично вымываются осадками и попадают в почву и открытые водоемы, частично остаются в атмосфере и в дальнейшем переносятся воздушными потоками. В общем случае основным загрязняющим веществом, согласно имеющимся данным о продуктах сгорания пиротехнических составов и растворов, являются аэрозольные комплексы йодида серебра.

В зависимости от размера территории работ по АВ обычно используются небольшие количества льдообразующего реагента. Как правило для наземных генераторов это составляет 5-25 г йодистого серебра в час работы генератора.

В работах, выполненных за рубежом были проанализированы десятки тысяч образцов проб, собранных после засева облаков в течение тридцатилетнего периода, показавшие, что средняя концентрация серебра в дождевой воде, снеге и в поверхностных водах, как правило, меньше, чем 0,01 микрограмм на литр. С 1980-х годов были изучены более 100 рек и озер Сьерра-Невады (США) на территориях проведения АВ. В водоемах, осадках и в пробах донных отложений озер не было обнаружено серебра в концентрациях выше естественного фона и каких-либо доказательств о накоплении серебра после более пятидесяти лет непрерывных операций по засеву облаков. Эти исследования проводились в рамках мониторинга окружающей среды для определения возможного воздействия на озера при засеве облаков. Никаких доказательств повышения содержания серебра выше фонового уровня после засева облаков обнаружено не было.

Анализ химического состава водоемов и дождевой воды из образцов, собранных во время летней программы по засеву облаков в Испании, показал, что вклад серебра от засева облаков был неотличим от естественных фоновых значений. Греческие ученые, изучавшие воздействие AgI на почву, растения и их физиологию, атмосферные осадки, планктон, животных и человека при проведении греческой программы засева облаков, после обработки и анализа 2500 образцов почвы получили аналогичные результаты.

По результатам выполненного анализа WEATHER MODIFICATION ASSOCIATION (WMA) было сформулировано следующее заявление: «В опубликованной научной литературе четко показано, что не было обнаружено никаких экологически вредных последствий после засева облаков аэрозолями йодистого серебра, и, как ожидается, не будет. На основе этой работы WMA считает, что йодид серебра является экологически безопасным при проведении программ

по засеву облаков» и, в соответствии с этим, можно утверждать, что применение в активных воздействиях наземных жидкостных и пиротехнических генераторов аэрозолей йодистого серебра не оказывает отрицательного воздействия на окружающую среду или здоровье человека.

Заключение

1. Исследования результатов проведенных в мире работ по искусственному регулированию осадков и предотвращению града с использованием наземных аэрозольных генераторов свидетельствуют, что при воздействии на градовые облака риски градобития снижаются на 40–50%, а при искусственном увеличении осадков достигается их увеличение на 20–70%.

2. Представленная в докладе схема планирования и проведения работ по ИРО и градозащите с использованием наземных пиротехнических и (или) ацетоновых аэрозольных генераторов может явиться основой разрабатываемой методики ИРО.

3. Использование численного моделирования позволяет выработать эффективную схему расстановки наземных генераторов.

4. Многочисленными мировыми исследованиями подтверждается, что при проведении программ по засеву облаков с применением наземных жидкостных и пиротехнических генераторов аэрозолей йодистого серебра не оказывает отрицательного воздействия на окружающую среду и здоровье человека.

Список литературы

1. Bishop J.T. Six weeks of cloud seeding in South-Western Alberta. // J. Weather Modif. – 1978. – Vol.10 - № 1 - P.51-53.

2. Bishop J.T. The increase in the number of rain and a decrease of hailstone in a project in south-west Alberta (Canada). // J. Weather Modif. – 1979. – Vol.11 - № 1 - P.71-72.

3. Program graduading activities of the National Association for research and fight against dangerous meteorological phenomena (France): 1976 // Assoc. Nat. Lutte Contre Fleaux Atmos. 1977. № 25. P. 3-38.

4. Program graduading National Association for research and fight against dangerous meteorological phenomena (France): 1978//Assoc. Nat. Lutte Contre Fleaux Atm. 1980. №28. P.2-18.

5. Петрунин А.М., Частухин А.В., Бычков А.А. // Современные наземные генераторы льдообразующих аэрозолей для активных воздействий на облака. / Матер. VI Всероссийской научной конференции «Проблемы военно-промышленной геофизики и контроля состояния природной среды». – СПб. – 2016. – С. 105-109.

6. Петрунин А.М., Корнеев В.П., Колосков Б.П., Частухин А.В., Бычков А.А., Ким Н.С., Сергеев Б.Н. Исследования распространения льдообразующего реагента в пограничном слое атмосферы при воздействии наземными аэрозольными генераторами «НАГ-07М». // Научный

журнал Северо-Кавказского федерального университета «Наука. Инновации. Технологии». - 2016 - №3 - С. 69-82.

7. Деннис А. Изменение погоды засевом облаков. / А. Деннис. – М.: Мир, 1983. – 272 с.

ИСКУССТВЕННЫЕ ОБЛАКА И ТУМАНЫ КАК ПЕРСПЕКТИВНОЕ СРЕДСТВО РЕШЕНИЯ ХОЗЯЙСТВЕННЫХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Доронин А.П., Кулешов Ю.В., Петроченко В.М., Щукин Г.Г.

Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского, г. Санкт-Петербург

Исследования и наблюдения последних лет убедительно показали, что в атмосфере могут наблюдаться искусственные атмосферные образования (ИАО). Анализ работ в этой области позволил сделать вывод о том, что ИАО могут быть разделены на две группы [1]:

- антропогенные атмосферные образования, то есть атмосферные образования, связанные непосредственно с хозяйственной деятельностью человека;

- искусственные облака и туманы (ИОТ), то есть атмосферные образования, созданные в результате целенаправленных действий человека с применением определенных методов и средств модифицирования атмосферы.

В настоящей работе основным объектом исследования выбраны ИОТ, которые могут создаваться в различных физико-географических районах нашей страны и в различные сезоны года, на различных высотах в атмосфере (от земной поверхности до 8 – 12 км), на больших площадях (сотни – тысячи км²) и в течение длительного времени (часы – десятки часов). Кроме того, создание ИОТ позволяет решать широкий круг хозяйственных и экологических задач (см. рис. 1), а также приносить значительную выгоду (например, стоимость затрат на борьбу с заморозками на площади 1 км² с помощью искусственных туманов в 2 – 3 раза ниже, чем при использовании дымовых завес) [1].

Физические основы создания ИОТ базируются на [2, 3]:

- способности ряда химических веществ поглощать водяной пар из атмосферы при относительной влажности воздуха менее 100%;

- наличию в атмосфере слоев, в которых наблюдается недонасыщение над водой, но перенасыщение над льдом;

- наличии в атмосфере вертикальной неустойчивости.

Выполненный к настоящему времени анализ современных методов создания ИОТ свидетельствует о том, что на современном этапе представляется возможным создание полей искусственных перистых кристаллических облаков (ИПКО), искусственных конвективных облаков (ИКО), искусственных слоистообразных облаков (ИСО) (теплых и кристаллических), искусственных туманов (ИТ) (теплых и кристаллических) и искусственных низковысотных водно-аэрозольных образований (НВАО) (рис. 2) [4].

Оценивание уровня разработки методов создания ИОТ показало, что они характеризуются различной степенью завершенности. Установлено, что приведенные на рис.2 уровни разработки методов создания ИОТ характеризуются в основном проведением теоретических и экспериментальных исследований, а также выполнением натуральных экспериментов. Сведений о внедрении в оперативную практику методов создания ИОТ в литературе к настоящему времени не приводится [1].

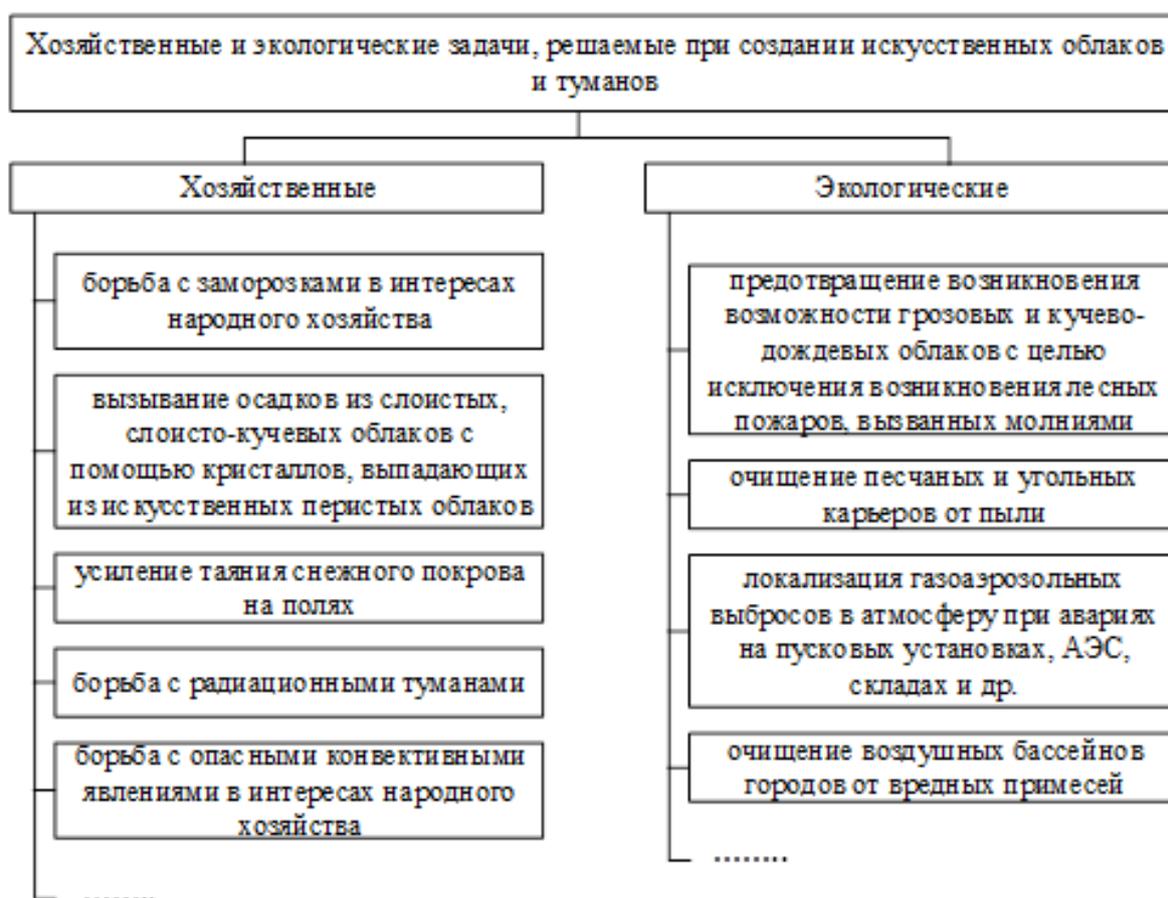


Рис. 1. Перечень хозяйственных и экологических задач, решаемых при создании искусственных облаков и туманов.



Рис. 2. Методы создания искусственных облаков и туманов.

Примечание: ЛА – летательный аппарат; ТМС – тепловая машина специальная; ПАВ – поверхностно-активные вещества.

Для реализации ряда методов создания ИОТ в нашей стране и за рубежом разработаны соответствующие технические средства, которые в общем виде включают в себя следующие:

- самолеты различных типов с потолком набора высоты до 6–12 км, оснащенные специальными генераторами для диспергирования капель воды, аэрозолей и водных растворов кристаллизующих и гигроскопических реагентов, а также установками для диспергирования хладореагентов (твердой углекислоты и жидкого азота), пропана и мелкодисперсной сажи. Используются для создания ИПКО, ИКО, ИСО, ИТ;

- метеотроны различных типов (открытые горелки (метеотрон Дессана), струйные огнеметы (метеотрон Новикова), турбореактивные двигатели (метеотрон Института прикладной геофизики)). Используются для создания конвективных облаков;

- различные инженерные средства, изменяющие альbedo подстилающей поверхности (асфальтирование, зачернение). Применяются для создания конвективных облаков;

- турбовинтовые вертолеты (например, МИ-8, МИ-26). Используются для создания ИСО и ИТ;

- ледоколы различных типов для раскрытия акваторий ото льда. Применяются для создания в холодное полугодие ИСО и ИТ;

- морские суда различных типов, использующие топливо с большим содержанием серы. Могут использоваться для создания ИСО над морем;

- тепловые машины специальные различных модификаций, позволяющие осуществлять диспергирование водных растворов кристаллизующих и гигроскопических реагентов. Применяются для создания ИСО, ИТ и НВАО;

- наземные углекислотные установки. Используются для создания кристаллических ИТ;

- наземные генераторы различных типов для применения кристаллизующих реагентов (например, йодистого серебра) и водных растворов AgI (создание ИТ);

- пиротехнические составы на основе гигроскопических реагентов (создание ИТ).

В качестве примера на рисунке 3 представлены отечественные технические средства, с помощью которых представляется возможным создание ИОТ.

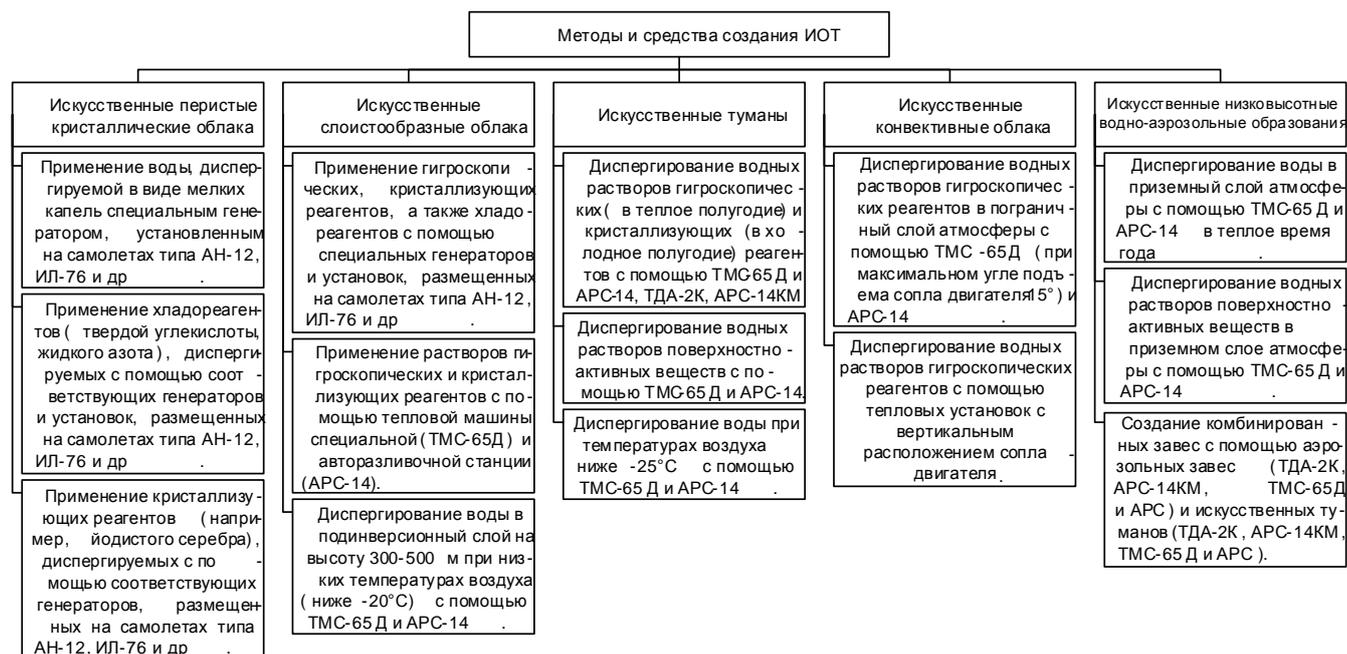


Рис. 3. Методы и средства создания ИОТ.

К настоящему времени в нашей стране проведена серия натуральных экспериментов по созданию ИОТ с помощью соответствующих технических средств отечественного производства.

Первая серия таких экспериментов была проведена в среднем Поволжье в апреле-мае. В качестве технических средств доставки и диспергирования химических реагентов использовались тепловая машина специальная ТМС-65 и авторазливочная станция (АРС).

Метеорологические условия в районе проведения натуральных экспериментов характеризовались следующими значениями: температура воздуха изменялась в пределах от 0,5 до 15,6°C, скорость ветра не превышала 4-5 м/с, а значения относительной влажности воздуха находились в диапазоне от 50-55 до 90-95%. В качестве химических реагентов использовались водные растворы гигроскопических реагентов и поверхностно-активных веществ, в частности, мочевины, поваренной соли, порошки СФ-2У и их смеси определенной концентрации. Водные растворы

химических веществ готовились в емкостях машины АРС-14, а затем по шлангу подавались в сопло двигателя ВАК-1 ТМС-65.

Проведено 12 натуральных экспериментов. Было показано, что с использованием указанных технических средств представляется возможным создание ИТ, ИСО и ИКО. Так, например, пространственно-временные характеристики созданных туманов характеризовались следующими значениями: длина – 4-5 км, ширина 0,3-0,5 км, вертикальная протяженность 100-300 м. Время существования ИТ при относительной влажности воздуха ниже 70% определялось временем работы двигателя. При влажности воздуха 80% и выше оно составляло десятки минут после выключения двигателя.

Во второй серии натуральных экспериментов, проводившихся в феврале в Центральном районе Европейской территории России (ЕТР), в качестве технических средств доставки и диспергирования реагентов использовалась тепловая машина специальная модификации ТДА-2К (тепловой дымовой агрегат). Было проведено 7 натуральных экспериментов. Температурно-влажностный и ветровой режимы в районе проведения экспериментов характеризовались следующими значениями: температура воздуха – изменялась в пределах от 2,2 до 4,6°C, скорость ветра – в пределах от 4 до 7 м/с, относительная влажность воздуха – в пределах от 68 до 97%. В качестве реагентов использовались водные растворы аммиачной селитры, поваренной соли, порошка СФ-2У и их смеси определенной концентрации. Растворы готовились в емкости машины АРС-14, а затем с помощью насоса подавались в сопло двигателя ТДА-2К. В результате проведенных экспериментов была показана возможность использования указанных химических и технических средств для создания ИТ, протяженность которых составляла до 1 км, ширина – 200-300 м, а вертикальная протяженность – 30-50 м. Время существования измерялось десятками минут после выключения двигателя.

Третья серия натуральных экспериментов по созданию ИОТ проводилась в июне-июле в северном районе ЕТР. В качестве технических средств доставки и диспергирования химических реагентов использовалась тепловая машина специальная модификации АРС-2КМ, а в качестве рецептур применялись водные растворы гигроскопических веществ (мочевины и поваренной соли) и ПАВ (порошки СФ-2У), а также их смеси определенной концентрации. Было проведено 10 экспериментов. Синоптические условия в период проведения экспериментов характеризовались следующими значениями характеристик температурно-влажностного режима: температура воздуха – изменялась в пределах от 19 до 29°C; относительная влажность воздуха – изменялась от 74 до 89%; скорость ветра – изменялась в пределах 2-4 м/с.

Созданные ИТ характеризовались следующими пространственно-временными характеристиками: длина слоя тумана – до 500-700 м, ширина – 100-200 м, вертикальная протяженность – 20-30 м. Время существования тумана – десятки минут после выключения двигателя.

Таким образом, результаты проведенных экспериментов по оцениванию возможности создания ИОТ позволяют однозначно сделать положительный вывод о целесообразности применения для этих целей отечественных технических средств, представляющих собой тепловые машины специальные различных модификаций, позволяющих применять водные растворы гигроскопических и кристаллизующих растворов.

Наличие методов создания ИОТ и ряда технических средств для их реализации обуславливает, в свою очередь, необходимость проведения исследований по оцениванию условий, благоприятных для создания ИОТ в конкретных физико-географических районах России и в определенные сезоны года. В частности, результаты таких исследований для ряда районов Северо-Западного региона приведены в работах [5].

Поскольку создание ИОТ осуществляется с использованием химических реагентов и их рецептур, актуальной становится задача по оцениванию экологических аспектов проведения такого рода работ. Выполненные в этом направлении исследования и полученные результаты свидетельствуют о том, что по критерию экологичности проведение операций по созданию ИОТ не только принципиально возможно, но и целесообразно, поскольку применяемые реагенты и их рецептура не наносят никакого заметного негативного воздействия на состояние окружающей природной среды (табл. 1) [6].

Таблица 1

Экологические аспекты, связанные с работами по созданию искусственных облаков и туманов

№ п/п	Наименование химического реагента	Цель применения	Способ применения	Экологические аспекты
1	Твердая углекислота (CO ₂)	Создание искусственных кристаллических перистых и слоистообразных облаков и туманов	1. Диспергирование с борта летательных аппаратов, оснащенных установками для диспергирования CO ₂ 2. Диспергирование с помощью наземных стационарных и мобильных углекислотных установок	- локальное увеличение концентрации углекислого газа в незначительной концентрации в районе создания ИАО
2	Жидкий азот (N ₂)	Создание искусственных кристаллических перистых и слоистообразных облаков и туманов	1. Диспергирование с борта летательных аппаратов, оснащенных установками для диспергирования жидкого азота 2. Диспергирование с помощью наземных стационарных и мобильных установок жидкого азота	- внесение в атмосферный воздух дополнительного количества азота (N ₂) в незначительной концентрации
3	Йодистое серебро (AgI)	Создание искусственных кристаллических перистых и слоистообразных облаков и туманов	1. Диспергирование с борта летательных аппаратов, оснащенных генераторами для диспергирования аэрозоля AgI 2. Диспергирование с помощью наземных генераторов аэрозоля AgI	- локальное загрязнение атмосферного воздуха, почвы и поверхностных вод йодистым серебром в незначительных концентрациях

			3. Диспергирование водных растворов AgI с помощью наземных тепловых машин специальных модификаций ТМС-65Д, АРС-14-КМ, ТДА-2К	
4	Вода	Создание искусственных кристаллических перистых и слоистообразных облаков и туманов	1. Диспергирование с борта ЛА, оснащенных емкостями для хранения воды 2. Диспергирование с помощью наземных тепловых машин специальных модификаций ТМС-65Д, АРС-14-КМ, ТДА-2К	- повышенное влагосодержание в области засева
5	Мочевина	Создание жидкокапельных искусственных туманов, слоистообразных и конвективных облаков	Диспергирование водных растворов мочевины определенной концентрации с помощью наземных тепловых машин специальных модификаций ТМС-65Д, АРС-14-КМ, ТДА-2К	- локальное загрязнение атмосферного воздуха, почвы и поверхностных вод мочевиной в незначительных концентрациях
6	Поваренная соль	Создание жидкокапельных искусственных туманов, слоистообразных и конвективных облаков	Диспергирование водных растворов поваренной соли определенной концентрации с помощью наземных тепловых машин специальных модификаций ТМС-65Д, АРС-14-КМ, ТДА-2К	- локальное загрязнение атмосферного воздуха, почвы и поверхностных вод поваренной солью в незначительных концентрациях; - коррозия металлических частей технических средств
7	Поверхностно-активные вещества (порошок СФ-24)	Создание низкочастотных водноаэрозольных образований	Диспергирование водных растворов ПАВ определенной концентрации с помощью наземных тепловых машин специальных модификаций ТМС-65Д, АРС-14-КМ, ТДА-2К	- локальное загрязнение атмосферного воздуха, почвы и поверхностных вод ПАВ в незначительных концентрациях

Данный вывод в полной мере согласуется с заключениями, сделанными авторами в работе [7], посвященной анализу экологической безопасности российских технологий активных воздействий на облака.

Вместе с тем, вполне очевидно, что расширение работ в области модифицирования облаков естественного и искусственного происхождения и возрастающий интерес общественности к проблемам экологического характера диктуют необходимость дальнейших исследований последствий проведения такого рода мероприятий.

Наличие методов и средств создания ИОТ обуславливает необходимость рассмотрения гидрометеорологического (геофизического) обеспечения (ГМО, ГФО) деятельности хозяйственных отраслей страны как совокупности двух подвидов обеспечения: информационного ГМО (ГФО) и операционного ГМО (ГФО).

Выводы

1. Искусственные облака и туманы могут явиться одним из основных объектов воздействия в различных физико-географических районах страны и в разные сезоны года в интересах решения широкого круга хозяйственных и экологических задач.

2. Проведенные в ряде районов России натурные эксперименты с использованием тепловых машин специальных различных модификаций, осуществляющих диспергирование водных растворов гигроскопических и поверхностно-активных веществ и их смесей определенной концентрации, показали принципиальную возможность создания искусственных туманов, искусственных слоистообразных и конвективных облаков.

Пространственно-временные характеристики искусственных туманов в зависимости от модификации используемого технического средства характеризуются следующими значениями:

длина слоя искусственного тумана – от 500 до 5000 м;

ширина слоя искусственного тумана – от 100 до 500 м;

вертикальная протяженность слоя искусственного тумана – от 20 до 300 м.

Установлено, что время существования искусственных туманов в значительной мере определяется значением относительной влажности воздуха: при значениях относительной влажности менее 70% оно определяется временем работы генератора, а при значениях влажности более 70% – составляет, как правило, десятки минут.

3. Проведение работ по созданию искусственных облаков и туманов с помощью соответствующих гигроскопических и кристаллизующих химических реагентов и их рецептур не приведет к сколь-нибудь заметному негативному воздействию на окружающую природную среду.

Вместе с тем рассмотрение работ в области модифицирования облаков естественного и искусственного происхождения и возрастающий интерес со стороны общественности к проблемам экологического характера обуславливают необходимость проведения дальнейших исследований в области оценивания последствий проведения такого рода мероприятий.

Список литературы

1. Доронин А.П., Мазуров Г.И., Дидык О.И., Жуляев В.В., Фролов К.О. Искусственные атмосферные образования и экология / Труды I Всероссийской научной конференции «Экология и космос» имени академика К.Я. Кондратьева. – СПб.: ВКА имени А.Ф.Можайского. – 2014. – С. 121–126.

2. Козлов В.Н., Мазуров Г.И., Доронин А.П., Коршун Н.А. Физические основы искусственного образования облачности в верхней тропосфере // Труды Главной геофизической обсерватории имени А.И. Воейкова. – 2014. – Вып. 570. – С.261-273

3. Матвеев Л.Т. Физика атмосферы. – СПб.: Гидрометеиздат. – 2000. – 778 с.

4. Доронин А.П., Ивлев Л.С., Кулешов Ю.В., Фролов К.О. Методы создания искусственных атмосферных образований / Сборник трудов VIII Международной конференции «Естественные и антропогенные аэрозоли». СПб, 1 – 5 октября 2012 г. – СПб.: 2013. – С.524-527.

5. Кулешов Ю.В., Доронин А.П., Фролов К.О., Хайруллин К.Ш. Физико-статистический анализ пригодности атмосферных условий в Архангельской области для решения задач планирования и организации работ по созданию искусственных туманов // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2016. – № 42. – С.134-147.

6. Лебедева В.Ю., Доронин А.П., Никульшин Б.Ю., Фролов К.О., Козлова Н.А. Экологические аспекты, связанные с работами по созданию искусственных атмосферных образований в интересах решения хозяйственных и экологических задач / Материалы III Всероссийской научной конференции «Экология и космос» имени академика К.Я. Кондратьева / под общ. ред. Ю.В. Кулешова. – СПб.: ВКА имени А.Ф.Можайского, 2017. – С.221-225.

7. Ким Н.С., Корнеев В.П., Частухин А.В., Щукин Г.Г. Экологические аспекты российских технологий активных воздействий на облака // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2017. – № 46. – С.91-99.

АНАЛИЗ ГРАДОВЫХ ЯВЛЕНИЙ В ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ АЗЕРБАЙДЖАНА ПО ДАННЫМ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Сафаров С.Г., Насибли А.А.

«Национальный Департамент по гидрометеорологии МЭПР Республики Азербайджан»,
г. Баку

Выпадение интенсивного града наносит огромный ущерб сельскому хозяйству, линиям электропередачи, связи и другим коммуникациям, транспорту и сооружениям, а также флоре и фауне. Обычно град сопровождается молнией, выпадением интенсивного ливня и сильным шквальным ветром.

Территория Азербайджана, особенно ее западная часть, является одним из градоопасных регионов Кавказа. Этому благоприятствуют сложный рельеф местности, большие температурные контрасты подстилающей поверхности, своеобразные экспозиции горных склонов, а также взаимодействие холодных арктических и влажных атлантических воздушных масс [3].

В климатологии анализ градовых явлений традиционно проводится по данным наземных станций и пунктов наблюдений. Однако достаточно большое расстояние между ними не позво-

ляет обнаруживать всех градовых явлений, которые имеют локальный характер. Поэтому эти данные не могут объективно характеризовать градовую активность данной территории. Для этих целей целесообразно использовать данные дистанционных методов наблюдений, в особенности метеорологических радиолокаторов.

Преимущество радиолокационного метода заключается в том, что в радиусе обзора можно зондировать любую часть пространства, и таким образом следить за развитием градовых облаков от зарождения до отмирания, оценить градоопасную ситуацию, определить траекторию градовых осадков, размер града и т.д.

С другой стороны, радиолокационные характеристики - высота верхней границы радиоза конвективной облачности H_v (км), его радиолокационная отражаемость Z (dbz), площадь, занятая радиозах и градовым очагом, скорость и направление перемещения облаков и осадков - находятся в тесной физико-статистической зависимости от метеорологических параметров облачной атмосферы.

Для выполнения данной задачи нами была использована радиолокационная методика исследования климатологии градобития [3,4]. В работе использовались материалы радиолокационных наблюдений, проводимых за период 1979-2016 гг. в Акстафинской и Гейгелской радиометеорологических станциях (РМС) Центра радиометеорологии и аэрологии с помощью радиолокатора МРЛ-5. В радиус обзора входят территории Казахского, Акстафинского, Товузского, Шамкирского, Кедабекского, Дашкесанского и др. районов. В 2001 г. в Акстафинской, а в 2013 г. в Гейгельской РМС на базе МРЛ-5 с применением соответствующего программно-технического комплекса была создана автоматизированная система управления радиолокационными наблюдениями, что заметно улучшило качество и оперативность проводимых работ.

С целью уточнения результатов радиолокационных наблюдений в работе также были использованы данные Госстраха, акты повреждений от градобитий и материалы наблюдений наземной гидрометеорологической сети, сообщения с сайтов Интернета и т.д. Таким образом, использовалась вся имеющаяся информация о граде, что позволило получить наиболее полное представление о пространственно-временном распределении градобития по территории [4].

Для распознавания градового состояния облаков, в основном, были использованы следующие радиолокационные критерии [1,2]:

- $Z_{10} < 55$ dbz - не градовое;
- $55 < Z_{10} < 65$ dbz - слабый град с ливнем, без ущерба;
- $65 < Z_{10} < 75$ dbz - град с ущербом (градобитие);
- $Z_{10} > 75$ dbz - катастрофическое градобитие,

где Z_{10} - радиолокационная отражаемость радиоза от облаков на длине волны 10 см.

Для анализа были отобраны только те облака, которые по своим радиолокационным характеристикам удовлетворяли бы одно из двух последних условий, то есть, вызывали градобитие. При необходимости также были использованы критериальные значения других информативных характеристик, таких, как высота верхней границы H_v и высота зоны повышенного радиоза H_{45} .

За рассматриваемый период было analyzed 880 случаев с градобитием.

Суточный ход повторяемости градобитий установлен как для территории отдельных районов, так и в целом (табл. 1).

Таблица 1

Суточный ход повторяемости градобитий (в процентах) за 1979-2016 гг.

Часы суток	0-2	2-4	4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	22-24
Актафа	1	3	2	1	0	0	3	14	29	20	20	8
Газах	2	5	1	0	0	0	1	16	24	20	19	9
Кедабек	1	1	0	0	1	2	8	24	31	18	10	5
Дашкесан	1	0	1	1	1	1	4	26	32	15	13	4
Товуз	1	1	0	0	0	0	6	19	25	27	14	7
Шамкир	4	1	0	0	0	1	5	11	25	19	29	5

Из табл. 1 видно, что основная часть (80-85%) градобитий наблюдается в период 14-22 ч., которая связана с усилением конвекции, которая в свою очередь связана с максимальным прогревом подстилающей поверхности. Однако суточные максимумы повторяемости для различных районов несколько отличаются друг от друга. Например, если в Кедабекском и Дашкесанском районах суточный максимум наблюдается в период 14-18 ч. (55-58%), то в Газахском, Акстафинском и Товузском районах в период 16-20 ч. (44-52%), а в Шамкирском районе в 18-22ч. (48%) (табл. 1).

Время начала возникновения градобитий 14-16 ч. совпадает со временем суточного максимума температуры воздуха и подстилающей поверхности, и, таким образом, обострения конвекции. А смещение времени суточных максимумов, вероятно, связано с различной удаленностью территории этих районов от основных очагов возникновения градоопасной конвективной облачности и с особенностями траекторий фронтальных градовых процессов.

В статье также рассмотрено распределение случаев с градобитиями по месяцам (табл. 2). В данном случае выбор статистики случаев с градобитиями не случаен, так как имеется в виду, что он лучше характеризует градовую активность района, чем дни с градобитием.

Как видно из табл. 2, в регионе исследования градобития наблюдаются с апреля по октябрь месяцы, и это в основном совпадает с периодом вегетации сельскохозяйственных растений. В апреле, сентябре и октябре градобития наблюдаются относительно редко, но иногда и в эти месяцы они могут нанести значительный ущерб.

Активация градовых процессов начинается с апреля, однако в этом месяце повторяемость градобитий небольшая и составляет всего 1-5%. Основная часть градобитий наблюдается за период май-июль (75-83%). Однако с полной уверенностью можно сказать, что максимум градовой активности встречается в июне месяце (30-42%).

Таблица 2

Распределение случаев с градобитием по месяцам (в процентах) за 1979-2016 гг.

Районы		Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Число случаев
Акстафа	0	3	25	35	15	19	4	0	127
Газах	0	3	24	30	20	18	5	0	116
Кедабек	0	1	22	39	21	8	8	2	214
Дашкесан	0	1	26	34	19	8	8	5	164
Товуз	0	5	24	42	15	7	7	1	177
Шамкир	1	1	32	38	13	8	7	0	82
По региону в целом	0	2	24	38	18	11	6	1	880

Как видно из таблицы, на территории Газахского и Акстафинского районов градовая активность и в августе остается значительной.

В работе также проведен анализ временного хода годового количества случаев с градобитиями для 6 районов, указанных выше. Результаты данного анализа для районов Акстафа, Кедабек и Дашкесан показаны на рис. 1, из которого следует, что повторяемость градобитий имеет резкие годовые колебания. При этом линейный тренд для Акстафинского района демонстрирует незначительное уменьшение повторяемости градобитий со временем. Аналогичный вид линейного тренда характерен и для районов Газах и Товуз. Однако для районов Кедабек и Дашкесан линейные тренды демонстрируют явный рост повторяемости градобитий. Следует отметить, что по сравнению с периодом 1979-2004 гг. [3] в рассматриваемом периоде линейные тренды имеют заметный подъем. Известно, что линейные тренды показывают общую тенденцию изменения, однако, как видно из рис. 1, в различные отрезки времени характер изменения рассматриваемой величины значительно отличается.

С целью выявления этих временных отрезков, т. е. локальных периодов, построены полиномиальные трендовые кривые с применением 6-летнего фильтра. Эти кривые показывают,

что если не принимать во внимание колебания, возникающие в маленьких масштабах, многолетние изменения повторяемости градобитий можно рассматривать как временные ряды с определенными локальными периодами.

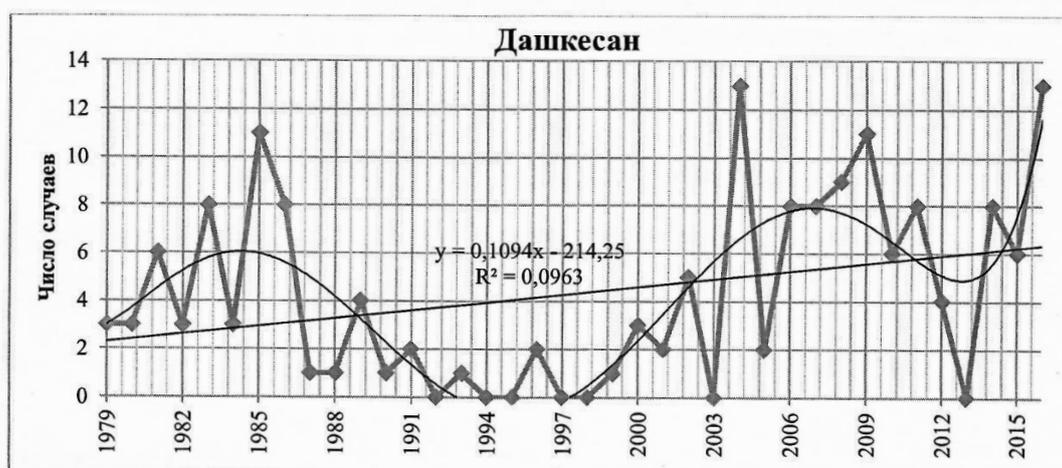
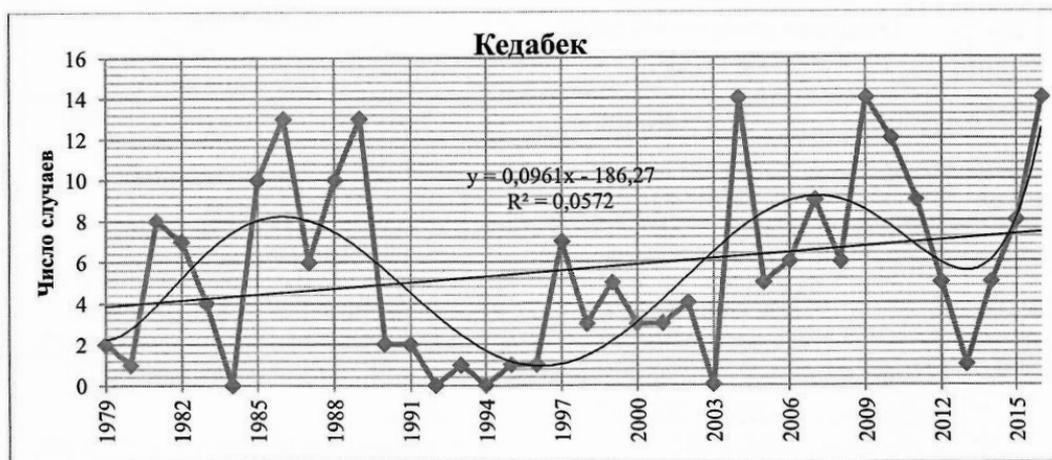
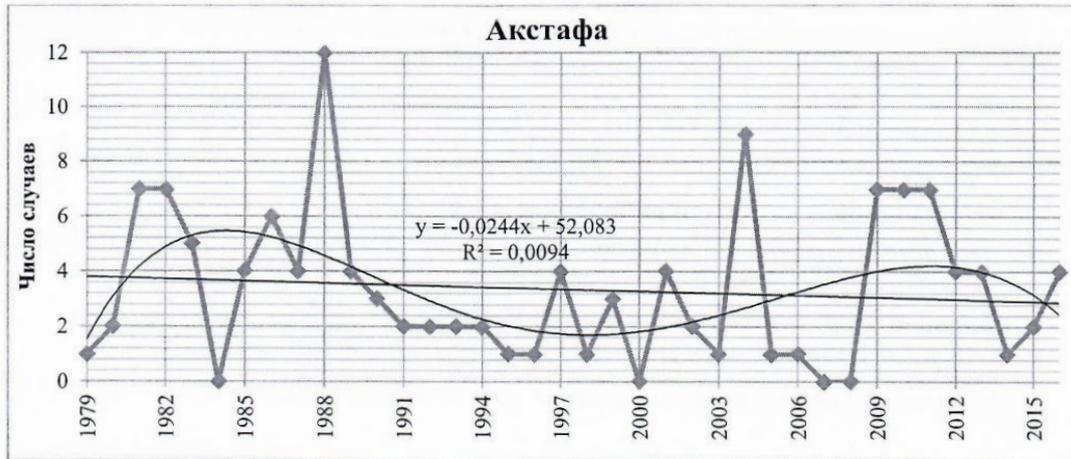


Рис.1. Временной ход годового количества случаев градобитий для районов Акстафа, Кедабек и Дашкесан за период 1979-2016 г.г.

Как видно из рисунка, для наиболее градоопасных районов, таких, как Кедабек и Дашкесан, длина периода этих изменений составляет, ориентировочно, 20-22 года. Точнее, начиная с концов 80-х годов прошлого века, наблюдается постепенное уменьшение, а за период 1991-1999 гг. - минимальное значение градовой активности. С начала 21-го века снова наблюдается повышение градовой активности, которая достигла максимума в 2007-2009 гг. Однако, в отличие от предыдущих периодов, здесь уровень максимума значительно выше. За период 2000-2016 гг. (за исключением 2003 и 2013 гг.) наблюдались довольно высокие значения повторяемости градобитий. Можно отметить, что в последние годы повторяемость градобитий данного региона меняется в довольно узких пределах, сохраняя при этом довольно большие значения (см. рис.). Все это свидетельствует об изменениях в климатологии града в данном регионе, которые, в свою очередь, вероятно, связаны с глобальным и региональным потеплением климата.

Сложившаяся ситуация, связанная с увеличением повторяемости и интенсивности градобитий, создает серьезные проблемы для экономики республики. Каждый год град продолжает наносить огромный ущерб экономике, в том числе сельскому хозяйству.

Таким образом, имеется большая необходимость всестороннего изучения градовых процессов данного региона в сложившейся новой климатической ситуации, разработки надежных методов их прогнозирования, а также организации мероприятий по предотвращению градобитий.

Список литературы

1. Абшаев М.Т., Малкарова А.М. Оценка эффективности предотвращения града. Санкт-Петербург: Гидрометеоздат, 2006, 279 с.
2. РД 52.37.67-98. Методические указания. Методы оценки эффективности воздействия на градовые процессы. М., 1999, 20 с.
3. Сафаров С.Г. Грозоградовые и селевые явления на территории Азербайджана и радиолокационные методы их прогнозирования. Баку: "Элм" 2012. 292 с.
4. Сафаров С.Г. Оценка повторяемости явлений градобития и их экономических последствий в западной зоне Азербайджана// Труды Геогр. Общества Азербайджана. 2004, том IX, с. 341-350.

ОБНОВЛЕННАЯ СЛУЖБА БОРЬБЫ С ГРАДОМ В КАХЕТИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РАБОТ ПО МОДИФИКАЦИИ ПОГОДЫ В ГРУЗИИ

Амиранашвили А.Г.¹, Дзодзуашвили У.В.², Глонти Н.Я.¹, Кайшаури М.Н.^{2,3},
Саури И.П.², Чаргазия Х.З.^{1,2}, Чихладзе В.А.¹

¹Институт геофизики им. М. Нодиа Тбилисского государственного
университета им. И. Джавахишвили

²Научно-технический центр «Дельта»

³Институт гидрометеорологии Грузинского технического университета

Производственные работы по защите сельскохозяйственных культур от градобитий в Грузии проводились в период с 1967 по 1989 гг. К концу 80-х годов прошлого столетия площадь защищаемой территории в районах Кахетии достигала 800 тыс. га и в районах Южной Грузии – 400 тыс. га. Эффективность противогородовых работ в Грузии к этому времени, по данным о пострадавших сельскохозяйственных угодий, составляла примерно 70%. Средняя физическая эффективность (сопоставление данных об ожидаемых и реальных случаях града) – 75-85%. После прекращения противогородовых работ обнаружилось, что площади, побитые градом в Кахетии увеличились и даже стали больше, чем до начала работы противогородовой службы [1-6].

Учитывая актуальность проблемы борьбы с градом в Грузии [1-4] при поддержке Правительства Грузии в 2015 году в Кахетии Научно-техническим Центром «Дельта» с участием Института геофизики им. М. Нодиа Тбилисского государственного университета им. И. Джавахишвили, после 25-летнего перерыва противогородовые работы были восстановлены и проведены тестовые испытания системы воздействия на градовые процессы [5,6].

Современная структура противогородовой службы кардинально отличается от существовавшей ранее [5,6]. На рис. 1 представлена общая схема работы восстановленной противогородовой службы в Кахетии.

Как следует из рис. 1, все операции по радиолокационному слежению за градовыми процессами и ракетного воздействия на них посредством специальной телекоммуникационной системы происходят дистанционно с командного пункта, расположенного в Тбилиси.

На данном этапе для слежения за градовыми облаками используется один метеорологический радиолокатор Meteor 735CDP10 С-диапазона (5-см длина волны) фирмы SelexES (Германия), который расположен в селе Чотори Сигнахского муниципалитета Кахетии (рис. 2) примерно в 80 км от Центрального Пункта Управления Службы Борьбы с Градом (ЦПУ СБГ) [5-7].

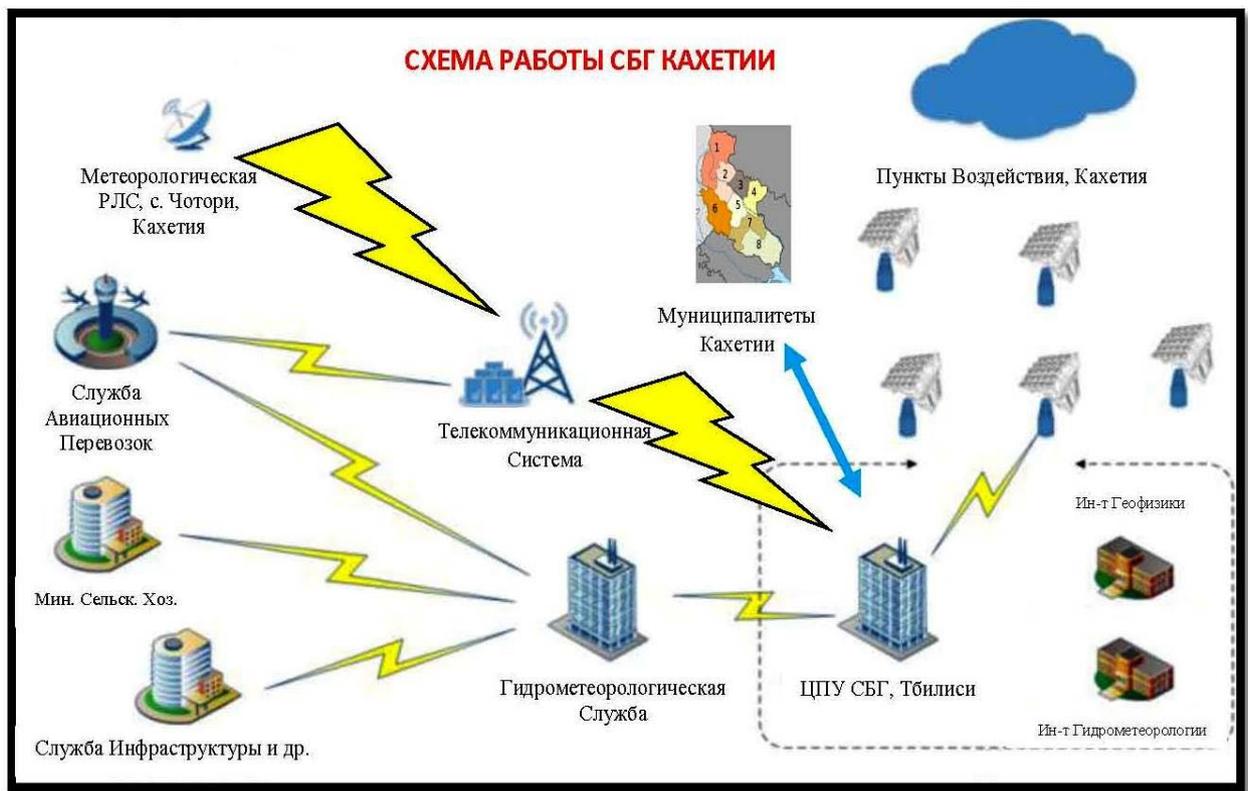


Рис. 1. Схема работы противогорадовой службы в Кахетии.
 Административные центры муниципалитетов Кахетии: 1 – Ахмета, 2 - Телави, 3 - Кварели, 4 - Лагодехи, 5 - Гурджаани, 6 - Сагареджо, 7 - Сигнахи, 8 - Дедоплисцкаро.



Рис. 2. Метеорологический радиолокатор Meteor 735CDP10.

ЦПУ имеет постоянную связь с гидрометеорологической службой Грузии, министерством сельского хозяйства Грузии, Службой авиационных перевозок, службами инфраструктуры, муниципалитетами Кахетии и др. (рис. 1). Предусмотрена также организация «горячей» линии для средств массовой информации, заинтересованных организаций и отдельных лиц.

В работе противоградовой службы принимают участие Институт геофизики им. М. Нодиа и Институт гидрометеорологии (осуществление научно-методического руководства работами, обучение и повышение квалификации персонала, анализ полученных данных, совершенствование существующей методики воздействия на атмосферные процессы и разработка новых и др.).

Радиолокационный мониторинг градовых процессов, анализ метеорологической ситуации в районе воздействия по спутниковой информации и данным радиозондов (<http://ready.arl.noaa.gov/READYcmet.php>), а также все другие работы по проведению операций по дистанционному воздействию на облака, производит группа из 4 операторов (всего – 16 операторов на 4 группы). В настоящее время численность персонала противоградовой службы Кахетии составляет около 30 человек (против 800 в бывшей службе).

Операции ракетного воздействия на градовые облака происходят с более чем 80 стационарных и двух мобильных пунктов воздействия. С мая 2015 г. по август 2016 г. использовались противоградовые изделия SK-6 производства Македонии. С сентября 2016 г. по настоящее время используются противоградовые изделия Trayal D 6-B производства Сербии [8-11].



Рис. 3. Фотография одного из современных пунктов воздействия на градовые процессы в Кахетии.

Автоматические ракетные пусковые установки с дистанционным управлением спроектированы и изготовлены в научно-техническом центре «Дельта». Пока применяются 26-ствольные установки СД-26 (рис. 3). При необходимости количество стволов и их калибр можно менять. На пунктах воздействия стрелков нет. Заряжение установок противоградовыми ракетами производит специальная мобильная группа [10].

На пункте воздействия (рис. 3) смонтирована указанная автоматическая пусковая установка для ракет SK-6 и Trayal D 6-B, аккумулятор питания, солнечная батарея и другие

необходимых принадлежности для автономной работы установки. Пункт огражден специальным забором, имеется камера видеонаблюдения, постоянная связь с правоохранительными органами на случаи несанкционированного проникновения на пункты воздействия, перед началом пуска ракет издаются предупредительные звуковой и световой сигналы.

Управление установками (рис. 4) осуществляется дистанционно посредством специальной компьютерной программы. С помощью этой программы можно сообщать пусковым установкам желаемый азимут и угол возвышения, после чего осуществляется открытие защитной крышки установки и запуск желаемого количества ракет в заданном направлении. Точность перемещения стволов установки СД-26 по вертикали и азимуту около 1 градуса. После пуска ракет защитная крышка закрывается.

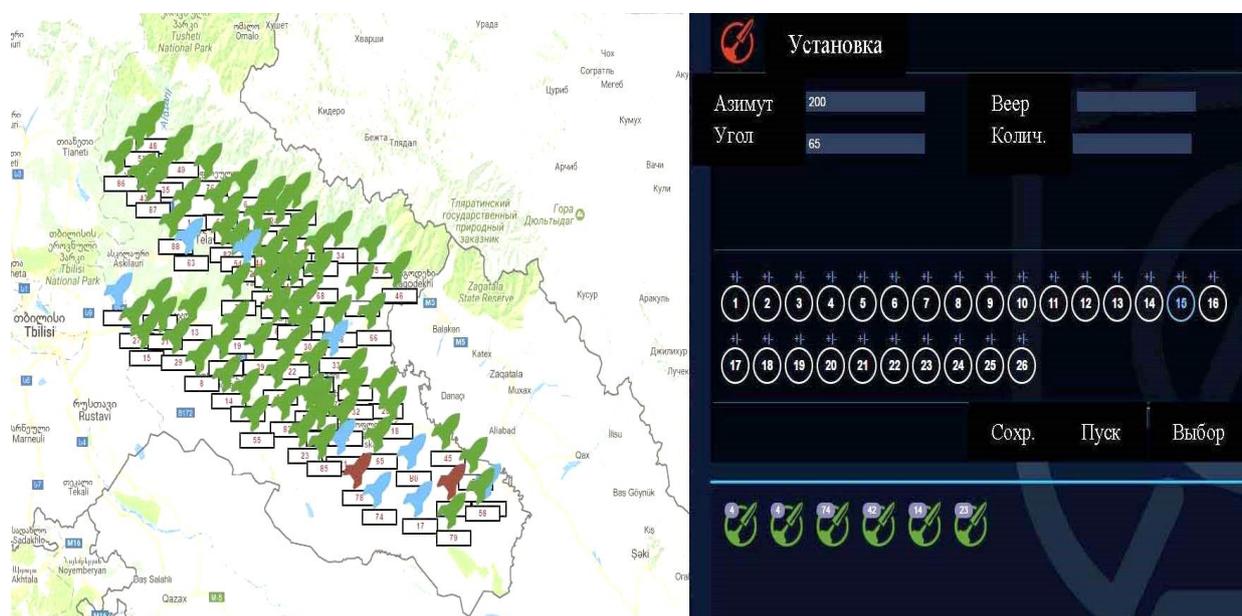


Рис. 4. Фотография пульта дистанционного управления запуска противораковых ракет в Кахетии.

Слева – схема расположения пусковых установок, зелёный цвет – установка готова к действию, голубой – проблемы со связью, красный – установка в нештатном состоянии. Справа – информационное табло (азимут и вертикальный угол пуска, веерность, подтверждение пуска, количество израсходованных изделий и др. для отдельных пунктов воздействия).

Указанная установка намного более эффективная, оперативная и безопасная, чем заграничные аналоги, не говоря о применяемой ранее пусковой установке ТКБ-040, также грузинского производства [10,12]. Проведение операций воздействия после команды на стрельбу занимает несколько секунд. Отметим, что проводится постоянное совершенствование как самих пусковых установок, так и программного обеспечения для их автономной работы. В перспективе в Грузии предусмотрена организация производства противораковых ракет с улучшенными баллистическими характеристиками (дальность, высота, пологость и др.).

В настоящее время в основу методики воздействия на градовые процессы положена используемая в конце восьмидесятых годов прошлого столетия физическая концепция ускорения осадкообразования в зоне формирования условий зарождения града, с последующим вымыванием этой зоны и исключением зарождения и роста града [5,6,13].

Тестовый режим работы противоградовой системы в 2015-2016 гг. показал перспективу ее дальнейшего использования. Эффективность противоградовых работ, несмотря на ограниченное количество средств воздействия (работы главным образом проводились в экономичном режиме [13]), была не хуже, чем в годы воздействия в прошлом столетии [5,6,14,15]. Физическая эффективность по результатам сопоставления реальных и ожидаемых дней с градом в указанные годы составила ~95%. Экономический эффект по данным о побитых градом территориях ~ 70%.

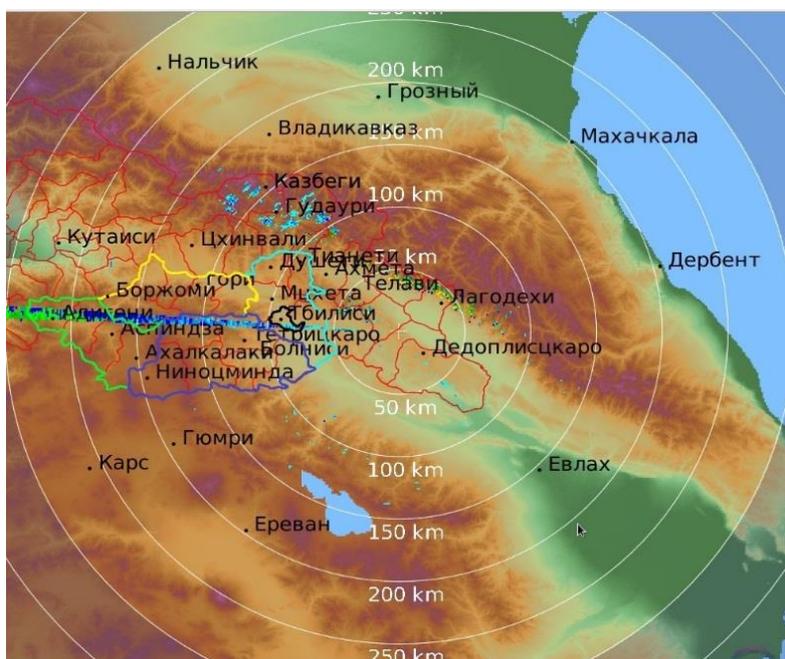


Рис. 5. Предварительная схема развития работ по подавлению града в Восточной Грузии.

При благоприятных условиях в последующие несколько лет предполагается расширение защищаемых от града территорий Восточной Грузии (рис. 5).

На рис. 5 изображены действующий полигон по активным воздействиям на атмосферные процессы (Кахетия – Ахмета, Телава, Лагодехи, Дедоплискар и др.) и перспективные полигоны:

- темно-синий контур, существовавший в прошлом веке полигон на территориях муниципалитетов Тетрицкаро, Болниси, Ниноцминда и др. (в окрестностях территории муниципалитета Ниноцминда проводились работы по увеличению атмосферных осадков).
- желтый контур - полигон на территории муниципалитетов Гори, Боржоми и др.;

- зеленый контур - полигон на территории муниципалитетов Аспиндза, Адигени, Ахалкалаки и др.;
- синий контур – полигон на территории муниципалитетов Мцхета, Душети, Тианети и др. (в окрестностях территории муниципалитета Тианети ранее проводились работы по увеличению атмосферных осадков);
- черный контур - территория столицы Грузии - Тбилиси. Запрещается работа по активным действиям по атмосферным процессам с использованием ракетных технологий в целях безопасности населения. Возможно использование авиационной техники для подавления града и регулирования атмосферных осадков. Возможно также расположение ракетных пунктов на границах города для воздействия на градовые процессы вне периметра его территории.

В случае расширения работ по активным воздействиям на атмосферные процессы, а также мониторингу опасных метеорологических явлений, планируется приобретение еще нескольких современных метеорологических радиолокаторов, которые будут объединены в единый комплекс слежения за облаками и облачными системами.

Учитывая, что зона действия РЛС значительно перекрывает территорию Восточной Грузии, в перспективе возможно проведение комплексного радиолокационного мониторинга различных опасных гидрометеорологических процессов как на территории Восточной Грузии, так и на сопредельных с ней территориях России, Турции, Азербайджана и Армении по согласованию с соответствующими структурами указанных стран.

Список литературы

1. 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. Ин-та гидрометеорологии, ISSN 1512-0902, том 108, Тбилиси, 2002. - с. 249-260.
2. Амиранашвили А.Г., Бахсолиани М.Г., Бегалишвили Н.А., Бериташвили Б.Ш., Рехвиашвили Р.Г., Цинцадзе Т.Н., Читанава Р.Б. О необходимости возобновления работ по искусственному регулированию атмосферных процессов в Грузии. // Тр. Ин-та Гидрометеорологии ГТУ, ISSN 1512 – 0902, т.119, Тбилиси, 2013.- с. 144 - 152.
3. Амиранашвили А., Глonti Н., Дзодзуашвили У., Ломтадзе Дж., Чихладзе В. О возобновлении противоградовых работ в Грузии.// Материалы научной конференции, посвященный 80 – летию со дня основания Института геофизики, ISSN 1512-1135, Тбилиси, 2014. - с. 208-212.

4. Амиранашвили А.Г., Дзодзуашвили У.В., Ломтадзе Дж. Д., Саури И.П., Чихладзе В.А. Некоторые характеристики градовых процессов в Кахетии. //Тр. Ин-та геофизики им. М.З. Нодиа, ISSN 1512-1135, том 65, Тбилиси, 2015. - с. 77-100.
5. Amiranashvili A.G., Chikhladze V.A., Dzodzuashvili U.V., Ghloni N.Ya., Sauri I.P. Reconstruction of Anti-Hail System in Kakheti (Georgia)// Journal of the Georgian Geophysical Society, Issue B. Physics of Atmosphere, Ocean and Space Plasma,1512-1127, vol. 18B, Tbilisi. 2015. - pp. 92-106.
6. Амиранашвили А.Г., Бурнадзе А.С., Двалишвили К.С., Геловани Г.Т., Глонти Н.Я., Дзодзуашвили У.В., Кайшаури М.Н., Квеселава Н.С., Ломтадзе Дж. Д., Осепашвили А.Р., Саури И.П., Телия Ш.О., Чаргазия Х.З., Чихладзе В.А. Возобновление работ по борьбе с градом в Кахетии. //Тр. Ин-та геофизики им. М.З. Нодиа, ISSN 1512-1135, том 66, Тбилиси, 2016. - с. 14-27.
7. Абаиадзе О.А., Авлохашвили Х.В., Амиранашвили А.Г., Дзодзуашвили У.В., Кириа Дж.К., Ломтадзе Дж. Д., Осепашвили А.Р., Саури И.П., Телия Ш.О., Хеташвили А.А., Цхведиашвили Г.Н., Чихладзе В.А. Радиолокационное обеспечение противорадовой службы в Кахетии. //Тр. Ин-та геофизики им. М.З. Нодиа, ISSN 1512-1135, том 66, Тбилиси, 2016. - с. 28-38.
8. Амиранашвили А.Г., Дзодзуашвили У.В., Чихладзе В.А. Противорадовые ракеты типа земля-воздух.// Тр. Ин-та геофизики им. М.З. Нодиа, ISSN 1512-1135, том 64, Тбилиси, 2013.- с. 151–159.
9. Амиранашвили А.Г., Дзодзуашвили У.В., Ломтадзе Дж. Д., Саури И.П., Чихладзе В.А. Средства воздействия на атмосферны процессы в Кахетии. //Тр. Ин-та геофизики им. М.З. Нодиа, ISSN 1512-1135, том 65, Тбилиси, 2015. - с. 113-120.
10. Амиранашвили А.Г., Барекчян И.Ю., Двалишвили К.С., Дзодзуашвили У.В., Ломтадзе Дж. Д., Осепашвили А.Р., Саури И.П., Татишвили Г.З., Телия Ш.О., Чихладзе В.А. Характеристики наземных средств воздействия на градовые процессы в Кахетии. //Тр. Ин-та геофизики им. М.З. Нодиа, ISSN 1512-1135, том 66, Тбилиси, 2016. - с. 39-52.
11. Amiranashvili A.G, Chikhladze V.A.,Dzodzuashvili U.V., Jincharadze G.A., Pipia M.G., Sauri I.S. On the Use of Anti-Hail Rockets "Trayal D 6- B" in the Work of Anti-Hail System in Kakheti (Georgia). //Journal of the Georgian Geophysical Society, Issue B. Physics of Atmosphere, Ocean and Space Plasma, ISSN 1512-1127, vol.19B, Tbilisi, 2016. - pp. 73-78.
12. Абаиадзе О.А., Арвеладзе Л.В., Барекчян И.Ю., Дзаганашвили Д.Р., Кириа Дж.К., Манагадзе И.Б., Размазишвили Р. Н., Татишвили Г.З., Ундилашвили Г.Д., Чхаидзе Б.Д. Дистанционная система управления активными воздействиями на градовые процессы в Кахетии. //Тр. Ин-та геофизики им. М.З. Нодиа, ISSN 1512-1135, том 66, Тбилиси, 2016. - с. 53-59.

13. Абшаев А.М., Абшаев М.Т., Барекова М.В., Малкарова А.М. Руководство по организации и проведению противорадовых работ. // «Печатный двор», ISBN 978-5-905770-54-8, Нальчик, 2014. - 500 с.
14. Бурнадзе А.С., Варамашвили Н.Д., Джамришвили Н.К., Квеселава Н.С. Об оценках физической эффективности противорадовой защиты. // Тр. Ин-та геофизики им. М.З. Нодиа, ISSN 1512-1135, том 66, Тбилиси, 2016. - с. 108 - 115.
15. Бурнадзе А.С., Варамашвили Н.Д., Квеселава Н.С. Основные методы оценки экономической эффективности противорадовых работ. // Тр. Ин-та геофизики им. М.З. Нодиа, ISSN 1512-1135, том 66, Тбилиси, 2016. - с. 116 - 122.

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС СОПРЯЖЕНИЯ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ И НАЗЕМНЫХ ДАННЫХ

Жарашуев М.В., Циканов Х.А., Гергоков А.Х., Аппаева Ж.Ю.

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

Введение

В земной атмосфере повседневно наблюдаются самые разнообразные явления, создающиеся в результате протекания в ней различных физических процессов. Эти явления и процессы совершаются в атмосфере не изолировано, а в тесном взаимодействии с процессами, происходящими в верхних слоях почвы и воды.

Изучение процессов и явлений, наблюдаемых в атмосфере, имеет большое практическое значение и позволяет выяснить законы их развития. Знание же этих законов дает возможность разработать методы прогноза атмосферных процессов, а в отдельных случаях позволяет изменить развитие их в сторону более благоприятную для человека.

Основные атмосферные процессы развертываются на больших пространствах в виде определенных условий погоды и климата, обнаруживаются в таком же крупном масштабе. Поэтому существенное значение в метеорологии имеет сопоставление наблюдений на географических картах, с последующим анализом пространственно-временного распределения наблюдаемых величин.

Для изучения географического распределения метеорологических элементов и сравнения состояния атмосферы (погоды и климата) в различных местах Земли необходимо, чтобы метеорологические станции в каждой стране вели наблюдения, по возможности, однотипными приборами, по единой методике, в определенные часы суток. Иными словами, станции в каждой стране и в мировом масштабе должны составлять единое целое - *метеорологическую сеть*. К метеорологическим элементам относятся, в первую очередь, температура и влажность воздуха, атмосферное давление, ветер, облачность и осадки, грозы, град и т. д. А так же некоторые величины, непосредственно не отражающие свойств атмосферных процессов, но тесно связанные с ними, такие как температура почвы или поверхностного слоя воды, испарение, высота и состояние снежного покрова и т.д.

На метеорологических станциях во всем мире производятся одновременные (синхронные) наблюдения через каждые три часа по единому - гринвичскому времени. Результаты наблюдений за эти сроки немедленно передаются в органы службы погоды, где составляются синоптические карты и другие материалы, служащие для предсказания погоды.

На метеорологических станциях основного типа регистрируются следующие метеорологические элементы:

- температура воздуха на высоте 2 м над земной поверхностью;
- атмосферное давление;
- влажность воздуха - упругость водяного пара в воздухе и относительная влажность;
- ветер - горизонтальное движение воздуха на высоте 10- 12 м над земной поверхностью. Измеряется его скорость и определяется направление, откуда он дует;
- облачность, типы облаков по международной классификации, высота нижней границы облаков, ближайших к земной поверхности, скорость и направление движения облаков;
- количество осадков, выпавших из облаков, их типы (дождь, град, морось снег и т.д.);
- наличие и интенсивность различных осадков, образующихся на земной поверхности и на предметах (росы, иней, гололеда и пр.), а также тумана;
- температура на поверхности почвы;
- состояние поверхности почвы;
- высота и плотность снежного покрова;
- на некоторых станциях - испарение воды с водных поверхностей или с почвы.

Наблюдения на метеорологических станциях в основном имеют характер измерений и ведутся с помощью специальных измерительных приборов. Принципы ряда метеорологических приборов были предложены еще в XVII-XIX веках. Создаются новые конструкции приборов с исполь-

зованием возможностей современной техники: полупроводников, радиосвязи и радиолокации, различных химических реакций и т. п. В настоящее время в метеорологическом приборостроении и программном обеспечении наблюдается быстрый прогресс. Особый интерес, представляет собой создание *программных комплексов сети метеостанций* и применение радиолокации в метеорологических целях. На экране радара можно обнаружить скопления облаков, области осадков, грозы, град и даже большие атмосферные вихри (тропические циклоны) в значительном отдалении от наблюдателя и проследить их эволюцию и перемещение в пространстве и времени.

Во многих странах уже более 20 лет оперативно используются метеорадиолокаторы, в основном в сочетании с сетями дождемеров, которые часто применяются для их калибровки. Оценки осадков, полученные с помощью метеорологических радиолокаторов, зачастую более полезны, чем полученные осадкомером, потому что они непрерывны во времени и пространстве и отражают площадь охвата. Тем не менее, с их использованием связаны такие проблемы, как обратное рассеяние, ослабление, поглощение сигнала и помехи при его передаче, которые особенно проявляются в районах с переменным рельефом и сложными условиями калибровки сигнала.

Разработка распределенных моделей прогнозирования опасных явлений погоды (специально предназначенных для использования радиолокационных данных в узлах специальной разработанной сетки моделей) все еще находится на стадии тестирования. Кроме того, их использование в режиме реального времени должно предусматривать последующую детальную оценку в автономном режиме, и должно быть доказана их повышенная эффективность по сравнению с более простыми и широко используемыми моделями с сосредоточенными параметрами. Однако преимущества высокого временного и пространственного разрешения радиолокационных данных представляют особую ценность для получения оценок непродолжительных метеорологических явлений.

Принцип работы программы

Для целей получения оперативной информации о метеорологической ситуации в области радиолокационного обзора нами была разработана программа «RadMet.exe», обеспечивающая автоматическое построение карты заданного региона (например, Северного Кавказа), на которую на фоне административных границ территории наносятся:

- позиции гидрометеорологических станций (ГМС);
- суммарный слой осадков по радиолокационным данным «ДМРЛ-С»;
- слой осадков по данным ГМС;
- карта приземной температуры;
- карта давления у земли;
- карта влажности воздуха;

- карта бала облачности;
- направление ветра.

Программа «RadMet.exe» опрашивает 93 страницы официального сайта Гидрометцентра РФ <http://meteoinfo.ru>, с которого берет 12 и 24 часовые данные ГМС об осадках (в 07 и 19 часов по Гринвичу за 24 и 12 часов, соответственно). Также берет информацию о температуре, давлении, влажности, направлении ветра, бале облачности, типе метеорологического явления, каждые 3 часа. Эта информация сохраняется в базе данных.

Параллельно этому программа «RadMet.exe» при эксплуатации на сети «ДМПЛ-С» должна иметь доступ к собственной базе радиолокационных данных в формате кода BUFR.

Считывая архив BUFR файлов ПО «ГИМЕТ-2010» программа «RadMet.exe»:

- формирует свою базу данных, соответствующих суммарным осадкам за 12 и 24 часа, и, отфильтровывая все остальные BUFR файлы (в связи с этим база радиолокационных данных программы «RadMet.exe» не должна быть общей с другими программами, ввиду уничтожения всех ненужных файлов) выбирает в базе радиолокационных данных файл с суммарными осадками за интересующий период;
- автоматически ищет соответствующий синоптический срок в базе данных наземных измерений ГМС;
- накладывает одну картинку на другую (рис.1).

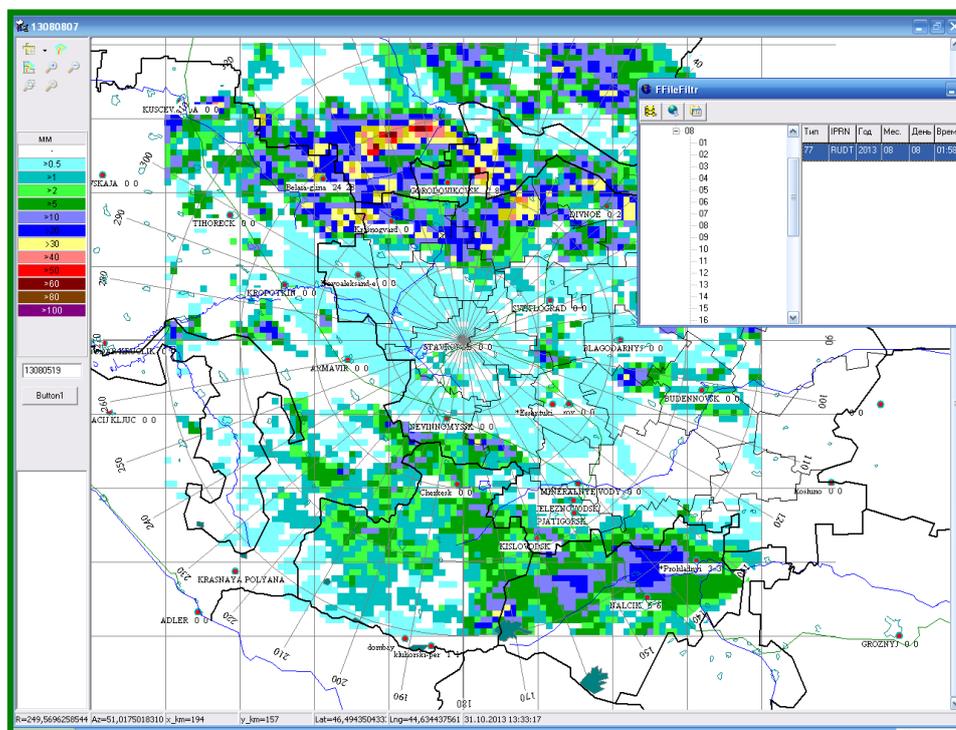


Рис.1. Пример карты осадков, выпавших 8 августа 2013 г.

На карте сравнения сумм осадков, выдаваемых программой «RadMet», радиолокационная карта слоя осадков по данным «ДМРЛ-С» отображается в градациях и цветовой палитре (рис. 2 а), приведенной в левой части карты, а слой осадков по данным метеостанций отображается в цифровом виде после наименований метеостанций. Например, «Belaia Glina 24 28» означает на метеостанции Белая Глина слой осадков за 12 часов (с 00⁰⁰ до 12⁰⁰ UTC) составил 24 мм, а за 24 часа (с 00⁰⁰ до 24⁰⁰ UTC) составил 28 мм.

Выбор BUFR файлов для сравнения с данными ГМС осуществляется с помощью панели управления, которая называется FileFiltr и содержит: (рис. 2 б)



Рис.2. а) шкала градации данных о суммарных осадках; б) блок управления программы для FileFiltr.exe; в) блок управления программы для RadMet.exe.

- кнопки проведения сравнения по всем файлам, выведенным на панели (рис.2 б);
- кнопку, открывающую данные сравнений в текстовом формате;
- левую часть, на которой отображается дата и время последовательности BUFR файлов, принятых из архива «ДМРЛ-С»;
- правую часть, где отображается выбранный для сравнения BUFR файл;
- центральную кнопку, которая инициирует принудительную, внеочередную попытку скачивания данных метеостанций с сайта Гидрометцентра (рис. 2 б);
- правую кнопку, которая вызывает текстовый файл «Osadki.txt» с результатами сравнения (рис. 2 в);
- кнопку с изображением руки, отображающую карту атмосферного давления (рис.2 в);
- кнопку лупы с квадратиком, увеличивающую масштаб выделенной области карты (рис. 2 в);
- кнопку с изображением лупы и знаком минус, уменьшающую масштаб карты на один шаг (рис. 2 в);

- кнопку с изображением лупы и знаком плюс, увеличивающую масштаб карты на один шаг (рис.2 в);
- кнопку с изображением лупы и крестиком, уменьшающую масштаб карты до минимального размера (рис. 2 в);
- кнопку с буквой C^0 , отображающую карту температуры (рис.2 в);
- кнопку с изображением белых облаков, отображающую карту бала облачности (рис. 2 в);
- кнопку с изображением черных облаков, отображающую карту влажности воздуха (рис. 2 в).

Сравнение радиолокационных и наземных данных о слое осадков осуществляется для точки размещения метеостанции с учетом ее географических координат. При этом данные метеостанции сравниваются с радиолокационными данными, рассчитанными из матрицы BUFR файла для конкретного квадрата 4x4 км, где размещена метеостанция[1-4].

Программа «RadMet» позволяет сразу провести сравнение множества файлов BUFR. Для этого следует выбрать группу файлов за заданный период времени, затем выбрать год месяц или день в левой части, и с какого периода нужно рассчитать в правой части и нажать левую кнопку панели управления (рис. 2.б). В результате чего, будет проводиться последовательное сравнение всех ниже расположенных радиолокационных данных с данными метеонаблюдений.

Для отображения карты температуры, давления, влажности или бала облачности необходимо выбрать соответствующий тип карты на панели управления (рис. 2 в). В результате чего, программа обратится к базе данных для определения градации шкалы, в зависимости от минимального и максимального значения по формуле (1.1 и 1.2):

$$\frac{P_{\max} - P_{\min}}{13} = dP \quad (1.1)$$

$$P_i = P_{\min} + i * dP \quad (1.2)$$

где P_{\max} , P_{\min} - минимальное и максимальное значение шкалы метеопараметров, dP – интервал изменения шкалы градаций метеопараметров, P_i - i -ый объект шкалы градаций.

На рисунке 3, отображена карта приземной температуры для 13 апреля 2017 в 12 часов, на которой, кружками разных цветов отмечены метеостанции и температуры, которые они выдают, в соответствие с градацией, отображенной в правом верхнем углу. При выборе другого типа карты, цветовая палитра шкалы останется прежней, но значения будут пересчитаны в зависимости от типа карты. Красными палочками, отмечены направления ветра от центра к концу палки.

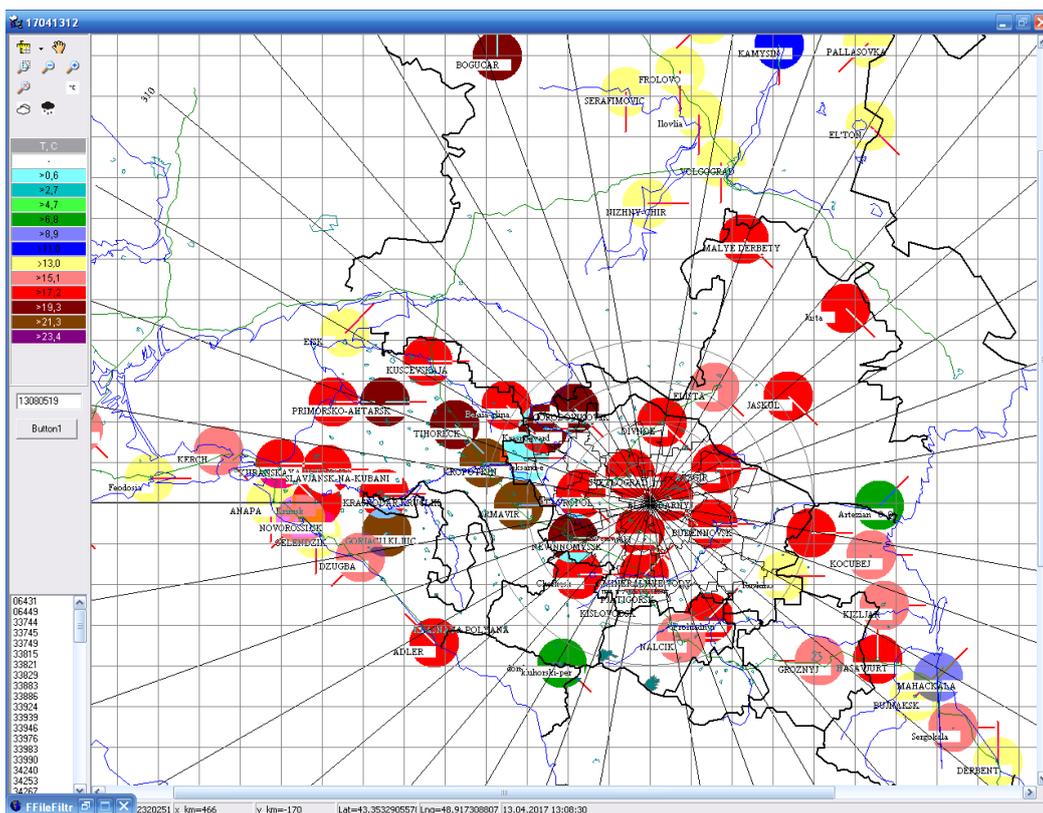


Рис.3. Карта приземной температуры в соответствии с градацией.

Заключение

Данная программа и алгоритмы реализованы и используются в оперативной работе с января 2012 года, что позволяет провести обширный, автоматический анализ многих метеопроцессов, проходящих на территории покрытия метеостанций.

Список литературы

1. Жарашуев М.В., Гергоков А.Х. Методика автоматической идентификации площадки засева градовых облаков. Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. 2015. № 3 (187). С. 25-30.
2. Жарашуев М.В. Статистический анализ радиолокационных характеристик мощных конвективных ячеек. Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. – Ростов-на-Дону, 2010. №7 – С. 58 - 65.
3. РД 52.04.320-91. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1, МРЛ-2, МРЛ-5. –СПб.: Гидрометеиздат, 1993.-264 с.
4. Жарашуев М.В. Статистический анализ градовой активности Крыма и Ставропольского края. Гидрометеиздат – Москва, Метеорология и гидрология, № 7. 2012 – С. 37-44.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ РАДИОЛОКАТОРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ОТРАЖАЕМОСТИ ОБЛАКОВ И ОБЛАЧНЫХ СИСТЕМ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЕДИНИЦАХ ИЗМЕРЕНИЙ

Ватиашвили М.Р.

Государственный военный научно-технический центр «Дельта»
Министерства обороны Грузии, г. Тбилиси

Введение

Применение метеорологических радиолокаторов (МРЛ) основано на рассеянии радиоволн сантиметрового диапазона частицами облаков и осадков (ОО), встречающихся в виде капель дождя, градин, кристаллов, снежинок и их различных комбинаций. МРЛ обладают рядом специфических особенностей, которые обеспечивают их высокую эффективность при обнаружении и измерении параметров метеообразований. Распределение многочисленных источников излучения в облаке создает суммарный отраженный сигнал, который несет метеорологическую информацию об отражающих объемах ОО. Среднее значение принимаемого сигнала $P_{пр}$ на входе приемника МРЛ зависит от: их технических характеристик МРЛ и радиолокационных параметров ОО, рассчитанных в диапазоне различных длин волн: $\lambda_1 = 3,2$ см, $\lambda_2 = 10,3$ см, $\lambda_3 = 56$ см [6 - 8, 14, 15, 17-18, 20].

Зависимость между $P_{пр}$, техническими характеристиками МРЛ и радиолокационными параметрами ОО выражается уравнением радиолокации атмосферных образований, полученного для однократного рассеивания и при условии взаимной независимости рассеивания частиц друг от друга [6 - 8, 14 - 18, 19]:

$$P_{пр} = \frac{P_{пер} G^2 \lambda^2 c \tau \theta^2 \eta_{\lambda}}{4^5 \ln 2 \pi^2 10^{0,17} R^2} K_{ав} K_{зап} K_{РПУ} K_{з}, \quad (1)$$

где $P_{пр}$ – средняя мощность принятого сигнала (Вт); $P_{пер}$ – импульсная мощность электромагнитных колебаний, регулируемых передатчиком МРЛ (Вт); G – коэффициент усиления антенны; λ – длина волны (см); c – скорость света (см/с); τ – длительность импульса (сек); θ – диаграмма направленности излучения антенны (радиан); $K_{ав}$ – коэффициент полезного действия антенно-волноводного тракта на прием и передачу (в соответствии с техническим паспортом может изменяться от 0,2 до 10 дБ); $K_{зап}$ – коэффициент заполнения радиолокационного объема частицами ОО; $K_{рпу}$ – коэффициент учета ослабления в пленке воды, образуемой на оболочке радиопрозрачного укрытия (РПУ) антенны во время выпадения осадков в месте установки МРЛ;

K_3 – коэффициент, учитывающий влияние подстилающей поверхности на диаграмму направленности антенны МРЛ; ζ – ослабление радиоволн в газах атмосферы, облаках и осадках при их распространении на пути $2R$; η_λ – удельная площадь обратного рассеяния частиц облаков и осадков (см^{-1}).

К информативным радиолокационным параметрам ОО Кроме η_λ относятся.

Эффективная площадь рассеяния i -ой частицей в ОО σ_i (см^2). При выполнении рэле-евских условий рассеяния электромагнитного излучения, σ_i рассчитывается следующим выражением:

$$\sigma_i = \frac{64\pi^5 \alpha^6}{\lambda^6} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2 = \frac{\pi^5 D^6}{\lambda^6} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right|^2, \quad (2)$$

где: m – комплексный показатель преломления вещества частицы на длине волны λ_i ; D и a – диаметр и радиус рассеивающих частиц; $\left| \frac{m_B^2 - 1}{m_B^2 + 2} \right|^2 = 0,93 \pm 0,004$ – множитель для воды в сантиметровом диапазоне длин волн; $\left| \frac{m_I^2 - 1}{m_I^2 + 2} \right|^2 = 0,197$ – множитель для льда единичной плотности.

Удельная площадь обратного рассеяния частиц в ОО (η , (см^{-1})). Она является суммарной эффективной площадью рассеяния единичного объема ОО, заполненного рассеивающими частицами (каплями, кристаллами и т. д.):

$$\eta = \sum_{i=1}^N \frac{\sigma_i}{V_s}, \quad (3)$$

где – η (м^{-1}), N – число рассеивающих частиц в эффективном объеме V отражающей области.

Уравнение (2), с учетом уравнения (1), примет следующий вид:

$$\eta = \frac{64\pi^5}{\lambda^4} \alpha^6 \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 1} \right|^2 = \frac{\pi^5}{\lambda^4} \left| \frac{m^2 - 1}{m^2 + 1} \right|^2 \sum_{i=1}^N \frac{D_i^6}{V_s}. \quad (4)$$

Радиолокационная отражаемость ОО (Z , $\text{мм}^6 \cdot \text{м}^{-3}$). Она характеризует отражающие свойства единичного объема ОО и/или сумму, возведенных в шестую степень диаметров частиц, находящихся в единице объема V_s :

$$Z = \sum_{i=1}^N \frac{D_i^6}{V_s}, \quad (5)$$

где Z измеряется в $\text{мм}^6 \cdot \text{м}^{-3}$ или в $Z(\text{dBZ})$ относительно $Z_0 = 1 \text{мм}^6 \cdot \text{м}^{-3}$ (dBZ) или $Z(\text{мм}^6 / \text{м}^3) = 10^{18} Z(\text{м}^3) = 10^{12} Z(\text{см}^3)$, (6)

$$Z(\text{dBZ}) = 10 \lg \frac{Z}{Z_0}. \quad (7)$$

Если Z определяется через радиус частицы, то

$$Z_a(\text{dBZ}) = Z(\text{dBZ}) - 18. \quad (8)$$

Значение $Z(\text{м}^3)$ рассчитывается следующим уравнением:

$$Z = \frac{\lambda^4}{\pi^5} \eta, \quad (9)$$

где - λ (м), η (м⁻¹) и Z (м³).

Эквивалентная радиолокационная отражаемость Z_o . Она характеризует свойства единичного объема ОО и равна отражаемости капельного облака, формирующего равный по амплитуде сигнал:

$$Z_o = \frac{\lambda^4 \cdot \eta}{\pi^5 \left| \frac{m_o^2 - 1}{m_o^2 + 2} \right|^2}, \quad (10)$$

где для водяных частиц $Z_o = Z$, а для ледяных частиц

$$Z_o = \left\{ \left| \frac{m_l^2 - 1}{m_l^2 + 2} \right|^2 / \left| \frac{m_o^2 - 1}{m_o^2 + 2} \right|^2 \right\} Z \quad \text{или} \quad (11)$$

$$Z_o = (0,189 \div 0,224) Z \quad (12)$$

Для частиц, отличных от релеевских, имеем

$$Z_o = 3,52 \cdot 10^9 \eta \lambda^4, \quad (13)$$

где η – в см⁻¹, λ – в сантиметрах.

Перечисленные технические характеристики МРЛ и радиолокационные параметры ОО, однозначно характеризующие условия формирования опасных явлений погоды (грозы, град, шквалы, ливень, обложные осадки), легли в основу:

- изучения структуры и динамики развития ОО [3];
- совершенствованных и разработанных новых методов: радиолокационного диагноза и сверхкраткосрочного прогноза опасных явлений погоды (грозы, град, шквалы, ливень, обложные осадки), развивающихся в естественных условиях и при проведении на них активных воздействий [1-5, 8 - 13]; оценки критериев засева ОВ 1 - 4-ой категорий [1, 2, 7, 8, 10, -13]; оценки критериев пригодности облаков для воздействия в работах по искусственному увеличению осадков [13, 19]; активных воздействий на градовые процессы и оценки их физической и экономической эффективности [1-5]; активных воздействий по искусственному увеличению осадков и оценки их физической и экономической эффективности [10 -13].

Прошло 50 лет со дня начала производственных работ по защите сельскохозяйственных культур от градобитий (1967 г.), проводимой в районах региона Центрального Кавказа. В северной части этого региона расположены защищаемые территории (ЗТ) Военизированных служб (ВС) Российской Федерации, включающие в себя районы Краснодарского и Ставропольского краев, Кабардино-Балкарской и Карачаево-Черкесской республик и Республики Северная Осетия (Алания). В южной части этого же региона расположены ЗТ ВС Республики Грузия - включающие в себя районы Кахети и Квемо Каргли [13]. Площади ЗТ соответственно достигают 2 млн. 421 тыс. и 900 тыс. га.

В ВС Российской Федерации установлены автоматизированные АСУ - МРЛ с длинами волн $\lambda = 3,2$ см и $\lambda = 10,3$ см, а в ВС Республики Грузия - автоматизированный метеолокатор «METEOR 735 CDP 10» с $\lambda = 5,6$ см.

Градоопасность этих районов оценивается в зависимости от числа дней с градом и поврежденных от него площадей, занятых с сельскохозяйственными культурами.

Целью представленной работы является:

- расчет значений постоянной МРЛ C_λ и радиолокационного параметра η_λ ОО по данным технических характеристик МРЛ с длинами волн $\lambda = 3,2$ см, $\lambda = 10,3$ см и $\lambda = 5,6$ см;

- расчет значений постоянной МРЛ C'_λ и характеристик радиолокационной отражаемости Z_a (dBZ), Z_d (dBZ), $\lg Z_a$, $\lg Z_d$ ОО с соответствующими единицами измерений по данным технических характеристик МРЛ;

- составление обобщенной таблицы и/или построение карты распределения радиолокационных параметров, связывающих: значения $\eta_{\lambda i}$ со значениями параметров Z_a (dBZ), Z_d (dBZ), $\lg Z_a$, и $\lg Z_d$, которые могут быть использованы для перевода значений $\eta_{\lambda i}$, в значения Z и обратно.

1. Материалы и методика исследования

Привлекались многолетние радиолокационные наблюдения за параметрами ОО, сопровождающихся опасными явлениями погоды, которые выбирались:

- с научных монографий и статей, научно-исследовательских программ и проектов посвященных вопросам штормооповещения, физики облаков и активных воздействий;

- с отчетов научно-производственных и производственных работ по воздействию на градовые процессы и искусственному увеличению осадков.

В основу анализа и обобщения результатов радиолокационных наблюдений за ОО, сопровождающихся опасными явлениями погоды, положен физико-статистический метод исследования.

2. Расчет значений C_λ МРЛ и η_λ ОО

Разделив обе части уравнения (1) на $P_{ш} = P_0$ (соответственно уровень шумов приемного устройства и минимальная мощность отраженного сигнала) и положив $K_{зап} = 1$, $K_{ав} = 1$, $K_3 = 1$ и объединив технические параметры МРЛ в одну постоянную величину (C_λ), получим уравнение радиолокации атмосферных образований с учетом длины волны (λ) МРЛ и способа измерений отраженных сигналов:

$$\frac{P_{пр}}{P_0} = C_\lambda \cdot \frac{\eta_\lambda}{R^2}, \quad \text{где} \quad (14)$$

$$C_\lambda = \frac{P_{пер} G^2 \lambda^2 c \tau \theta^2}{P_0 4^5 \ln 2 \pi^2 10^{0,17}} K_{РПУ} K_{ав} \quad (15)$$

$$- \eta_{\lambda} = \frac{P_{\text{пп}} R^2}{C_{\lambda}} = \frac{(10 \lg \frac{P_{\text{пп}}}{P_0} = n) R^2}{C_{\lambda}} = \frac{10^{0,1n}}{C_{\lambda}} R^2 \quad (16)$$

Обозначим свободные члены, входящие в уравнении (15) буквой

$$f = \frac{c}{4^5 \ln 2 \pi^2} = 4,286 \cdot 10^6, \quad (17)$$

тогда уравнение (15) с учетом уравнения (17) примет следующий вид:

$$C_{\lambda} = \frac{P_{\text{пер}} G^2 \lambda^2 \tau \theta^2}{P_0 \cdot 10^{0,1\zeta}} f \cdot K_{\text{РПУ}} K_{\text{ав}} \quad (18)$$

Здесь C_{λ} (Вт·см²·см·с/(Вт·с)) или (см³) - постоянная МРЛ, которая определяет его энергетический потенциал и позволяет сравнивать различные МРЛ с точки зрения их обнаруживающей способности.

В связи с тем, что в уравнении (18) входят значения технических параметров МРЛ, изменяющихся в широких пределах, то расчет C_{λ} на трех длинах волн ($\lambda_1 = 3,2$ см; $\lambda_2 = 10,3$ см; $\lambda_3 = 5,6$) следует проводить с использованием данных инструментальных измерений (табл.1) с привлечением следующих формул:

$$10 \lg C_{\lambda} = 20 \lg \lambda + 10 \lg P_{\tau} - \lg P_0 + 10 \lg \tau + 20 \lg G + 20 \lg \theta - 0,1 \zeta + f \quad (19)$$

$$10 \lg C_{3,2} = 10,1 + 51,8 - 136 - 57,0 + 102,2 - 41,2 - 6 + 66,3 = 261,8 \text{ dB}$$

$$10 \lg C_{10,3} = 20,6 + 57,7 - 138 - 57,0 + 83,2 - 31,6 - 6 + 66,3 = 273,8 \text{ dB}$$

$$10 \lg C_{5,6} = 15,0 + 54,8 - 138 - 57,0 + 87,2 - 35,1 - 6 + 66,3 = 267,9 \text{ dB}$$

Результаты расчетов C'_{λ} представлены в таблице 1.

Таблица 1

Расчёт постоянной МРЛ с учетом длины волны

Параметр	Значение канала			Параметр	Значения для параметров		
	МРЛ-5		*МЕТЕОР		МРЛ-5		МЕТЕОР
	I канал	II канал	735 CDP 10		I канал	II канал	735 CDP 10
λ , см	3,2	10, 3	5,6	$20 \lg \lambda$	10,1	20,6	15,0
P_{τ} , кВт	150	850	450	$10 \lg P_{\tau}$	51,8	59,3	56,5
P_0 , Вт	$2,5 \cdot 10^{-14}$	$1,6 \cdot 10^{-14}$	$1,6 \cdot 10^{-14}$	$10 \lg P_0$	-136	-138	- 138
τ , сек	$2 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$10 \lg \tau$	-57,0	-57,0	-55,0
G , dB	$1,29 \cdot 10^5$	$1,44 \cdot 10^4$	$2,28 \cdot 10^4$	$20 \lg G$	102,2	83,2	87,2
Θ , град	0,5	1,5	1,0	$20 \lg \Theta$	-41,2	-31,6	-35,1
ζ , dB	6	5	5	Z	- 6	- 5	- 5
f , см/с	$4,286 \cdot 10^6$	$4,286 \cdot 10^6$	$4,286 \cdot 10^6$	$10 \lg f$	66,3	66,3	66,3
C_{λ} , см ³	$1,51 \cdot 10^{26}$	$2,410^{27}$	$6,17 \cdot 10^{26}$	$10 \lg C_{\lambda}$,	261,8	273,8	267,9

*Радиолокатор «МЕТЕОР 735 CDP 10» установлен на защищаемой территории Кахети для проведения противорадовой защиты.

Расчет $\eta_{\lambda i}$ ОО с учетом длины волны МРЛ можно проводить с помощью уравнения (16) представленной в логарифмической форме:

$$10 \lg \eta_{\lambda} = 0,1n + 2 \lg R - \lg C_{\lambda} \quad (20)$$

$$10 \lg \eta_{3,2} = 0,1n + 2 \lg R - \lg C_{3,2}$$

$$10 \lg \eta_{5,6} = 0,1n + 2 \lg R - \lg C_{5,6}$$

$$10 \lg \eta_{10,3} = 0,1n + 2 \lg R - \lg C_{10,3}$$

Результаты расчетов η_{λ} представлены в таблице 2.

Таблица 2

Расчет значений η_{λ} для различных длин волн

Параметр отражаемости	Значение параметра отражаемости						
$\eta_{3,2}$ (см ⁻¹), $C_{\lambda}=1,51 \cdot 10^{26}$ см ³	$1 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-8}$
$\eta_{5,6}$ (см ⁻¹), $C_{\lambda}=6,17 \cdot 10^{26}$ см ³	$1 \cdot 10^{-12}$	$5 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-9}$
$\eta_{10,3}$ (см ⁻¹), $C_{\lambda}=2,41 \cdot 10^{27}$ см ³	$1 \cdot 10^{-13}$	$5 \cdot 10^{-13}$	$1 \cdot 10^{-12}$	$5 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-10}$
$\eta_{3,2}$, см ⁻¹ , $C_{\lambda}=1,51 \cdot 10^{26}$ см ³	$5 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$	10^{-6}	$5 \cdot 10^{-6}$	10^{-5}	$5 \cdot 10^{-5}$
$\eta_{5,6}$, см ⁻¹ , $C_{\lambda}=6,17 \cdot 10^{26}$ см ³	$5 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-8}$	10^{-7}	$5 \cdot 10^{-7}$	10^{-6}	$5 \cdot 10^{-6}$
$\eta_{10,3}$, см ⁻¹ , $C_{\lambda}=2,41 \cdot 10^{27}$ см ³	$5 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-8}$	10^{-7}	$5 \cdot 10^{-7}$

3. Расчет C'_{λ} МРЛ и характеристик Z ОО при различных размерностях

Для исключения зависимости C_{λ} и характеристик радиолокационной отражаемости Z (м³) от длины волны λ МРЛ вводят понятие радиолокационной отражаемости Z (м³), характеризующейся уравнением (9):

$$\eta_{\lambda} = \frac{Z \pi^5}{\lambda^4}, \quad (21)$$

где λ (м), η_{λ} (м⁻¹) и Z (м³)

Подставляя значение η_{λ} из (21) в (1) получим уравнение радиолокации атмосферных образований без учета длины волны МРЛ:

$$\frac{P_{\text{пр}}}{P_0} = \frac{\pi^3 P_{\text{пер}} G^2 c \tau \theta^2 Z_{\text{э}}}{P_0 4^5 \ln 2 \lambda^3 10^{0,17} R^2} \cdot K_{\text{РПУ}} K_{\text{ав}} \quad (22)$$

Уравнение (22) можно представить в следующем виде

$$\frac{P_{\text{пр}}}{P_0} = C'_{\lambda} \cdot \frac{Z_{\text{э}}}{R^2}, \quad (23)$$

где:

$$C'_{\lambda} = \frac{\pi^3 P_{\text{пер}} G^2 c \tau \theta^2}{P_0 4^5 \ln 2 \lambda^3 10^{0,17}} K_{\text{РПУ}} K_{\text{ав}}, \quad (24)$$

$$Z_{\text{э}} = \frac{P_{\text{пр}} R^2}{C'_{\lambda}} = \frac{(10 \lg \frac{P_{\text{пр}}}{P_0} = n) R^2}{C'_{\lambda}} = \frac{10^{0,1n}}{C'_{\lambda}} R^2 \quad (25)$$

Обозначим свободные члены, входящие в уравнении (24) буквой

$$f' = \frac{c\pi^3}{4^5 \ln 2} = 1,31 \cdot 10^9 \quad (26)$$

С учетом уравнения (26) уравнение (24) примет следующий вид:

$$C'_\lambda = \frac{P_{\text{пер}} G^2 c t \theta^2}{P_0 \cdot 10^{0,1\zeta} \lambda^2} f' \cdot K_{\text{РПУ}} K_{\text{ав}} \quad (27)$$

Расчет постоянной радиолокатора C'_λ , для трех каналов без учета длины волны проводился по данным инструментальных измерений (табл.3) технических характеристик МРЛ с привлечением уравнения (27) :

$$\begin{aligned} 10\lg C'_\lambda &= -20\lg\lambda + 10\lg P_\tau - \lg P_0 + 10\lg\tau + 20\lg G + 20\lg\theta - 0,1\zeta + 10\lg f' \\ 10\lg C'_{3,2} &= -10,1 + 51,8 - 136 - 57,0 + 102,2 - 41,2 - 6 + 91,2 = 282,9 \text{ dB} \\ 10\lg C'_{10,3} &= -20,6 + 57,7 - 138 - 57,0 + 83,2 - 31,6 - 6 + 91,2 = 261,6 \text{ dB} \\ 10\lg C'_{5,6} &= -15,0 + 54,8 - 138 - 57,0 + 87,2 - 35,1 - 6 + 91,2 = 262,9 \text{ dB} \end{aligned} \quad (28)$$

Результаты расчетов C'_λ представлены в табл.3.

Таблица 3

Расчёт постоянной МРЛ C'_λ без учета длины волны

	Значение канала			Параметр	Значения для параметров		
	МРЛ-5		МЕТЕОР		МРЛ-5		МЕТЕОР
	I канал	II канал	735 CDP 10		I канал	II канал	735 CDP 10
λ , см	3,2	10, 3	5,6	$20\lg \lambda$	-10,1	-20,26	-15,0
P_τ , кВт	150	850	450	$10\lg P_\tau$	51,8	59,3	56,5
P_0 , Вт	$2,5 \cdot 10^{-14}$	$1,6 \cdot 10^{-14}$	$1,6 \cdot 10^{-14}$	$10\lg P_0$	-136	-138	-138
τ , сек	$2 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$10\lg \tau$	-57,0	-57,0	-55,0
G , dB	$1,29 \cdot 10^5$	$1,44 \cdot 10^4$	$2,28 \cdot 10^4$	$20\lg G$	102,2	83,2	87,2
Θ , град	0,5	1,5	1,0	$20\lg \Theta$	-41,2	-31,6	-35,1
ζ , dB	6	5	5	Z	-6	-5	-5
f , см/с	$2,12 \cdot 10^9$	$2,12 \cdot 10^9$	$2,12 \cdot 10^9$	$10\lg f$	91,2	91,2	91,2
C'_λ , см ³	$1,95 \cdot 10^{-26}$	$1,44 \cdot 10^{-26}$	$1,95 \cdot 10^{-26}$	$10\lg C'_\lambda$	262,9	261,6	262,9

Для расчета характеристик радиолокационной отражаемости ОО с различными единицами измерений Z_d и $Z_a(\text{м}^3)$, $\lg Z_a$ и $\lg Z_d$ привлекались уравнения (5)– (13) и (25).

Здесь уравнение (25) представлено в логарифмической форме:

$$10\lg Z_{=0,1n} + 20\lg R - \lg C'_\lambda \quad (29)$$

$$10\lg Z_{=0,1n} + 20\lg R - \lg C'_{3,2}$$

$$10\lg Z_{=0,1n} + 20\lg R - \lg C'_{5,6}$$

Соотношения между единицами измерений характеристик радиолокационной отражаемости ОО представлены в табл. 4.

Таблица 4

Соотношения между единицами измерений характеристик радиолокационной отражаемости ОО

Параметр отражаемости	Значение параметра отражаемости						
$\eta_{3,2}, \text{см}^{-1}, C_\lambda = 1,51 \cdot 10^{26} \text{см}^3$	$1 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-8}$
$\eta_{5,6}, \text{см}^{-1}, C_\lambda = 6,17 \cdot 10^{26} \text{см}^3$	$1 \cdot 10^{-12}$	$5 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-9}$
$\eta_{10}, \text{см}^{-1}, C_\lambda = 2,4 \cdot 10^{27} \text{см}^3$	$1 \cdot 10^{-13}$	$5 \cdot 10^{-13}$	$1 \cdot 10^{-12}$	$5 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-11}$	$1 \cdot 10^{-10}$
$\lg Z_d$	0,5	1,2	1,5	2,2	2,5	3,2	3,5
$\lg Z_r$	-1,3	-0,6	-0,3	0,4	0,7	1,4	1,7
$Z'_d(\text{dBZ})$	5	12	15	22	25	32	35
$Z'_r(\text{dBZ})$	-13	-6	-3	4	7	14	17
$\eta_{3,2}, \text{см}^{-1}, C_\lambda = 1,51 \cdot 10^{26} \text{см}^3$	$5 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$
$\eta_{5,6}, \text{см}^{-1}, C_\lambda = 6,17 \cdot 10^{26} \text{см}^3$	$5 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-6}$
$\eta_{10}, \text{см}^{-1}, C_\lambda = 2,4 \cdot 10^{27} \text{см}^3$	$5 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-7}$
$\lg Z_d(\text{dBZ})$	4,2	4,5	5,2	5,5	6,2	6,5	7,2
$\lg Z_r(\text{dBZ})$	2,4	2,7	3,4	3,7	4,4	4,7	5,4
$Z'_d(\text{dBZ})$	42	45	52	55	62	65	72
$Z'_r(\text{dBZ})$	24	27	34	37	44	47	54

4. Обсуждение полученных результатов

В табл.1 и табл. 3 представлены значения постоянных МРЛ, которые определяют их энергетический потенциал и позволяют сравнивать различные МРЛ с точки зрения их обнаруживающей способности. Значения C_λ и C'_λ и радиолокационных параметров ($\eta_\lambda (\text{см}^{-1})$, $Z'_d (\text{dBZ})$ и $\lg Z'_d$) рассчитывались с помощью технических параметров с учетом и без учета длин волны.

Анализ табл.1 позволил выявить тенденцию увеличения роста C_λ с увеличением длины волны МРЛ от 3,2 до 10,3 см. Разность между экстремальными значениями C_λ составила 12 dB. Различия в показаниях постоянной МРЛ, рассчитанных по инструментальным данным с учетом длины волны, варьирует в широких пределах и могут быть вызваны характеристиками волноводного тракта и приемо-передаточных устройств [10]. При анализе табл. 3 разность между максимальным ($C'_{3,2} = C'_{5,6} = 262,9 \text{ dB}$) и минимальным значением ($C'_{10,3} = 261,6 \text{ dB}$) не превышает 1,3 dB.

Полученные в табл.1 и табл.3 значения C_λ и C'_λ , рассчитанные с учетом и без учета длины волны, хорошо согласуются с данными, полученными наиболее широко используемыми в мире МРЛ [9]. Для объективной оценки C_λ и C'_λ калибровку МРЛ необходимо проводить по реальным осадкам, полученным на наземной осадкомерной сети и и/или автоматизированных МРЛ, а также по совокупности реперных целей, выбираемых в разных азимутах и удалениях. На применяемой АСУ, после градуировки и калибровки МРЛ, необходимо записать файл местников и значение средней отражаемости совокупности местников, которые вносятся в акт калибровки МРЛ и в систему автоматического введения поправок на изменение его постоянной в каждом цикле обзора. [10].

В табл.2 представлены значения η_{λ_i} ОО, рассчитанные с учетом длины волны по формулам (16) и (20), а в табл. 4 - значения радиолокационной отражаемости ОО (Z) с различными единицами измерений, рассчитанные без учета длины волны по формулам (25) и (29). Анализ табл.2 и табл. 4 показал, что значения η_{λ_i} , измеренные в одном и том же облаке в реальном масштабе времени различными МРЛ (с $\lambda_1 = 3,2$ см, $\lambda_2 = 5,6$ см. и $\lambda_3 = 10,3$ см.), отличаются друг от друга на один и два порядка.

Анализ значений η_{λ_i} , рассчитанных с учетом длины волны МРЛ показал, что они отличаются друг от друга на один и два порядка (табл.4). Например, при значениях: $\eta_{3,2} = 1 \cdot 10^{-7}$ см⁻¹, $\eta_{5,6} = 1 \cdot 10^{-8}$ см⁻¹ и $\eta_{10,3} = 1 \cdot 10^{-9}$ см⁻¹, соответствующим критериям града в облаке: $\lg Z_d = 4,5$ или $Z_d = 45$ dBZ, а $\lg Z_a = 2,7$ или Z_a dBZ, где d и a - диаметры и радиусы рассеивающих частиц. Таким образом, табл.4 позволяет перевести значения η_{λ_i} , рассчитанные с учетом различных длин волн и постоянных МРЛ в значения Z , а значения Z - в соответствующие значения η_{λ_i} ,

Заключение

1. По данным литературных источников проведен анализ распространения, поглощения и рассеяния радиоволн сантиметрового диапазона частицами ОО. Среднее значение принимаемого сигнала $P_{пр}$ на входе приемника МРЛ зависит от его технических характеристик и радиолокационных параметров ОО. Зависимость выражается уравнением радиолокации атмосферных образований.

2. Для трех каналов, с помощью технических характеристик МРЛ:

- с учетом длины волны (λ_i) рассчитаны их постоянные C_λ : при $\lambda = 3,2$ см $C_{3,2} = 261,8$ dB, $\lambda = 5,6$ см $C_{5,6} = 267,9$ dB, $\lambda = 10,3$ см $C_{10,3} = 273,8$ dB;

- без учета длины волны (λ_i), рассчитаны их постоянные C'_λ : при $\lambda = 3,2$ см, $C'_{3,2} = 262,9$ dB, $\lambda = 5,6$ см $C'_{5,6} = 262,9$ dB, $\lambda = 10,3$ см $C'_{10,3} = 261,6$ dB;

С помощью постоянных (C_{λ_i}) МРЛ,:

- с учетом длины волны (λ_i) рассчитаны η_{λ_i} . (табл. 2 и табл.4);

- без учета длины волны (λ_i), рассчитаны Z (табл.4).

3. Соотношения между $\eta_{\lambda i}$ и Z , приведенные в табл.4, могут быть использованы для перевода значений $\eta_{\lambda i}$, рассчитанных с учетом различных длин волн и постоянных МРЛ, в значения Z и обратно;

4. Полученные результаты могут быть применены при:

- построении климатических карт и составления таблиц распределения радиолокационных параметров ОО, сопровождающихся опасными явлениями погоды;

- планировании и проведении проектов по воздействию на градовые процессы и искусственному увеличению осадков из облаков;

- совершенствовании существующих и разработке новых:

- радиолокационных критериев градоопасности объектов воздействия и критериев пригодности облаков для искусственного вызывания осадков из них;

- методов оценки физической и экономической эффективности при проведении противоградовых работ и работ по искусственному увеличению осадков;

- радиолокационных методов диагноза и сверхкраткосрочного прогноза грозоградовых процессов, сопровождающихся катастрофическими ливнями, градобитиями и шквалами.

Список литературы

1. Абшаев М.Т. Состояние оперативных программ подавления града в мире. // Обзорение прикладной и промышленной математики. Т.3., В 2. 1996. С 246 - 260.
2. Абшаев М.Т. Активные воздействия на градовые процессы. – РД. 52.37. 596. 98. М:1998.-32 с.
3. Абшаев М.Т., Малкарова А. М. Методические указания. Методы оценки эффективности воздействия на градовые процессы – РД. 52.37. 67 – 98. М:1999. -20 с
4. Абшаев М.Т., Малкарова А. М. Оценка эффективности предотвращения града. - С.-Петербург. Гидрометеиздат, 2006. – 279 с.
5. Абшаев М.Т., Абшаев А. М., Малкарова А. М. Состояние и перспективы развития противоградовых работ. Сборник Международной научная конференция с элементами научной школы «Инновационные методы и средства исследований в области физики атмосферы, гидрометеорологии, экологии и изменения климата», – Ставрополь, Издательство Северо-Кавказского федерального университета. 2013. С .3 – 11.
6. Атлас Д. Успехи радарной метеорологии. – Л. - Гидрометеиздат, 1967. – 195 с.
7. Баттан Л.Дж. Р адиолокационная метеорология. Пер. с английского. – Л. - Гидрометеиздат, 1979. – 231с.
8. Брылев Г.Б., Гашина С.Б., Низдойминога. Радиолокационные характеристики облаков и осадков. – Л.: - Гидрометеиздат, 1986. – 230 с.

9. Ватиашвили М.Р. Физические основы метеорологической защиты населенных пунктов и важнейших объектов // Математическое моделирование в научных исследованиях, часть II. Материалы Всероссийской научной конференции... Ставрополь. 27-30. сентября 2000. С. 88-95.
10. Ватиашвили М.Р. Джангуразов Х.Х., Кассиров В.П. //Способ активных воздействий на градовые процессы. Патент РФ на изобретение. №2321871, заявка № 2006 121792, А 01 G 15/10/2007.
11. Ватиашвили М.Р. Влияние фазовых переходов воды на параметры облаков и облачных систем, развивающихся в естественных условиях и подвергшихся воздействию частицами льдообразующих реагентов. // Радиолокационная метеорология и активные воздействия. Сборник статей ГГО, посвященный памяти В.Д. Степаненко. 2012. С. 162 – 177.
12. Ватиашвили М.Р. Исследование градоопасных и градовых ячеек в периоды проведения и отсутствия противогодовой защиты. Международная конференция “Актуальные проблемы геофизики”. Материалы научной конференции, посвященной 80–летию со дня основания Института геофизики. Тбилиси, 2014, с. 203-207.
13. Ватиашвили М. Р. Метод прерывание града на подступах защищаемой территории со стороны вторжения градовых облаков //Наука. Инновации. Технологии. 2016. 4.С.7-24
14. Довиак Р., Зрнич Д. Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения. – Л.: Гидрометеиздат, 1988.- 512 с.
15. Метеорологические автоматизированные радиолокационные сети. Институт радарной метеорологии. - С.-Петербург. Гидрометеиздат, 2002. – 331 с.
16. Организация и проведение противогодовой защиты. РД 52.37.731. – Нальчик ООО. Редакция журнала «Эльбрус». 2010. – 86 с. .
17. Руководство по применению радиолокаторов МРЛ-4, МРЛ-5 и МРЛ-6 в системе градозащиты. - С.-Петербург Л.: Гидрометеиздат, 1993. –356 с.
18. Руководство по производству наблюдений и применению информации с неавтоматизированных радиолокаторов МРЛ-1 МРЛ-2, МРЛ-5. - С.-Петербург. Гидрометеиздат, 2002. – 331 с.
19. Сванидзе Г.Г., Бегалишвили Н.А., Ватъян М.Р., Карцивадзе А.И., Гудушаури Ш.Л. Методические указания по организации и проведению работ по искусственному увеличению осадков из конвективных облаков с помощью противогодовой техники. М., Гидрометеиздат, 1986, 25 с.
20. Степаненко В.Д. Радиолокация в метеорологии (радиометеорология). 2-е издание. – Л. Гидрометеиздат, 1979. – 343 с.

РАДИОЛОКАЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И РАЗВИТИЯ ОТДЕЛЬНЫХ КОНВЕКТИВНЫХ ЯЧЕЕК В КОМПЛЕКСАХ МНОГОЯЧЕЙКОВЫХ ГРАДОВЫХ ПРОЦЕССОВ

Макитов В.С., Инюхин В.С., Жарашуев М.В.

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

Введение

Закономерности взаимодействия отдельных конвективных ячеек в мезомасштабных комплексах многоячейковых градовых процессов остаются наименее изученными на сегодняшний день, несмотря на то, что именно многоячейковые градовые процессы имеют наибольшую повторяемость практически во всех градоопасных регионах планеты. От региона к региону варьируется только процент упорядоченных и неупорядоченных многоячейковых процессов. Взаимодействие отдельных конвективных ячеек, составляющих многоячейковый кластер, определяет характер формирования, развития и смены ячеек, продолжительность стадии их максимального развития (градовой стадии) и, как следствие, продолжительность существования самого кластера. Одним из наиболее перспективных подходов к решению таких задач является комплексный анализ результатов многочасовых непрерывных радиолокационных наблюдений градовых процессов, выполненных с использованием автоматизированных систем сбора, обработки и представления радиолокационной информации, получивших широкое распространение в последние годы. Кроме чисто научного интереса, процессы взаимодействия конвективных ячеек имеют и большое прикладное значение при проведении оперативных проектов по засеву облаков с целью увеличения осадков или подавления града. Вне зависимости от применяемой методики воздействия (ракетная или самолетная), физически обоснованный выбор объекта, места, температурного уровня и интенсивности засева невозможен без учета структуры и динамики развития взаимодействующих ячеек многоячейковой облачной системы.

В связи с этим целью настоящей работы является анализ формирования и развития отдельных ячеек многоячейковых градовых процессов, наблюдавшихся над центральной частью Северного Кавказа. Основу экспериментального материала составили результаты многочасовых непрерывных радиолокационных наблюдений с использованием двухволнового метеорологического радиолокатора МРЛ-5, оснащенного автоматизированной системой сбора, обработки и анализа радиолокационной информации MeteoX [1]. Радиолокационные наблюдения проводились непрерывно от момента появления первого радиозеха до полной диссипации облака. Временная дискретность регистрации радиолокационных параметров по полному пространственному обзору облака составляла в среднем 3 минуты. Объем статистической выборки 314 градо-

вых ячеек, для каждой из которых строились временные распределения основных радиолокационных параметров, как измеряемых, так и рассчитанных в рамках используемой автоматизированной системы.

1. Синоптические и термодинамические условия формирования многоячейковых градовых процессов на Северном Кавказе

Анализ наиболее типичных синоптических ситуаций, приводящих к развитию многоячейковых градовых процессов, проводился согласно принципам, изложенным в [2]. Как известно, развитие и интенсивность градового процесса определяется не только мезомасштабными термодинамическими и циркуляционными характеристиками рассматриваемого региона, но и факторами макромасштабной циркуляции в средней и верхней тропосфере. К этим факторам следует отнести характер макромасштабной циркуляции, глубину и направленность макроложбины, интенсивность развитых в ней циклонов, с которыми связаны «градоопасные зоны» - области наиболее интенсивной адвекции холодного воздуха к региону прогноза.

На рис. 1. в качестве примера синоптических ситуаций, характерных для развития многоячейковых градовых процессов на Северном Кавказе, приводятся карты макромасштабной циркуляции в средней тропосфере (АТ 500 гПа) 05.06.2012 г. (а), 06.06.2012 г. (б) и 07.06.2012 г. (в). Зеленым цветом выделены «градоопасные зоны». В эти дни отмечались многоячейковые градовые процессы с нарастающей интенсивностью, а процесс 07.06.2012 г. характеризовался выпадением крупного града.

Как видно из рис.1, характер макромасштабной циркуляции в средней тропосфере (АТ 500гПа) представлял собой зональный тип Wc с нарушением зональности и был определен по характерной для данного месяца изогипсе 560гПа. Арктический центр низкого давления находится в районе моря Лаптевых ($t_{ц} = -24^{\circ}\text{C}$, $n = 4$), но, макроложбина, распространившаяся к югу и способствовавшая развитию градового процесса, возникла благодаря многоцентровой циклонической депрессии, сформировавшейся над Скандинавией ($t_{ц} = -24^{\circ}\text{C}$, $n = 3$, рис.1а). Такой характер макромасштабной циркуляции приводит, как правило, к развитию локальных многоячейковых грозоградовых процессов средней интенсивности.

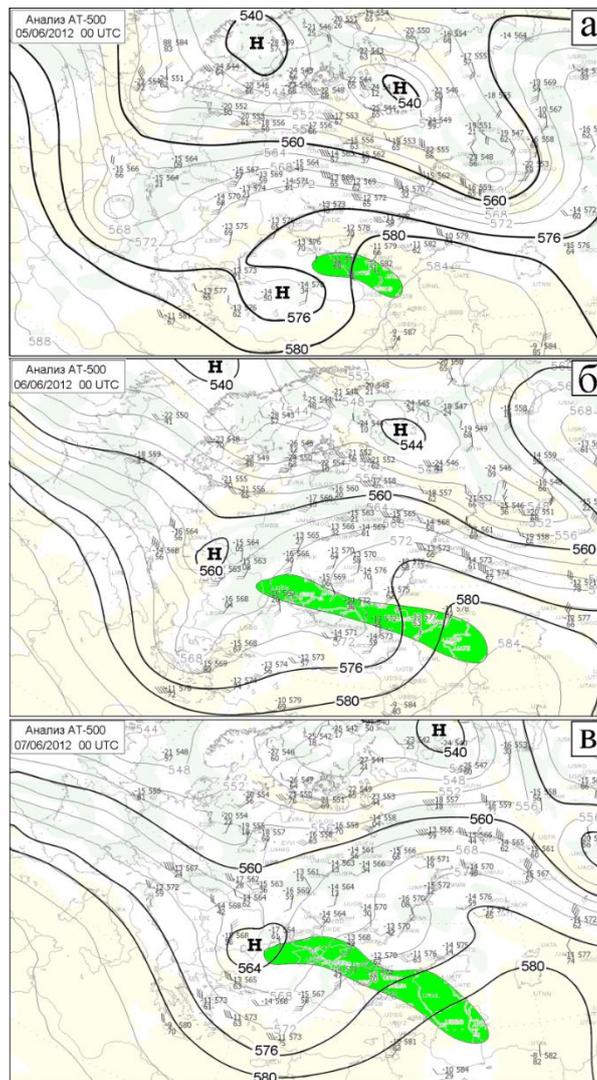


Рис.1. Характер макромасштабной циркуляции в средней тропосфере (АТ 500 гПа) 05.06.2012 г. (а), 06.06.2012 г. (б) и 07.06.2012 г. (в). Зеленым цветом выделены «градоопасные зоны».

Главной особенностью термодинамики атмосферы в дни с развитием многоячейковых процессов является слабый сдвиг ветра в слое облакообразования, а иногда и его отсутствие. При этом запас энергии неустойчивости в значительной степени определяет интенсивность градового процесса, а сдвиг ветра влияет на степень упорядоченности и время жизни, как отдельных градовых ячеек, так и процесса в целом.

На рис. 2. приводятся данные температурно-ветрового зондирования атмосферы в дни с развитием многоячейковых градовых процессов на Северном Кавказе.

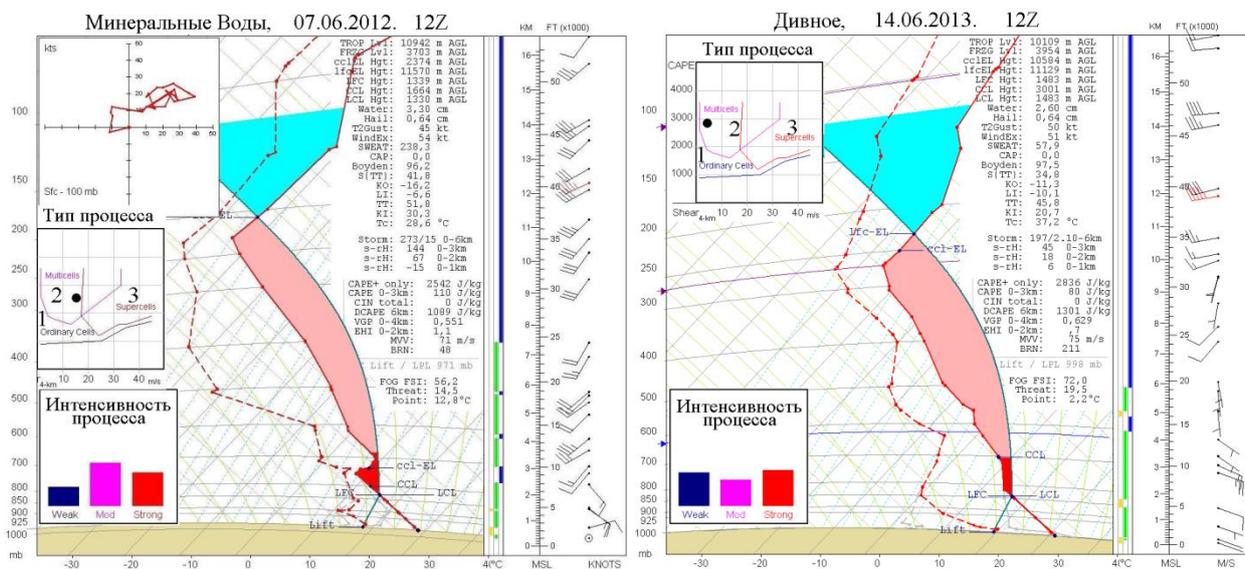


Рис.2. Графическая интерпретация результатов температурно-ветрового зондирования атмосферы в дни с многоячейковыми градовыми процессами 07.06.2012г. и 14.06.2013г. Цифрами 1-3 на врезке рисунка обозначены области одноячейковых, многоячейковых и суперячейковых процессов, соответственно.

Следует отметить, что процесс 07.06.2012г. характеризовался наличием сдвига ветра, и поэтому, на врезке рисунка 2 его положение находится на границе области многоячейковых и суперячейковых процессов. Такое соотношение энергии неустойчивости и сдвига ветра обычно отмечается для процессов переходного типа, когда отдельные градовые ячейки имеют стадию квазистационарности, характерную для суперячейковых градовых облаков. Процесс 14.06.2013г. развивался при отсутствии сдвига ветра практически до уровня 200 гПа, и поэтому, в этом случае наблюдались в основном симметричные градовые ячейки. Можно сказать, что эти два случая характеризуют границы диапазона природной изменчивости термодинамических условий формирования многоячейковых градовых процессов.

2. Взаимодействие отдельных ячеек при развитии многоячейковых градовых процессов

Как известно, взаимодействие отдельных конвективных ячеек, составляющих многоячейковый кластер, определяет характер формирования, развития и смены ячеек, продолжительность стадии их максимального развития, градовой стадии, и, как следствие, продолжительность существования самого кластера. Одним из процессов, требующих детального исследования является процесс слияния отдельных конвективных ячеек [5]. Результаты такого слияния зачастую приводят к формированию ячеек с характеристиками, значительно превосходящими их значения до начала процесса слияния. Причем сам механизм такого слияния не является особенностью только многоячейковых облачных систем. Аналогичные процессы отмечается и при развитии

суперячейковых градовых облаков, когда периферийные фидерные облака вовлекаются в систему основного восходящего потока [6]. В данной работе анализ процесса слияния отдельных конвективных ячеек выполнен на примере многоячейковой облачной системы, развивавшейся над центральной частью Северного Кавказа 07.06.2014г.

Первое радиоэхо исследуемого кластера было зарегистрировано радаром в 17:42 юго-восточнее Нальчика, в районе административной границы между Кабардино-Балкарией и Северной Осетией. Высота верхней границы радиоэха в это время составляет 8,0 км, а значение максимальной радиолокационной отражаемости – 27 dBZ. Осадки в ней еще не сформированы. Интенсивно развиваясь, уже через 12 мин, в 17.54, эта ячейка достигает градовой стадии, из нее отмечается выпадение мелкого града, крупы и ливневых осадков. Высота верхней границы радиоэха H_v в это время составляет 11,4 км, высота зоны отражаемости 45 дБЗ H_{45} – 9,3 км, а значение максимальной радиолокационной отражаемости Z_{max} – 50 dBZ.

Правее ячейки 1, в том же кластере, в 17.45 регистрируется первое радиоэхо градовой ячейки 2. Именно такой порядок зарождения и смены градовых ячеек характерен для упорядоченных многоячейковых градовых процессов с правосторонним развитием. В 17.54 H_v ячейки 2 составляет 9,9 км, а Z_{max} – 43 dBZ. Обе ячейки интенсивно развиваются. Всего через 9 мин, в 18.03, H_v ячейки 1 составляет 11,7 км, H_{45} – 6,8 км, Z_{max} – 52 dBZ.

На рис. 3 приводится радиолокационная структура радиоэха исследуемого кластера в 18:06 и в 18:20.

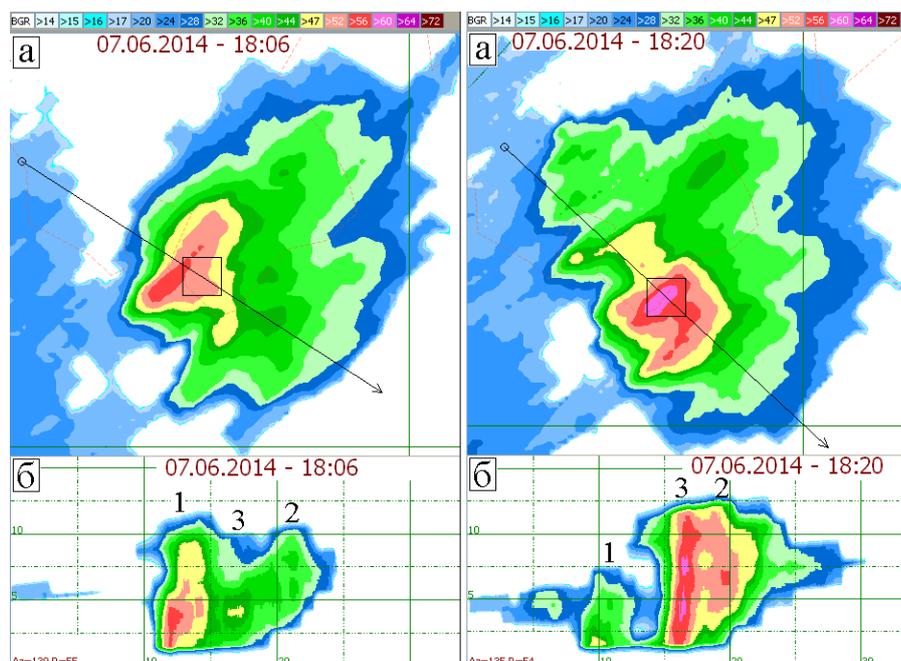


Рис. 3. Горизонтальная (а) и вертикальная (б) структура радиоэха ячеек 1, 2 и 3 в 18:06 и 18:20. Направления вертикальных разрезов указаны стрелками.

В 18.06 радиолокационные параметры ячейки 1 достигли своих максимальных значений ($H_B - 11,9$ км, $H_{45} - 10,9$ км, $Z_{\max} - 59$ dBZ, высота зоны отражаемости 55 dBZ $H_{55} - 8,6$ км). Примерно в этот период начинается процесс слияния ячеек 1 и 2, который приводит к формированию между ними новой ячейки 3. В дальнейшем, в течение нескольких минут, ячейка 1 еще сохраняет максимальные значения своих радиолокационных параметров. А затем, к 18.15 доминирующее положение в кластере занимает уже новая градовая ячейка 3. В это время значения ее радиолокационных параметров превосходят соответствующие значения параметров ячеек 1 и 2. Радиолокационная структура кластера приобретает структуру классического упорядоченного многоячейкового градового процесса. Правый фланг кластера активный и обновляющийся, соответствует области зарождения новых ячеек, а левый, распадающийся фланг, соответствует области диссипации ячеек, области выпадения жидких осадков. Ячейка 3 продолжает активно развиваться, в то время как параметры ячеек 1 и 2 стремительно падают. Уже через 6 минут, в 18.20, для ячейки 3 H_B составляет 12,8 км, $H_{45} - 11,8$ км, $H_{55} - 11,4$ км, $Z_{\max} - 64$ dBZ. Интересно отметить, что структура радиоэхо ячеек в период слияния имеет вид, аналогичный приведенному в [5] для градового процесса, наблюдавшегося 10.08.2008 г. над континентальной Грецией. Возможно, что общие закономерности процесса слияния характерны для облаков различных физико-географических районов.

Как видно из рис. 3, в 18:06 ячейка 1 является доминирующей в кластере. Однако максимум радиолокационной отражаемости смещен в нижнюю часть радиоэха и расположен в теплой части атмосферы. В течение ближайших циклов обзора она прекратит свое существование, и не будет больше регистрироваться радаром как отдельная ячейка. В этот же период ячейка 3 достигает максимума своего развития. Ее вертикальный разрез в плоскости максимальной радиолокационной отражаемости, приведенный на рис. 3, показывает, что даже область максимальной отражаемости (контур более 60 dBZ) расположена на высотах 7 – 9 км. Это – оптимальная зона для роста крупного града в облаке. Ячейка 3 сохраняет свои максимальные характеристики в течение более получаса. Это свидетельствует о наличии относительно непродолжительной стадии квазистационарности, характерной для суперячейковых градовых облаков и облаков переходного типа. К 18.44 градовые ячейки 1 и 2 полностью диссипировали и радаром больше не регистрируются. Градовая ячейка 3 находится на стадии квазистационарности, значение максимальной радиолокационной отражаемости в это время составляет 64 dBZ.

На рис. 4 приводятся временные распределения основных радиолокационных характеристик ячеек 1-3.

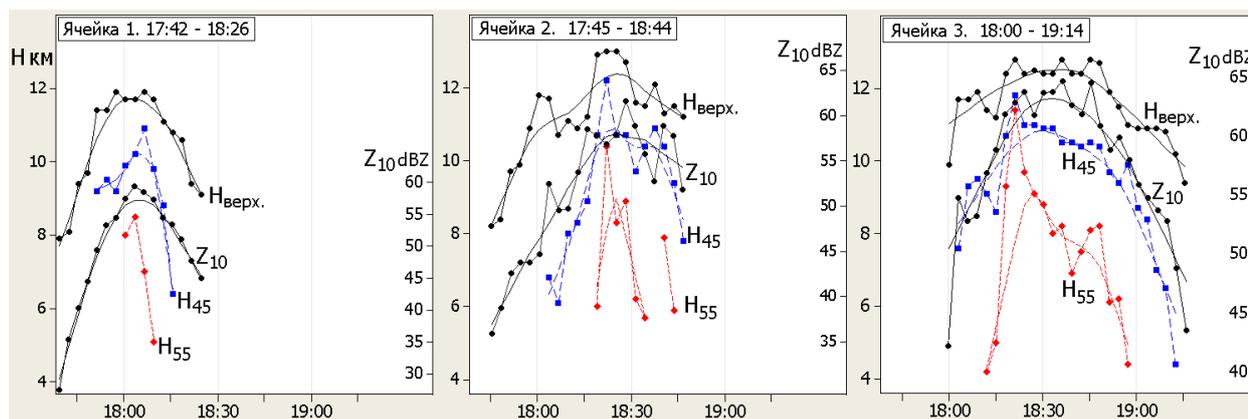


Рис. 4 – Временные распределения основных радиолокационных параметров ячеек 1-3. Z_{10} – максимальная радиолокационная отражаемость на длине волны $\lambda=10$ см, $H_{\text{верх.}}$ – высота верхней границы радиоэха, H_{45} , H_{55} – высоты зон повышенной отражаемости, ограниченных контурами в 45 и 55 dBZ, соответственно.

Значения параметров, приведенных на рис. 4, получены с использованием автоматизированной компьютерной системы сбора, обработки и анализа радиолокационной информации с шагом по времени 3 минуты. Как видно из рисунка, ячейка 1 имеет наименьшие значения всех радиолокационных параметров и наименее продолжительное время жизни. Параметры ячеек 2 и 3 до момента слияния были примерно одинаковыми. Однако дальнейшее их развитие сильно различается. В результате слияния отмечается взрывной рост значений высот повышенной отражаемости H_{45} и H_{55} ячеек 2 и 3. Причем, наиболее резко выросло значение H_{55} ячейки 3. С 18:15 до 18:21 это значение возросло с 5,0 км до 11,4 км, т.е. скорость роста зоны повышенной отражаемости в этот период превышала 1 км/мин. Проникновение области, ограниченной контуром радиолокационной отражаемости 55 dBZ в зону отрицательных температур свидетельствует о наличии крупных частиц в зоне роста града и увеличении объема переохлажденной части градового очага. С другой стороны это указывает на наличие более протяженных траекторий растущих градин и, как следствие, увеличение времени нахождения частиц в области наиболее оптимальных термодинамических условий для роста крупного града. При этом для ячеек 2 и 3 время существования контура 55 dBZ составило 24 и 45 мин соответственно. Для ячейки 1 это значение существенно ниже – 9 мин. Примерно такое же соотношение отмечается и для времени существования контура 45 dBZ – 24, 42 и 69 мин, соответственно для ячеек 1-3.

Таким образом, анализ радиолокационных данных по структуре и динамике развития трех конвективных ячеек многоячейкового градового процесса 06.07.2014 г. показал, что ячейки 1-3 развивались в одном кластере, объединенном общим контуром радиолокационной отражаемости в 47 dBZ. В результате слияния ячеек 2 и 3 радиолокационные параметры обеих ячеек значи-

тельно увеличились. Ячейка 3 стала доминантной в кластере, а продолжительность ее жизни существенно превысила аналогичные значения для ячеек 1 и 2. Максимальные значения радиолокационных параметров за все время существования кластера отмечаются именно у ячейки 3.

Работа подготовлена при финансовой поддержке РФФИ грант (16-05-0019716_a).

Список литературы.

1. Инюхин В.С., Суслов В. В. Алгоритмы автоматизированного распознавания и анализа радиоза облаков // Труды ВГИ, 2010. – Вып. 96. – С. 89-100.
2. Гораль Г.Г., Баркова М.В. Кинематика высотных циклонов и интенсивность градовых процессов на Северном Кавказе // Труды ВГИ. – 1989. – Вып.74. – С. 124 – 132.
3. Баркова М.В. Влияние факторов макро- и мезомасштабной циркуляции на интенсивность градовых процессов в регионе Кавказа // Тр. ГМЦ, 1990. Вып. 308. С.101-108.
4. Газаева З.А., Макитов В.С. Распределение траекторий перемещения многоячейковых градовых процессов на Северном Кавказе // Труды ВГИ, 1991. Вып. 80. С.93-99.
5. T. Karacostas et al. Analysis and numerical simulation of a real cell merger using a three-dimensional cloud resolving model, 2016, Atmospheric Research, 169, 547-555.
6. D. Rosenfeld, W.L.Woodley, T. W. Krauss, Makitov V. Aircraft microphysical documentation from cloud base to anvils of hailstorms feeder clouds in Argentina. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2006, vol. 45, pp. 1261-1281.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ БАЗЫ ДАННЫХ ПО АКТИВНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ В ИЗУЧЕНИИ ВЛИЯНИЯ АКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ГРАДОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

Борисова Н.А., Суспицына Ю.В.

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

Информационные технологии в современном обществе развиваются очень стремительно, они проникают во все сферы человеческой деятельности. Зачастую приходится работать с данными из разных источников, каждый из которых связан с определенным видом деятельности. Для координации всех этих данных необходимы определенные знания и организационные навыки.

Климатические и погодные условия являются одними из ведущих факторов, формирующих условия проживания населения. К опасным метеорологическим явлениям (ОМЯ) относятся явления погоды, которые, по своей интенсивности, продолжительности и времени возникновения представляют угрозу безопасности, здоровью и жизни людей. Эти погодные явления отрицательно воздействуют на экосистемы, наносят значительный экономический ущерб, могут приводить к авариям и катастрофам. На фоне наблюдаемой динамики климата изучение данных процессов становится еще более актуальным в геоэкологическом аспекте. Так, при составлении перспективных планов развития климато-зависимых отраслей хозяйственной деятельности необходимо учитывать то обстоятельство, что климат будет меняться и в необозримом будущем. Вынужденная адаптация к последствиям перестройки климатических процессов, прогнозируемым в будущем, потребует колоссальных финансовых затрат. В то же время изменение климатических условий приведет к изменениям в природной среде и отразится уровне рек, повлияет на пожароопасную обстановку, аномальные погодные условия, сезонную ритмику, экологические катастрофы, таяние многолетнемерзлых пород. Смещение климатических зон увеличит риск появления новых инфекционных и паразитарных болезней .[2]

В Росгидромете получение, накопление и обработку геофизической информации осуществляют ряд учреждений, к их числу относятся ИПГ, ГГО, ЦАО, ААНИИ, НИЦ “Планета”. В указанных учреждениях подготовлено более 80 массивов гелиогеофизической информации за период с начала 70-х годов по настоящее время, общим объемом более 1,5 Тбайт. Данные размещаются в основном на лазерных дисках. Геофизическая служба Росгидромета осуществляет подготовку обобщений на постоянной основе: – Ежемесячный обзор гелиогеофизической обстановки. – Ежемесячный бюллетень «Космические данные». В РАН подготовку массивов информации по гелиогеофизической обстановке осуществляется в более 10 учреждениях – ИФЗ, ИЗМИРАН, ИКИР ДВО, ИКФИА СО, ИССФ, ИОА СО и др.

Обобщения готовятся периодически в зависимости от потребностей организации в геофизической информации для выполнения исследовательских проектов или других задач. Обзоры и бюллетени не стандартизированы, часто пересекаются по содержанию. В целом, накопление и обработка гелиогеофизической информации осуществляется с использованием большого количества слабо связанных между собой технологий. В технологиях используется широкий спектр программного обеспечения, форматов и структур данных, классификаторов и кодов.

Существенно различаются технологии обработки информации в зависимости от платформ наблюдений: наземная и космическая сети наблюдений. Коллекции геофизических дан-

ных ведутся и поддерживаются отдельно друг от друга и, как следствие, характеризуются высоким уровнем дублирования. В большинстве случаев это вызвано организационными особенностями соответствующих служб, когда ответственность за сбор и архивацию данных несут различные ведомства и службы, а также отсутствием технологий, обладающих средствами интеграции разнородных данных. Создание и хранение совместных массивов синхронизированных данных наблюдений за геофизическими параметрами окружающей среды не ведется.

В геофизической службе Росгидромета и РАН широко применяются традиционные средства доставки оперативной геофизической информации по каналам связи (телефону, телеграфу, телексу, радио, автоматизированной системе передачи данных, электронной почте и пр.) осуществляется гелиогеофизическими службами Росгидромета и РАН в различных режимах. Историческая и обобщенная (аналитическая) информация предоставляется в основном по запросам в организацию-держатель на технических носителях (лазерные диски), по электронной почте или посредством размещения требуемой информации на ftp-серверах. Преобладает форма адресного обслуживания, причем реализация и мониторинг обслуживания (адреса пользователей, статус доставки информации и др.) выполняются преимущественно вручную персоналом центров ГС или специалистами учреждений. В последние годы с развитием телекоммуникационных технологий все большее значение приобретает применение web-ориентированных технологий, обеспечивающих on-line доступ к оперативной и задержанной геофизической информации в режимах адресного и многократного использования. [3]

Наличие больших объемов накопленных данных, с одной стороны, и ограниченное их одновременное использование, с другой стороны, выдвинули проблему доступа к ним на первый план. Все это в конечном счете влияло на эффективность работы с данными и, соответственно, на качество проводимых климатических обобщений и ряда других работ, связанных с обслуживанием народнохозяйственных организаций.

Определение очередности (порядка) создания единой базы данных за весь период наблюдений, ее структуры, мер по сокращению разрыва между современными средствами обработки данных и доступностью уже накопленных стало актуальной задачей. При ее успешном решении возможен выход на новый уровень исследований и развития климатологической обработки данных наблюдений.

Современные системы управления базами данных обеспечивают как физическую (независимость от способа хранения и метода доступа), так и логическую независимость данных (возможность изменения одного приложения без изменения остальных приложений, работающих с этими же данными). Создание базы данных по активным воздействиям на основе электронных библиотек повысит эффективность поиска и использования накопленной информации.

На основе многолетней работы противорадовых служб была создана база данных по материалам активных воздействий на основе Microsoft Access с целью рационального использования и грамотного оперирования как уже существующих, так и перспективных данных для решения различных научно-исследовательских и практических задач, в частности - для изучения динамических процессов климата региона, а также для рационального ведения хозяйственной деятельности и ее планирования. Это позволит, в свою очередь, повысит эффективность сбора необходимой информации, ее систематизацию, анализ, хранение и пополнение фактическими климатическими данными.

Программа реализована средствами Microsoft Access. Реализован удобный пользовательский интерфейс для безопасного и легкого ввода информации. Разработанная база данных состоит из 47 таблиц, которые разбиты на три раздела. Разделы «Данные» и «Техническая информация» заполняются по телеграммам, присылаемым с противорадовых военизированных служб. Раздел «Дополнительная информация» заполняется информацией необходимой для более полного понимания противорадовых работ (руководящие документы, файлы обзора и т.д.). Использование базы данных как безбумажной технологии дает пользователю многочисленные преимущества:

Компактность. Информация хранится в базе данных в электронном виде, нет необходимости хранить многотомные бумажные картотеки. В архив принимаются и хранятся «информационные объекты» (файлы), включающие, главным образом, содержательную и контекстную информацию (данные). В долговременной перспективе (более 10 лет) необходимо проведение миграции документов в программно независимые форматы (страховые форматы).

Оперативность доступа к архивным электронным документам может обеспечиваться тем, что они будут приниматься, храниться и/или своевременно переводиться в форматы текущей информационной системы организации/архива — пользовательские форматы.

Достоинствами созданной базы данных является: высокая скорость обработки информации компьютером намного выше ручной обработки и низкие трудозатраты. Нет необходимости в рутинной ручной работе над данными. Дополнительные преимущества появляются при использовании базы данных в многопользовательской среде, поскольку становится возможным осуществлять централизованное управление данными. В дальнейшем база данных по активным воздействиям будет усовершенствоваться с учетом потребностей пользователей, и пополняться полученными ежегодными данными с ВС. [1, 5]

Научно обоснованная оценка эффективности является одной из важнейших компонент проектов модификации погоды. Проблема оценки эффективности противорадовых работ является весьма сложной и многогранной. Эффективность и себестоимость противорадовых ра-

бот в значительной степени зависят от градоопасности региона, ценности защищаемых культур, повторяемости града и других, неблагоприятных для сельского хозяйства, атмосферных явлений, интенсивности и специализации сельскохозяйственного производства, особенностей применяемой агротехники, характеристик ущерба от разных стихийных явлений, и в том числе от града. Поэтому для оценки эффективности российской технологии противогодовой защиты в разных регионах рассматриваются их физико-географические и агроклиматические особенности, профиль сельскохозяйственного производства, климатологию града и градоопасность этих регионов. В базе данных по активным воздействиям внесены основные параметры для анализа работы противогодовой защиты. [4] Функциональные возможности данной базы позволят в перспективе проводить сравнительный анализ работ противогодовых служб на основе расчета экономической и физической эффективности за определенный промежуток времени; выявлять изменения в ходе развития градовых процессов. [6] Систематизированная таким образом информация может использоваться для решения экономических задач, в сфере природопользования, послужит развитию научно-исследовательской деятельности. Исследования, проведенные на основе полученной информации, обеспечат поддержку территориальному планированию, прогнозированию земельных ресурсов, повышение осведомленности органов государственного управления, субъектов экономики, научной общественности о происходящих и будущих изменениях опасных природных процессов и их последствиях, а так же о возможностях их смягчения.

Список литературы

1. Абшаев М.Т. Оперативный контроль эффективности воздействия на градовые процессы // Тр. ВГИ. - 1981. - Вып. 72. - С. 81 - 99.
2. Гребенюк Г.Н., Кузнецова В.П. Геоинформационная база данных метеорологической и фенологической информации тюменской области // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 5-6. – С. 1233-1241.
3. Концепция построения и развертывания интегрированной информационно- телекоммуникационной системы для сбора и обмена геофизической информации. ГУ «Гидрометцентр России». Москва 2009.
4. Малкарова А.М. Статистическая оценка эффективности ракетно-артиллерийской технологии противогодовой защиты // Тезисы Всероссийской конференции по ФО и АВ на гидромет. процессы. - Нальчик. 2001. С.125-127.
5. РД 52.37.732-2010. Методы оценки эффективности активного воздействия на градовые процессы и порядок отчетности о проведении противогодовой защиты.
6. РД 52.37.746–2010 Порядок сбора и обработки данных о градобитии, Нальчик,2010. -19с.

ИСТОРИЯ СТАНОВЛЕНИЯ И РАЗВИТИЯ АКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ В СТАВРОПОЛЬСКОМ КРАЕ

Акимова И.И., Ресенчук С.Е., Кузьминова А.Г.

ФГБУ «Ставропольская военизированная служба по активному воздействию на метеорологические и другие геофизические процессы», г. Ставрополь

В 1988 г. по инициативе Правительства Ставропольского края был создан Ставропольский филиал Высокогорного геофизического института (СФ ВГИ), который осуществлял исследования и опытно-производственные работы по искусственному увеличению осадков (ИУО). Директором СФ ВГИ был Эмба Январби Алиевич - один из авторов патентов, правообладателями которых являются СтНППЦ («Авиационный комплекс для активных воздействий на облака», «Пиротехнический патрон для стимулирования осадков») и СФ ВГИ («Генератор аэрозоля»).

Опытно-производственные работы по ИУО в Ставропольском крае проводились на площади около 2,5 млн.га с применением арендуемых самолетов Як-40, Ан-12, Ан-26, Ан-72, оснащенных кассетами для отстрела пиропатронов ПВ-26 и ПВ-50, содержащих кристаллизующий реагент с йодидом серебра. Работы осуществлялись в период с мая по июнь, и программа предусматривала ИУО из конвективных облаков, имеющих для этой цели максимальный потенциал. Оценка экономической эффективности работ по ИУО на основе модели «урожай-осадки» показала, что в Ставропольском крае средний годовой прирост осадков в вегетационный период май-июнь обеспечил рост урожайности сельскохозяйственных культур. Например, прирост годового валового сбора урожая пшеницы (профилирующей культуры) приблизительно равнялся 150 тыс. тонн на 2 млн. га посевной площади. Однако значительное удорожание авиационного топлива и запрет на аренду военных самолетов привели к тому, что эти работы в последующие годы были приостановлены.

1 июня 1993 г. в связи с организацией работ по защите сельхозкультур от градобитий в Ставропольском крае приказом Росгидромета от 31.05.1993 г. № 37 «Об организации Ставропольской ВС» была создана Ставропольская военизированная служба по активному воздействию на гидрометеорологические процессы при Ставропольском филиале Высокогорного геофизического института (Ставропольская ВС).

В 1994 г. защита сельскохозяйственных культур осуществлялась авиационным методом на территории Кочубеевского, Андроповского, части Шпаковского и Предгорного районов Ставропольского края с использованием самолетов-лабораторий Як-40 и Ан-12.

В 1995 г. приказом Росгидромета от 26. 05. 1995 г. № 61 Ставропольский филиал ВГИ был преобразован в федеральное государственное унитарное предприятие Росгидромета – Ставропольский научно-производственный геофизический центр. С этого года противоградовые работы проводятся с использованием российской ракетной технологии с постепенным увеличением площади защиты и числа пунктов воздействия (ПВ). Управление противоградовыми операциями производилось с командного пункта (КП), расположенного в г. Ставрополе и оборудованного метеорадиолокатором МРЛ-5.

В 1997 г. в связи с отсутствием финансирования противоградовые работы на территории Ставропольского края не проводились.

В 1999 г. на основании Приказа Росгидромета от 27.12.1999 г. №153 «О переименовании Ставропольской ВС» служба была переименована в Государственное учреждение «Ставропольская военизированная служба по активному воздействию на метеорологические и другие геофизические процессы» (ГУ «Ставропольская ВС») служба стала самостоятельным юридическим лицом с организационно-правовой формой «государственное учреждение». Начальником ГУ «Ставропольская ВС» был назначен Джангуразов Хизир Хасанович. За многолетний труд в сфере активных воздействий и заслуги в области метеорологии ему было присвоено почетное звание «Заслуженный метеоролог Российской Федерации».

В этом же году НПЦ «Антиград» была проведена автоматизация Ставропольского радиолокатора «МРЛ-5», подготовка персонала и ГУ «Ставропольская ВС» перешла на применение автоматизированной технологии противоградской защиты.

В 2000 г. в применяемую в ПГЗ научно-методическую литературу была включена методика «Оценки времени достижения эффекта воздействия на градовые облака», в разработке которой активное участие принимал начальник отдела активных воздействий ГУ «Ставропольская ВС», к.г.н., с.н.с. Ватиашили Михаил Рубенович. За заслуги в сфере активных воздействий он был удостоен почетного звания «Заслуженный метеоролог Российской Федерации».

Сфера его научных интересов - опасные явления погоды, физика облаков и др. Ватиашили М.Р. является автором и соавтором более 200 научных работ, а также нескольких патентов в области активных воздействий на градовые процессы («Способ активных воздействий на градовые процессы», «Генератор искусственных ледяных кристаллов»).

В 2000 году на территории Кировского района Ставропольского края были образованы 5 ПВ, управление которыми осуществляла ГУ «Северо-Кавказская ВС», так как КП ГУ «Ставропольская ВС» значительно удален от территории Кировского района (свыше 150 км), а с увеличением расстояния уменьшается способность МРЛ-5 распознавать структуру градовых и не градовых облаков.

В 2001 г. в весенне-осенний период на значительной территории Ставропольского края велись работы по ИУО. Районы, сроки и объемы проведения этих работ в оперативном порядке определялись Министерством сельского хозяйства совместно с ГУ «Ставропольская ВС». В проведении работ был задействован самолет АН-26, оборудованный системой отстрела пиропатронов ПВ-26 - АСО-2И. Рентабельность проведения работ по ИУО в 2001 году составила 1:32.

В целях дальнейшего повышения эффективности и удешевления технических средств активного воздействия (САВ) научно-производственными объединениями разрабатываются новые средства воздействия. В 2001 году ГУ «Ставропольская ВС» выступила полигоном для испытания противорадового ракетного комплекса «Алан», который отличался от применяемых в службе САВ.

В 2002 году по итогам двухлетних испытаний работа противорадового комплекса «Алан» была оценена, как неудовлетворительная. Технические недостатки и высокая стоимость не позволили внедрить его в практику противорадовой защиты (ПГЗ).

В 2003 г. для оптимизации управления активными воздействиями на облака с целью искусственного увеличения осадков и предотвращения градобитий на базе ГУ «Ставропольская ВС» испытывались авиационные технические средства. В результате совместно с ГП НПЦ «Антиград» были зарегистрированы патенты «Авиационный метеорологический комплекс для активных воздействий на облака» и «Автоматизированная система управления активными воздействиями на облака», соавторами которого стали сотрудники ГУ «Ставропольская ВС» - Джангуразов Х.Х. – начальник ГУ «Ставропольская ВС», Кассиров В.П. – заместитель начальника, Евграфов В.Д. – начальник отдела связи.

Представленный авиационный метеорологический комплекс содержал размещенную на борту самолета аппаратуру для измерения параметров атмосферной среды и сопряженную с ней бортовую автоматизированную систему для регистрации и обработки результатов измерений, а также радиостанцию с радиомодемом, бортовой блок управления активными воздействиями и бортовые средства активных воздействий на облака. В качестве САВ на борту самолета предусматривалось размещение бортовой ракетной установки, системы автоматического отстрела пиропатронов и устройства для внесения гранул твердой углекислоты в облачную среду.

В этом же году было начато внедрение в службе новых противорадовых изделий (ПГИ) «Алазань-б» в практику активных воздействий (АВ) ГУ «Ставропольская ВС». Новая ракета типа «Алазань» имела меньшую массу взрывчатого вещества (а, следовательно, радиус поражения осколками), больший эффективный радиус, а также в два раза увеличенное количество йодистого серебра в общей массе льдообразующего реагента в сравнении с предыдущими модификациями.

В 2004 г. защищаемая территория (ЗТ) Ставропольского края была расширена за счет развертывания трех ПВ на территории Шпаковского района.

В 2006 г. специалистами отдела активных воздействий ГУ «Ставропольская ВС» была проведена апробация рекомендации по уменьшению дискретности засева во времени и пространстве применяемых ракет «Алазань-б» за счет сокращения интервала времени между засевами до 3 минут и уменьшения расстояния между трассами ракет до 0,5 км вместо 1 км. Апробация показала, что это требует увеличения расхода ракет на каждый разовый засев, но обеспечивает повышение эффективности АВ и сокращение суммарного расхода за счет уменьшения кратности засева и более быстрого достижения желаемого эффекта. Эти результаты были учтены при разработке руководящего документа 52.37.731 – 2010 «Организация и проведение противорадовой защиты».

Расширение работ по защите сельскохозяйственных культур от засух и градобитий в восточных районах края определило необходимость получения радиолокационной информации метеолокатора, расположенного непосредственно в районе работ. В 2006 году был введен в строй и по договору с НПЦ «Антиград» автоматизирован радиолокатор МРЛ-5 в г. Зеленокумск.

В это же время ПВ Кировского района перешли под управление ГУ «Ставропольская ВС». Продолжилось расширение ЗТ Ставропольского края - открыты три ПВ в Предгорном районе.

В 2007 г. в ГУ «Ставропольская ВС» была начата региональная научно-исследовательская работа, направленная на реализацию мероприятия «Целевой научно-технической программы Росгидромета «Научные исследования и разработки в области гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды» на 2008-2010 годы. Работа проводилась сотрудниками ГУ «Ставропольская ВС» совместно со специалистами ГУ «ВГИ».

В 2008 г. в применяемую в ПГЗ научно-методическую литературу была включена методика «Исследования норм расхода реагента в градовых облаках различной интенсивности», основным автором которой являлся начальник отдела активных воздействий ГУ «Ставропольская ВС», к.г.н., с.н.с. Ватиашвили М.Р.

В 2009 г. ЗТ Ставропольского края расширилась за счет появления двух ПВ в Шпаковском, а также одного ПВ в Кировском районе.

В 2010 г. начальником ГУ «Ставропольская ВС» становится Лозовой Василий Иванович.

В 2011 г. в соответствии с Приказом Росгидромета от 27.05.2011 г. №311 «Об утверждении новой редакции Устава Федерального государственного бюджетного учреждения «Ставропольская военизированная служба по активному воздействию на метеорологические и другие геофизические процессы» ГУ «Ставропольская ВС» была переименована в Федеральное государственное бюджетное учреждение «Ставропольская военизированная служба по активному воздействию на метеорологические и другие геофизические процессы» (ФГБУ «Ставропольская ВС»).

При поддержке и содействии сельхозпроизводителей края были развернуты 5 ПВ на территории Кочубеевского и Предгорного районов. Это позволило не только увеличить площадь защиты, но сократить негативное влияние непростреливаемых участков и запретных секторов. Таким образом, происходит усовершенствование уже существующей сети пунктов.

В 2014 г. В рамках двух федеральных целевых программ: «Модернизация ЕС ОрВД РФ (2009–2015 гг.)» и «Создание и развитие системы мониторинга геофизической обстановки над территорией РФ на 2008–2015 гг.» предусмотрена установка порядка 140 новых метеорадиолокаторов ДМРЛ-С. Согласно плану Росгидромета по созданию единого метеорадиолокационного поля над территорией РФ в г. Ставрополь был размещен радиолокатор ДМРЛ-С.

На КП г. Ставрополя ФГБУ «Ставропольская ВС» был установлен абонентский пункт локальных пользователей доплеровского метеорадиолокатора «ДМРЛ-С». Специалисты службы прошли обучение по программе «Автоматизированный доплеровский радиолокатор «ДМРЛ-С» на базе ФГБУ «ЦАО». Использование радиолокационных данных ДМРЛ-С позволяет применять теоретические знания специалистов на практике. Способность доплеровского радиолокатора отражать горизонтальные и вертикальные сдвиги ветра дает возможность проводить краткосрочное прогнозирование и уточнение типов градовых процессов, а повышенная чувствительность позволяет обнаруживать проявления конвективной неустойчивости на более ранних стадиях.

В 2015 г. начальником ФГБУ «Ставропольская ВС» становится Акимова Ирина Ивановна.

В соответствии с планом НИОКР Росгидромета по направлению «Технологии активных воздействий на гидрометеорологические и геофизические процессы и явления» АО «НПО «ЛЭМЗ» по Техническому заданию Росгидромета под научным руководством ФГБУ «ВГИ» разработал новый полностью твердотельный доплеровский метеорологический радиолокатор «ДМРЛ-10», работающий на длине волны 10 см и предназначенный для обеспечения противоградовых работ и штормоповещения. Программное обеспечение вторичной обработки радиолокационной информации и управления противоградовыми операциями «АСУ-ДМРЛ-10» разработано ФГБУ «ВГИ». Опытный образец «ДМРЛ-10» был установлен на позиции ФГБУ «Ставропольская ВС» в г. Зеленокумске.

В период с июля по ноябрь 2015 года специалисты ФГБУ «Ставропольская ВС», ФГБУ «ВГИ» и АО «НПО «ЛЭМЗ» провели приемочные испытания опытного образца «ДМРЛ-10». Отмеченные в процессе эксплуатации недостатки были впоследствии устранены. По итогам приемочных испытаний радиолокатор «ДМРЛ-10» получил высокую оценку специалистов.

В настоящее время ФГБУ «Ставропольская ВС» защищает Ставропольский край от градобитий на площади 839 тыс.га (из них 660 тыс.га – культивируемая площадь).

На протяжении всей истории существования ФГБУ «Ставропольская ВС» руководство службы стремится внедрять и применять новейшие научно-технические достижения в области активных воздействий на гидрометеорологические процессы. Специалисты ФГБУ «Ставропольская ВС» постоянно совершенствуются в своей профессиональной деятельности посредством изучения новых теоретических и практических разработок в области активных воздействий на гидрометеорологические процессы, активно участвуют в научно-исследовательской работе Росгидромета.

На всех этапах становления и развития Ставропольской ВС огромную помощь в подготовке специалистов, обеспечении руководящими документами и научно-методическом руководстве оказывали и оказывают ФГБУ «ВГИ» и НПЦ «Антиград».

2.2. Активные воздействия на электрические явления в облаках и другие гидрометеорологические процессы

О МЕТОДАХ АКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ОБЛАКАХ

Михайловский Ю.П., Синькевич А.А.,
ФГБУ «ГГО им. А.И. Воейкова», г. Санкт-Петербург

Введение

Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова стояла у истоков разработки методов воздействия на электризацию облаков [4, 5, 10, 22]. В 70—80 годах прошлого века наблюдался всплеск интереса к таким воздействиям во всем мире, в том числе и в СССР [1, 2, 3, 8, 9, 15, 16, 18, 23, 25, 30]. Результаты проектов оказались не столь очевидны, как ожидалось, и финансирование этих работ существенно сократилось. На последней конференции ВМО по активным воздействиям на облака, проходившей в Бали (Индонезия) в 2011 г, а также на 3-х последних конференциях по Атмосферному электричеству (Пекин, Китай, 2002, Рио де Жанейро, Бразилия, 2011, Норман, США, 2014) не было представлено докладов по данному направлению. Работы по воздействиям на электризацию не отражены и в последней обзорной монографии, вышедшей в России [12]. При том, что грозы являются основным опасным явлением погоды (ОЯП) связанным с конвективными облаками и могут приводить к серьезным материальным потерям и человеческим жертвам [12, 15]. По нашим представлениям электрические процессы

способствуют появлению в облаках других ОЯП (порывы, торнадо, град) [9, 13, 14, 15]. Представляется интересным вернуться к анализу полученных ранее результатов, используя современный уровень представлений о физике электризации и осадкообразования.

При анализе существующих методов воздействий более предпочтительными представляются воздействия на основной механизм организованной электризации, под которой, в отличие от стохастической, случайной, понимается совокупность процессов микро- и макроэлектризации, приводящая к появлению в облаке пространственно-разделенных локализованных зарядов разных знаков величиной до сотен Кулон и электрических полей с напряженностью более 1000 кВ/м и позволяющая представить облако генератором тока (заряда) для стороннего наблюдателя [1, 6, 13, 14, 15, 37]. Воздействия с целью превентивного вызывания молниевых разрядов созданием в облаке или между облаком и землей проводящих каналов, также широко исследуемые в это время, представляются менее надежными для целей подавления электрической опасности облака, чем уменьшение эффективности его электрического генератора [2, 10, 11, 16, 26, 29, 33, 36].

В настоящее время большинство ученых считают основным механизмом электризации облака взаимодействия крупных и мелких ледяных частиц [1, 2, 6, 8, 9, 13, 14, 15, 19, 24, 30, 35, 37]. Особенно это относится к предгрозовой стадии развития облака. Теория физики процессов, происходящих на микроуровне и приводящих к заряджению сталкивающихся частиц, окончательно не разработана. Однако в лабораторных экспериментах и численных моделях показано, что при взаимодействиях ледяных частиц различных размеров и с различными свойствами поверхности (кристаллы, крупа, град) в присутствии переохлажденной воды на частицах появляются заряды, величина которых достаточна для объяснения электризации облака до грозового состояния за реальные времена [1, 6, 15]. Показано, что величина и даже знак разделяющихся при столкновении зарядов зависит от состояния поверхности частиц, их размеров, температуры и водности в месте контактов [1, 8, 10, 30, 35, 37].

Результаты самолетных натурных экспериментов и разработанная на их основе эмпирическая нестационарная модель электризации, хорошо согласуются и могут быть логично объяснены в терминах механизма электризации лед—лед [1, 6, 13, 14, 15]. Таким образом, из результатов экспериментов и эмпирической модели следует, что мощность эквивалентного электрического генератора облака определяется крупными ледяными частицами и, следовательно, изменяя их размеры и количество, мы получаем возможность целенаправленно регулировать ток зарядки облака и, следовательно, его электрическое состояние [1, 15].

Для изменения размеров и количества крупных ледяных частиц в облаке используются воздействия на облака с помощью льдообразующих реагентов [1, 3, 10, 12, 15, 18, 20, 23, 35, 39].

При введении в облако на ранней стадии его развития оптимального количества ядер кристаллизации (т.н. «микрофизический засев», когда не возникает конкуренции за влагу), в облаке ускоряется появление крупных ледяных частиц и их количество возрастает, что приводит к ускорению и усилению электризации. Однако введение в облако избыточного количества льдообразующего реагента («перезасев» до облака ядрами кристаллизации) вызывает конкуренцию за влагу между ледяными зародышами, замедляет рост ледяных частиц, препятствует образованию крупных ледяных частиц, что приводит к замедлению и подавлению электризации. Таким образом, за счет регулирования количества льдообразующего реагента, вводимого в облако, возможно получать как усиление (ускорение) электризации, так и ее подавление (замедление) [1, 3, 9, 15, 18, 25, 30]. Наименее исследованными, как теоретически, так и экспериментально, представляются В с целью изменения заряда, разделяющегося при единичном акте электризации и В основанные на изменениях ионного состояния [10, 11, 17, 21, 22, 26, 29, 32, 33, 35, 40].

В представленную ниже схему включены физические принципы воздействий (В) на электрическое состояние конвективных облаков, собранные из источников, представленных в «Списке литературы». Степень практической реализации представленных методов очень различна – от просто гипотезы до обоснованной теоретически и проверенной в многолетних натурных экспериментах. Полужирным шрифтом выделены конкретные способы воздействия на облака, из них подчеркнуты реально использовавшиеся на практике хотя бы в единичных экспериментах.

1. Схема методов воздействий на электрические явления в облаках:

- ⇒ на механизм генерации электрического заряда облака;
- ⇒ на параметры микроэлектризации (электризация частиц) с целью изменения заряда, разделяющегося при единичном акте, с целью изменения химических и физических свойств частиц, изменения свойств поверхности частиц.

1.1 Поверхностно-активными веществами (ПАВ) и льдообразующим реагентом для изменения фазового состояния частиц;

1.2 Кислотами, солями, щелочами с целью изменения химического состава частиц, изменения концентрации и размеров частиц, изменения фазового состояния частиц;

1.3 Льдообразующим реагентом для перераспределения облачной влаги и заряжения облачных частиц;

1.4. Коронным разрядом на земле, потоками ионов от источников на земле, введением заряженных частиц с целью изменения количества актов электризации, изменения концентрации и размеров частиц, создание сильных электрических полей, разделение зарядов в пространстве, изменения структуры потоков частиц в облаке

1.5. Метеотроном для инициирования восходящих движений;

1.6. Инициирование нисходящих движений сбросом грубодисперсных порошков, парашютами, струей вертолета, струей двигателя самолета.

1.7. Разрушение упорядоченной структуры воздушных потоков струей двигателя самолета, продуктами взрыва снарядов, льдообразующим реагентом

1.8. Заряженными грубодисперсными порошками и заряженными каплями воды

2. На внешнюю цепь электрического генератора

2.1. На электрические потери облака с целью изменения электрической проводимости в облаке, коронирования частиц в облаке.

2.2. Проводящими остриями и льдообразующим реагентом для введение ионов извне.

2.3. Коронным разрядом на земле, потоками ионов от источников на земле для создание сильных электрических полей.

2.4. Заряженными грубодисперсными порошками и заряженными каплями воды с целью изменения турбулентной проводимости в облаке и провоцирования и локализации разрядов молний.

2.5. Металлическими тросами, столбами воды после взрыва, пучками ионов, пучками электронов, лазерами.

Воздействия разделены на относительно крупные блоки - механизмы В на генерацию электрических зарядов облака (1) и механизмы В на внешнюю цепь электрического генератора (2). (1) в свою очередь делится на (1.1.) - В на параметры микроэлектризации (электризация частиц) и (1.2.) - В на параметры макроэлектризации (разделение зарядов в пространстве). Блок (2) также делится на воздействия для увеличения электрических потерь в облаке либо за счет коронирования, либо за счет введения заряженных частиц и ионов (2.1.) и на В с целью провоцирования и локализации разрядов молний (2.2.). Предлагаемая классификация является нашей интерпретацией идей и заключений соответствующих авторов, хотя мы и старались максимально близко придерживаться даже терминологии. Вследствие труднодоступности некоторых оригинальных работ, ссылки на них были взяты из более поздних работ и монографий.

Проведенный анализ представленной схемы и литературы показывает, что наиболее определенные, повторяющиеся результаты получаются при В льдообразующими реагентами [1, 6, 13, 14, 15, 23, 38, 39]. При этом большое значение имеет концентрация вводимого реагента и зона введения [1, 15]. При этом, зачастую, воздействуя на облака льдообразующим реагентом по сходной методике и получая одинаковые результаты, авторы могут объяснять их по-разному, одни – уменьшением мощности механизма, заряжающего облако, вторые – уменьшением времени действия этого механизма, мощность которого остается неизменной, а третьи – увеличением электрических потерь за счет увеличения проводимости при коронировании искусственных ледяных кристаллов [3, 6, 9, 23, 35].

Авторы [35] получили достоверное снижение количества разрядов при В. Можно предположить, что имело место также снижение количества осадков, т.к. на положительную корреляцию осадков и молниевой активности указывают многие авторы, в т.ч. и авторы [35]. В том же районе по сходной методике воздействий проводились эксперименты по засеву облаков тем же реагентом с целью изменения осадкообразования (проект FACE). В результате было получено увеличение осадков в 2 раза.

В экспериментах по В льдообразующим реагентом авторы зачастую не уделяли должного внимания количеству вводимого в облако реагента и стадии, на которой находилось облако в момент воздействия. Это могло приводить к тому, что вместо подавления электризации наблюдалось усиление и наоборот. В частности, такое возможно, когда в качестве «экспериментальной единицы» в рандомизированном эксперименте выбирается не облако, а день, и В проводятся на все облака без учета отдельно взятого облака [39];

Результаты экспериментов по В с помощью коронирующих острий типа углепроводящих волокон (углен) или металлизированных полосок нейлона («chaff», «мякина») пока не могут служить доказательством возможности подавления электризации этим методом вследствие малочисленности экспериментальных данных, а также несовершенства методики контроля эффекта В [39];

В с помощью стимулирования молниевых разрядов тросами, лазерами, пучками частиц с высокой энергией наиболее прозрачны с точки зрения постановки и результатов экспериментов. Следует отметить, что такие В не подавляют механизм электризации, а снижают на некоторое время вероятность генерации молнии в том объеме облака, который подвергается В. Кроме того, существуют гипотезы, что В такого типа стимулируют ионные механизмы электризации, связанные с молниевыми разрядами [10,22];

Воздействия на электризацию могут служить мощным инструментом исследования процессов электризации, средствами проверки адекватности существующих представлений об этом процессе реальности [6, 8, 40].

В настоящее время большинство исследователей, публикуя результаты экспериментов, приводят доказательства значимости обнаруживаемого эффекта В и используемые методы оценки эффекта воздействия. Однако, по-видимому, до сих пор нельзя сказать, что вопросы, связанные с проведением оценки эффективности В на облака и их электризацию, решены или даже близки к окончательному решению [6, 7, 15, 26, 29, 31, 33, 35, 37, 38, 39]. Если попытаться обобщить многочисленные работы, можно обнаружить все возрастающее понимание того, что статистические методы сами по себе, без ясного понимания физики процессов, не могут дать

определенного ответа об эффективности методов воздействий. В подтверждение этого тезиса можно привести слова Брехема [25], который, анализируя работы по оценке эффективности В на осадки, говорит, что «зачастую даже длительные многолетние эксперименты могут не дать определенного ответа» и что «... разные исследователи (математики) на основании одного и того же материала могут прийти к противоположным выводам». Показательны в этом смысле также дискуссии Каземира и Гриффтиса [31, 35], различие во мнениях относительно результатов экспериментов по градозащите в Швейцарии [24, 26], сравнение результатов работ по проектам FACE-1 и FACE-2 [39]. Для усиления определенности результатов разрабатываются вопросы планирования экспериментов [7, 12, 15, 38], проводятся теоретические и лабораторные исследования механизмов воздействий [8, 17, 19, 21, 32, 36,40]. Большие надежды связываются с наблюдающимся стремительным совершенствованием средств контроля электрического состояния облаков и проводимых воздействий.

Список литературы

1. Гальперин С. М., Кашлева Л. В., Михайловский Ю. П., Степаненко В. Д. (1990). Электризация конвективных облаков в естественном цикле развития и при воздействиях (самолетные исследования) / В сб. Вопросы атмосферного электричества. — СПб: Астерион. С. 76—120.
2. Дьячук В.А., Мучник В.М., Рудько Ю.С. Иницирование грозových разрядов в облаках // Тр. II Всесоюзного симпозиума по атмосферному электричеству – Л.: Гидрометеиздат – 1984 – С.115-118.
3. Зимин Б.И. Регулирование развития грозовой активности конвективных облаков при воздействии льдообразующими аэрозолями // Тр. ЦАО – 1978 – вып.136 – С.104.
4. Имянитов И. М., Никандров В. Я. (1965). О возможности воздействия на электрические процессы в облаках. / В сб. Краткие тексты и тезисы докладов к совещанию по активным воздействиям на облака и туманы. – Л.: Изд. ГГО. С. 138—142.
5. Имянитов И.М., Кулик М.М., Чуваев А.П. Предварительные данные об опытах по регулированию развития и изменения электрического состояния облаков мощной конвекции в южных районах Европейской территории СССР и Закавказье // Тр. ГГО – 1957 – вып.67 – С.33-58.
6. Имянитов И.М., Михайловский Ю.П. Исследование механизма электризации облаков с помощью воздействий на их электрическое состояние // Атмосферное электричество. Тр. III

Всесоюзного симпозиума по атмосферному электричеству – Л.: Гидрометеиздат – 1988 – С.143-146.

7. Имянитов И.М., Михайловский Ю.П. Об оценке эффективности активных воздействий // Тр. ГГО – 1984 – вып.474 – С.16-26.

8. Имянитов И.М., Михайловский Ю.П., Павлова Г.П. Результаты экспериментов по воздействию грубодисперсными аэрозолями на электрическое состояние облаков // Тр. ГГО – 1982 – вып.484 – С.59-74.

9. Исследование взаимосвязей между радиолокационными и электрическими параметрами грозных облаков и оценка эффективности воздействий на них / А.Г. Аминарашвили, Т.Г. Гзиришвили, Л.М. Нехотина, Л.Т. Трофименко, В.С. Богачук - Тр. III Всесоюзного симпозиума по атмосферному электричеству – Л.: Гидрометеиздат – 1988 – С.116-119.

10. Качурин Л. Г. (1990). Физические основы воздействия на атмосферные процессы. —Л.: Гидрометеиздат. 464 с.

11. Козлов В. Н., Коршун Н. А. (2013). Способ инициирования грозных разрядов. — Патент РФ № 2541661 от 01.20

12. Колосков Б. П., Корнеев В. П., Щукин Г. Г. (2012). Методы и средства модификации облаков, осадков и туманов. — СПб: РГГМУ. 342 с.

13. Михайловский Ю. П., Кашлева Л. В. (2012). Методика и результаты исследований электризации конвективных облаков с помощью самолетов. / В сб. Радиолокационная метеорология и активные воздействия. — СПб: Д АРТ. С. 98—121

14. Михайловский Ю.П. Дистанционные исследования электризации конвективных облаков радиофизическими методами с использованием самолетов. Сборник «Вопросы радиометеорологии», посвященный 90 - летию со дня рождения В.Д. Степаненко, ВКА им. А.Ф. Можайского, С- Петербург, 2013, с.238-252.

15. Михайловский Ю. П. Методика и результаты самолетных воздействий на электризацию конвективных облаков. — Труды ГГО, 2015, вып. 577, с. 197—211.

16. Ньюмен М. Искусственное вызывание молнии для изучения процессов разряда // Проблемы атмосферного электричества – Л.: Гидрометеиздат – 1969 – С.327.

17. Об опытах по воздействию ПАВ на грозные облака с целью уменьшения их электрической активности / Н.Н. Бурчуладзе, Т.Н. Громова, И.А. Скороденок, Н.В. Торопова – Тр.ГГО – 1977 – вып.389 – С.87-92.

18. Седунов Ю.С. Физика облаков и развитие работ по активным воздействиям на гидрометеорологические процессы // Достижения в области гидрометеорологии и контроля окружающей среды – Л.: Гидрометеоиздат – 1987 – С.34-56.
19. Сумин Ю.П., Шварц Я.М. Электрическое поле в окрестности кучевых облаков, подвергнутых воздействию // Тр. ГГО – 1971 – вып.262 – С.157-162.
20. Физические основы активных воздействий на облака. Часть II. Засев облаков льдообразующими реагентами с целью увеличения количества осадков // «Бюллетень ВМО» – 1986 – т.35, № 4 – С.397-408.
21. Шварц Я.М. О возможности использования электрических сил при воздействии на теплые облака и влиянии электрических неоднородностей в облаках на их развитие // Тр. ГГО – 1972 – вып.277 – С.121-129.
22. Шишкин Н.С. Облака, осадки и грозовое электричество. - Л.: Гидрометеоиздат – 1964 – 402 с.
23. Battan L.J. Cloud seeding and cloud-to-ground lightning. – J. Appl. Met., 1967, N 1, p.102.
24. Bigg E.K. Persistent effects of cloud seeding. – Search, 1985, v.16, N 1-2, p.40-42.
25. Brecham R.F. Field-experimentation in weather modification. – J. Amer. Stat. Assoc., 1979, v.74, p.365.
26. Changoon S. Purposeful and accidental weather modification. Our current understanding. – Phes. geoph., 1983, v.4, N 2, p.126-139.
27. Corzine H.A. Preliminary data on reported weather modification activities in the U.S. for CY 1982. – J. Weather Modif., 1983, v.15, N 1, p.
28. Corzine H.A. Preliminary data on reported weather modification activities in the U.S. for CY 1983-1984. – J. Weather Modif., 1985, v.17, N 1, p.74-75.
29. Dessens J. La modification du temps dans le monde. – Assoc. natetude et lute contre fleaux atmos., 1985, N 33, p.47-48.
30. Dirks R.A. Progress in weather modification research 1979-1982. – Rev.Geoph. and Space Phys., 1983, v.21, N 5, p.1065-1076.
31. Fuquay D., Baughman R. Project skyfire lightning research. Final report to NSF. – Missula, 1969, 67p.
32. Griffiths H. Comment on lightning suppression by chaff seeding at the base of thunderstorms. - J. Geoph. Res., 1976, v.81, N 12, p.1801-1803.
33. Helsdon I. Chart seeding effects in a dynamical-electrical cloud model. - J. Appl. Met., 1980, v.19, N 9, p.1101-1126.

34. Holf F.A. A statistical evolution of two operational seeding project. – J. Clim. and Appl. Met., 1985, v.24, N 5, p.452-462.
35. Holroyd E., Super A. Seeding experiments using AgI in convective clouds. – Paper 6th conference of planet and inonvertent weather modification, Champaign-Urbane, 1977, p.354-357.
36. Kasemir H.W. Lightning suppression by chaff seeding at the base of thunderstorms. - J. Geoph. Res., 1976, v.81, N 12, p.1965-1970.
37. Pruppache, H. R., Klett J. D. (1997): Microphysics of Clouds and Precipitation. — Kluwer Academic Pablishers. 954 p.
38. Robert G., Donald M. Statistical analyses of a randomized lightning modification experiment. – J. Appl. Met., 1976, v.15, N 7, p.790-794.
39. Simpson J. Planning and estimated of experiments on artificial modification of cumulus clouds. - J. Appl. Met., 1975, v.14, N 5, p.946-958.
40. Smith P.L. et. al. Research to develop evalution technigues for operational convective cloud modification projects. – Rept. Inst. Atmos. Sci. Sch. Mines and Technol., 1985, N 2, XVI – 93 p.
41. Vonnegut B. Artificial modification of atmospheric space charge. - J. Geoph. Res., 1962, v.67, N 3, p.1073-1083.

МЕТОД СОЗДАНИЯ ТОКОПРОВОДЯЩИХ ОБЪЕМОВ В АТМОСФЕРЕ ДЛЯ ИНИЦИИРОВАНИЯ МОЛНИЕВЫХ РАЗРЯДОВ

Камруков А.С.¹, Пашкевич М.Ю.², Березинский Н.А.², Трофимов А.В.¹, Шаповалов А.В.³, Ружин Ю.Я.⁴, Вагонов С.Н.⁵, Архипов В.П.¹, Березинский, И.Н.³, Квочур А.Н.⁶, Шереметьев Р.В.²

¹ ФГБОУ «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана», г. Москва

² ГУП «Высокогорный научно-исследовательский испытательный центр авиационной техники и вооружения», г. Нальчик

³ ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

⁴ ФГБУН «Институт земного магнетизма и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН» ИЗМИРАН, г. Троицк, МО

⁵ АО «ФНПЦ «НИИ прикладной химии», г. Сергиев Посад, МО

⁶ ФГУП «Пилотажно-исследовательский центр ЛИИ им. М.М. Громова», г. Жуковский, МО

Гроза представляет значительную опасность для жизнедеятельности человека за счет поражения важных наземных объектов (склады боеприпасов, атомные электростанции, нефтехранилища, радиотехнические и энергетические установки летательных аппаратов (самолеты, вертолеты, ракеты, дирижабли, аэростаты и т.д.), а также морские и речные суда различного назначения. На современном этапе технического развития (еще со времен Б. Франклина) молниезащита зданий, сооружений и объектов осуществляется методом упреждающего инициирования разряда опасной грозовой ячейки на землю через молниеотводы различных конструкций и растекания тока молнии по земле до безопасных для защищаемого объекта значений.

Стационарный молниеотвод изготавливается из стержня, троса или сетки [1]. Он устанавливается на высоте, превышающей защищаемый объект, и концентрирует потенциал земли в точке подвеса. Под действием электрического поля приближающегося грозового облака плотность наведенных на земле зарядов значительно возрастает. Электростатическое поле земли концентрируется у острия молниеотвода до величины, превышающей порог ионизации воздуха. Вокруг острия молниеотвода возникает облачко ионов. Оно поляризуется под действием объемных зарядов конвективного облака и вытягивается в сторону ближайшего объемного заряда грозового облака. Заряженный объем облака в свою очередь концентрируется в направлении активизированного молниеотвода, и из него излучаются стримеры, формирующие лидер молниевых разряда. Разряд грозовой ячейки на землю производится через область максимальной напряженности приземного электрического поля, формируемой чаще всего

ближайшим молниеотводом. Ток молнии растекается в земле в окрестности установки молниеотвода. Радиус зоны защиты сопоставим с высотой молниеотвода.

Недостатки этого способа заключаются в невысокой вероятности попадания разряда молнии в молниеотвод и малой степени защиты объекта. Дело в том, что опасность воздействия ЭДС (электродвижущей силы) магнитной индукции тока молнии на низкопотенциальные и взрывоопасные коммуникации защищаемого объекта требует снижения действующего значения тока, что возможно лишь при отводе молнии в землю на значительном удалении от объекта, а это не всегда осуществимо.

Культивируемая на Западе с конца 1990-х годов технология активной молниезащиты (early streamer emission, ESE) имеет сомнительные преимущества над традиционными методами [2, 3]. В любом случае, как традиционные, так и активные молниеотводы имеют радиус действия, сравнимый с высотой их установки и не могут защитить обширные, а тем более, мобильные объекты. В этой связи сформировалась тенденция упреждающего снятия с облаков грозных зарядов на дальних подступах к защищаемому объекту.

С этой целью рядом исследователей был предложен способ инициирования молниевых разрядов с использованием ракет, запускаемых с поверхности земли. Ракеты несут за собой медный проводник [4]. В другом методе для получения молниевых разрядов использовались также ракеты с твердотопливным двигателем [5]. В состав топлива добавляется хлорид кальция и соли цезия. Горящее топливо оставляет позади летящей ракеты след из этих солей, которые, вступая в контакт с влагой воздуха, образуют токопроводящий канал. Молния идет по пути наименьшего электрического сопротивления, т. е. по сформированному ионизированному каналу.

Недостатки этих способов: громоздкость, ограниченный радиус действия ракеты, жесткая привязка точки старта к стержневой мачте молниеотвода; отсутствие мобильности, малое быстродействие при повторных вызовах молнии; возможные обрывы прикрепляемого проводника при стартах; невозможность инициировать направленные межоблачные разряды; разрушение целостности токопроводящего канала (вследствие его малого сечения) турбулентностью атмосферы.

Разрабатывались также методы инициирования молниевых разрядов с помощью инфракрасных (ИК) лазеров [6]. Лазерный луч пропускали вблизи вершины металлической мачты. Момент запуска лазерного импульса выбирался по данным установленных датчиков напряженности электрического поля. В луче ИК-лазера воздух нагревается и ионизируется, формируя проводящий канал, по которому развивается молниевый разряд. При длительности им-

пульса ~ 50 нс, пороговая интенсивность для пробоя воздуха, содержащего аэрозоли, составляет 10^7 – 10^8 Вт·см². Сформированный вершиной мачты восходящий лидер перехватывает молнию.

Основной недостаток этого способа – большие затраты энергии на разогрев всего газа в канале. При создании протяженного проводящего пространства необходимы мощные лазеры, что делает задачу труднодостижимой.

С этой же целью и с аналогичным результатом использовали ультрафиолетовый (УФ) лазер [7], формировавший проводящий канал за счет фотоионизации.

Недостатки лазерных методов – громоздкость и сложность оборудования, значительная энергоемкость, возможность работы в идеальных погодных условиях, высокая стоимость реализации. Лазерный луч хорошо фокусируется только на коротких дистанциях. На больших трассах он подвергается расфокусировке и значительному поглощению энергии в облачной среде.

Общий недостаток как ракетного, так и лазерного способов искусственного вызывания молнии заключается в том, что формируемый ими плазменный проводящий канал имеет малое поперечное сечение. Любая неоднородность атмосферы – плотности, типа и концентрации аэрозоля, мелкомасштабная турбулентность и др. в области проводящего канала – нарушает целостность канала и его проводимость, а, следовательно, и его способность к поляризации и проводника лидера канала. К тому же, использование этих методов возможно для инициирования молний только в направлении лучей, исходящих из точки воздействия по методу «вызываю огонь на себя», что требует соблюдения дополнительных мер безопасности при воздействии.

Новый способ молниезащиты

Нами предложен новый способ инициирования молниевых разрядов из грозовых облаков [8, 9], который проще, дешевле, надежнее описанных выше. К тому же, он имеет более широкие возможности применения.

Разрабатываемая нами технология искусственного инициирования молний основана на дистанционном формировании в атмосфере высокоионизированных каналов необходимой пространственной ориентации и протяженности по цепочке соприкасающихся зон разрыва артиллерийских боеприпасов плазменно-оптического действия. Это пока единственный на современном уровне развития науки и техники физически и технически реализуемый способ формирования в атмосферном воздухе плазменных каналов заданной пространственной ориентации, формы и протяженности в сотни метров.

Метод включает дистанционное определение предразрядного состояния, координат, параметров перемещения грозовых ячеек, а также создание плазменного токопроводящего канала между грозовой ячейкой и землей (водной поверхностью) или между соседними активными ячейками того же, или соседнего облака вблизи важного объекта, защищаемого от поражения молнией. Плазменный токопроводящий канал для инициирования молниевых разрядов создают синхронным подрывом серии артиллерийских боеприпасов плазменно-оптического действия (БПОД) [10, 11].

При подрыве БПОД в воздухе формируется долгоживущее плазменно-вихревое образование в виде эллипсоида вращения с характерным диаметром порядка нескольких метров и генерируется высокоэнергетический импульс широкополосного электромагнитного излучения в диапазоне 0,19–14 мкм. Яркость излучения многократно превышает яркость солнечного излучения и соответствует радиационным температурам 15000–20000 К. В плазменном вихре создаются высокие концентрации электронов – $10^{12} \dots 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Ударная волна, высокая температура и коротковолновое излучение приводят к ионизации прилегающего воздуха, увеличивая тем самым эффективный радиус облака разрыва.

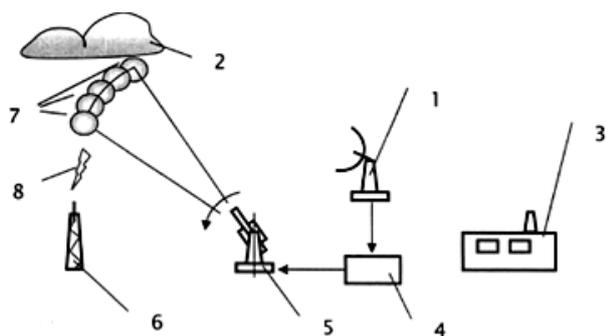
Протяженные плазменные каналы для инициирования молниевых разрядов создаются программируемым подрывом серии БПОД. Точки подрыва располагают так, чтобы ионизированные области, возникающие в атмосфере при срабатывании боеприпасов плазменно-оптического действия, соприкасались друг с другом с перекрытием по цепочке в направлении от грозовой ячейки к поверхности земли или к соседней грозовой ячейке.

Для реализации предлагаемой технологии инициирования молний необходимы следующие технические средства:

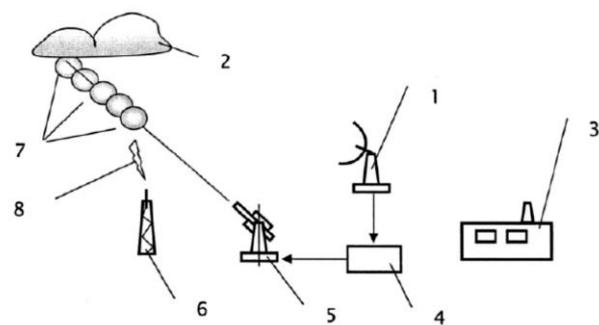
- станция грозовой разведки, обеспечивающая дистанционное определение предразрядного состояния и координат грозовых ячеек.
- вычислительный блок на базе микропроцессоров, осуществляющий обработку данных станции грозовой разведки в режиме реального времени и выдачу команд целеуказания.
- скорострельная артиллерийская установка с комплектом БПОД.

В качестве артиллерийской установки предполагается использовать стоящую на вооружении установку с программно-регулируемым приводом, обеспечивающую перемещение ствола по азимуту и углу места с заданной скоростью. Скорострельность установки составляет до 6000 выстрелов в минуту. Время срабатывания взрывателя снаряда устанавливается дистанционно индукционным методом при выходе из ствола.

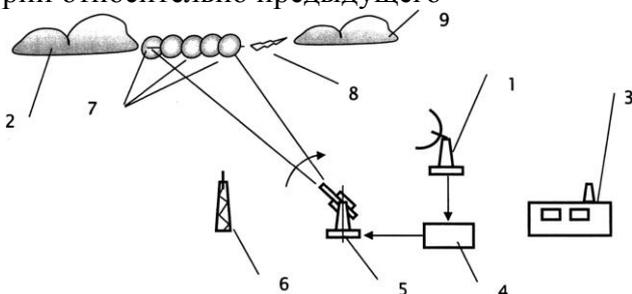
Примеры реализации технологии инициирования молний показаны на рисунке 1. Условия применения технологии обозначены в подрисуночных подписях и в [8, 9].



Пример 1 – Схема инициирования молниевых разрядов с изменением направления полета каждого последующего боеприпаса в серии относительно предыдущего



Пример 2 – Схема инициирования молниевых разрядов с изменением времени срабатывания каждого последующего боеприпаса в серии относительно предыдущего



Пример 3 - Схема инициирования молниевых разрядов с одновременным изменением направления полета и времени срабатывания каждого последующего боеприпаса в серии относительно предыдущего

Условные обозначения

- 1- Станция грозовой разведки;
- 2 - грозовое облако ;
- 3 - защищаемый объект;
- 4 - вычислительный блок ;
- 5 - скорострельная артиллерийская установка;
- 6 - молниеприемник;
- 7 – плазменные образования ;
- 8 – молниевый разряд

Рис.1. Примеры реализации технологии инициирования молний.

Для оценки технических характеристик создаваемых в натуральных условиях ионизированных каналов был проведен эксперимент с последовательным подрывом четырех 70 мм БПОД. Опыты проводились на полигоне НИИ Прикладной химии г. Сергиев Посад Московской обл. Фрагменты из опытов показаны на рисунках 2 и 3. На рисунке 2 приведена фотография общего вида экспериментальной площадки. Экспериментальные образцы БПОД подвешивались в воздухе на трос, натянутый между двумя стойками. Расстояние между точками подвеса 10 м, что служило масштабом для наблюдателей. Съемка производилась высокоскоростной тепловизионной камерой с покадровыми отметками времени, что облегчало проводить анализ результатов эксперимента.

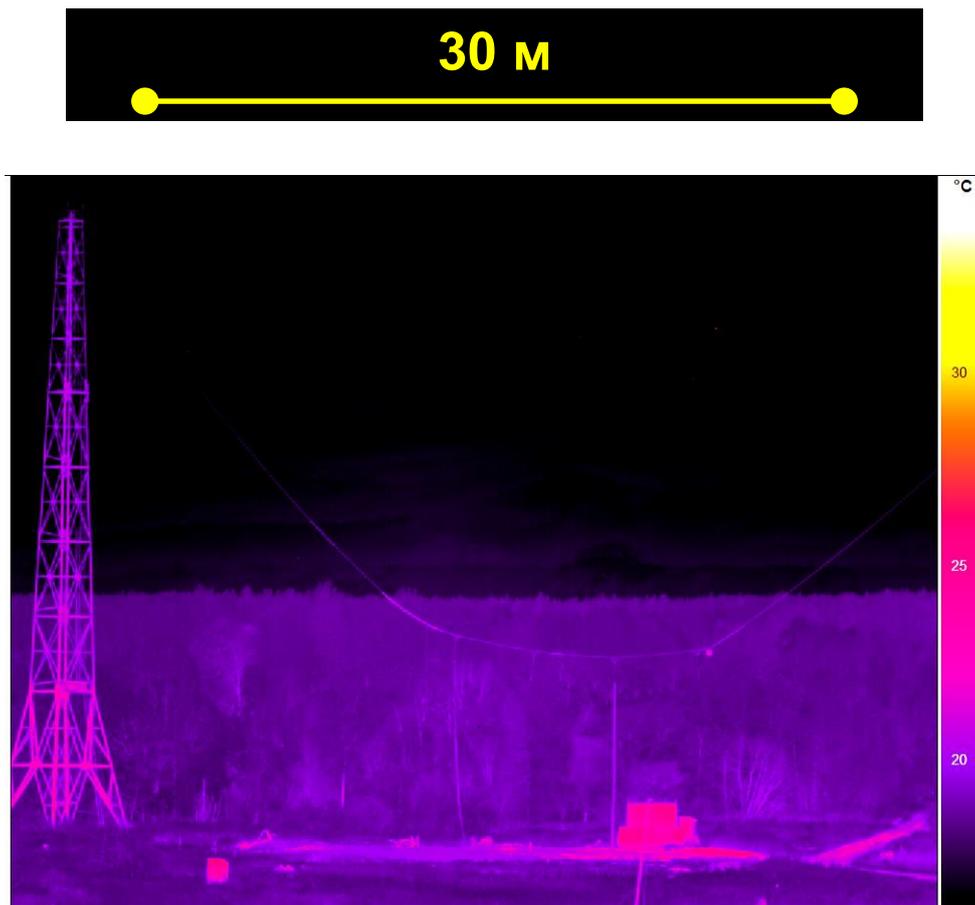


Рис.2. Общий вид экспериментальной площадки.

На рисунке 3 приведена выборка кадров видеосъемки. Из рисунка видно, что светимость цепочки разрывов продолжается практически до 2 сек, а диаметр свечения единичного разрыва превышает 10 м (интервал между точками подвеса зарядов). Эти результаты указывают на возможность создания непрерывного ионизированного канала в атмосфере в соответствии с идеей предложенного способа инициирования молниевых разрядов.

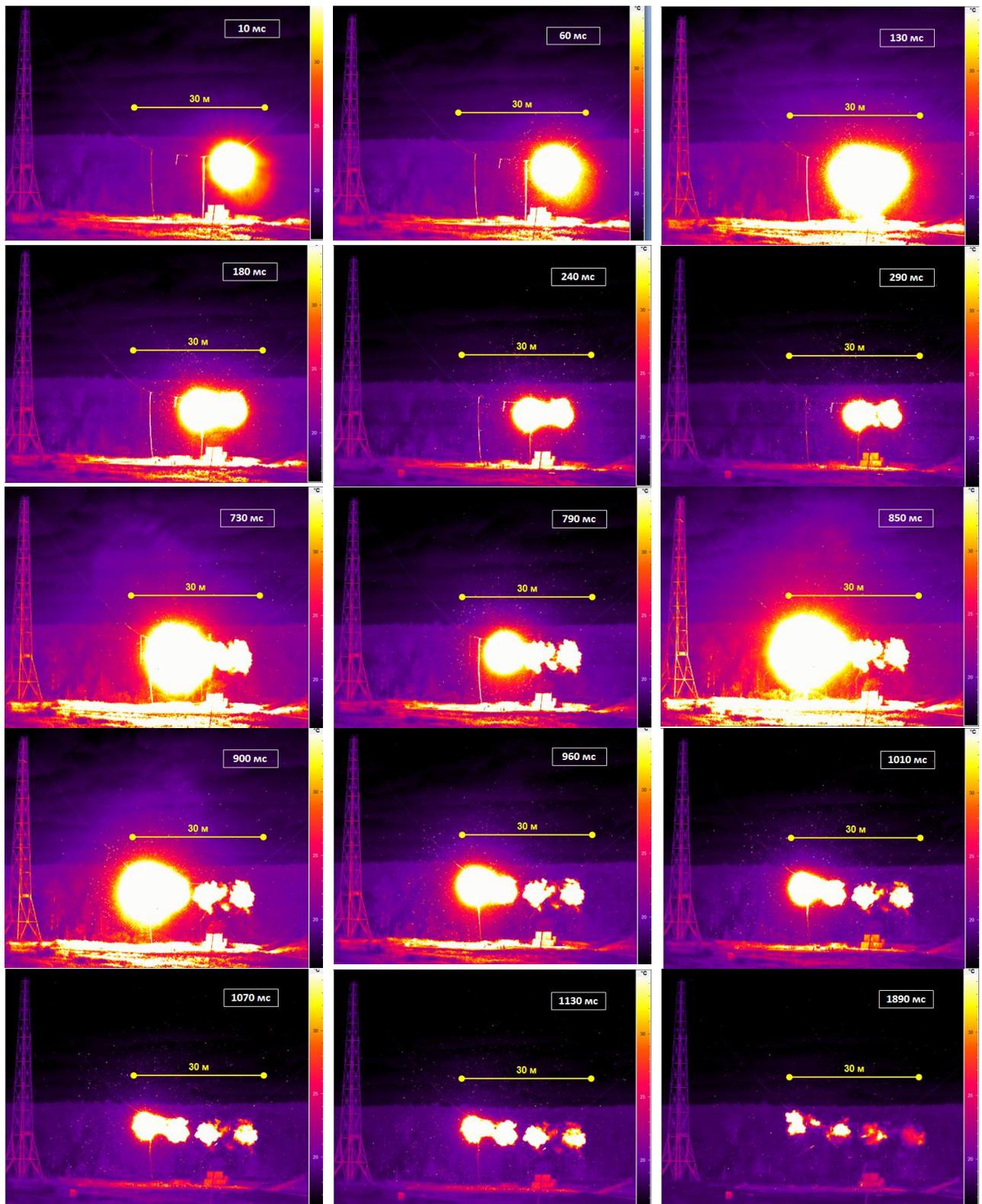


Рис.3. Выборка кадров видеосъемки последовательного подрыва серии БПОД.

Данная технология инициирования молний открывает возможность создавать в околооблачном, межоблачном и внутриоблачном пространстве токопроводящие области для электрической нейтрализации зарядов грозовых облаков, а также воздействовать на пространственно-временную изменчивость характеристик молниевых разрядов.

Развитие предлагаемой технологии определяет принципиально новые технические пути управления [12] энергоемкими природными явлениями и решения задачи целенаправленного использования энергии молниевых разрядов.

Аналогичные работы, объявленной целью которых является разработка технологии искусственного создания и управления разрядами молний, проводятся в настоящее время в рамках отдельной программы Управления перспективных исследовательских программ DARPA (США).

Список литературы

1. Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций. Москва, Издательство МЭИ, 2004.
2. The International Center for Lightning Research and Testing (ICLRT) at Camp Blanding, Florida.
3. Базелян Э. М. Активные молниеотводы. «Электротехнический рынок». № 4 (22), июль-август 2008.
4. Rakov V., Uman M. Lightning. Physics and effects. 2003. Cambridge University Press. 687 p.
5. The International Center for Lightning Research and Testing (ICLRT) at Camp Blanding, Florida.
6. Базелян Э. М., Райзер Ю. П. Физика молнии и молниезащиты М: Физматлит, 2001. 320 с.
7. Базелян Э. М., Райзер Ю. Л. Механизм притяжения молнии, проблема лазерного управления молнией // УФН. 2000. Т. 170. № 7, С.753.
8. Архипов В. П., Березинский И. Н., Березинский Н. А., Камруков А. С., Козлов Н. П., Пашкевич М. Ю., Трофимов А. В., Федченко Л. М., Шереметьев Р. В. Патент RU 2525842 С1.
9. Архипов В. П., Березинский И. Н., Березинский Н. А., Камруков А. С., Козлов Н. П., Пашкевич М. Ю., Трофимов А. В., Федченко Л. М., Шереметьев Р. В. Новый способ инициирования молниевых разрядов для задач грозозащиты важных подвижных и стационарных объектов. Геология и геофизика Юга России, № 3, 2015, стр.5-18.
10. Взрывной плазменно-вихревой источник оптического излучения. Патент РФ № 2462008. Архипов и др., 2012;
11. Буланов С. С., Есиев Р. У., Камруков А. С., Козлов Н. П., Морозов М. И., Росляков И. А. Взрывные плазменно-вихревые источники оптического излучения. ЖТФ 2010, т. 80, вып. 11, стр. 87–94.
12. Залиханов М.Ч., Архипов В.П., Березинский И.Н., Березинский Н.А, Камруков А.С., Квочур А.Н., Пашкевич М.Ю., Ружин Ю.Я. Трофимов А.В., Шереметьев Р.В. Способ управления молниевыми разрядами. Решение от 07.07.2017 г. на выдачу патента на изобретение по заявке № 2016105616/07 от 18.02.2016.

ДИНАМИКА ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТИ КОНВЕКТИВНЫХ ОБЛАКОВ ПРИ ИХ ЕСТЕСТВЕННОМ РАЗВИТИИ И ПРИ АКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Аджиев А.Х., Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Геккиева Ж.М.,
Казакова С.Т., Кулиев Д.Д., Муратов И.А.

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

Введение

В работе исследуются особенности развития грозовых процессов и параметров молний на юге европейской части России с использованием грозопеленгационной сети LS8000, а также региональной сети МРЛ. Рассматриваются результаты анализа влияния засева кристаллизующими реагентами на электрическую активность градовых и градоопасных облаков, выполненного на основе совмещения в реальном масштабе времени данных грозопеленгационной сети, автоматизированного метеорологического радиолокационного комплекса АМРК «АСУ-МРЛ» и места внесения кристаллизующего реагента с помощью противоградовых ракет.

Грозовые процессы являются внешним проявлением атмосферных процессов (например, атмосферной циркуляции, микрофизических преобразований в облаках, переход конвективного облака в градоопасное состояние и др.), непосредственный мониторинг которых не всегда доступен.

В целом гроза – это комплексное атмосферное явление, признаками которого являются многократные электрические разряды (молнии) между разноименно заряженными областями облака - облачные разряды, разными облаками - межоблачные разряды или между облаками и землей – наземные разряды. Как правило, очень часто грозы сопровождаются сильным шквалистым ветром, ливневыми осадками и градом.

При этом электрические факторы являются следствием микроструктурных процессов в облаке, хотя электрические поля, согласно численным моделям, оказывают ускоряющее воздействие на процессы облакообразования. За счет электрической коагуляции время роста частиц осадков в мощном конвективном облаке существенно сокращается (около 30%). При этом одной из важных предпосылок разделения электрических зарядов в облаках в умеренных широтах, где град приносит наибольший ущерб народному хозяйству, является наличие твердой фазы. Известно, что имеется взаимосвязь между процессами образования и выпадения града и интенсивностью грозовой активности мощных кучево-дождевых облаков [1- 6]. На этих принципах основываются модели электризации конвективных облаков, которые получают все большее распространение в мировой практике для прогноза эволюции Сb, а также гроз. Моделям, описывающим

электрическое поле атмосферы, посвящены работы [1, 2].

Мировой опыт эксплуатации грозопеленгационных систем показал, что электрические процессы в облаках свидетельствуют не только об их существенной микрофизической перестройке, но и предшествуют появлению опасных явлений погоды (ОЯП) (ливни, град, смерчи, шквалы и др.), т.е. они фактически являются предикторами ОЯП. Для осуществления количественной и качественной оценки этой взаимосвязи измеряются следующие характеристики грозовой активности облаков: время появления, координаты, количество и тип разрядов, количество повторных разрядов во вспышке молнии, полярность и величина протекающих токов, соотношение числа разрядов на землю и внутриоблачных разрядов в единицу времени и др.

В данной работе исследована динамика грозовой активности конвективных облаков при их естественном развитии и при активных воздействиях на градовые процессы. Для этих задач использована грозопеленгационная система LS8000 [7].

Координаты местоположений грозопеленгаторов и центрального пункта LS8000, установленного на Северном Кавказе приведены в таблице 1.

Каждый грозопеленгатор имеет по два датчика – низкочастотный (LF) и высокочастотный (VHF). Низкочастотный датчик LF фиксирует, в основном, молниевые разряды типа Облако-Земля. Высокочастотный датчик VHF фиксирует молниевые разряды только типа Облако-Облако и внутри облачные.

Таблица 1

Координаты местоположений грозопеленгаторов и центрального пункта

Место расположения	Координаты		
	Широта	Долгота	Высота, м
Черкесск	44,2874 °	42,2404 °	901
Зеленокумск	44,4337 °	43,9036 °	172
Ставрополь	45,1136 °	42,1012 °	483
Кызбурун	43,6787 °	43,4048 °	747
Центральный пункт (ВГИ), г. Нальчик	43,4694 °	43,5861 °	540

Зоны обзора для разных типов молниевых разрядов различные. Для молниевых разрядов Облако-Земля радиус области обзора составляет 625 км от центров сети, а разрядов Облако-Облако - 325 км. Зона обзора грозопеленгационной сети приведена на рис. 1. Как видно из рисунка зона обзора перекрывает территории юга Европейской части России и республик Закавказья.

По данным полученным с LF и VHF датчиков центральный процессор (CP8000), расположенный в центре приема и обработки информации, выдает до 25 параметров по каждому молниевому разряду. Основные параметры следующие:

для молниевых разрядов Облако-Земля:

- Дата и время разряда с точностью до 100 наносекунд;
- Широта, долгота (WGS-84) (координаты разряда);
- Сила и полярность сигнала (тока в канале разряда), в кА;
- Классификация разрядов на положительные и отрицательные;
- Время роста сигнала до пикового значения, в мкс;
- Время спада сигнала от пикового значения до нуля, в мкс.

для молниевых разрядов Облако-Облако и внутриоблачных разрядов:

- Дата и время с точностью до 100 наносекунд;
- Широта, долгота (WGS-84) (координаты разряда).

Аналогичная система грозорегистрации работает в ряде стран: США, Финляндия, ЮАР, Китай, ФРГ, Канада и др. [8].

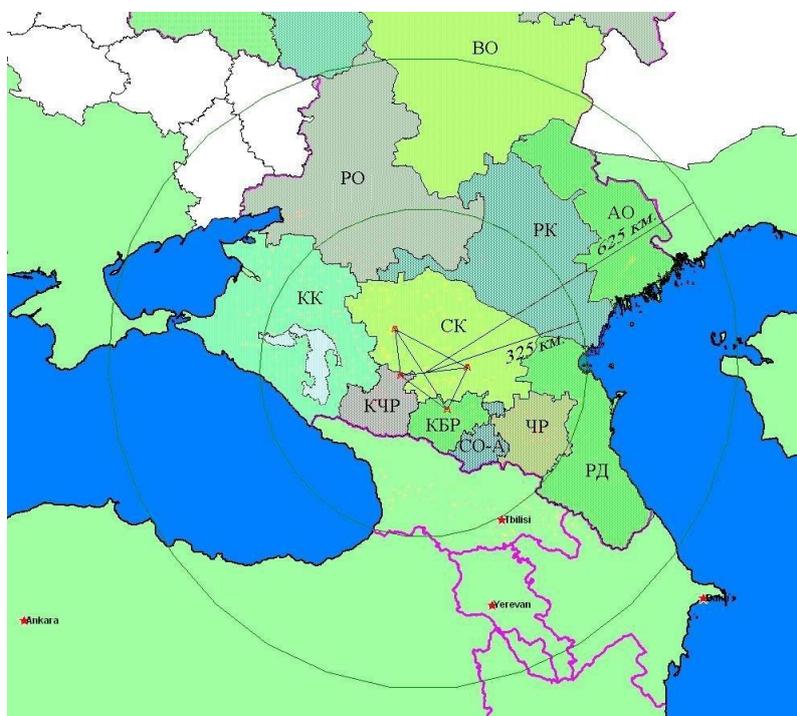


Рис. 1. Зона обзора грозопеленгационной сети LS8000. Обозначения: КК, РО, ... – Краснодарский край, Ростовская область и т.д.; вершины четырехугольника показывают места установок датчиков LS8000; меньшая окружность – зона обзора облачных и межоблачных разрядов; большая окружность – зона обзора наземных молниевых разрядов.

Благодаря таким инструментальным измерениям можно достаточно точно определять начало, окончание и продолжительность грозовых явлений на юге Европейской части России, а также динамику их развития и траекторию перемещения, пространственное местоположение разрядов молний, их классификацию по типам и полярностям (знак переносимого молнией на землю электрического заряда), значение амплитуды токов в каналах наземных разрядов молний и временные характеристики нарастания и спада импульсов токов.

Система позволяет автоматическую регистрацию указанной информации, их архивирование и визуализацию информации в различных форматах: в виде табличных данных, в виде точек координат молний, наложенных на карты местности (рис. 2), в виде цветовой индикацией на различных картосхемах и др.

Для отображения данных о молниевых разрядах на карте местности в состав грозоупреждающей сети LS 8000 входит программное приложение LTS-2005, которое позволяет его реализацию в режиме реального времени (рис. 2). Цвет разрядов показывает временной диапазон, в течение которого произошли эти разряды. Красный цвет показывает разряды, которые произошли за последние 30 минут. Знаки «+» и «-» показывают полярности молниевых разрядов.

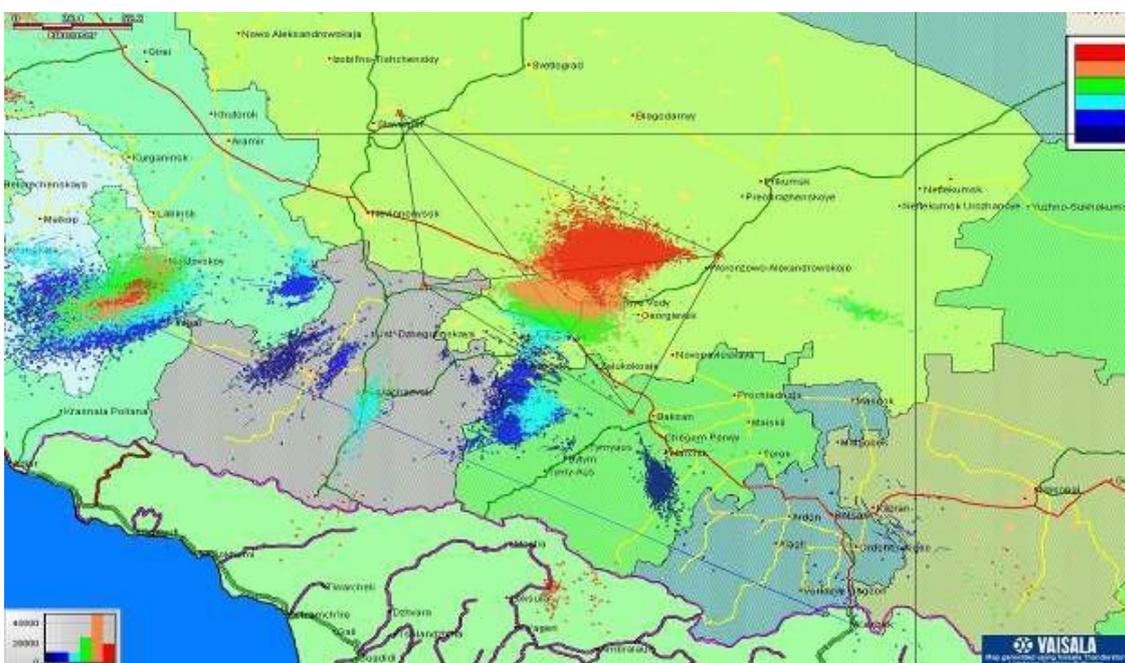


Рис. 2. Пример отображения грозового процесса на карте местности. Обозначения: «+» - разряды «облако-земля» положительной полярности; «-» - разряды «облако-земля» отрицательной полярности; О – межоблачные и внутриоблачные разряды.

Для подготовки данных о молниях в формате, необходимом для совмещения с данными метеорологических радиолокаторов, была создана программа DataClient. Она извлекает по локальной сети из CP8000 информацию о параметрах молниевых разрядов, преобразует их в необходимый вид и записывает на жесткий диск с формированием заранее определенной структуры представления информации. Программа DataClient в оперативном режиме отслеживает все молниевые разряды, разбивает данные по типам (CG или IC), группирует их по минутным и часовым интервалам и записывает на жесткий диск компьютера.

Для комплексной обработки данных грозовых разрядов совместно с данными радиолокационных измерений использовалась система АМПК «АСУ-МРЛ» [9], предназначенная для целей

штурмооповещения и управления активными воздействиями на облачные процессы, позволяющая получать около 30 карт метеоинформации, измерять более 40 одномерных, двумерных и трехмерных параметров облачных ячеек, строить диаграммы эволюции любых параметров, распознавать явления погоды и категории объектов воздействия, отображать на фоне структуры облаков место внесения реагента, пеленги грозовых разрядов по данным сети датчиков LS8000 (см. рис. 3), и рассчитывать их грозовые характеристики.

На рис. 3 красными кругами обозначены радиусы действия ракетных пунктов воздействия. Замкнутый черный многоугольник ниже основного радиозэха - площадка засева. Замкнутый контур черного цвета на фоне радиозэха - мощные осадки у земли. Замкнутый контур белого цвета на фоне радиозэха - градовые и ливневые осадки у земли. Синий вектор из центра грозоградовой ячейки - направление ведущего потока или среднего ветра в атмосфере на уровне 700-500 миллибар. Красный вектор из центра грозоградовой ячейки - направление перемещения ячейки.

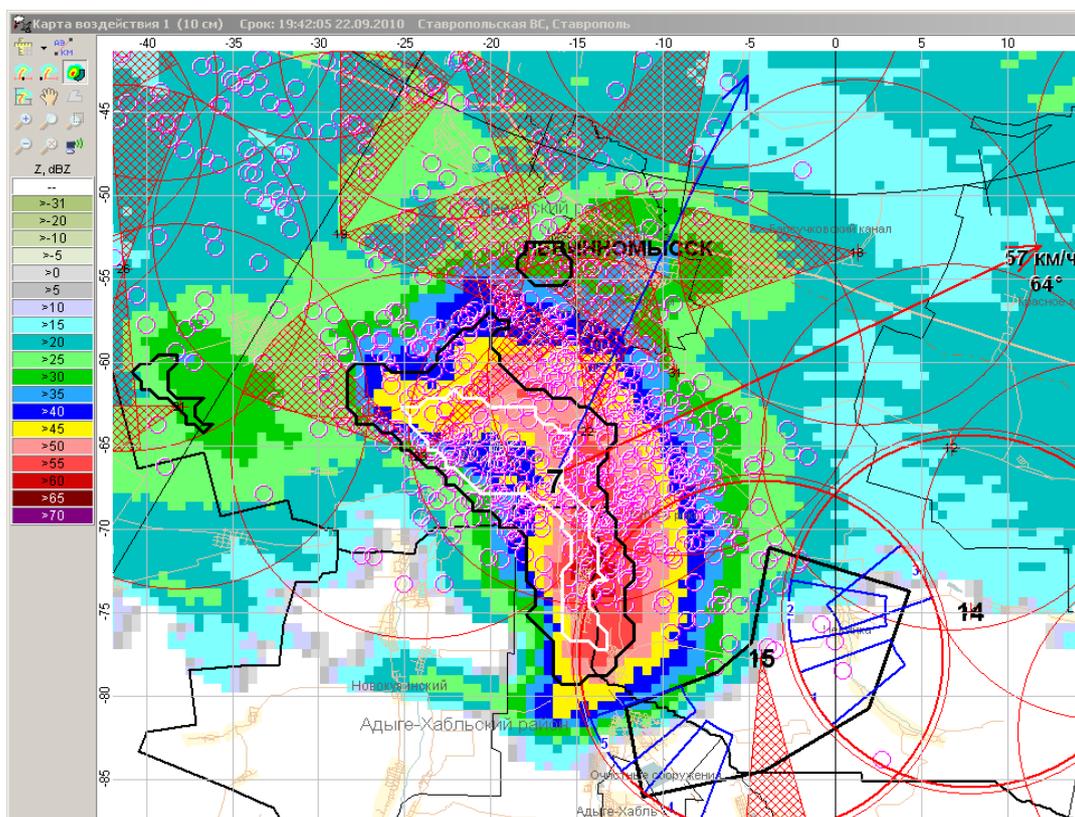


Рис. 3. Пример синтезированной карты радиолокационной структуры суперячеекового градового облака 22.09.2010 г. с местом внесения противогрозовых изделий (ПГИ) и пеленгами грозовых разрядов.

Обозначения:

- Внутриоблачные грозовые разряды.
- +
-
- ▭ Место внесения ПГИ в виде усеченных трапеций, показывающих начало и конец трассы эффективного засева ракет.

Результаты и обсуждения

1. Грозовая активность

Важной климатической характеристикой грозовых явлений является их продолжительность. В климатических характеристиках принято определять продолжительность гроз в год, в месяц и за один грозовой день. Количество часов грозовой активности в целом на территории юга европейской части России составляет около 5000 часов. В среднем продолжительность грозы за грозовой день составляет около 4 часов в день. Благодаря возможности используемой аппаратуры по локализации измерений на малой (ограниченной) территории стало возможным оценить количество молний за грозовой процесс и длительность грозовой активности.

В среднем молниевая активность грозового дня продолжается в течение 240 минут. Продолжительность грозового цикла одной облачной ячейки в среднем составляет около 31,2 минут (стандартное отклонение $\pm 20,2$ мин), генерируются при этом около 235 молний (стандартное отклонение ± 392).

Прослеживается взаимосвязь между продолжительностью грозовых явлений в отдельной грозовой ячейке (облака) и интенсивностью молниевых разрядов. Используя полученные данные и известные методы анализа [24], составлено уравнение исторической регрессии по более 4000 случаям наблюдений за естественно эволюционирующими облачными ячейками:

$$T = 0,965F + 20,8 \text{ (мин), при } F > 0,$$

где T – продолжительность грозы в мин., F – средняя частота разрядов в облаке мин^{-1} .

Максимальная молниевая активность (число разрядов в единицу времени) может достигать до 60 разрядов в минуту, при этом до 20% из них - разряды на землю. Обычно такие грозы обусловлены суперячейками – мощными грозоградовыми облаками и, как правило, на Северном Кавказе они повторяются 1-2 раза в год, нанося значительный материальный ущерб сельскому хозяйству.

2. Грозовая активность при градовых процессах

В данном предварительном анализе рассматривается эволюция мощных грозоградовых процессов (22.09.2010 г., 15.05.2016г.), на которые проводилось воздействие с целью предотвращения града Ставропольской и Краснодарской Военизированной службами Росгидромета с помощью ПГИ с реагентом AgI .

На синтезированные карты структуры облаков, получаемых на «АСУ-МРЛ» через каждые 3 мин 40 сек, отображались места грозовых разрядов и вносимых ПГИ именно в этом интервале времени. Для отсека ложных гроз осуществлена фильтрация разрядов, отмечавшихся за границами радиоэха с $Z < 5 \text{ dBZ}$. Места внесения ракет нанесены с упреждением на перемещение облаков.

На рис. 4 представлена эволюция мощного суперячейкового градового облака (22.09.2010 г.), из которого по радиолокационным и наземным данным выпадал крупный град. По мере его развития с 18:53 до 19:55 максимальная отражаемость увеличилась от 54 до 66 dBZ (рис. 4а). В 18:53 появился и резко увеличивается во времени объем с отражаемостью 55 dBZ, а соответствующее ему интегральное водосодержание градовой компоненты осадков достигло значения $M_{55} \geq 1100$ килотонн, при общем водосодержании облака $M_{15} \geq 1600$ килотонн (рис. 4б). Водосодержание вертикального столба (VIL) облака увеличилось за это время с 20 до 70 кг/м². Согласно российской технологии защиты от града [10] облако, как объект воздействия (ОВ), достигло 4 категории. Воздействие на него проводилось с 19:33 и до 20:11, внесено 63 ПГИ "Алазань-6" с общим количеством кристаллизующего реагента 39,69 кг и общим выходом около $4,2 \cdot 10^{17}$ активных кристаллизующих частиц. Из-за недостатка ракет в течение всего времени воздействия отмечался недозасев. Только спустя полчаса от начала воздействия VIL резко уменьшилось с 70 до 40 кг/м².

Ход грозовых параметров облака показан на рисунках 4з - 4е, из которых следует, что:

- с началом воздействия сумма токов отрицательных разрядов типа облако-земля (рис. 4з) резко уменьшается от 110 до 10 килоампер/мин;
- сумма токов положительных зарядов, напротив, увеличилась с 30 до 80 килоампер/мин;
- пиковый ток разрядов облако-земля обеих полярностей вначале увеличивается после воздействия, а затем спустя 10 - 15 минут уменьшается (рис. 4д);
- наиболее показательную реакцию на засев кристаллизующим реагентом демонстрирует количество межоблачных разрядов, увеличиваясь от 110 до 800 разрядов в мин., при средней мощности разрядов 20 килоампер. Количество энергетически более сильных разрядов облако-земля, напротив, резко уменьшается, вплоть до полного исчезновения, и далее плавно увеличивается.

Аналогичная динамика указанных параметров, как правило, прослеживается и при других градовых процессах. На рис. 5 и 6 приведен ход параметров градового облака, наблюдавшегося 15 мая 2016 года на территории Ставропольского края. На рис. 5 приведен ход параметров молниевых параметров, а на рис. 6 - ход динамики максимальной отражаемости этой ячейки за тот же период времени.

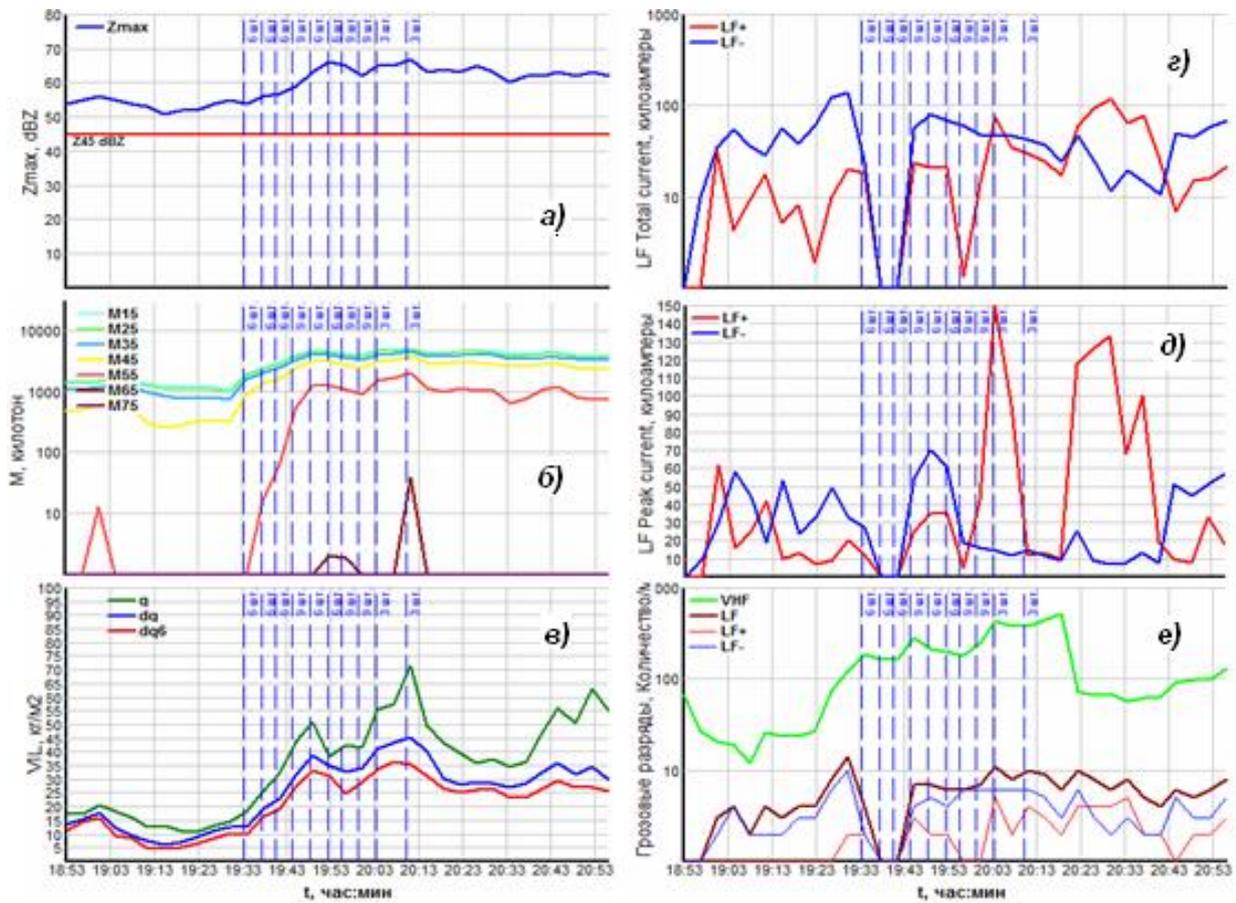


Рис. 4. Эволюция во времени параметров супер ячейкового градового облака, наблюдавшегося 22.09.2010 г. в Ставропольском крае, в процессе засева кристаллизующим регентом AgI:

(**a**) - максимальная радиолокационная отражаемость (Z , dBZ); (**б**) - суммарное водосодержание объемов, ограниченных изолиниями $Z = 15, 25, 35, 45, 55$ и 65 dBZ (M , килотонн); (**в**) - максимальное значение VIL ($\text{кг}/\text{м}^2$) всей толщи облака (q), слоя выше изотермы 0°C (dq) и слоя выше изотермы -6°C (dq_6); (**г**) - суммарный ток положительных (LF+) и отрицательных (LF-) разрядов облако-земля (килоампер); (**д**) - максимальный ток разрядов облако-земля (килоампер); (**е**) - частота разрядов облако-облако (VHF) и облако-земля (LF) в мин. Моменты внесения и количество ракет "Алазань-6" обозначены вертикальными пунктирными линиями.

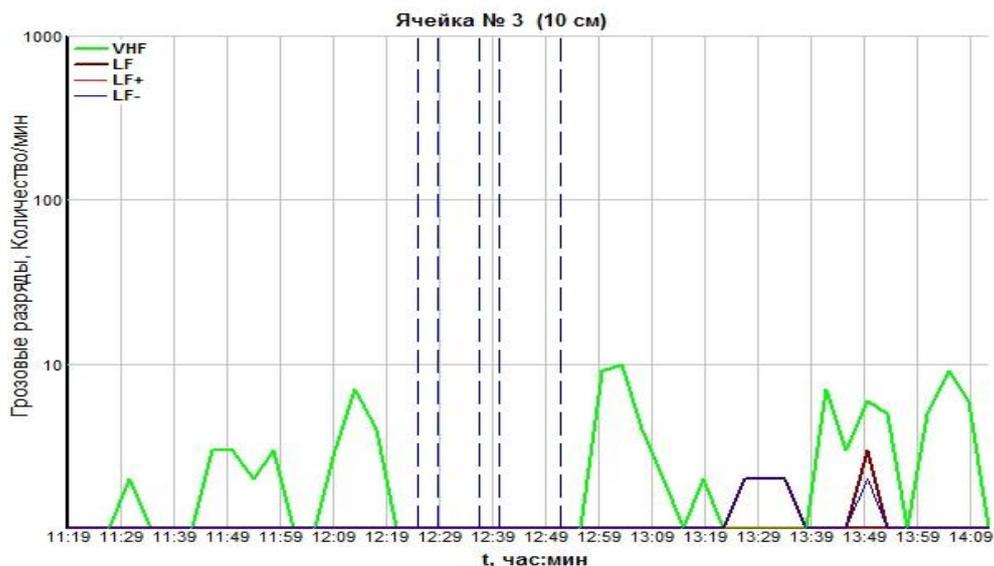


Рис. 5. Динамика грозовой активности градового облака (ячейка №3) на территории Ставропольского края 15.05.2016г.

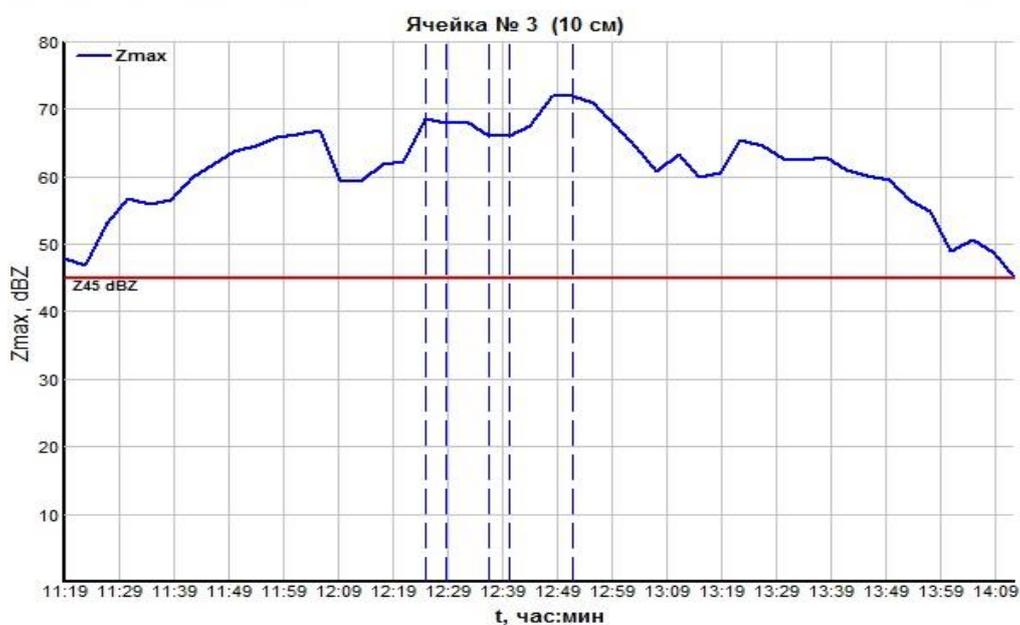


Рис. 6. Динамика максимальной отражаемости ячейки №3 на территории Ставропольского края 15.05.2016г.

Выводы

Опытная эксплуатация системы грозопеленгации в 2010-2017 гг. позволила выявить следующие особенности развития грозоградовых явлений на Северном Кавказе:

- 1) Наиболее интенсивная генерация электрических зарядов в облаке происходит при формировании в нем градовых частиц. Подтверждением этого является увеличение количества молний различных типов в период индикации града в облаке с помощью метеорадиолокатора МРЛ-5;

2) В зоне роста градовых частиц, как правило, совпадающей с отрицательно заряженной областью облака, имеет место интенсивное разделение электрических зарядов и формирование условий для возникновения отрицательных молний CG. В этот период имеет место рост высоты верхней границы облака и его отражаемости до 10 км и 65 dbZ соответственно;

3) Начало формирования града совпадает по времени с максимальным интегральным водо-содержанием как облака в целом, так и его переохлажденной части;

4) Измерение числа грозовых разрядов в период зарождения и выпадения града показывает, что градовая стадия обычно сопровождается наибольшей грозовой активностью кучево-дождевых облаков. Появление градовых частиц в облаке увеличивает грозовую активность в 2-2,5 раза. В тоже время градообразование в конвективном облаке начинается после начала грозы, которая может продолжаться и после прекращения града. Это показывает, что процесс градообразования в облаке занимает значительно меньше времени, чем грозовая деятельность. При этом косвенным подтверждением перехода облака в градоопасную стадию является: рост интенсивности грозы до 5 и более разрядов в минуту; облако становится градовым, если число разрядов превысит 10 разрядов/мин.

5) Среднее значение тока отрицательной CG молнии составляет 16,8 кА. Для положительных CG молний среднее значение тока составило 22,9 кА;

6) С увеличением высоты местности над уровнем моря значение амплитуды тока уменьшается. Среднее значение тока в равнинной и степной зонах территории Северного Кавказа составляет около 23 кА, а в горной части – 14 кА.

7) Получены распределения токов различной полярности. Средние значения токов молнии в зрелой стадии развития грозового облака составляют 1...100 кА. В начале и завершении грозы грозовая активность определяется, в основном, внутриоблачными молниями.

8) Проведены работы по объединению радиолокационной и грозорегистрационной информации с учетом орографии местности, над которой развиваются облака для более точного распознавания гроз, града, вида осадков и т.д.

9) По предварительным данным получено, что пеленги грозовых разрядов относительно редки во фронтальных обновляющихся частях градовых облаков (областях нового роста), куда вносится кристаллизующий реагент в соответствии с технологией противогордовой защиты. Засев областей нового роста аэрозолем AgI приводит через 3 – 6 минут к повышению частоты внутриоблачных грозовых разрядов (VHF) и сокращению разрядов «облако-земля» (LF) положительной и отрицательной полярности. Повышение частоты грозовых разрядов наблюдается в областях повышенной отражаемости и на подветренном фланге градового облака. Это, по-видимому, связано с тем, что кристаллизующий реагент, вносимый в области слабых восходящих потоков,

по мере стимулирования быстрой электризации облачных частиц за счет фазовых переходов, втягивается в мощный восходящий поток и в градовый очаг, и переносится на подветренный фланг, приводя к интенсификации разрядных процессов в этих областях. По мере засева разряды «облако-земля» практически исчезают, хотя из облака продолжает выпадать град. Грозовые характеристики облака реагируют на АВ более быстро, чем радиолокационные, но также быстро и возвращаются в первоначальное состояние, видимо, за счет быстрой регенерации объемного заряда в облаке.

Список литературы

1. Довгалоук Ю.А., Веремей Н.Е., Синькевич А.А. Применение полуторамерной модели для решения фундаментальных и прикладных задач физики облаков. – Изд. "Моби Дик", Санкт-Петербург, 2013, вып. 2, 220 с.
2. Шаповалов А.В. Моделирование эволюции конвективных облаков с учетом электрических процессов, Математическое моделирование, том 15, №4, 2003, С. 65–76.
3. Mansel E. R., MacGorman D.R., Ziegler C.L., and J. Straka. Charge structure and lightning sensitivity in a simulated multicell thunderstorm. – J. Geophys. Res., 2005, vol. 110, pp.12-20.
4. MacGorman D. R., Straka J. M., Ziegler C. L. A Lightning Parameterization for Numerical Cloud Models. – J. Appl. Meteor., 2001, vol. 40, pp. 459–478.
5. Gardiner B., Lamb D., Pitter R. Measurements of initial potential gradient and particle charges in a Montana summer thunderstorm., – J. Geophys. Res., 1986, vol. 90, N D4, pp. 6079-6086.
6. Zhao, P., Y. Yin, H. Xiao. The effects of aerosol on development of thunderstorm electrification: A numerical study.-Atmospheric Research, 2015, vol. 153, pp. 376-391.
7. Аджиев А.Х., Стасенко В.Н., Тапасханов В.О. Система грозопеленгации на Северном Кавказе. Метеорология и гидрология. 2013. № 1. С. 5-11.
8. Кононов И.И., Петренко И.А., Снегуров В.С. Радиотехнические методы местоопределения грозových очагов // Л.: Гидрометеиздат, 1986. 222с.
9. Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Котелевич А.Ф., Сирота Н.В. Автоматизированная система управления противоградовыми операциями «АСУ-МРЛ» // Труды научно-прак. конф, посвящ. 40-летию производств. работ по защите сельхозкультур от градобитий, Нальчик, 2011. С. 211 - 225.
10. Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Малкарова А.М., Пометельников В.А. Руководящий документ РД 52.37.731-2010. Организация и проведение противоградовой защиты. Нальчик, 2010, 86 с.

МОНИТОРИНГ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ АТМОСФЕРЫ В РАЙОНЕ ЭЛЬБРУСА

Кудринская Т.В., Куповых Г.В., Редин А.А.

Южный федеральный университет, г. Таганрог

Введение. Электрическое поле атмосферы является важным параметром мониторинга состояния атмосферы и индикатором антропогенного воздействия на нее. Изменчивость электрического поля вблизи земной поверхности связана с наложением возмущений локального происхождения на его глобальные вариации, обусловленные изменениями потенциала ионосферы вследствие волновых геофизических процессов, изменением электрической проводимости, глобальной грозовой активности и т.п. [1,2]. Регион Северного Кавказа в летний сезон характеризуется интенсивной грозовой деятельностью, местные грозы наблюдаются при высокой температуре и высоком влагосодержании воздуха, преимущественно в послеполуденные часы в летние месяцы [3]. Основными характеристиками гроз являются число дней с грозой и повторяемость гроз. Наибольшая повторяемость дней с грозой по месяцам наблюдается в июне, несколько ниже в июле, затем следуют май и август. Кроме того, наблюдается следующая тенденция: за годом, характеризующимся большим числом грозовых дней, идет год малоактивный в грозовом отношении.

Поведение атмосферно-электрических характеристик приземного слоя отражает состояние континентальной радиоактивности (в частности, концентрации радона в атмосфере), содержания аэрозолей, поэтому важно определить пункты наблюдений для решения задач выделения глобальных эффектов на фоне локальной изменчивости. В этом отношении интересны исследования поведения градиента потенциала электрического поля атмосферы и концентрации аэроионов в высокогорных пунктах, так как это позволяет исключить антропогенную составляющую в формировании электродинамики атмосферы, а также характеризуются низким уровнем радиоактивности приземного слоя.

Исследование проявления солнечно-земных связей в атмосферном электричестве представляет научный и практический интерес. Известно, что вспышки на Солнце могут вызывать изменения атмосферного электрического поля, в результате чего усиливается грозовая деятельность в атмосфере [4]. Число и интенсивность гроз находится в соответствии с процессами, протекающими на Солнце: грозы учащаются и усиливаются при увеличении числа пятен [4]. Влияние солнечных вспышек на атмосферно-электрические процессы может проявляться через 10-15 минут. После мощных вспышек на Солнце к Земле приходят протоны высоких

энергий (солнечные космические лучи), которые ионизируют верхние слои атмосферы и изменяют ее глобальную проводимость.

Методы исследования. В работе рассматриваются данные измерений, полученные на высокогорной станции Пик Чегет (43°16'N, 42°30' E; 3040 м н.у.м.), расположенной на северном склоне горы Чегет, примерно в 5–7 км от вершин Эльбруса.

В современных условиях необходимо применение эффективных технических средств и обеспечение автоматизации получения информации. Методика измерений и состав аппаратуры был выбран с учетом их работы без обслуживания длительное время, программное обеспечение измерительного комплекса позволяет проводить измерения, передачу и визуализацию значений напряженности электрического поля атмосферы и параметров молниевых разрядов.

Используемая система грозопеленгации с помощью грозорегистратора LS8000 является высокоточной аппаратурой для регистрации грозовых разрядов и их параметров [5]. Система состоит из четырех грозопеленгаторов LS8000 фирмы Vaisala и центрального пункта приема и обработки информации от датчиков. В процессе работы комплекс регистрирует: дату и время (с точностью 100 нс); широту, долготу (WGS-84); силу и полярность сигнала (тока в канале разряда); классификацию разрядов на типы облако-земля или внутриоблачный разряд, на положительные и отрицательные разряды. Для регистрации напряженности электрического поля во всех пунктах наблюдений использовался измеритель электрического поля EFM 550 фирмы Vaisala. Для обработки и дальнейшего анализа данных создана программа «Vaisala data processing».

Измерения концентрации легких ионов осуществлялись с помощью счетчика аэроионов «Сапфир-3М». Одновременно проводилась автоматическая регистрация минутных значений температуры воздуха, абсолютной и относительной влажности, скорости и направления ветра, давления с помощью автоматической метеорологической станции АМС-2000.

Для контроля радиоактивности атмосферы проводились эпизодические измерения концентрации радона с помощью радиометра «AlphaGuard», детектором в котором является импульсная ионизационная камера с активным объемом 0,56 л (альфа-спектроскопия) и измерения мощности эквивалентной дозы гамма-излучения с помощью дозиметр-радиометра СРП-88н.

Мощность солнечных вспышек отслеживается и измеряется Геостационарными эксплуатационными спутниками наблюдения за окружающей средой (англ. Geostationary Operational Environmental Satellite или GOES). В работе использованы данные со спутников с GOES-15 и GOES-14. Кроме того, в работе рассматривались данные интенсивности космических лучей с нейтронных мониторов (<http://cr0.izmiran.rssi.ru/mosc/>) и данные солнечной активности (www.moveinfo.ru).

Результаты статистического анализа данных. В таблице представлены результаты статистического анализа вариаций напряженности электрического поля приземного слоя атмосферы для трех летних месяцев за 2012-2016 года.

Таблица 1

Средние статистические характеристики напряженности электрического поля

	<i>Характеристика</i>	<i>2012</i>	<i>2013</i>	<i>2014</i>	<i>2015</i>	<i>2016</i>
1	Среднее	650	700	600	590	600
3	Статистическая ошибка	7	7	6	13	9
4	Минимум	170	170	130	155	230
5	Максимум	1300	1450	1350	1360	1140
6	Экссесс	0,2	0,4	0,7	0,5	0,1
7	Асимметричность	0,3	0,6	0,8	0,7	0,4

Характерно что, средние значения напряженности электрического поля мало меняются по годам, а диапазон измеряемой величины для летнего сезона достаточно широкий. На основании экспериментальных данных построены эмпирические вариационные ряды для летнего сезона и рассчитаны теоретические кривые, соответствующие нормальному распределению. Экспериментальные распределения обнаруживают незначительную правостороннюю (положительную) асимметрию и также небольшой положительный эксцесс по сравнению с нормальной кривой.

При этом среднесуточные вариации электрического поля атмосферы достаточно хорошо согласуются как между собой, так и с кривой Карнеги [1], отражающей унитарную вариацию. На рис. 1 приведены суточные изменения за три летних месяца для указанных годов, время указано по Гринвичу.

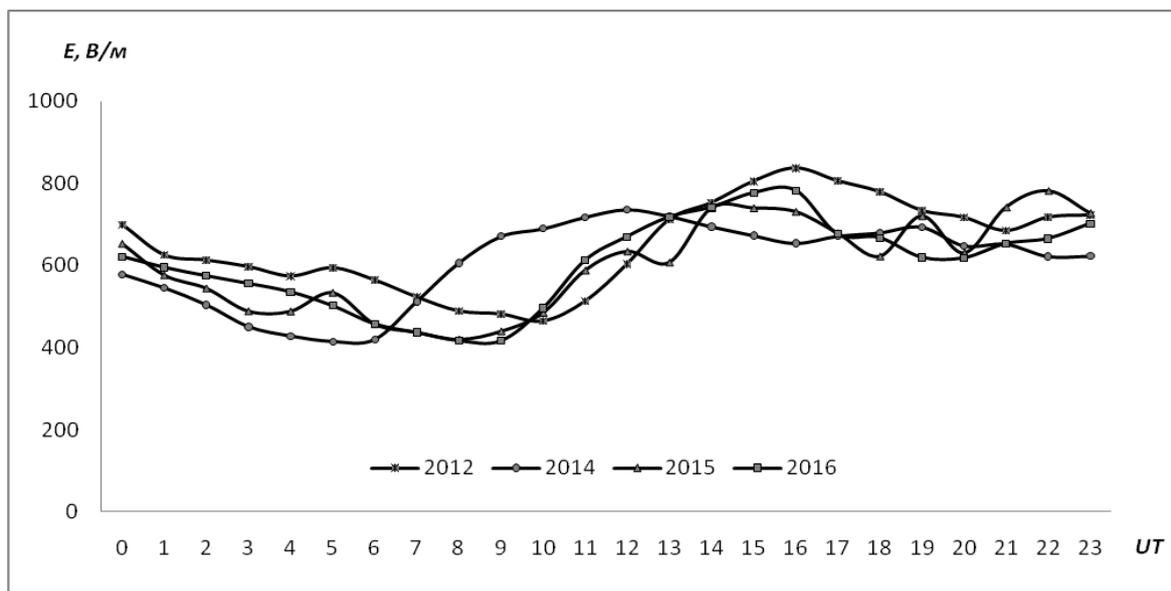


Рис. 1. Среднесуточные вариации напряженности электрического поля, Пик Чегет.

Так максимум в вариациях приходится на дневные часы по местному времени, с более развитой конвекцией и турбулентным обменом, а минимум на ночные часы.

Концентрации легких ионов имеют стабильно высокие значения, что обусловлено чистотой атмосферы (Таблица 2). При этом, горные условия характеризуются низким уровнем радиоактивного α -излучения - концентрация радона менее 30 Бк/м³ и повышенным уровнем γ -излучения – мощность эквивалентной дозы 0,25 мкЗв/ч (по сравнению с равнинными территориями).

Таблица 2

Средние значения концентрации аэроионов

	2012	2015	2016
n_+ , ион/см ³	800	910	940
n_- , ион/см ³	480	720	550

Для исследования связи процессов в верхней атмосфере с атмосферно-электрическим полем приземного слоя и выявления солнечно-земных связей использовались следующие данные: число наблюдаемых солнечных пятен, планетарный индекс, интенсивность галактических космических лучей и количество вспышек на Солнце (рентгеновское излучение). Усредненный планетарный индекс возмущений геомагнитного поля на средних широтах, характеризующий колебания горизонтальной составляющей магнитного поля Земли (Ар-индекс), получается измерением магнитометрами в нескольких точках Земного шара. При этом значения Ар-индекса менее

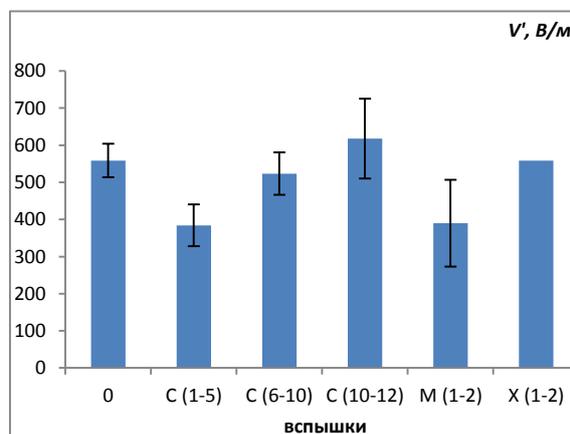
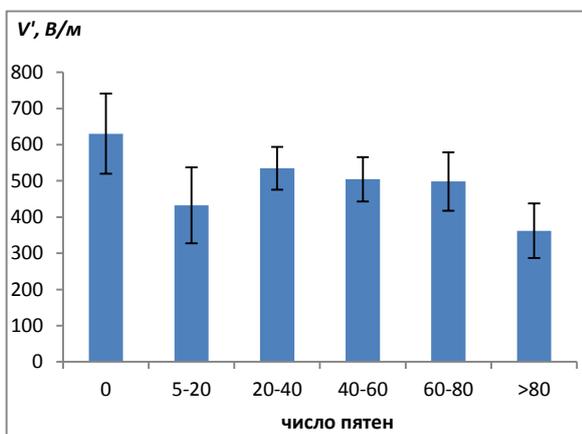
10 характеризуют спокойное состояние магнитного поля Земли, от 15 до 30 – активное и более 35 – штормовое. Вспышки на Солнце делятся на пять классов в зависимости от мощности рентгеновского излучения: А, В, С, М, Х. Минимальный класс А (0.0) соответствует мощности излучения на орбите Земли в 10 нВт/м^2 , при переходе к следующей букве мощность увеличивается в десять раз. В таблице 3 представлены указанные характеристики для летнего периода (июнь, июль, август) за 3 года, при этом включены данные только за те дни, когда есть измерения напряженности электрического поля.

Таблица 3

Характеристики солнечной и магнитной активности

	2014	2015	2016
ГКЛ	6170	6090	6415
Вспышки (сумма) С/М/Х	240/12/3	13/1/0	22/0/0
Число пятен (среднее)	70	47	40
Ар-индекс	9	15	9

На рис. 2 показаны распределения значений напряженности электрического поля приземной атмосферы по числу пятен на Солнце и количеству вспышек класса С, М и Х на горной станции Пик Чегет в летний сезон.



а)

б)

Рис. 2. Распределение напряженности атмосферно-электрического поля по характеристикам солнечной активности: а) число пятен; б) количество вспышек.

Можно отметить, что в дни, когда не наблюдается активности Солнца (отсутствуют вспышки класса С и выше, фиксируется небольшое количество пятен), напряженность электри-

ческого поля приземной атмосферы имеет более высокие значения. Низкие значения напряженности электрического поля соответствуют небольшой активности (небольшое количество пятен и вспышек) и усиление поля с увеличением солнечной активности.

Известно, что интенсивность ГКЛ меняется в противофазе с числом солнечных пятен. Тогда можно ожидать, что увеличение интенсивности космических лучей будет приводить к уменьшению поля. На рис. 3 представлена зависимость напряженности электрического поля приземной атмосферы от интенсивности ГКЛ.

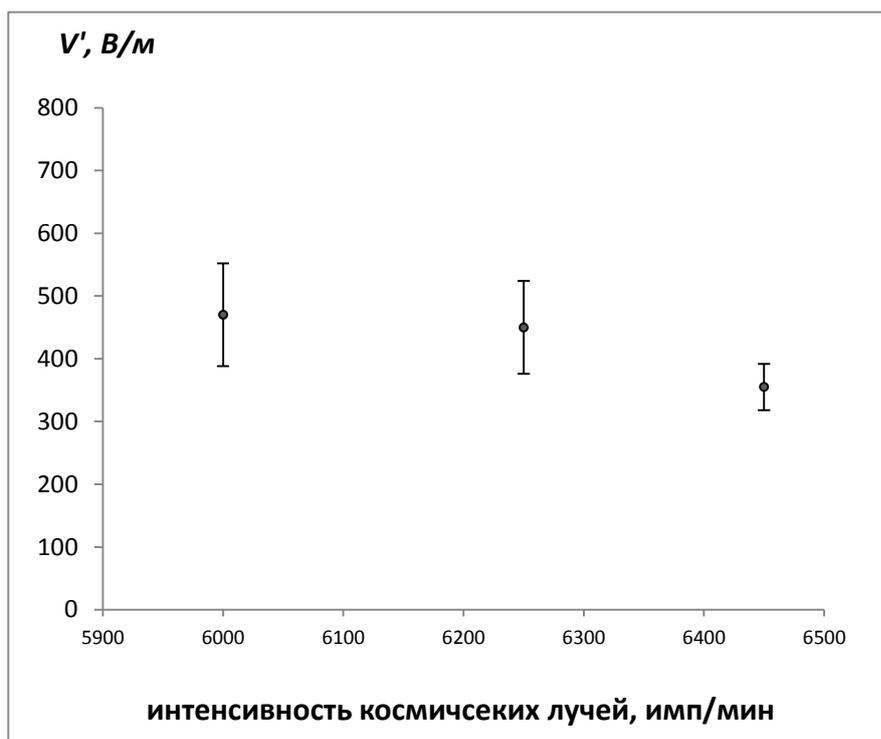


Рис. 3. Зависимость напряженности атмосферно-электрического поля от интенсивности ГКЛ, Пик Чегет, лето 2014-2016гг.

Вспышки на Солнце вызывают изменение атмосферного электрического поля, в результате чего усиливается грозовая деятельность в атмосфере. Рассмотрим влияние рентгеновской вспышки на грозовые процессы. 10 июня 2014 года в 15-16 часов по местному времени наблюдались две мощные вспышки высшего класса (X2.2 и X1.5). Для анализа были использованы данные силы тока разрядов «облако-земля». На основании этих значений была рассчитана интенсивность полярных разрядов (отношение суммы значений разрядов того или иного знака к

числу их регистраций в данный час):
$$y_{\rho\pm} = \frac{\sum_{i=1}^n I_{\pm i}}{n} .$$

На рис. 4 показана динамика значений интенсивности полярных разрядов в указанный день.

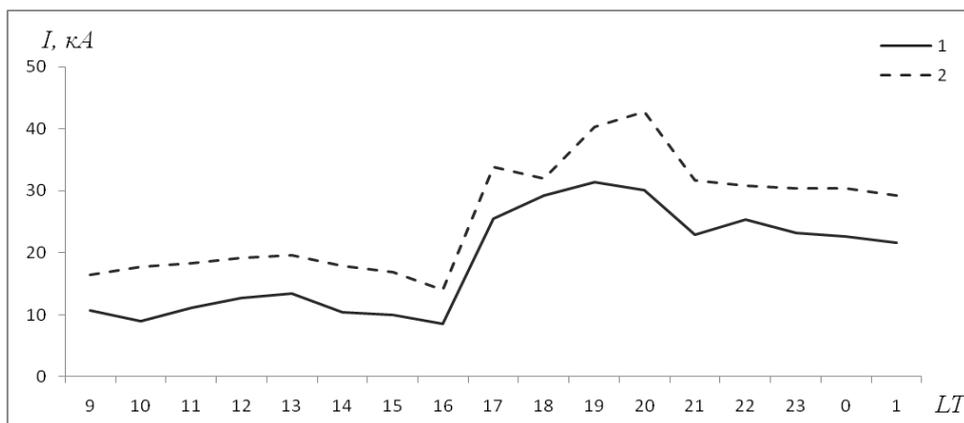


Рис. 4. Вариационные ряды интенсивности полярных разрядов (1 – положительных и 2 – отрицательных), Пик Чегет, 10 июня 2014г.

Можно отметить, что непосредственно после прохождения вспышек наблюдается усиление грозовой деятельности, о чем свидетельствует увеличение интенсивности разрядов обоих знаков.

Выводы. Полученные среднесуточные вариации электрического поля на Пике Чегет свидетельствуют об обусловленности его временного хода глобальной унитарной вариацией потенциала ионосферы. Электрическая проводимость воздуха (концентрации легких ионов) имеют стабильно высокие значения, что говорит о низкой аэрозольной загрязненности атмосферы в высокогорных условиях. Поэтому пункт наблюдения на Пике Чегет является глобально-репрезентативным с позиций мониторинга атмосферы. Проявление солнечно-земных связей в атмосферном электричестве подтверждается зависимостью значений напряженности электрического поля от интенсивности ГКЛ и числа солнечных пятен, а также усилением грозовой деятельности после прохождения солнечных вспышек.

Список литературы

1. Морозов В.Н. Атмосферное электричество // Атмосфера. Справочник (справочные данные, модели). Л. : Гидрометеиздат, 1991. С. 394 - 408.
2. Чалмерс Дж. А. Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеиздат. 1974. 420 с.
3. Аджиев А.Х., Куповых Г.В. Атмосферно-электрические явления на Северном Кавказе. Таганрог. Изд-во ТРТУ, 2004. 137 с.
4. Морозов В. Н., Куповых Г. В Математическое моделирование глобальной атмосферной электрической цепи и электричества приземного слоя. Монография. - СПб.: Астерион, 2017-307 с .
5. Аджиев А.Х., Тапасханов В.О., Стасенко В.Н. Система грозопеленгации на Северном Кавказе// Метеорология и гидрология №1, 2013. – С.5-11.

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПРОЦЕССЫ ОБРАЗОВАНИЯ КРИСТАЛЛОВ ЛЬДА НА ЧАСТИЦАХ РЕАГЕНТА НА ОСНОВЕ AgI

Хучунаев Б.М., Будаев А.Х., Теунова Н.В.,
Ташилова А.А., Панозтов В.П.

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

Введение

В настоящее время, несмотря на определенный успех в исследовании облачных процессов многие вопросы, связанные с микрофизикой образования новой фазы в облаках, остаются не до конца решенными. Более того, развитие этой области знаний в последние годы привело к необходимости пересмотра многих основополагающих положений о процессах образования облаков, осадков и связанных с ними явлений погоды. Это связано с тем, что при дальнейших исследованиях появляются все новые и новые виды льдообразующих ядер и выявляются различные физические процессы, влияющие на образование кристаллической фазы в атмосфере. Интенсивное развитие нанотехнологий в последние десятилетия выявило много особенностей роста новой фазы в наномире, какими и являются процессы образования кристаллов воды в облаках. Исследования структуры нанопленок воды в присутствии электрического поля показывают, что они могут кристаллизоваться при комнатной температуре при значениях электрического поля 10^6 В/м.

При решении проблем образования осадков не в полной мере учитывается влияние на микрофизические процессы в облаках электрических характеристик и в особенности образования твердой фазы в наномире, также не учитывается структурная особенность воды в облаках. Влияние этих процессов на образование осадков, на фазовый состав облака, на климат в целом может быть значительным.

Экспериментальные исследования фазовых переходов воды, приближенные к естественным условиям в облаках (при наличии электрического поля, реализации механизма капельного роста или роста под пленкой на естественных аэрозольных частицах), представляются актуальными, как для решения задач физики облаков, так и развития физики фазовых переходов.

В данной работе приводится описание аппаратуры, методика и результаты исследования влияния электрического поля на процессы образования ледяной фазы на частицах реагента. Необходимо отметить, что образование ледяной фазы в облаках преимущественно происходит на льдообразующих частицах искусственного или естественного происхождения, по-

этому исследование влияния электрического поля на льдообразующие реагенты можно перенести на образование ледяной фазы в облаках в присутствии электрического поля.

Аппаратура для исследования влияния электрического поля на образование кристаллов льда на частицах реагента

В работе исследуется влияние электрического поля на процесс образования кристаллов льда при реализации механизма конденсация - кристаллизация и механизма погружения.

Аппаратура и методика для исследования влияния электрического поля при реализации механизма конденсация - кристаллизация отличается тем, что в малой облачной камере создается электрическое поле при помощи параллельных пластин. Эксперименты по определению зависимости удельного выхода кристаллов при наличии и отсутствии электрического поля при реализации механизма погружения проводились в малой облачной камере. В камере возгонки сжигался реагент AgI, затем воздух из камеры пропусклся (барботировался) через воду и затем разбрызгивался с помощью установки для диспергирования капель в малой облачной камере.

Для исследования льдообразующих свойств реагентов при реализации механизма погружения использовался комплекс аппаратуры (рисунок 1). В баллон (1) с помощью компрессора накачивался воздух до 8 атмосфер. На стойке укреплены две емкости (2) на высоте 2-2,5м, в емкости находится водный коллоидный раствор реагента. Коллоидный раствор реагента получен барботированием воздуха с реагентом из камеры возгонки через дистиллированную воду. Скорость барботирования составляет один литр в минуту. Для получения капель с реагентом к каждой из этих емкостей подключены трубки ($d=2\text{мм}$) с запирающим устройством. На конце трубки имеется игла. От баллона с воздухом отходит шланг с металлической трубкой, в конце которой закреплено сопло. Игла крепится перед соплом на расстоянии 2-3мм. Для распыления раствора реагента необходимо открыть запирающее устройство. Капли, стекающие из иглы, разбиваются струей сжатого воздуха, выходящего из сопла, и разбрызгиваются в малой облачной камере (3).

Напряженность электрического поля создавалось двумя параллельными пластинами, на которые подавалось напряжение. Напряженность электрического поля держалось около $4 \times 10^4 \text{ В/м}$.

Напряжение электрического поля в экспериментах составляло 8кВ, расстояние между пластинами - 0,2 м. Расход реагента определялся в зависимости от массы сожженного реагента, времени барботирования через воду и объема раствора реагента внесенного в малую облачную камеру.



Рис. 1. Комплекс аппаратуры для распыления водного раствора реагента.
1– баллон со сжатым воздухом, 2– емкости с раствором реагента, 3 – малая облачная камера.

Результаты экспериментов

А) при реализации механизма конденсация - кристаллизация

Удельный выход льдообразующих ядер при наличии электрического поля приводятся в таблице 1.

Таблица 1

Значения удельного выхода кристаллов

п/п	Расстояние между пластинами, м	Поданное напряжение, кВ	Напряженность, $\times 10^4$ В/м	Температура в камере, °С	Масса реагента, г	Среднее количество кристаллов в кадре	Удельный выход, $n_{кр}/\Gamma_{реар}$
1	0,3	7	2,33	-5,2	0,191	71	$4,64 \times 10^{10}$
2	0,3	7	2,33	-9,9	0,2	603	$3,8 \times 10^{11}$
3	0,3	7	2,33	-6,5	0,21	178	$1,6 \times 10^{11}$
4	0,3	7	2,33	-9,9	0,21	173	$1,03 \times 10^{11}$
5	0,3	7	2,33	-7,3	0,21	58	$3,45 \times 10^{10}$
6	0,3	7	2,33	-7,7	0,21	1112	$6,6 \times 10^{11}$
7	0,3	9	3,0	-10,4	0,21	2406	$1,43 \times 10^{12}$
8	0,3	8	2,7	-10,5	0,21	1009	$6,0 \times 10^{11}$
9	0,3	9	3,0	-9,9	0,21	650	$3,9 \times 10^{11}$
10	0,3	8,8	2,9	-8,0	0,21	169	$1,0 \times 10^{11}$
11	0,3	9	3,0	-8,0	0,21	106	$6,3 \times 10^{10}$
12	0,3	8,9	2,97	-9,0	0,21	35	$2,1 \times 10^{10}$
13	0,3	8,8	2,93	-7,4	0,21	255	$1,5 \times 10^{11}$
14	0,3	3	1,0	-7,8	0,21	493	$2,9 \times 10^{11}$
15	0,3	2,8	0,9	-7,7	0,21	544	$3,2 \times 10^{11}$
16	0,3	2,8	0,9	-8,6	0,21	876	$5,2 \times 10^{11}$
17	0,3	8,0	2,7	-11,2	0,18	19	$1,3 \times 10^{10}$

Аналогичным образом были проведены эксперименты при отсутствии электрического поля.

Таблица 2

Значения удельного выхода кристаллов при отсутствии электрического поля

п/п	Температура в камере, °С	Масса реагента, г	Среднее количество кристаллов в кадре	Удельный выход, $n_{кр}/\Gamma_{реар}$
1	-10,6	0,21	1115	$6,6 \times 10^{11}$
2	-9,5	0,21	263	$1,6 \times 10^{11}$
3	-6,3	0,21	150	$8,9 \times 10^{10}$
4	-10,6	0,21	585	$3,5 \times 10^{11}$
5	-9,3	0,21	432	$2,6 \times 10^{11}$
6	-8,5	0,21	338	$2,0 \times 10^{11}$
7	-7,9	0,21	1134	$6,8 \times 10^{11}$
8	-9,9	0,21	617	$3,7 \times 10^{11}$
9	-10,5	0,21	1016	$6,0 \times 10^{11}$
10	-8,2	0,21	1348	$8,0 \times 10^{11}$
11	-9,7	0,21	436	$2,6 \times 10^{11}$
12	-8,6	0,21	286	$1,7 \times 10^{11}$
13	-9,4	0,21	909	$5,4 \times 10^{11}$
14	-9,7	0,21	2087	$1,2 \times 10^{12}$
15	-9,9	0,21	686	$4,1 \times 10^{11}$

На рисунке 2 приводится зависимость удельного выхода кристаллов от температуры при наличии и отсутствии электрического поля.

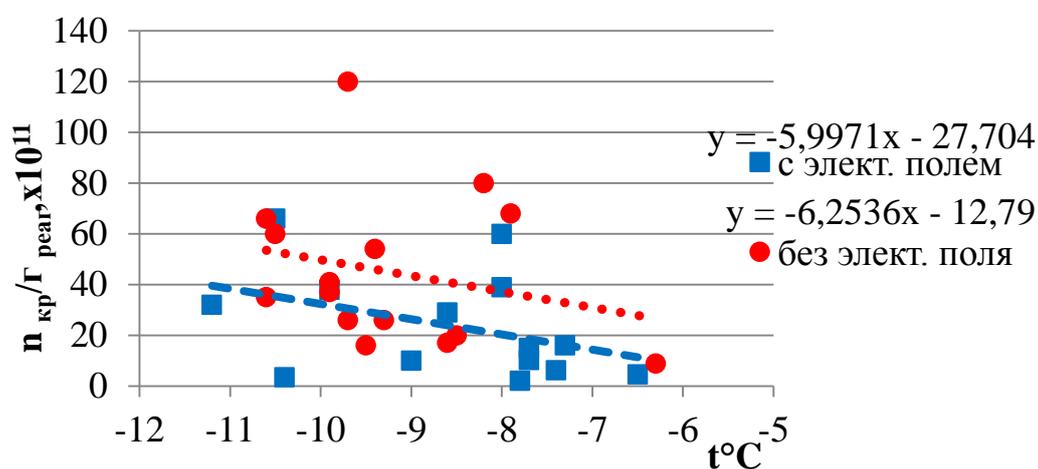


Рис. 2. Зависимость удельного выхода кристаллов от температуры при наличии и отсутствии электрического поля.

Определение зависимости удельного выхода кристаллов при наличии и отсутствии электрического поля в результате реализации механизма погружения

Результаты экспериментов по определению удельного выхода частиц реагента при наличии и отсутствии электрического поля приведены в таблице 3.

Удельный выход кристаллов при наличии и отсутствии электрического поля в результате реализации механизма погружения

Без поля		С полем	
Т, °С	Удельный выход, 10^{11} г ⁻¹	Т, °С	Удельный выход, 10^{11} г ⁻¹
1	2	3	4
-8,1	1,9	-11,3	2,19
-9,3	6	-8	4,8
-6	12	-7,7	15,3
-10,2	11	-9,3	15,1
-8,3	7,06	-7	4,5
-10,3	8,56	-6,8	15,6
-8,3	4,59	-7,5	3,24
-9	12,3	-7,8	8,99
-9,4	11,1	-9	14,8
-8,4	21,3	-7,6	20,2
-7	16,8	-15,5	13,7
-4,9	13,0	-13,5	17,5
-7,8	15,6	-16,7	13,9
-15,5	5,38	-13,2	6,9
-14,5	15,1	-13,4	17,7
-17,1	9,0	-11,9	20,0
-14,1	1,47	-11,9	22,3
-12,6	10,0	-12,0	0,42
-12,8	12,8	-11,7	1,84
		-12,4	19,4
		-13,7	11,0
		-12,3	19,6
		-16,1	14,6
		-15,0	11,7
		-13,3	7,8
		-14,1	5,8
		-13,2	8,2
		-13,6	1,78
		-13,1	5,9
		-16,0	21,1
		-14,8	12,9
		-13,7	17,9
		-13,2	1,41
		-13,1	11,8
		-12,1	6,6
		-11,6	3,1
		-11,6	20,5
		-9,2	13,7

Как видно из таблицы при реализации механизма погружения напряженность электрического поля до 4×10^4 В/м не влияет на процессы образования кристаллов льда на частицах реагента.

Заключение

Проведены эксперименты по исследованию влияния электрического поля на процессы образования кристаллов льда при реализации различных механизмов кристаллизации. Проведенные эксперименты показывают:

- удельный выход льдообразующих ядер в облачной камере при реализации механизма конденсация - кристаллизация уменьшается с увеличением напряженности электрического поля. При этом, просветление облачной среды между пластинами с напряженностью электрического поля происходит на 10-20сек. быстрее, чем без электрического поля;

- электрическое поле при реализации механизма погружения не влияет на удельный выход льдообразующих ядер в облачной камере;

- при реализации контактного механизма и наличии электрического поля удельный выход льдообразующих ядер увеличивается.

ОЦЕНКИ РАДИОАКТИВНОСТИ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПРИЭЛЬБРУСЬЕ ДЛЯ ПЛАНИРОВАНИЯ РАБОТ ПО ИОНИЗАЦИИ АТМОСФЕРЫ

Тертышников А.В.¹, Козлов В.Н.¹, Куповых Г.В.², Удриш В.В.¹

¹ МО РФ, г. Москва

² ТРТУ (ЮФУ), г. Таганрог

Введение

В горных районах отмечается аномальное развитие конвективных ячеек не только за счет горной циркуляции атмосферы, но и за счет повышенного уровня радиоактивности и электрического поля атмосферы [1-3]. Эти эффекты влияют на электрическую проводимость воздуха, процессы образования облаков и осадков.

В реальной атмосфере конденсация пара в капли происходит при достижении насыщения над ядром конденсации. Образование облачности и осадков происходит при сочетании ряда неустойчивых состояний в атмосфере (коллоидной, фазовой, термической, динамической и др.). В середине 60-х годов прошлого века И.М. Имянитов и В.Н. Никандров [4]

интуитивно предложили рассматривать наряду с указанными видами неустойчивостей возникновение электрической неустойчивости в облаках. При этом, физическое явление, связанное с микроэлектрической неустойчивостью в виде дробления капель под действием электрических сил, открыл в 1882 г. английский физик лорд Рэлей (Стретт Джон Уильямс) [5]. В 1987 г. П. Райст [6] опубликовал предельные значения адсорбции отрицательно заряженных ионов и электронов каплями воды.

В 30-х годах прошлого века разрабатывалась теория нуклеации, в которой не учитывалось дробление капель. Это явление практически остается без внимания до настоящего времени [5], хотя тогда же на явление дробления капель при адсорбции электронов и отрицательных ионов обратили внимание физики при обосновании расщепления (цепной реакции) атомного ядра, состоящего из одноименно заряженных протонов [5].

По масштабам проявления различают два вида энергии неустойчивости электрического происхождения [5]: микро- и макроэлектрическую. Микроэлектрическая неустойчивость позволяет объяснить процесс образования осадков в теплых облаках в реальном масштабе времени существования конвективной ячейки и проявляется при достижении предела Рэля. Макроэлектрическая проявляется в молниевых разрядах. Соответственно, могут быть установлены критерии для выражения энергии неустойчивости электрического происхождения, как предел Рэля для капель, и предельное количество электричества при грозовых разрядах, как предел Имянитова [5].

Механизм ионной электризации в облаках не достаточно изучен. Атмосферные ионы возникают в результате ионизации, генерируемой космическими лучами, радиоактивностью почвы [7] и воздуха, грозовой активностью, испарения влаги растительностью, ветром. Эти процессы играют существенную роль в процессах облако- и осадкообразования в естественных условиях. Взаимодействие атмосферных ионов с аэрозольными частицами сопровождается, как правило, конденсационным ростом частиц [5, 8, 9].

Оценки радиационных условий в Приэльбрусье

Изучение ионных характеристик атмосферы и учет состояния электрического поля необходимы для эффективного мониторинга гидрометеорологической безопасности и проведения работ военизированными подразделениями Росгидромета. Но данных измерений мало, большинство из них получены при отсутствии облаков, туманов, сильного ветра и других явлений. Р. Коул и Е. Пирс показали, что появление в атмосфере ионов вызвано ионизацией, интенсивность которой у поверхности Земли составляет около 10^7 пар ионов/(м³с) [10]. При этом 20% величины связано с космическими источниками, 35% - с радиоактивностью почвы, а 45% - с радиоактив-

ностью воздуха. Интенсивность ионизации с высотой по [10] вначале убывает, достигая минимума на высоте около 3 км, а затем возрастает; в нижней стратосфере на высоте порядка 12 км становится максимальной, после чего начинает убывать с высотой. Такие изменения объясняются уменьшением влияния радиоактивности почвы и воздуха. Но так ли это в горных районах? Тем более, что за почти 50 лет исследований появились новые климатические модели радиации и нейтронного потока в атмосфере Земли [11-14]. Они разработаны в исследовательском центре Лэнгли (Langley Research Center, LaRC) в рамках проекта NASA по сверхкраткосрочному прогнозированию радиационной опасности авиаперелетов [11].

Регистрация потока тепловых нейтронов может использоваться для оценки уровня радиоактивности, для оценки ионизации атмосферы, при прогнозе естественного количества осадков или искусственно вызванных. Основным источником свободных нейтронов в атмосфере Земли является космическое излучение. Преимущественно протоны космических лучей создают при взаимодействии с атомами атмосферы Земли вторичное космическое излучение, содержащее пионы, протоны, нейтроны, мюоны, электроны, позитроны и фотоны. Интенсивные космические излучения приводят к увеличению осадков на 17-25% [12].

Обзор технологий, а также очевидный коллапс в отечественных исследованиях потока тепловых нейтронов представлен в [14], где оставлены без внимания вопросы времени жизни тепловых нейтронов, что актуально при обработке данных наблюдений нейтронного фона, и др. Попытки разобраться в результатах [14] привели к постановке ряда натуральных экспериментов в Приэльбрусье. При освоении технологии зондирования потока тепловых нейтронов использовался полигон Сура, где в марте 2014 г. было отмечено увеличение мощности вариаций потока тепловых (низкоэнергичных) нейтронов после выключения нагревного стенда, причем для периодов, соответствующих времени жизни тепловых нейтронов. Однако программа измерений была сорвана патерналистской амбицией руководства ФГБУ «ИПГ».

В июне 2014 г. в ходе экспедиции в Приэльбрусье тем же мобильным счетчиком тепловых нейтронов СНМ-18 (наполнение – 97% ^3He + 3% Ar , 405 кПа) удалось провести маршрутные съемки интенсивности потока тепловых нейтронов. Выбор маршрутов измерений определялся задачами экспедиции, проводившей экспериментальное зондирование ионосферы над Эльбрусом и установку сетевых геодезических навигационных приемников сигналов ГНСС ГЛОНАСС/GPS на метеостанциях Росгидромета и в ФГБУ «ВГИ».

Период измерений потока тепловых нейтронов пришелся на период летнего солнцестояния. Состояние магнитного поля Земли было спокойным. Индекс K_p 17.06.2014 г. по данным [15] соответствовал значению 1+, 18.06.2014 г – 3-, 19.06.2014 г. – 2, 20.06 – 2, 21.06 – 1, 22.06 – 1-, 23.06 – 1-, 24.06 – 1+, 25.06 – 1. В изменении индекса ap возмущений не было. Интенсивность солнечного излучения на длине волны 10,7 см ($F_{10,7}$) уменьшалась: 20.06 – 105.5, 21.06 – 104.5,

22.06 – 97.3, 23.06 – 95.6, 24.06 – 96.6, 25.06 – 100.2. Возмущений ионосферы не было. 22.06.2014 г. началась перестройка атмосферной циркуляции. На Приэльбрусье начал оказывать воздействие гребень повышенного давления с северо-запада, что привело к уменьшению облачности над Эльбрусом.

Сейсмические условия региона были спокойными. Геофизической службой РАН [16] на Восточном Кавказе 23.06.2014 г. в 05:27:44.0 UT были зафиксированы слабые землетрясения с координатами эпицентра 42.92° с.ш. и 45.44° в.д., магнитудой $m_b=3,6-4,0$, глубиной гипоцентра $z=15$ км, 24.06.2014 г., $t=12:36:34.1$, 43.62° с.ш., 45.64° в.д., $m_b=3,6$, $z=10$ км, а также на Западном Кавказе 24.06.2014 г., $t=05:07:28.3$, 44.66° с.ш., 37.25° в.д., $m_b=3,4$, $z=10$ км.

Измерения потока тепловых нейтронов проводились по следующим маршрутам:

1. Минеральные Воды – Терскол по трассам Р217 и А158 (17.06.2014 г.);
2. Южный склон Эльбруса (Терскол – поляна Азау – станция Мир – Гара-Баши – Приют 11, 22.06.2014 г.);
3. Терскол – Нальчик по трассе А158 и Р217 (25.06.2014 г.).

Дискретность снятия данных была настроена через каждые 3 минуты.

Для координатной привязки счетчика СНМ-18 при проведении измерений использовался планшетный компьютер, с встроенным блоком позиционирования GPS/ГЛОНАСС, и работающее под управлением ОС Android бесплатное программное обеспечение “Геотрекер” [17].

Основными факторами в изменении интенсивности потока тепловых нейтронов были высота над уровнем моря и состояние подстилающей поверхности во время измерений. Полученные на всех маршрутах данные с использованием метода наименьших квадратов представлены на рис. 1.

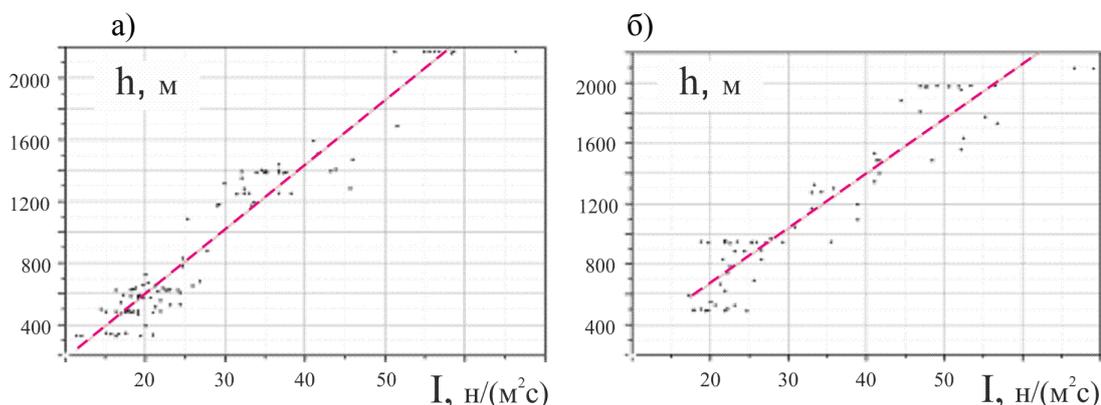


Рис. 1. Изменение интенсивности потока тепловых нейтронов по высоте на трассах:
 а) Минеральные воды – Терскол (шоссе Р217 и А158) – 17.06.2014 г.; б)
 Терскол – Нальчик (шоссе А158 и Р217) – 25.06.2014 г.

Сгущения точек на графиках обусловлены стоянками экспедиции и естественной орографией маршрутов.

Оценки напряженности приземного электрического поля на Чегете

С 2012 г. на станциях Пик Чегете и Кызбурун (в начале Баксанского ущелья в 40 км от Нальчика на высоте 700 м над у. м.) ведется непрерывная регистрация напряженности электрического поля измерителем EFM 550 фирмы Vaisala на [18].

В результате измерений было установлено, что на Чегете в условиях невозмущенной погоды хорошо проявляется глобальная унитарная вариация градиента потенциала электрического поля атмосферы. В частности, средний уровень интенсивности ионообразования составил 20 (пар ионов/см³с) на высоте 1 м и 25 (п.и./см³с) на поверхности земли. Для сравнения почти на уровне моря в Воейково (Ленинградская область) средние значения степени ионизации воздуха чуть меньше: 15 (пар ионов/см³с) и 20 (п.и./см³с), соответственно. Различия небольшие, хотя интенсивность космических лучей на высоте труднодоступной метеостанции Пик Чегет (3000 м) в 4-5 раз больше, чем в равнинных условиях. При этом не было обнаружено значительных концентраций радона или β -излучения на поверхности, что также подтверждается невысокими значениями электрической проводимости (около 40 фСм/м на высоте 2 м над поверхностью) и постоянством значений ее положительной компоненты в течение суток. Среднее количество ядер конденсации на Пике Чегет составило $5 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3}$, что практически не влияло на электрические параметры атмосферы [8].

Средние значения напряженности электрического поля (в В/м) в летние месяцы 2012-2016 гг. представлены в табл. 1.

Таблица 1

Год	2012	2013	2014	2015	2016
Среднее летнее E, В/м	650	580	600	660	590

Для летних месяцев 2014 года статистические характеристики 1230 среднечасовых значений наблюдений электрического поля приземного слоя атмосферы характеризовались средним значением 600 В/м с минимаксами 130 и 1380 В/м.

На основании экспериментальных данных построены эмпирические вариационные ряды, изображенные на рис. 1 в виде гистограммы, и рассчитана теоретическая кривая (сплошная линия), соответствующая нормальному распределению. Экспериментальная кривая, построенная по всему массиву данных, обнаруживает незначительную правостороннюю (положительную) асимметрию и также небольшой положительный эксцесс по сравнению с нормальной кривой.

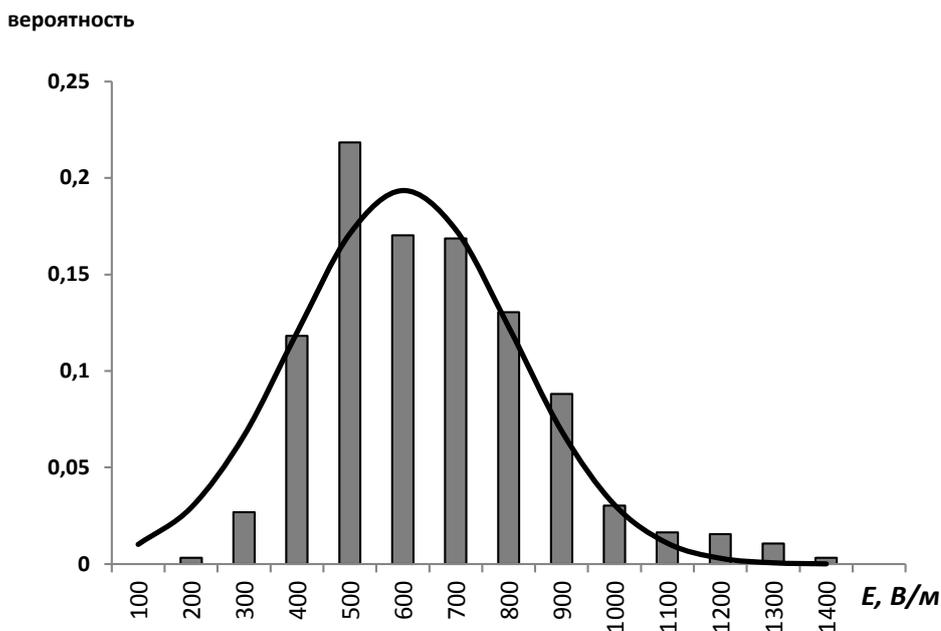


Рис. 1 Гистограмма распределения значений электрического поля на Чегете.

В табл. 2 представлены трехчасовые значения (в В/м) суточных изменений напряженности электрического поля за три летних месяца 2014 г.

Таблица 2

Трехчасовые значения (в В/м) суточных изменений напряженности электрического поля за три летних месяца 2014 г.

УТ	июнь	июль	август
0-2	530	511	597
3-5	430	399	469
6-8	514	531	489
9-11	633	716	734
12-14	642	730	781
15-17	577	730	693
18-20	606	718	706
21-23	636	650	609

На рис. 2 приведены среднесуточные данные для всего массива данных за 3 месяца 2014 г. (время указано по Гринвичу). По местному времени максимум приходится на дневные часы, с более развитой конвекцией и турбулентным обменом, а минимум на ночные часы.

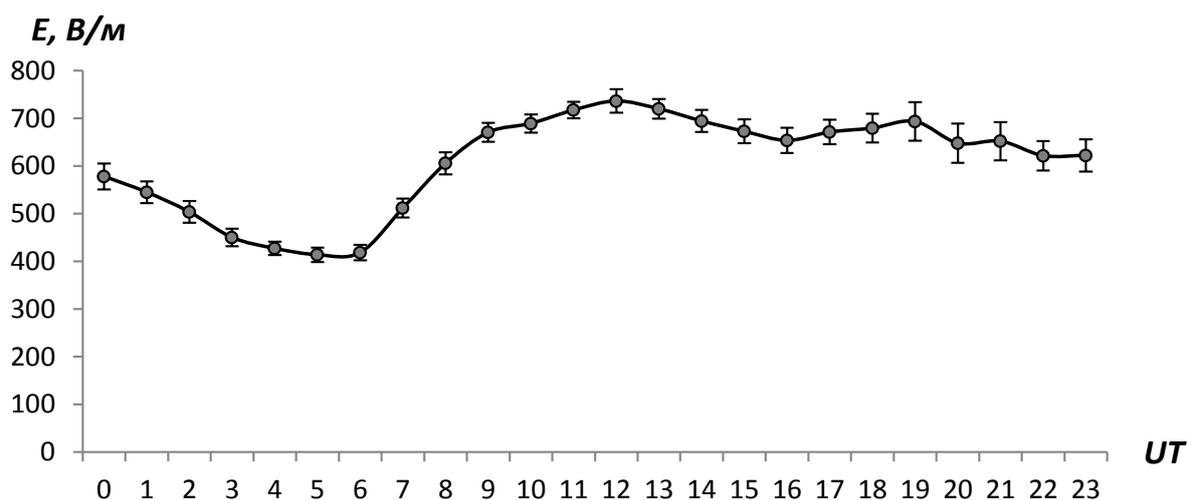


Рис. 2 Суточный ход электрического поля на Пике Чегет (июнь-август 2014 г.).

Обсуждение результатов измерений

Полученные результаты измерений приземного нейтронного фона на маршруте Терскол-Баксан в июне 2014 г. соответствуют модели удельной интенсивности потока (I) тепловых нейтронов в виде [19]:

$$I = 0,0815h + 20 + R,$$

где R используется для учета влагосодержания в приземном слое атмосферы. При наличии осадков $R=10$ н/с на кв. метр. При сырой и облачной погоде $R=0$.

Погрешности полученных оценок – 15-20 %.

Для отрезка высот 2500-3300 м над уровнем моря на южном склоне Эльбруса удельная интенсивность потока тепловых нейтронов соответствует модели: $I=0,118h+6$.

Наклон линейной зависимости с высотой увеличивается, как и коэффициент корреляции между высотой и интенсивностью потока тепловых нейтронов при использовании экспоненциальных зависимостей. Это отмечено для измерений с самолетов [14]. При этом, в [14] на высоте 3 км средняя интенсивность нейтронного потока оценена в 3 н/с, а на высоте 2 км вдвое меньше. Последнее на полтора порядка меньше, чем оценки, полученные при маршрутных съемках в районе Майкопа [14].

В результате проведенных измерений в Приэльбрусье интенсивность потока тепловых нейтронов на высоте 2 км оценена в 54-57 н/с на кв. метр, что в полтора раза больше, чем для маршрутных съемок в [14], хотя максимальная оценка соответствует полученным результатам измерений в Приэльбрусье.

На высоте 1 км интенсивность потока для маршрутных съемок в районе Майкопа в [14] соответствует 22-23 н/с на кв. м., а в измерениях в Приэльбрусье эта оценка на четверть больше (28-30 н/с на кв. м.). Время проведения эксперимента в [14] не указано. По приведенным фотографиям можно предположить, что это лето. Гелиогеофизические условия не учтены.

Полученные оценки маршрутных съемок интенсивности приземного потока тепловых нейтронов в Приэльбрусье лучше, чем в [14], соответствуют данным климатической модели распределения радиации по высоте в свободной атмосфере [11], хотя представленные результаты экспедиционных измерений получены у земной поверхности. При этом остаются неясными известные эффекты всплеск нейтронного потока, локализованные на ограниченном пространстве, а также вклад нейтронов из земной поверхности.

Радиационный фон влияет на проводимость приземной атмосферы, на ее электрические свойства, а значит на процессы облако и осадкообразования. Приземный радиационный фон зависит от высоты над уровнем моря. Это необходимо учитывать в горных районах. При этом к результатам полувекковой давности в [10] для горных районов необходимо относиться осторожно!

На возвышенностях всегда концентрируется аномальный электрический заряд [3]. В Приэльбрусье на Пике Чегет на высоте 3 км над уровнем моря среднее значение напряженности электрического поля в 4-5 раз превышает значения нормального электрического поля на уровне моря!

Суточный ход электрического поля приземного слоя атмосферы в летние месяцы характеризуется минимумом (04-06 UT) и максимумом (11-13 UT) для всех летних месяцев. Повышенные значения напряженности электрического поля на склонах гор необходимо учитывать в численных моделях конвективных облаков.

Вполне обоснованно заключить, что горные районы выступают в качестве центров электрического взаимодействия геосфер в единой электрической цепи Земли.

Для энергии неустойчивости электрического происхождения могут быть установлены критерии: предел Рэлея для капель и предельное количество электричества при грозовых разрядах при напряженности электрического поля $3 \cdot 10^4$ В/см⁻¹ и более [5] – как предел Имянитова. Применение этих критериев полезно при объяснении последовательности физических процессов осадкообразования от возникновения облака до выпадения осадков и электрических разрядов.

Рекомендации по практическому применению результатов экспериментов

Выявление физического механизма начальной стадии осадкообразования в облаке послужило разработке способов управления механизмом осадкообразования в конвективных облаках. Из рассмотренных теоретических рассуждений следуют практические выводы об искусственном

вызывании осадков ионизированным реагентом. Из приведенной в [20] экспериментальной модели Cu song В.А. Зайцева следует, что в основании облака количество капель около 400 в см^3 , а на высоте 1000 м от основания облака 50 в см^3 . Возникает вопрос о судьбе остальных капель при восходящих потоках в облаке. В результате адсорбции мелкими каплями атмосферных ионов происходит реализация электрической неустойчивости первого вида, т.е. достижение каплями предела Рэлея и распад их на положительные ионы, адсорбированные на поверхности капли и отрицательно заряженные мелкие капли. Отрицательно заряженные капли адсорбируются не распавшимися более крупными каплями, а положительные ионы поднимаются к вершине облака свободными или на поверхности оставшихся капель, обуславливая положительный заряд в растущем конвективном облаке.

Ионы меняют электрическую проводимость в облаке. Происходит ускорение процесса заряда облачных капель, рост объемных зарядов, развитие осадкообразующего механизма и грозовых процессов. Меняя электрическую проводимость воздуха искусственно созданными ионами можно управлять электрическими процессами в облаке. При этом надо учитывать гелиогеофизические условия и рельеф.

Эффективным источником искусственной ионизации могут быть твердые аэрозольные частицы, испускающие электроны за счет термоэлектронной эмиссии при высоких температурах. Этот эффект впервые проявился в ракетной технике. Применение видов топлива с металлическими добавками приводило к образованию на корпусах ракет потенциала до 10^6 В [21]. Механизмом, определяющим накопление электрического заряда при температурах горения металлического горючего $\sim 3000 \text{ К}$, является термоэлектронная эмиссия из твердых продуктов сгорания. Появление электрического потенциала у твердой заряженной частицы при термической электризации приводит к образованию вокруг нее электронного облака. За счет внешних факторов электрического поля и турбулентности происходит ионизация электронного облака.

Практические возможности воздействия на облака твердыми наэлектризованными частицами рассматривались еще в прошлом столетии [5]. В результате экспериментов было подтверждено, что диаметр заряженных частиц реагента увеличивается за счет электрокоагуляции с каплями воды от 5-10 мкм до 20-25 мкм.

Инициирование осадков ионогенными реагентами проводилось в ФБУ «Авиалесоохрана» в 1997-2007 гг. для снижения класса пожарной опасности (КПО) лесов и тушения возникших пожаров. Лесные пожары ежегодно наносят значительный ущерб экономике не менее $USA25 \text{ тыс. \$}$ на гектар сгоревшего леса.

Для модификации облаков использовался самолетный аэрозольный генератор физико-химического состава щелочных металлов. Обобщенные результаты работ за 2000-2006 гг. приведены в табл. 3.

Результаты работ по искусственному инициированию осадков в засушливый период над лесными территориями РФ за 2000–2006 г.г. [5]

Год	Площадь погашенных пожаров, га	Количество полностью погашенных пожаров	Количество использованных пиропатронов с калиево-магниево-составом ПВ-26 ФХС	Количество искусственно вызванных осадков, т	Потенциальный экономический эффект, млн. долл. США	Количество воздействий с выпадением осадков (числитель) и без выпадения (знаменатель)	Количество частично погашенных пожаров, на которые выпали осадки
2000	16693	49	459	1 836 230	417,3	189/21	104
2001	945	8	159	103 950	23,62	43/16	16
2002	6570	22	479	722 700	164,25	80/31	40
2003	74496	71	692	8 194 560	1862,4	139/37	112
2004	13379	13	179	1 471 690	334,5	60/2	18
2005	2215	9	86	243 650	55,45	11/5	11
2006	19030	30	366	2 093 300	475,7	129/9	42

Всего за 2000–2006 г.г. ионогенными реагентами было произведено 772 воздействия на мощные кучевые облака для тушения лесных пожаров и снижения КПО лесов. Из них в 651 случае выпадали осадки (~84%), не выпадали осадки в 121 случае (16%) ; количество пожаров, на которые выпали осадки — 545 (~85%) из них полностью погашено пожаров — 202 (~37%), 106 воздействий проводилось для снижения КПО лесов; использовано 2420 пиропатрона ПВ-26 ФХС. Зоны выпадения искусственно вызванных осадков соответствуют зонам выпадения естественных осадков и имеют форму эллипса или овала, вытянутых вдоль направления ветра. Длина зоны осадков из одного облака достигает от 3 до 30 км (в 70 % случаев от 4 до 14 км), ширина — от 2 до 18 км (в 70% случаев — от 2,5 до 5 км). Площадь искусственно вызванных осадков одним изделием ПВ-26 ФХС изменялась от 30 га до 80 га в зависимости от влагосодержания атмосферы, энергии неустойчивости и др. факторов. Средний объем конвективного облака мощностью от 2,5 до 3 км составляет от 9 до 10 км³. В процессе роста мощность облака может увеличиться в 2–3 раза. При средней водности облака, равной 1 г/м³ (изменяется от 0,01 до 8 г/м³), из него может быть получено от 9 до 10 тыс. т воды, а с учетом коэффициента регенерации (около 4,2) этот объем увеличивается до 37–42 тыс. т.

Гелиогеофизические условия, а, значит, радиоактивность атмосферы и интенсивность космических лучей, влияющих на радиоактивность, в этих работах не учитывались.

Достигнутый уровень искусственного увеличения осадков составил ~20% от годовой норм. В отношении показателей урожайности зерновых культур искусственным вызыванием осадков потери могут быть сокращены на ~13,2 млрд. руб. и более. Официально затраты для достижения этого эффекта методом ИВО оцениваются в 10% от указанной суммы.

Применение методов ИВО в течение всего календарного года для создания запасов влаги в почве путем увеличения выпадения снега зимой и дождей в теплый период года может существенно сократить дефицит влаги. Наиболее эффективными для этих целей являются реагенты, зарекомендовавшие себя при тушении лесных пожаров. Вопросы испытания ионогенного реагента для искусственного вызывания осадков в горных районах остаются открытыми.

Заключение

По результатам маршрутных съемок приземного потока тепловых нейтронов в Приэльбрусье во второй половине июня 2014 г. получена модель интенсивности потока тепловых нейтронов (фактически радиоактивности) региона. Основными факторами модели являются высота над уровнем моря, характер подстилающей поверхности и гелиогеофизические условия.

Полученные оценки интенсивности потока тепловых нейтронов у земной поверхности в Приэльбрусье соответствуют данным климатической модели LaRC Parametric Atmospheric Ionizing Radiation (AIR) Model [11] в свободной атмосфере.

В Приэльбрусье зафиксированы повышенные значения электрического поля приземной атмосферы, в разы превышающие напряженности нормального квазистационарного электрического поля на уровне моря.

Эти особенности необходимо учитывать не только при моделировании конвективных процессов, но и при планировании работ военизированных подразделений Росгидромета, при мониторинге гидрометеорологической безопасности региона.

Предложены критерии для энергии неустойчивости электрического происхождения: предел Рэля для капель и предельное количество электричества при грозовых разрядах – как предел Имянитова. Применение этих критериев полезно при объяснении последовательности физических процессов осадкообразования от возникновения облака до выпадения осадков и электрических разрядов.

Благодарности. Авторы благодарят доктора биологических наук профессора А.В. Сыроешкина за предоставленный мобильный счетчик потока тепловых нейтронов СНМ-18, Аракелова А.С., Филиппова М.Ю., Земского П.Ю., Глухова Я.В. за помощь в проведении измерений, Земского П.Ю. за помощь в первичной обработке данных, Филиппова М.Ю. за предоставленный для экспедиций автомобиль, А.Х. Аджиева за содействие в проведении экспедиционных измерений на труднодоступных в Приэльбрусье, а также Т.В. Кудринскую за предоставленные данные по измерениям электрического поля.

Список литературы

1. Тertyshnikov A.V. Основы мониторинга чрезвычайных ситуаций. – Москва, 2013. 261 с.
2. Козлов В.Н., Коршун Н.А., Тertyshnikov A.V. Баллоэлектрический метод искусственного вызывания осадков //«Гелиогеофизические исследования». 2015. Вып. 13. <http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=369>;
3. Тertyshnikov A.V. Предвестники землетрясений и особенности их регистрации. – СПб.:ВИКА. 1996. 128 с.
4. Имянитов И.М., Никандров В.Я. О возможности воздействия на электрические процессы в облаках/Краткие тексты и тезисы докладов к совещанию по активным воздействиям на облака и туманы. – Л.: Изд. ГГО. – 1965. – С.138-142.
5. Козлов В.Н., Емельянова Н.А., Коршун Н.А. Искусственное регулирование осадков.- Saarbrucken Deutschland. - Изд.: LFP LAMBERT Academic Publishing. - ISBN: 978-3-659-46160-6. – 2013.-372с.
6. Райст П. Аэрозоли. М.: Мир. – 1987. – 278 с.
7. Анисимов С.В., Галиченко С.В., Афиногенов К.В., Макрушин А.П., Шихова Н.М. Объемная активность радона и ионообразование в невозмущенной нижней атмосфере: наземные наблюдения и численное моделирование //Физика Земли, 2017, № 1. С. 155-170. DOI: 10.7868/S0002333717010033.
8. Морозов В.Н., Куповых Г.В. Теория электрических явлений в атмосфере. Монография. Изд-во LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH&Co.KG Germany. 2012. 330 с.
9. Аджиев А.Х., Куповых Г.В. Атмосферно-электрические явления на Северном Кавказе. Монография, Таганрог: Изд-во ТРТУ. 2004. 137 с.
10. Cole R. K., Pierce E. T. Electrification in the Earths Atmosphere for altitudes between 0 and 100 kilometer.- J. Geophys. Res., 1965, v.70, № 12, p. 2735-2749.
11. http://sol.spacenvironment.net/nairas/docs/nairas_4thquarter_2008.pdf.
12. Christopher J. Mertens, Brian T. Kress, Michael Wiltberger, W. Kent Tobiska, Barbara Grajewski and Xiaojing Xu Atmospheric Ionizing Radiation from Galactic and Solar Cosmic Rays / <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/32114.pdf>.
13. <http://dic.academic.ru/dic.nsf/bse/>
14. Сыроешкин А.В. Нейтронное поле Земли и биосфера. – 2012. Palmarium Academic Publishing. 236 с.
15. celestrak.com.

16. <http://www.ceme.gsras.ru>.
17. <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.ilyabogdanovich.geotracker&hl=ru>.
18. Аджиев А.Х., Куповых Г.В. Измерения электрического поля атмосферы в высокогорных условиях Приэльбрусья // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2015, том 51, No. 6, с. 710–715.
19. Тертышников А.В. Модель приземного нейтронного фона в Кабардино-Балкарии и на южном склоне Эльбруса в июне 2014 г. // Гелиогеофизические исследования. 2015. <http://vestnik.geospace.ru/index.php?id=310>;
20. Зайцев В.А., Ледохович А. А.. Приборы для исследования туманов, облаков и измерения влажности. – Л.: Гидрометеоиздат. - 1970. – 255с.
21. Соу С. Гидродинамика многофазных систем. – М.: Мир. – 1971. - 533с.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РАЗРЯДЫ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ И МОЛНИЙ КАК ПРИЧИНА ПРЕВРАЩЕНИЯ ЧАСТИЦ МИКРОПРИМЕСИ АТМОСФЕРЫ В ЗАРОДЫШИ ГРАДА

Бейтуганов М.Н.

ФГБУ «Северо-Кавказская ВС», г. Нальчик

Определение перехода грозовой стадии развития облака в градовую стадию является важнейшей задачей в практике градозащиты. Атрибутом грозового облака является первоначальное развитие организованной электризации гидрометеоров. В капельных облаках на миллионы капель приходится единицы кристаллов. Для организованной электризации требуются наличие в переохлаждённой части облака ледяных частиц – крупы с концентрациями около 10^4 , контакты которых с кристалликами, приводит к их взаимной электризации. Положительно заряженные кристаллики воздушными потоками переносятся вверх, занимая вершинную часть облака и образуя верхний основной +Р -заряд, а отрицательно заряженные крупяные частицы занимают нижнее основание облака, образуя нижний отрицательный -N - заряд. Кроме этих основных зарядов в зрелых грозовых облаках ниже отрицательного -N-заряда может образоваться нижний +р - заряд, а внутри областей с основными зарядами могут существовать отдельные скопления гид-

рометеоров с противоположными основным зарядам знаками. В результате накопления электрических зарядов, создающих локальные области с напряжённостями поля, при которых могут реализоваться те или иные типы электрических разрядов, облако становится грозовым. Электрические разряды реализуются в виде коронных разрядов, деформирующихся в сильных электрических полях нейтральных и заряженных капель воды, обводнённых градин, а также и кристалликов. При достаточных по величине напряжённостях поля коронная форма разряда переходит в стримерную форму, а при слиянии десятков и сотен стримеров зарождается лидерная форма разряда. Протяжённостью области в которой существует локальное усиление напряжённости поля для поддержания этих типов разряда определяется их «жизнеспособность». Например, лидер может распространяться пока существует напряжённость поля, превышающая 100 кВ/м. При длинах около 7-10 м, соответствующих длине ступени лидера, последний превращается в молнию. Менее короткие лидеры называют инципиентными молниями.

Следует подчеркнуть, что этим типам электрических разрядов соответствует характерное для них электромагнитное излучение, которое длительное время впервые исследовано в лаборатории грозового электричества Высокогорного геофизического института (ВГИ) под научным руководством Л.Г. Качурина (М.И. Кармов, М.Н. Бейтуганов, А.Х. Аджиев). Однако в [1] отмечены только исследования ГГО им. Воейкова, проведённые позже. По характеристикам предгрозового радиоизлучения облаков сотрудниками ВГИ было предложено определять грозо- и градоопасность мощно-кучевого облака. Коронный разряд с гидрометеоров оставляет в зоне коронирующей поверхности ионы или электроны с одноимёнными заряду коронирующей поверхности зарядами. Если коронирует поляризованный в электростатическом поле грозового облака гидрометеор, то корона начинается с полюса, имеющего отрицательный фиктивный заряд, так как начальная напряжённость короны для него меньше, чем для положительного. Тогда из электронной лавины на полюс осаждаются положительные ионы, оставляя в пространстве электроны, затем превращающиеся в отрицательные ионы. Осадившиеся на нейтральный гидрометеор положительные ионы заряжают его избыточным эффективным зарядом. Если до короны гидрометеор имел собственный заряд, то этот заряд может нейтрализоваться частично или полностью. Важным моментом является факт внедрения в пространство избыточного заряда при коронном разряде с гидрометеоров. Аналогичное внедрение избыточного заряда имеет место и при других типах разрядов, и внедрённые ионы начинают осаждаться на облачные частицы и гидрометеоры.

Особый интерес с точки зрения образования ядер конденсации, сублимации и зародышей града представляет осаждение избыточных зарядов на частицы микропримеси атмосферы - ЧМА. Количество ЧМА в атмосфере достигает 10^{11} м^{-3} , а их размеры охватывают диапазон от ионов Ланжевена (ионы, осевшие на микрочастицах ЧМА) до десятков, а иногда и сотен мкм. При исследовании содержания аэрозольных частиц в капельных и крупяных зародышах града

[2] было установлено, что в крупных зародышах содержится аэрозоль с диаметром около 30мкм, а в капельных – около 60мкм. Причём, средняя температура зарождения крупных зародышей составляла – 10,7⁰С, а капельных – 5,3⁰С и, что эти зародыши образуются в облаке в диапазоне температур от -2⁰С до -15⁰С. Таким образом, образование зародышей града возможно только на гигантских (ГАЧ, с размерами от 1мкм до 30мкм) и сверхгигантских аэрозолях (СГАЧ, с размерами более 30мкм). Концентрации ГАЧ и СГАЧ в атмосфере достигают от 10³м⁻³ до 10⁴м⁻³, а концентрации градин в грозоградовом облаке не превышают несколько десятков в кубическом метре. Сопоставляя эти концентрации, был сделан вывод о том, что процесс образования зародышей града избирателен [2] и, по образному выражению Л.Г.Качурина [3] только «наиболее удачливые» аэрозоли становятся зародышами града. Удачливость ЧМА указанных размеров, по видимому, связана с величиной и знаком заряда, который они приобретают в процессе осаждения на них ионов из избыточного заряда, внедряемого в облачное пространство стримерно-лидерными типами разрядов и молниями. Градовая стадия развития облака наступает в условиях сильной грозы, где происходят различные типы электрических разрядов и молнии. Молниевые разряды бывают: облако – земля, внутриоблачные молнии, межоблачные молнии, молния от облака в чистый воздух. Во всех этих молниях распространение канала разряда происходит продвижением разряда за стримерной зоной головки лидера молнии. Стримерная зона головки лидера молнии внедряет в эту зону избыточный заряд с концентрацией порядка 10¹⁷м⁻³. Протяжённость стримерной зоны конусообразной формы зависит от длины канала разряда и может достигать до 300м [3], с диаметром основания около 70м. Диаметр основания конуса оценен исходя из угла раскрытия стримерной зоны лабораторной искры, равного ~15° [5]. Оставляемый молнией избыточный объёмный заряд будет занимать объём «цилиндра» с высотой в длину молнии и с указанным диаметром. Обратным ударом нейтрализуется часть внедрённого заряда: 0,5 часть для отрицательной молнии и 0,2 часть – для положительной молнии. На оказавшиеся внутри этого цилиндра ЧМА, в том числе на ГАЧ и СГАЧ, будут осаждаться ионы диффузионно согласно формуле (1), и под действием электростатического поля по формуле (2):

$$n1 = \frac{dkT}{2e^2} \ln \left(1 + \frac{\pi dcNe^2t}{2kT} \right), \quad (1)$$

$$n2 = \frac{3\epsilon d^2E}{4(\epsilon + 2)e}, \quad (2)$$

где d - диаметр частицы, k – постоянная Больцмана, t – время зарядки, N – средняя концентрация ионов, c – среднеквадратическая скорость иона, T – температура в градусах Кельвина, ε – диэлектрическая проницаемость частицы, E – напряжённость электростатического поля, e – заряд электрона.

По оценочным расчётам на частицу с d = 60мкм и ε = 4 из-за диффузии за t=1с осядут около 4,8 · 10³ ионов, а на частицу с d = 30км – около 2 · 10³ ионов. Такие заряды на частицах

получены при $T = 273^{\circ}\text{K}$, $N = 10^{17}\text{м}^{-3}$, $c = 4,5 \cdot 10^2\text{м/с}$. Концентрацию N , входящую в формулу (1) при расчётах для избыточных отрицательных зарядов следует использовать с коэффициентом 0,5, а для положительных - с коэффициентом 0,2, но на порядки величин эти коэффициенты существенно не повлияют. При зарядке частицы с $d = 60\text{мкм}$ в поле с $E = 100\text{кВ/м}$, диэлектрической проницаемости $\epsilon = 4$ на частицу осядут $1,25 \cdot 10^5$ ионов, а на частицу с $d = 30\text{мкм}$ – $3,1 \cdot 10^4$ ионов.

Зарядка мелких ЧМА приводит к их превращению в ядра конденсации или сублимации. Образуемые при отрицательных молниях отрицательно заряженные ГАЧ и СГАЧ в большинстве своём способны самостоятельно превратиться в крупяные зародыши, так как на них образуются плоскостные структуры, и кристаллы на них растут блочно. Некоторое количество из этих кристаллов, сталкиваясь с крупными переохлаждёнными каплями и замораживая их, могут стать источником капельных зародышей. На положительно заряженных ГАЧ и СГАЧ могут образоваться только нитевидные кристаллики, которые при определённых апексах разламываются. Эти «обломки», сталкиваясь с переохлаждёнными каплями, приводят к их замерзанию и образованию капельных зародышей града. Если концентрация кристаллов в облаке достаточна для их сближения как поляризованных во внешнем электрическом поле, то образующийся при их слипании конгломерат может расти, превращаясь в крупяной зародыш града. Таким образом, можно считать установленным, что при отрицательных молниях внедрение в пространство отрицательных ионов приводит к образованию, в основном, крупяных зародышей града, а при положительных молниях, внедряющих положительный заряд – образуются, в основном, капельные зародыши града. Процесс зарождения капельных или крупяных зародышей будет зависеть прежде всего от температуры среды, пронизываемой молниями, от типа молний, места возникновения молний в облаке, их полярностей, протяжённостей, ориентации и т.д. Например, исходя из установленного соотношения между отрицательными и положительными молниями на землю 10:1, можно считать, что отрицательные молнии исходят из нижнего отрицательного - N – заряда, и что зрелые грозовые облака, в основном, поляризованы положительно, т.е. в верхней части грозового облака находится положительный +P – заряд, а в нижней части - N – заряд. Отрицательная молния на землю, заряжая ГАЧ и СГАЧ отрицательным зарядом, и превращая их в крупяные и, частично, в капельные зародыши града, предотвращает образование крупных градин. Образующиеся градины в зависимости от высоты изотермы 0°C в тёплой части атмосферы могут полностью растаять или выпасть в виде крупы. Заметим, что центр отрицательного - N - заряда обычно находится на 1-2км выше изотермы 0°C и только после его частичной или полной нейтрализации отрицательными молниями, исходящими из всё больших высот, чем предыдущие, грозовое облако может перейти в градовую стадию

развития. Свидетельством того, что при отрицательных молниях не выпадает град является установленный факт выпадения града при положительных разрядах молний на землю. Центр положительного + P- заряда обычно находится на высотах 4-5км над изотермой 0⁰C. При градиенте температуры в облаке около 6,3⁰C этим высотам будут соответствовать температуры -25⁰- -31⁰C, а при этих температурах переохлаждённых крупных капель не существует.

Возникновение капельных зародышей по механизму контакт переохлаждённых капель с «обломками» нитевидных кристалликов, возникающих на положительно заряженных ГАЧ и СГАЧ, приводящий к их замерзанию, не реализуется. Так как положительные молнии от верхнего + P –заряда не создают дополнительных зародышей града, то выпадение града при положительных молниях, по-видимому, связано с этим явлением.

Кроме двух основных объёмных зарядов в грозовом облаке существуют электрические неоднородности различного происхождения. Например, в зависимости от температуры и влажности облачной среды, приобретаемый крупой при контакте с кристалликами отрицательный заряд может измениться на положительный заряд, что приведёт к образованию области с положительным зарядом внутри отрицательного – N заряда. Размеры электрических неоднородностей находятся в диапазоне от десятков метров до 1км и больше [6]. Кроме того, восходящие и нисходящие потоки могут обусловить частичное взаимное проникновение отдельных участков основных объёмных зарядов. На перифериях этих зарядов могут возникать ячейки небольшого размера с аномально высокой плотностью зарядов, где и зарождаются электрические разряды стримерно-лидерной формы. Жизнеспособность этих разрядов, т.е. возможность их превращения в внутриоблачные или наземные молнии, зависит от среднего поля, создаваемого основными зарядами.

Тип молний (внутриоблачный или наземный) зависит от расстояний между основными зарядами – длиной диполя и землёй. Если длина диполя меньше расстояния до поверхности земли, то разряд происходит внутри облака [7]. Эта молния развивается в сильном электрическом поле и имеет древовидную разветвлённую структуру канала на обоих её концах. При увеличении длины диполя степень разветвлённости разряда внутри облака уменьшается. Нейтрализуемое при молниевых разрядах на землю количество зарядов изменяется от десятков до сотен Кл. Учитывая, что средний заряд погонного метра лидера равен около 10⁻⁴ Кл, получим длины каналов разряда равные более, чем сотни километров. Разряды таких протяжённостей складываются из длин многочисленных ветвлений стримерно-лидерных составляющих молний, которые также внедряют в облачное пространство избыточные объёмные заряды.

Оценки количества нейтрализуемого молниями заряда можно провести исходя из объёмов, охватываемых ими. Допуская, что ячейка, где зарождается лидерный заряд имеет потенциал порядка 60 МВ, и что критическая напряжённость поля, при которой выполняются условия для распространения лидера $E_l = 500 \text{ кВ/м}$, получим размер ячейки $D = 240 \text{ м}$. Заряд такой ячейки составит $Q = \pi \epsilon \epsilon_0 E_l D^2 = 0.8 \text{ Кл}$. Нейтрализуемые обратным ударом молнии заряды достигают несколько сот Кл, что свидетельствует о нейтрализации зарядов с больших областей облака, чем с одной первоначальной ячейки, так как при отрицательной полярности лидера с находящихся в облаке электрических неоднородностей возникают встречные разряды. Например, согласно [8], нейтрализуемый наземной молнией объём облака с толщиной порядка 10^3 м и покрывающий в среднем горизонтальную площадь $18,4 \cdot 10^6 \text{ м}^2$ составляет $1,84 \cdot 10^{10} \text{ м}^3$ и исходит из области облака, расположенной вблизи уровня замерзания капель. Этот уровень может охватывать широкий диапазон температур, но так как высота объёма порядка 10^3 м , то при перепаде температур в облаке $6,3^\circ \text{С/км}$, можно допустить, что середина нейтрализуемого объёма находится на изотерме $-6,3^\circ \text{С}$.

Таким образом, можно предположить, что усечённый конус с площадью основания $18,4 \cdot 10^6 \text{ м}^2$ и высотой 10^3 м занимает внедрённый молнией избыточный заряд. В случае отрицательной молнии этот заряд образуется отрицательными ионами с концентрацией $0,5 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$. Зарядка находящихся в этом объёме ГАЧ и СГАЧ отрицательным зарядом приводит к образованию на них крупных и частично капельных зародышей града. Последующие за первой молнией молнии возникают со всё больших и больших высот, нейтрализуя большую часть нижнего отрицательного - N-заряда. Область существования крупных капель простирается до изотермы около -11°С , т. е. до высот около 1750 м над изотермой 0°С и капельные зародыши зарождаются между высотами этих изотерм. Начиная с высоты изотермы -8°С вплоть до -40°С в облаке возникают крупные зародыши града. Кроме того, конгломерат частиц, образующийся при слипании множества взаимодействующих поляризованных в электростатическом поле грозового облака кристалликов, может также превратиться в крупной зародыш града.

Таким образом, образование капельных зародышей града в облаке при средних температурах $-5,3^\circ \text{С}$ можно объяснить замерзанием крупных капель при контакте с кристалликами, образующимися на отрицательно заряженных ГАЧ и СГАЧ. Приводимый в литературе факт относительно небольшого количества капельных зародышей, составляющего четвертую часть общего количества зародышей града, можно объяснить интервалом температур, где они могут зарождаться. Возникновение оптимального для определённой водности облака количества крупных и капельных зародышей града при отрицательных

молниях предотвращает выпадение крупного града. Не смотря на то, что при температурах ниже -25°C или выше изотермы 0°C около 4000м, облака считаются преимущественно кристаллическими [9], влияние молниевых разрядов на физические процессы протекающие на этих высотах необходимо учитывать.

Принимая за диполи объёмные заряды, между которыми происходит молниевый разряд, анализировались изменения электрического поля грозового облака [10]. В качестве модели рассматривались вертикально ориентированные положительный, отрицательный и горизонтальный диполи. Диполь с положительным зарядом наверху считался положительным. Большинство облачных разрядов соответствовало первой модели, и заряд переносимый между верхним и нижним зарядами превосходил 100 Кл при длинах разрядов в несколько километров. В случае вертикально ориентированных отрицательно заряженных диполей молнии возникали на бо'льших высотах и переносили меньший заряд от 5 до 40Кл на расстояние нескольких километров. Горизонтальные разряды происходят на высотах от 6 до 12км с длинами от 2 до 8 км, а переносимые заряды - от 5 до 10Кл, иногда до 250Кл. Если вертикальные молнии можно отнести к внутриоблачным, то горизонтальные молнии, длиной 8 км и более, можно рассматривать как межоблачные или междуячейковые молнии. Что касается области зарождения лидеров перечисленных молний, то следует учесть величины напряжённостей поля, при которых они могут зародиться: отрицательные – 10^6В/м и положительные – $5 \cdot 10^5\text{В/м}$. Такие поля могут возникнуть в периферийной области отдельных скоплений заряженных гидрометеоров.

Основные выводы:

1. Зарождение крупяных и капельных зародышей града происходит на ГАЧ и СГАЧ при их зарядке в избыточном объёмном заряде, внедряемом в облачное пространство различными типами молниевых разрядов.

2. На отрицательно заряженных ГАЧ и СГАЧ крупяные зародыши образуются благодаря росту плоскостных структур. При столкновении части этих кристаллов с переохлаждёнными каплями последние превращаются в капельные зародыши.

3. На положительно заряженных ГАЧ И СГАЧ образуются нитевидные кристаллы, которые, не образуя плоскостные структуры, не могут превратиться в зародыши града. Эти кристаллы обламываются, и при контакте обломков с переохлаждёнными каплями замораживают их, т.е. образуют капельные зародыши.

4. Превышение количества крупяных зародышей над количеством капельных зародышей можно объяснить небольшим интервалом температур, при котором могут существовать крупные переохлаждённые капли.

5. Выведение отрицательными молниями из грозового облака части отрицательного - N - заряда при одновременном накоплении зарядов в верхнем +P – заряде приводит к возникновению положительных молниевых разрядов на землю. В сильном электрическом поле +P-заряда образующиеся из поляризованных кристалликов конгломераты, становятся крупными зародышами, которые вырастают в градины. По-видимому, недостаточным количеством образующихся крупных зародышей можно объяснить выпадение града при положительных молниях.

6. Для определения тенденции развития грозового облака, которая может привести к возникновению в нём града, прежде всего необходимо выявить типы и место возникновения молниевых разрядов в нём. Грозовое облако, являющееся продуктом электризации твёрдых частиц, уже является «градовым», так как в нём содержатся частицы крупы с концентрацией около 10^4 м^{-3} . Поэтому только привлечением одних радиолокационных параметров грозовых облаков невозможно определить градоопасность облака, что необходимо для повышения экономической эффективности работ по предотвращению града, которые становятся всё более и более затратными.

Список литературы

1. Стасенко В. Н. Радиолокационное исследование электроактивных зон в конвективных облаках. Метеорология и гидрология. 2006, №1, с.34-40.
2. Хоргуани В. Г. Микрофизика зарождения и роста града. М.: Гидрометеиздат. 1984. 187с.
3. Качурин Л. Г. Физические основы воздействия на атмосферные процессы. 1990. Гидрометеиздат. 462 с.
4. Базелян Э. М., Горин Б. Н., Левитов В.И. Физические и инженерные основы млезащиты. М.: Гидрометеиздат. 1978. 202с.
5. Петров Н.И., Петрова Г.Н. Физические механизмы развития молниевых разрядов между грозовым облаком и ионосферой. ЖТФ. 1999. том 69. вып.4. с.134-137.
6. Имянитов И.М. Строение и условия развития грозовых облаков. Метеорология и гидрология. 1981. №3. с.5-17.
7. Петров Н.И., Петрова Г.Н. Физические механизмы формирования внутриоблачных разрядов молнии. ЖТФ. 1993. Том 63. вып. 4. С.41-49.
8. Few A. A. Lightning channel reconstruction from thunder measurements // J. Geophys. Res. – 1970. – Vol. 75. №36. –р.7517-7523.
9. Мазин И.П., Шметер С. М. Облака строение и физика образования. 1983. Л.: Гидрометеиздат. 278с.
10. Юман М. Молния. 1972. М.: Издательство «Мир». 327с.

ВЛИЯНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ПОГОДНЫХ ЯВЛЕНИЙ НА ИЗМЕНЕНИЕ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ АТМОСФЕРЫ

Машуков И.Х.¹, Аджиева А.А.², Шаповалов В.А.¹

¹ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

²ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им.
В.М. Кокова»

Одним из наиболее существенных эффектов действия на атмосферу солнечного излучения является ионизация составляющих её газов. Она вызывается ультрафиолетовым и рентгеновским космическим излучением. Преимущественное поглощение ионизирующего излучения Солнца в верхних слоях атмосферы и понижение плотности воздуха с высотой создают значительную неоднородность в высотном ходе удельной электрической проводимости воздуха, которая приблизительно экспоненциально увеличивается с высотой от значения 10^{-18} См/м у поверхности земли, достигая величины порядка 10^{-7} См/м на высоте 100 км [7,8]. Это различие величин проводимости позволяет рассматривать воздух у земли как хороший изолятор, а в ионосфере и выше – как проводник. Ввиду ещё более высокой электрической проводимости среды околоземного космического пространства Земля вместе с атмосферой относительно межпланетной среды представляется нейтральной. В земной атмосфере, однако, действует глобальный процесс разделения зарядов, в результате которого атмосфера постоянно содержит избыточный положительный объемный заряд, а на земной поверхности индуцирован нейтрализующий его поверхностный отрицательный заряд. Это разделение зарядов является причиной существования электрического поля в тропосфере.

Величина и направление приземного электрического поля атмосферы широко варьирует в пространстве и времени и зависит от погодных условий, орографии местности, времени года, суток и других факторов. При этом особенностью электрических процессов в атмосфере является их сложный двойственный характер: они одновременно порождают трудноразделимые эффекты местного и глобального масштабов.

Целью настоящей работы является исследование влияния локальных явлений – осадки, облака и грозовая активность на изменение значения напряженности электрического поля атмосферы в районе города Нальчика.

Эффект глобального масштаба заключается в одновременном по всей Земле изменении напряженности электрического поля атмосферы (унитарные вариации). Известны, по крайней

мере, четыре периода унитарных вариаций: 11-летний, годовой, 27-суточный, суточный [6,7]. В годовом ходе напряженность поля ее значение зимой - больше, чем летом; в суточном ходе наблюдается максимум между 18 и 19 ч и минимум около 3 ч. Напряженность электрического поля атмосферы в экваториальных и полярных областях меньше, чем в средних широтах [6].

Эффекты местного масштаба, определяются в том числе, метеорологическими условиями, характерными для данного района [2,3,5]: облака, осадки, туман, метели, пыльные бури вызывают изменение напряженности поля с периодами в диапазоне от долей секунды до нескольких часов. Вообще наблюдается тесная связь между напряженностью поля и метеорологическими элементами. Значительное нарушение нормального электрического поля происходит при грозовой деятельности.

Для измерения напряженности электрического поля атмосферы при грозовых процессах был разработан аппаратно-программный комплекс, включающий в себя:

- регистраторы электрического поля атмосферы EFM550 фирмы Vaisala;
- грозорегистратор LS8000, также фирмы Vaisala;
- программное обеспечение для решения задачи измерения, передачи и визуализации значений напряженности электрического поля атмосферы и параметров молниевых разрядов.

Регистратор EFM550 производит измерение значения напряженности электрического поля атмосферы с частотой 2 Гц, т.е. каждые 0,5 секунды. Максимальные и минимальные значения напряженности, которые может измерить EFM550, составляют ± 10000 В/м [2]. Измеренные значения сохраняются на жестком диске компьютера. По этим данным можно изучать суточные и сезонные вариации напряженности электрического поля атмосферы с помощью программного обеспечения аппаратно-программного комплекса EFM550.

Система грозопеленгации LS8000 производства фирмы «Vaisala» Финляндия является разностно-дальномерной системой типа LPATS. Она установлена на Северном Кавказе в 2008 году, изначально система состояла из четырех сенсоров-грозопеленгаторов LS8000 и центрального пункта приема и обработки информации, в 2012 году к грозопеленгационной сети было добавлено ещё четыре грозопеленгатора. [5. Система обеспечивает сбор, архивирование и передачу потребителям следующую грозоразрядную информацию:

- координаты молниевых разрядов облако-земля, отрицательной полярности («LF-» разряды);
- координаты молниевых разрядов облако-земля, положительной полярности («LF+» разряды);
- координаты молниевых разрядов облако-облако и внутриоблачные («VHF» разряды).

Для совместного исследования данных грозопеленгатора LS8000 и измерителя напряженности электрического поля EFM550 был выбран участок территории с радиусом 20 км, с центром в точке установки датчика EFM550, в г. Нальчике широта $43,4694^{\circ}\text{N}$, долгота $43,5861^{\circ}\text{E}$. Согласно технических данных дальность репрезентативного измерения EFM550 составляет 50 км.

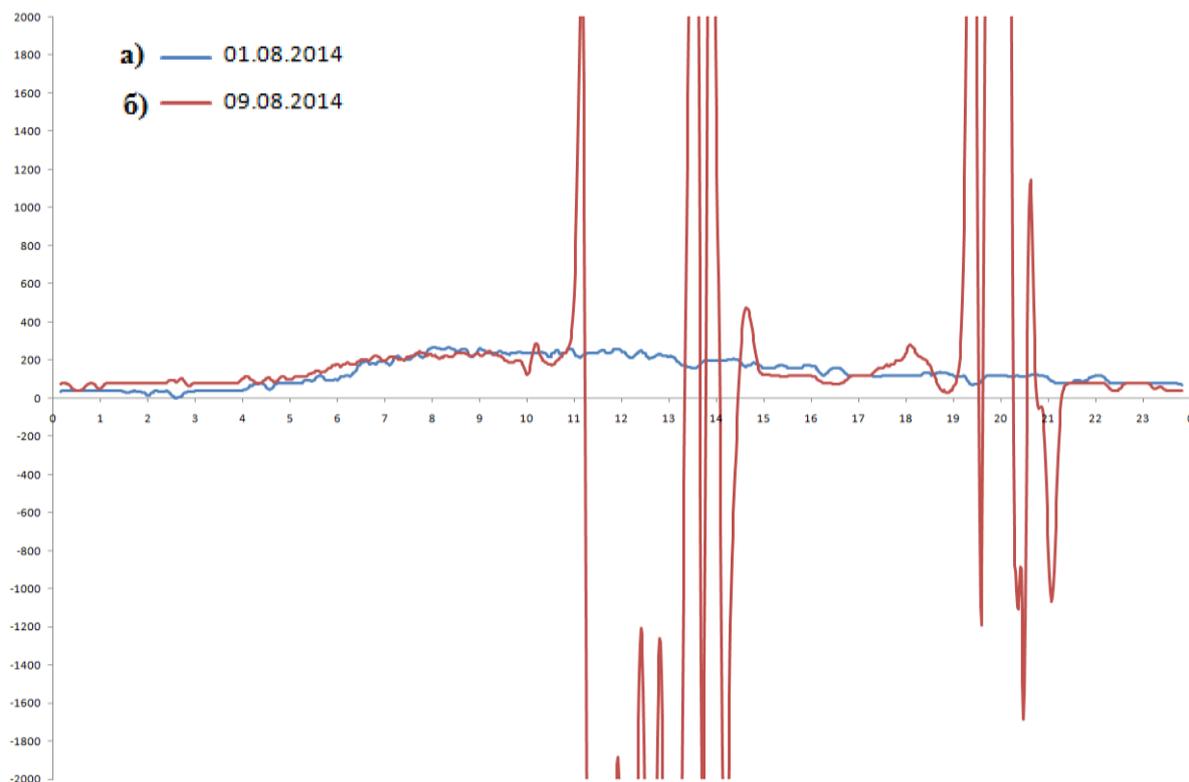


Рис. 1. Суточное изменение напряженности электрического поля в г. Нальчике (540 м над уровнем моря) при «хорошей погоде» (а – 01/08/2014) и в случае грозы (б – 09/08/2014).

Характерным свойством суточной вариации квазистатического электрического поля на станции «Нальчик» в условиях «хорошей погоды» является наличие волнообразного изменения значений E в освещенное время суток, так же прослеживается явная ее сезонная зависимость. В зимний период значение E выше, чем в летний период на 50-100 В/м.

Независимо от периода наблюдений в условиях «хорошей погоды» значение напряженности поля колеблется в среднем от + 20 до + 300 В/м и не превышает +700 В/м и оно всегда положительное (рис.1).

Как видно из рис. 1 грозовые явления оказывают значительное влияние на значение напряженности поля. Вклад последних в изменении естественной динамики электрического поля может доходить согласно проведенным исследованиям для положительной полярности до +5000 В/м и до – 3000 В/м для отрицательной полярности. Изменения составляют 2000% и 1200%, соответственно.

На рис. 2 представлен годовой ход напряженности электрического поля атмосферы, построенный по среднемесячным величинам за десятилетний период наблюдений.

Судя по графику, можно сделать вывод о наличии сезонности в ходе напряженности электрического поля атмосферы, с наблюдающимся увеличением его значений в холодный период года с максимумами в январе и марте месяце и последующим убыванием до значений 60-120 В/м с наступлением летне-осеннего периода.

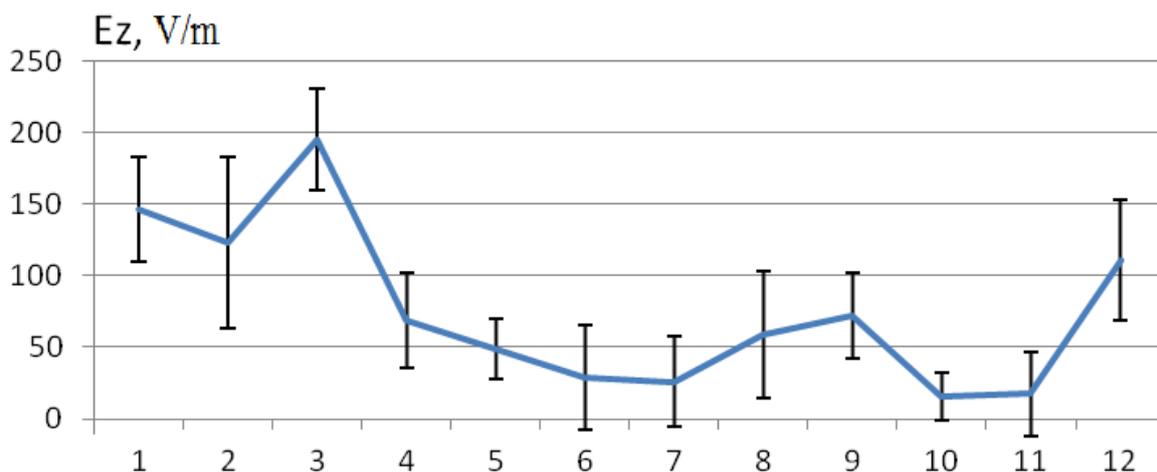


Рис. 2. Годовая вариация напряженности электрического поля по данным наблюдений ВГИ за 2005-2014 гг.

Наличие больших отклонений в значениях напряженности поля связано в первую очередь с наличием природно-климатических процессов, таких как грозы, туманы, снегопады. Кучевые облака, в частности облака хорошей погоды, вызывают небольшие отрицательные изменения электрического поля [1,3,8]. Источниками же наиболее сильных полей в атмосфере являются грозовые облака, напряженность поля под которыми у земной поверхности достигает 10^4 В/м. Грозовое облако является также генератором электрических разрядов, вызывающих скачки напряженности поля у земной поверхности.

На основе многолетних натурных экспериментов по исследованию динамики электрического поля атмосферы в различных метеорологических условиях, проводимых в ФГБУ ВГИ, построены графики флуктуаций электрического поля в условиях грозы (рис. 3). Количество грозовых разрядов на землю учитывалось по данным грозорегистратора LS8000.

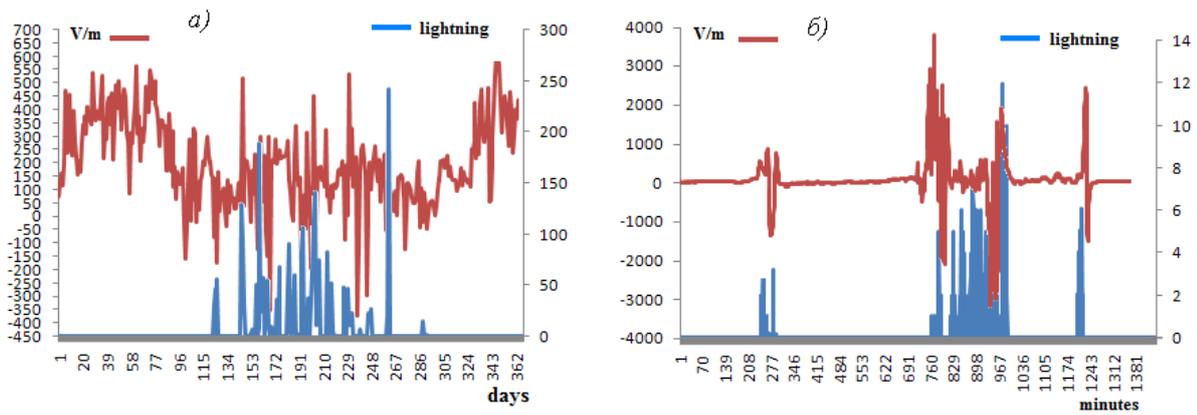


Рис. 3. Графики флуктуаций электрического поля в условиях грозы
 а) поле/разряды за 2011 год; б) поле/разряды за сутки (10.06.2014 г.).

На рисунке 3а представлен годовой ход напряженности поля за 2011 год в сопоставлении с данными о количестве разрядов грозопеленгатора LS 8000. Видно, что форма кривой хода вариации напряженности электрического поля в основном сохраняется, не смотря на использование всех данных, как в дни с ясной так и в дни с метеорологическими явлениями.

На рисунке 3б отражен ход напряженности поля в день, когда наблюдались грозы и разряды в пределах чувствительности датчика напряженности поля, т.е. зоны в 50 км. Исходя из данных разряды существенно влияют на ход напряженности электрического поля атмосферы, многократно превышая значение унитарной вариации.

Исследуем динамику напряженности поля на примере одного месяца (рисунок 4). Месяц содержал дни, как с ясной погодой, так и с метеоявлениями.

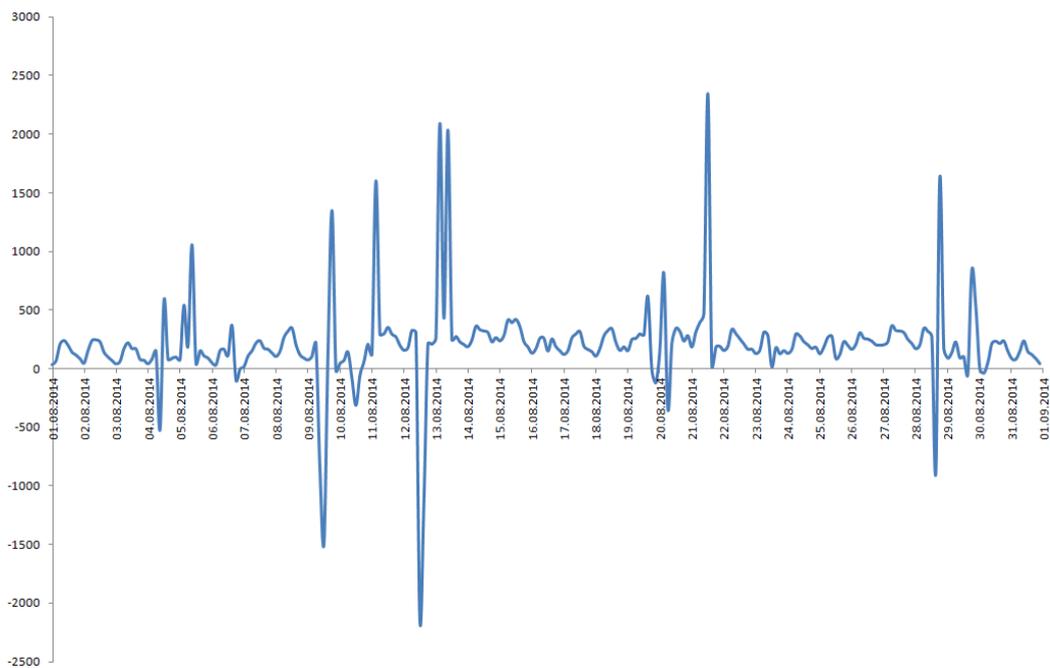


Рис. 4. Динамика напряженности электрического поля в августе 2014 г.

На рисунке 5 представлено сопоставление метеопараметров (давление, температура, влажность) с данными напряженности поля. Мы видим сохранение общей тенденции поведения исследуемых временных рядов и наличие характерных суточных колебаний.

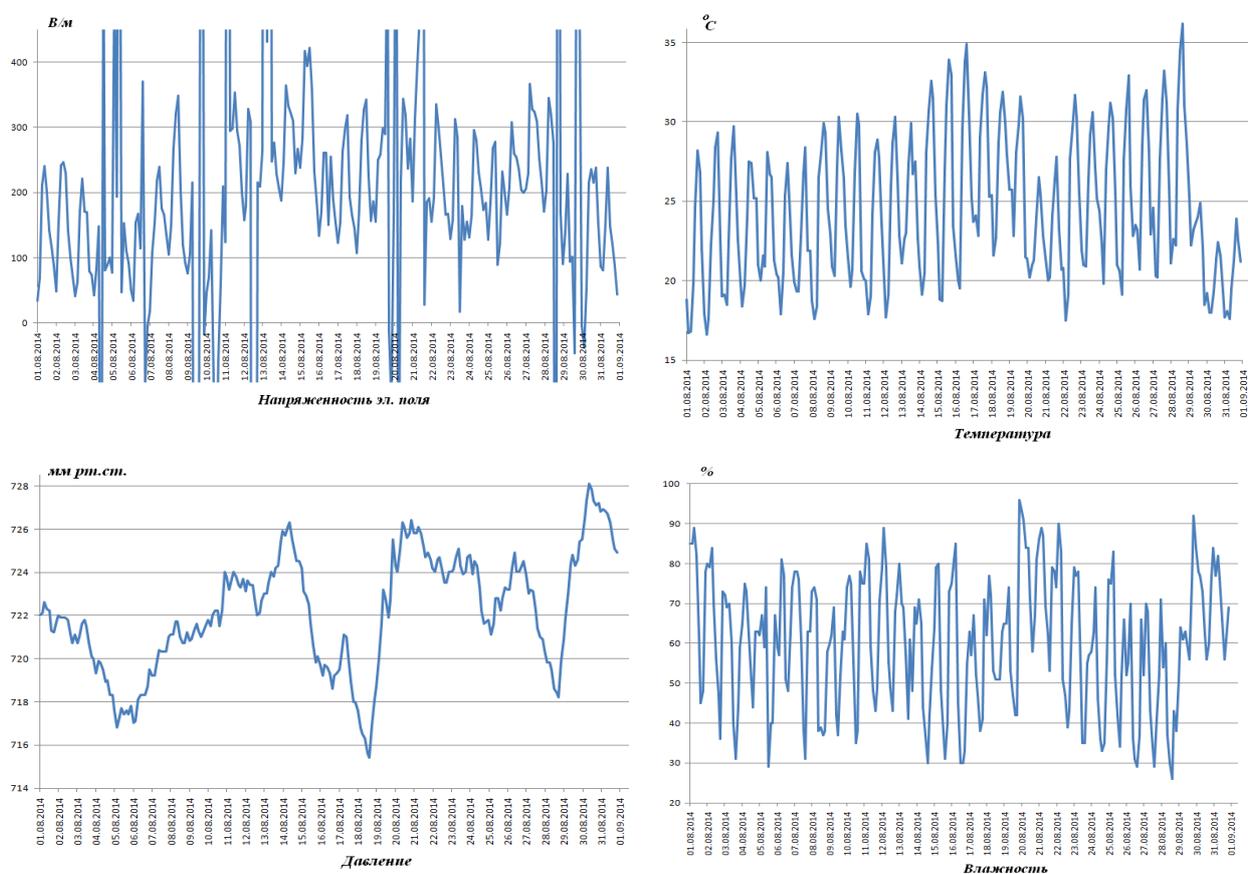


Рис. 5. Сопоставление динамики напряженности электрического поля с различными метеопараметрами за один промежуток времени.

Проведенный мониторинг, особенностей изменения напряженности электрического поля атмосферы в г.Нальчике в 2005—2014 гг. позволяет утверждать, что:

- годовой ход напряженности электрического поля "хорошей" погоды характеризуется максимумами среднего значения в январе - марте месяце и наибольшими значениями максимума май - август;
- существенные различия значений хода напряженности для полного ряда данных и "хорошей" погоды объясняются в первую очередь наличием природно-климатических процессов, таких как грозы, туманы, снегопады;
- наиболее значительные искажения в естественный ход поля вносят грозовые процессы;
- основные минимумы зафиксированных значений напряженности электрического поля в летний период связаны с грозовой активностью;

- грозовая активность вызывает сильные колебания электрического поля, которые выражаются в максимальном размахе между минимальным и максимальным зафиксированными за сутки значениями;

- наблюдается сохранение общей тенденции поведения временных рядов метеопараметров и напряженности электрического поля и присутствие характерных суточных колебаний.

Совмещение данных регистрации электрического поля и характеристик грозы для выявления роли грозовых явлений в суточных и годовых вариациях напряженности электрического поля, позволяют сделать вывод о том, что суточный ход значения напряженности электрического поля атмосферы может служить объектом разделения глобальных и локальных факторов атмосферного электричества.

Работа показала необходимость дальнейших исследований влияния локальных (туманы, осадки, грозы и др.) и глобальных (циклонические процессы, солнечно-земные связи и др.) факторов на суточные и сезонные вариации напряженности электрического поля атмосферы.

Список литературы

1. Аджиев А.Х., Стасенко В.Н., Шаповалов А.В., Шаповалов В.А. Напряженность электрического поля атмосферы и грозовые явления на Северном Кавказе // Метеорология и гидрология. №3. 2016 г., С. 46-54.
2. Аджиев А.Х., Калов Х.М. Исследование напряженности электрического поля атмосферы в г. Нальчике, по данным измерителя электрического поля EFM550 VII Всероссийская конференция по атмосферному электричеству. Сборник трудов. ФГБУ «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова». 2012 г., С. 101 – 103.
3. Аджиев А.Х., Кулиев Д.Д., Абшаев М.Т., Болгов Ю.В., Машуков Х.Х. Программно-аппаратный комплекс мониторинга электрической напряженности приземного слоя атмосферы./Известия КБНЦ РАН/ №2(52)2013, С. 49-56.
4. Аджиев А.Х., Куповых Г.В., Кулиев Д.Д., Казакова С.Т., Малкандуева Л.М. Совместный анализ вариаций напряженности электрического поля атмосферы и грозовой активности // Известия ЮФУ. Технические науки. №9 (158). 2014г. С.
5. Аджиев А.Х., Тапасханов В.О., Стасенко В.Н. Система грозопеленгации на Северном Кавказе. //Метеорология и гидрология. №1. 2013г. С. 5-11.
6. Анисимов С.В. Динамика электричества невозмущенной атмосферы средних широт. VII Всероссийская конференция по атмосферному электричеству. Сборник трудов. ФГБУ «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова». 2012 г., С. 18 – 21.
7. Анисимов С.В., Мареев Е.А. Географические исследования глобальной электрической цепи. Физика Земли. №10. 2008г, С 8 – 18.

8. Красногорская Н.В., Ремизов В.П. Вариации электрического поля атмосферы Земли. – В кн.: Физико-математические и биологические проблемы действия электромагнитных полей и ионизация воздуха. М.: Наука, 1975, т.1, С. 49-56.

СНИЖЕНИЕ ШУМОВ В ДАННЫХ МОНИТОРИНГА ХОДА НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ АТМОСФЕРЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФИЛЬТРА КАЛМАНА

Машуков И.Х.¹, Шаповалов В.А.¹, Аджиева А.А.²

¹ФГБУ "Высокогорный геофизический институт", г. Нальчик

²ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет имени В.М. Кокова», г. Нальчик

К настоящему времени исследования напряженности электрического поля атмосферы достигли высокого уровня автоматизации и производятся массово. Данные о напряженности электрического поля Земли востребованы как в исследовательских целях, так и для решения задач раннего предупреждения о подходе грозových очагов, в целях обеспечения требований к экологической безопасности, а так же в системах обеспечения защиты различных объектов, например, при подготовке ракетносителей к пускам [1, 3, 5].

Для мониторинга электрофизических явлений в свободной и нарушенной атмосфере методом измерения локальной напряженности электрического поля в центре мониторинга геофизической обстановки над южным регионом Российской Федерации при ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» создан аппаратно-программный комплекс, включающий в себя: измерители напряженности электрического поля атмосферы EFM550 фирмы Vaisala (Финляндия) [2]; программное обеспечение для решения задач измерения, передачи и визуализации значений напряженности электрического поля атмосферы. Информация в центр приема поступает на автоматическое рабочее место по каналам связи от радиолокаторов МРЛ-5, новых доплеровских станций ДМРЛ-С, грозорегистратора LS8000 и других источников [4].

Комплекс функционирует с 2010 года. Введены в эксплуатацию 4 измерителя электрического поля в атмосфере EFM550, они установлены в пунктах Нальчик, Пик Чегет, Кызбурун и Урвань. Каждый из них сопряжен с персональным компьютером, на жесткий диск которого записываются значения напряженности электрического поля атмосферы. Частота измерений

значений напряженности электрического поля атмосферы составляет 2 Гц, т.е. данные фиксируются и записываются в файл каждые полсекунды. Согласно технических данных дальность репрезентативного измерения EFM550 составляет 50 км, а точность $\pm 5\%$ от отклонения показаний или в абсолютных значениях ± 50 В/м. Максимальные и минимальные значения напряженности, которые может измерить EFM550, находятся в диапазоне ± 10 кВ/м [1].

Сопоставление данных измерений датчиков различных моделей, встречает ряд серьезных трудностей. Это связано не только с различным темпом измерений или характеристиками сенсоров, но и с шумами, возникающими в результате внешних и внутренних воздействий на измерительный прибор, которые составляют так называемую погрешность измерений.

Для устранения шумов и другой лишней информации существуют специальные алгоритмы цифровой обработки данных называемые фильтрами [6,7]. Необходимо отметить, что задача фильтрации — это не задача сглаживания. То есть фильтр применяется не для сглаживания данных с датчика, а чтобы получить наиболее близкое значение к реальной величине напряженности поля атмосферы.

В качестве такого фильтра авторами был выбран фильтр Калмана. Фильтр назван по имени венгерско-американского инженера-электрика Рудольфа Калмана. Этот фильтр нашел широкое применение в геофизических, инженерно-технических и эконометрических приложениях: от радаров и систем машинного зрения до оценок параметров экономических моделей, он является важной частью теории управления системами [8,9].

Фильтр Калмана является разновидностью рекурсивного фильтра, который оценивает состояние динамической системы по серии неточных измерений. Это означает, что для расчета текущего состояния системы необходимы только результат предыдущей итерации фильтра и текущие измерения. Фильтр использует динамическую модель системы, известные управляющие воздействия и множество последовательных измерений для формирования оптимальной оценки состояния. Так как он строится на линейных динамических системах, дискретизированных по времени, то его можно рассматривать в качестве аналога скрытым моделям Маркова, например, заданным цепями Маркова, построенными на линейных операторах с внесенными погрешностями с нормальным Гауссовым распределением. Состояние системы описывает вектор из действительных чисел. При каждом шаге по времени, линейный оператор применяется к вектору состояния системы, к нему добавляется некоторая погрешность и опционально некоторая информация об управляющих воздействиях на систему, если таковая известна. После чего другим линейным операторам с другой погрешностью добавляется видимая информация о состоянии системы (рисунок 1).

Обозначим через x_k вектор состояния модели для исследуемого процесса изменения напряженности поля. В момент времени k производится измерение z_k реального состояния системы x_k в соответствии с моделью измерения.

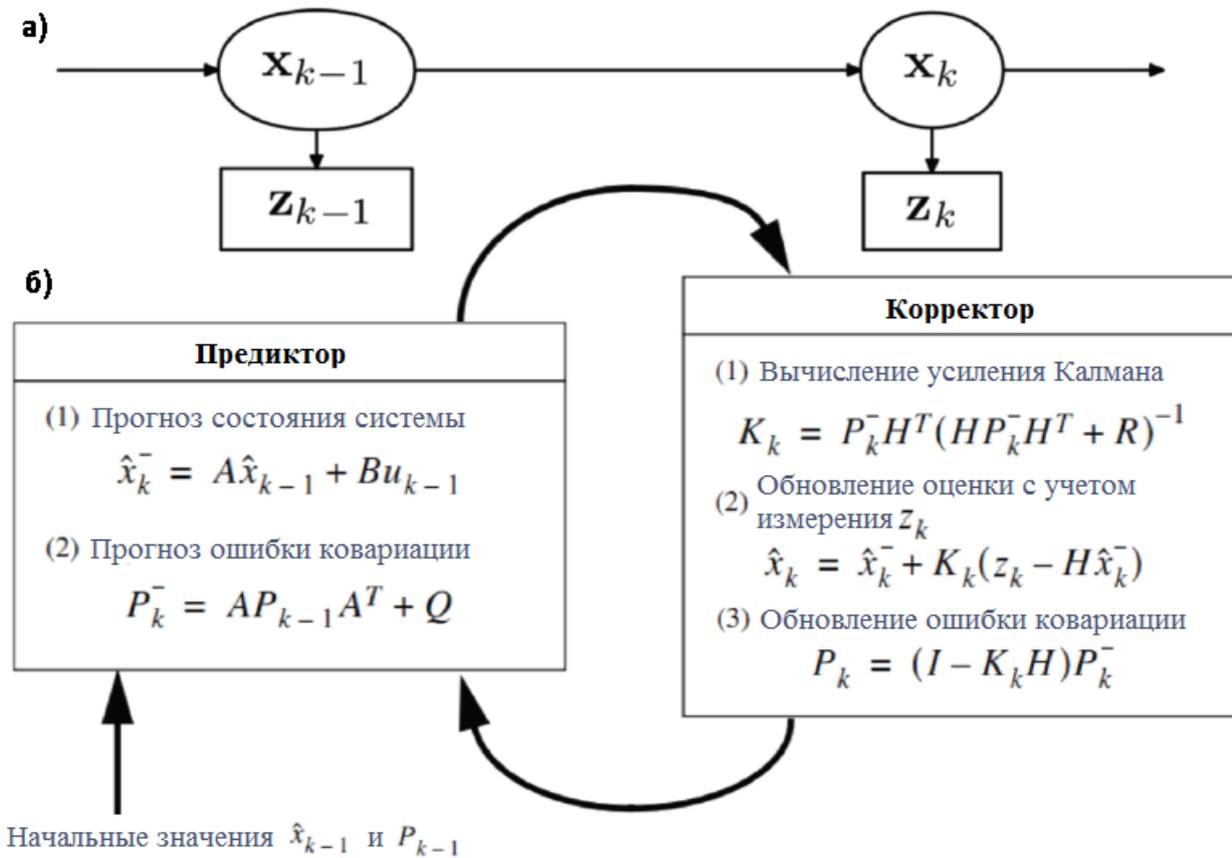


Рис. 1. а) Представление фильтра Калмана - как марковской модели; б) Алгоритм работы фильтра Калмана.

Модель системы для фильтра Калмана исходит из предположения, что реальное состояние в момент времени k получается из состояния в момент времени $k - 1$. Для применения фильтра Калмана необходимо, чтобы процесс изменения измеряемой величины можно было описать следующим образом [10]:

$$\begin{cases} z_k = H_k x_k + v_k, \\ x_k = A_k x_{k-1} + B_k u_{k-1} + w_k, \end{cases} \quad (1)$$

Система уравнений (1) описывает измерения отслеживаемого процесса и экстраполяцию (прогноз) его текущего состояния на основе состояния в предыдущий момент времени. Здесь $z_k \in R^m$ — вектор измерений; $x_k \in R^n$ — вектор состояния; матрица H_k размерностью $m \times n$ отображает состояние наблюдаемого процесса x_k в измерениях z_k ; $v_k \in R^m$ — случайная величина, характеризующая погрешности измерений; A_k — матрица размерностью $n \times n$

, соответствующая модели преобразования системы со временем, т.е. описывающая переход наблюдаемого процесса из предыдущего состояния x_{k-1} в состояние x_k ; $w_k \in R^n$ является случайной величиной, описывающей ошибку модели этого преобразования; $u_k \in R^d$ — вектор, описывающий управляющие воздействия; B_k — матрица размерностью $n \times d$, учитывающая влияние вектора управляющих воздействий u_{k-1} из предыдущего состояния в изменение состояния x_k . Ошибка измерения и ошибка модели — случайные величины. И их законы распределения не зависят от времени (от номера итерации k). Причем $p(z_k | x_k) \sim N(H_k x_k, R)$, $p(v) \sim N(0, R)$, где R - ковариационная матрица погрешностей измерений, а $p(x_k | x_{k-1}) \sim N(A_k x_{k-1} + B_k u_{k-1}, Q)$, $p(w) \sim N(0, Q)$, где Q - ковариационная матрица погрешностей наблюдаемого процесса.

Для применения фильтра необходимо ввести следующие понятия:

- \hat{x}_k - апостериорная оценка состояния объекта в момент k , полученная по результатам наблюдений вплоть до момента k включительно.

- P_k - апостериорная ковариационная матрица ошибок, задающая оценку точности полученной оценки вектора состояния и включающая в себя оценку дисперсий погрешности вычисленного состояния и ковариации, показывающие выявленные взаимосвязи между параметрами состояния системы.

- \hat{x}_k^- - нескорректированная промежуточная апостериорная оценка состояния объекта в момент времени k .

- P_k^- - нескорректированная промежуточная апостериорная ковариационная матрица ошибок.

Чтобы иметь возможность применить фильтр, необходимо определить матрицы переменных определяющих динамику системы и измерений, а значит нужно указать матрицы A_k , H_k и B_k для каждого шага по времени k . Матрицы A_k и H_k принимаются единичными матрицами не зависящими от момента времени k , так как в рамках решаемой задачи считается, что измерение есть линейная комбинация вектора состояния и некоторых случайных погрешностей. Поскольку, отсутствует дополнительная информация о процессе изменения напряженности поля, поэтому полагается, что управляющее воздействие $B_k u_{k-1}$ равно нулю. Ковариационная матрица погрешности измерений R считается заданной. Для её задания используются данные о предполагаемой точности измерения, получаемых от датчика, эти данные указаны изготовителем. Определение параметров шума для задания ковариационной мат-

рицы погрешностей наблюдаемого процесса - Q является более сложной задачей, так как требуется определить дисперсию процесса, что не всегда возможно, но можно подобрать этот параметр таким образом, чтобы он обеспечивал требуемый уровень фильтрации.

Каждая итерация фильтра Калмана состоит из двух этапов: предиктора (экстраполяции) и корректора [9, 10, 11].

На этапе предиктора вычисляется оценка \hat{x}_k^- по оценке вектора состояния \hat{x}_{k-1} и ковариационная матрица ошибок P_k^- по следующим формулам: $\hat{x}_k^- = A_k \hat{x}_{k-1} + B_k u_{k-1}$, $P_k^- = A_k P_{k-1} A_k^T + Q$.

На этапе корректора вычисляется матрица коэффициентов усиления фильтра Калмана - K_k по следующей формуле: $K_k = P_k^- H_k^T / (H_k P_k^- H_k^T + R)$, K_k используется для коррекции оценки состояния \hat{x}_k^- и ковариационной матрицы ошибок P_k^- следующим образом: $\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - H_k \hat{x}_k^-)$, $P_k = (I - K_k H_k) P_k^-$, где I - матрица идентичности (единичная матрица).

Для того, чтобы рекурсивный алгоритм заработал, необходимо задать начальные априорные: вектор состояния \hat{x}_0 и ковариационную матрицу P_0 . Поскольку они могут не совпадать с истинными значениями этих характеристик, то неверно заданные начальные условия дают искаженную оценку оцениваемого вектора состояния. Но фильтр предполагается асимптотически устойчивой системой, постепенно влияние начальных условий сойдет на нет и он станет работать устойчиво.

Так как состояние системы представлено одной переменной – напряженностью поля, то матрицы вырождаются в скалярные значения и весь алгоритм фильтра Калмана, с учетом принятых упрощений, можно изобразить в виде следующих уравнений:

$$\hat{x}_k^- = x_{k-1}, P_k^- = P_{k-1} + \sigma_w^2, K_k = P_k^- [P_k^- + \sigma_v^2]^{-1}, \hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - \hat{x}_k^-), P_k = (1 - K_k) P_k^-.$$

где σ_w^2 - дисперсия ошибок модели, σ_v^2 - дисперсия ошибок измерения, а x_{k-1} , P_{k-1} , z_k известны для каждой итерации.

Примеры данных полученных без фильтрации и с применением полученного алгоритма фильтра Калмана представлены на рисунках 2-3.

Фильтр Калмана достаточно прост в реализации, он автоматически подбирает усиление в зависимости от ошибки прогноза, причём это хорошо работает даже в присутствии шума. Благодаря пошаговой природе алгоритма, он может в реальном времени отслеживать состоя-

ние наблюдаемого процесса. Фильтр применим и в постобработке, когда есть возможность учитывать все результаты измерений, менять начальные условия, тем самым подбирая оптимальные коэффициенты.

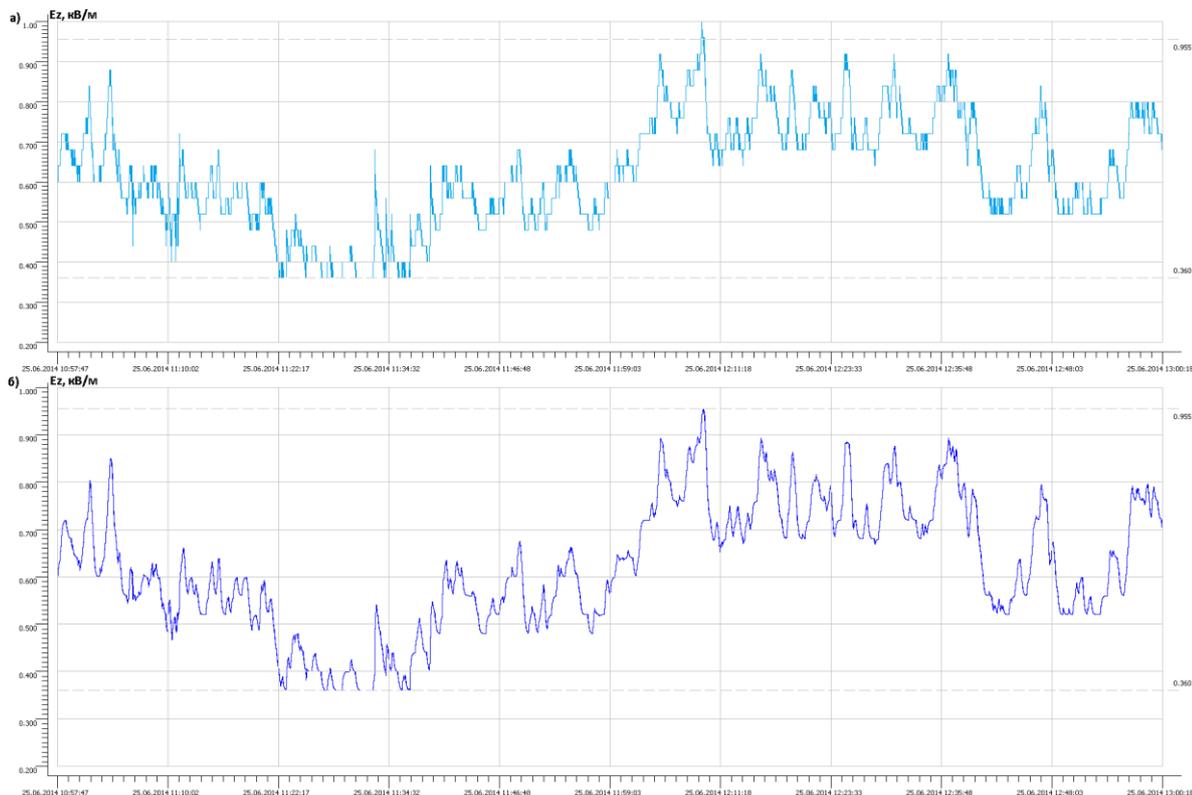


Рис. 2. Ход напряженности электрического поля атмосферы 25 мая 2014 года на пике «Чегет» по данным EFM 50 *a)* – без обработки и *б)* – с цифровой обработкой фильтром Калмана

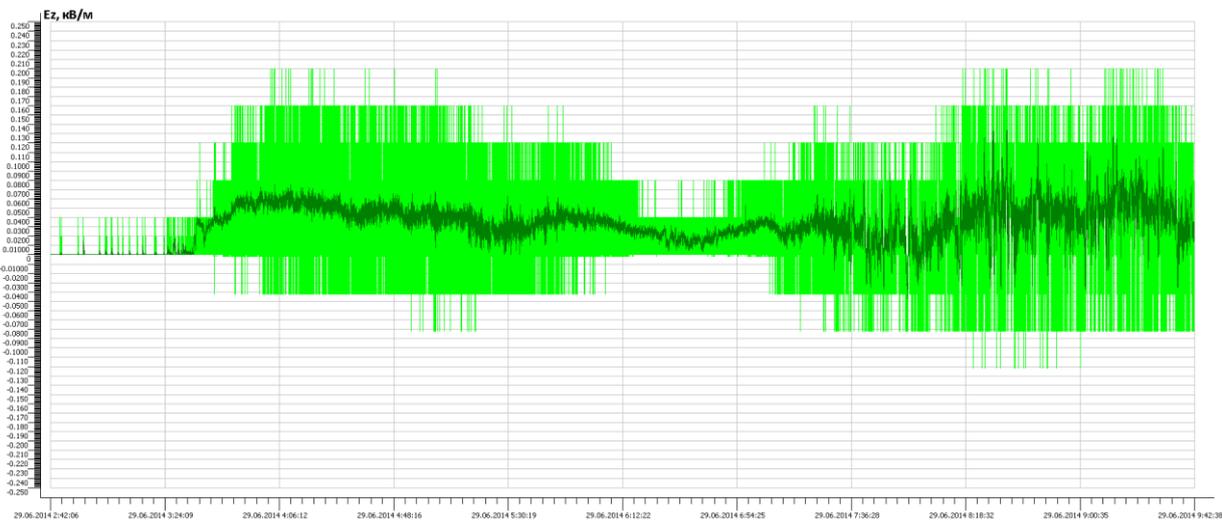


Рис. 3. Результаты наблюдений вертикальной компоненты электрического поля атмосферы для 29 мая 2014 в пункте Кызбурун без обработки и с цифровой обработкой фильтром Калмана.

Фильтр Калмана позволяет строить более точный ход измеряемого параметра, и способствует развитию программно-математического обеспечения усвоения данных наблюдений.

По результатам проведенной работы можно сделать вывод об эффективности цифровой обработки данных напряженности нарушенного и ненарушенного электрического поля атмосферы.

Список литературы

1. Аджиев А.Х., Куповых Г.В., Кулиев Д.Д., Казакова С.Т., Малкандуева Л.М. Совместный анализ вариаций напряженности электрического поля атмосферы и грозовой активности // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. №9 (158) С. 226-232.
2. Аджиев А.Х., Стасенко В.Н., Шаповалов А.В., Шаповалов В.А. Напряженность электрического поля атмосферы и грозовые явления на Северном Кавказе // Метеорология и гидрология. 2016. №3. С. 46-54.
3. Рязанов В.И., Аджиева А.А., Шаповалов В.А. Математическое моделирование распространения примесей в атмосфере для локальной области с учетом фактических и прогнозных полей метеорологических параметров // Материалы международной научной конференции «Актуальные проблемы прикладной математики и физики». Нальчик-Терскол. 2017. С. 182.
4. Аджиева А.А., Шаповалов В.А. Кластерный анализ в автоматическом выявлении и сопровождении грозовых очагов по данным грозопеленгационной сети // Инженерный вестник Дона. 2016. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2016/3559.
5. Редин А.А., Новикова О.В., Куповых Г.В. Комплекс атмосферно-электрических наблюдений как элемент экологического мониторинга // Известия ЮФУ. Технические науки. 2009. №10 С. 222-228.
6. Тарасова И.А., Леонова А.В., Синютин С.А. Алгоритмы фильтрации сигналов биоэлектрической природы // «Инженерный вестник Дона», 2012, №4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1481
7. Мисюра В.В., Мисюра В.И. Обработка и распознавание сигналов. Современное состояние проблемы // Инженерный вестник Дона. 2013. №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2130
8. Степанов О.А. Фильтр Калмана: история и современность // Гироскопия и навигация № 2 (69), 2010. С. 107-121.
9. Шахтарин Б.И. Фильтры Винера и Калмана. М.: Гелиос АРВ. 2008. 408с.
Welch G., Bishop G. An Introduction to the Kalman Filter. Department of Computer Science, UNC-Chapel Hill, TR 95-041, 2006. 16 p.
Namvaran M., Negarestani A. Noise Reduction in Radon Monitoring Data Using Kalman Filter and Application of Results in Earthquake Precursory Process Research // Act. Geophys. Volume 63, Issue 2, 2015. pp. 329–351.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ СНЕЖНЫХ ЛАВИН

Аджиев А.Х., Беккиев М.Ю., Болгов Ю.В.

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

Человеческая деятельность в холодных горных регионах всегда подвержена риску воздействию снежных лавин. Расширение освоения горных районов России и, как следствие, увеличение риска снежных лавин приводит к росту требований к концептуальным инструментам для правильного планирования инфраструктуры и проектирования безопасных сооружений [1]. Строительные организации, занимающиеся проблемами, связанными с лавинной опасностью, нуждаются, помимо качественных оценок гидрологических и геоморфологических условий участков, в количественных методах для предсказания схода лавин и оценки последствий. Такие прогнозы, как правило, основываются на математических моделях движения снежных масс, но из-за сложности явления все еще нет однозначного решения проблемы в рамках использования математического аппарата классической механики, в связи с этим на практике используются различные подходы. В данной работе представлен краткий обзор существующих математических моделей движения лавин и их особенностей.

Основными динамическими характеристиками снежной лавины принято считать: скорость переднего фронта; дальность выброса; силу удара лавины о препятствие; объем. Все перечисленные характеристики изменяются в зависимости от физико-географических условий [1,2]. В практике снеголавинных исследований используются двумерные и трехмерные модели движения лавин. Следует отметить, что прогнозирование движения лавин является в общем трехмерной задачей. Хотя многие существующие математические модели ограничиваются рассмотрением двумерного случая, это допущение является вынужденной мерой для сокращения размерности и объема вычислений, в этом случае, выбор траектории движения лавины должен быть сделан заранее. Хотя во многих случаях этот подход приемлем, при более сложном рельефе местности, траектория лавины не может быть предсказана тривиальным образом, а должна быть рассчитана на основе математического моделирования.

В математических моделях, используемых для описания движения снежных лавин, используются аналитические и численные подходы. Аналитические подходы основываются на аналогии с жидкостью, сыпучими материалами или частицами. Взаимодействие между лавиной и сооружением моделируется с использованием численных методов, как например *FEM* (метод конечных элементов) [3], *VOF* (метод объемов жидкости) [4] или *DEM* (метод

конечных элементов, используется для изучения основных физических процессов в малых масштабах) [5]. Результаты расчетов могут быть объединены с результатами натуральных наблюдений на местности или с лабораторными исследованиями.

Эмпирические модели. Эмпирические модели основаны на статистической обработке данных, без учета физики процесса. Преимущество эмпирических моделей заключается в простоте использовании при оценке дальности выброса лавины, при этом неопределенности физических процессов компенсируется результатами измерений реальных случаев схода лавин. К недостаткам эмпирических моделей относится то, что не учитывается физика процесса, что делает невозможным определение таких параметров лавины, как скорость, глубина потока и давление. Дальность выброса определяется при помощи регрессивного анализа (топографически – статистические модели), либо через сравнение с похожими по типу лавинами (сравнительные модели). Топографически-статистические модели включают как регрессивные, так и дедуктивные модели.

Топографически–статистические модели основаны на статистической регрессии, в которой максимальная дальность выброса связана с топографическими особенностями пути схода лавины – перепад высот между начальной (наивысшей) точкой и конечной (самой низкой точкой), кривизной пути движения лавины. В частности $\alpha\beta$ – модели используют уклон пути движения лавины α до участка с углом уклона β , между зоной начала движения лавины и участком с уклоном в 10^0 при линейном профиле участка движения лавины $\alpha = m\beta + c$ [6].

Дедуктивные модели основаны на законе распределения вероятностей для оценки дальности выброса. В частности, вводится дополнительный параметр δ , в зависимости от изменения угла склона (между участком с углом α и β). С учетом оценки приемлемого риска, такие модели используются для целей планирования землепользования при условии, что вероятность не превысит заданного значения. Значение коэффициента дальности выброса определяется выражением $Rr = (\tan \beta - \tan \alpha) / (\tan \alpha - \tan \delta)$.

В сравнительных моделях, используется многомерная статистика. Данный способ состоит в нахождении сходства между двумя или более участками схода лавин с учетом метеорологической ситуации. Многомерное пространство, содержащие соответствующие параметры для прогнозирования зависимой переменной (дальности выброса), сопоставляется с таблицей известных значений для зависимой переменной. Следовательно, зная дальность выброса, можно провести поиск ближайших аналогов.

Наконец, некоторые модели оценки риска для людей, населяющих лавиноопасные территории, основываются на исторической информации. Степень риска определяется как произведение вероятность встречи (временная и пространственная вероятность схода

лавин в зависимости от местоположения), экспозиции (время нахождения человек или объекта на опасном участке) и уязвимости (ущерб, причиненный людям или объектам).

Динамические модели. Первые модели динамики были разработаны в бывшем СССР в середине 30-х годов [7]. Динамические модели основываются на физике процессов и позволяют определить такие параметры, как скорость и глубина потока. Модели могут иметь разные размерности, при этом квазидвумерная модель означает одномерное уравнение с усредненным значением по глубине или ширине потока, в то время как квазитрехмерная – одномерная модель с усредненной массой и глубиной потока, или двумерная модель с усредненной глубиной потока. Далее представлены динамические модели для плотных и пылевых лавин, а также их комбинации.

Модели плотных лавин. В 1935 г. Тбилиским научно-исследовательским институтом сооружений впервые была предложена приближенная теория, в которой лавина рассматривалась как материальная точка, движущаяся с трением по наклонной плоскости под действием силы тяжести, причем окружающая среда оказывает сопротивление движению, прямо пропорциональное первой степени скорости [7]. Предложена зависимость, связывающая скорость движения лавины с длиной пройденного пути:

$$S = 2,3 \frac{a}{k^2} \lg \frac{a-kv_0}{a-kv} + \frac{v_0-v}{k} \quad (1)$$

где $a = g(\sin \alpha - r \cos \alpha)$; g – ускорение силы тяжести; α – угол наклона пути лавины относительно горизонта; r – коэффициент трения лавины о подстилающую поверхность; S – длина участка пути; v_0 – скорость движения лавины в начале участка; v – скорость движения лавины в конце участка; k – коэффициент сопротивления среды.

Г.К. Сулаквелидзе предложил зависимость для расчета верхнего предела скорости движения лавины на склоне с постоянным или возрастающим по ходу лавины углом уклона [8]. Скорость движения лавины при этом определяется из выражения:

$$v = (v_0 - v^*)e^{-kt} + v^* \quad (2)$$

где $v^* = \frac{a}{k}$ – предельная скорость лавины; $a = g \frac{\sin(\alpha-\varphi)}{\cos \varphi}$; α – угол уклона; φ – наименьший угол уклона, при котором начавшееся скольжение может продолжаться, преодолевая силу трения; v_0 – скорость движения лавины в начальный момент; k – коэффициент, зависящий от физических параметров снега и препятствий на пути движения лавины (для склонов Закавказья коэффициент $k=0,25$). Данная зависимость может применяться только для районов с конкретными физико-географическими условиями [2].

Наиболее часто используются модели, в которых лавина рассматривается как материальная точка, движущаяся по наклонной плоскости с переменной массой. Эти модели различаются лишь в деталях и дают в основном представление о скоростях схода лавин и

влиянии различных факторов на величину скорости движения лавин. Например, в модели, описанной в [9], лавина рассматривается как единая компактная снежная масса, движущаяся вниз по наклонной плоскости. Принимая во внимание то, что абсолютная скорость снежных масс, присоединяющихся к лавине, равна нулю, уравнения движения записываются в виде:

$$\frac{d(mV)}{dt} = mg(\sin \psi - k_f \cos \psi) - \frac{c_f \rho S V^2}{2}, \quad (3)$$

где m – масса лавины; V – скорость; t – время; g – ускорение свободного падения; ρ – плотность воздуха; S – площадь миделева сечения тела лавины; ψ – угол уклона; k_f – коэффициент трения скольжения; c_f – коэффициент сопротивления.

Закон изменения массы лавины записывается в виде:

$$\frac{dm}{dt} = \chi \rho_{s0} h_0 H V, \quad (4)$$

где ρ_{s0} – плотность снежного покрова; χ – коэффициент захвата снега лавиной; h_0 – мощность снежного покрова.

В более поздних моделях плотные лавины рассматриваются в виде тела с изменяемой геометрией или деформируемого тела. При рассмотрении тела с изменяемой геометрией, описывается движение твердого тела по наклонной плоскости (гибкое тело, перемещающееся по поверхности или движение его центра масс), используя закон сохранения момента. Сила сопротивления может быть выражена как $R = \mu N + Bv + Cv^2$ [10]. В выражение входит сумма сил – трения μN , пропорциональная нормальной силе N с коэффициентом трения μ , сила вязкости – Bv и сила Cv^2 пропорциональная квадрату скорости по аналогии с силой сопротивления для турбулентного водного потока в открытых каналах (во многих моделях коэффициент C вводится в виде функции).

Силой вязкости часто пренебрегают [11], даже если она вносит значительную составляющую особенно в пограничном слое вблизи дна, из-за изменения профиля скорости. Значение μ можно считать постоянной величиной или зависящей от скорости. Модели скольжения блоков были использованы, например, в модели *AVAL-ID* [12,13]. Сочетание двух составляющих $\mu N + Cv^2$ в настоящее время известно как течение *Voellmy*.

Движение лавины может быть также описано через закон сохранения энергии, учитывающий кинетическую, потенциальную энергии и диссипацию энергии. Модель движения центра масс лавины при взаимодействии с препятствием (дамбой) описана в [14]. С использованием упрощенной геометрии плотины в работе рассмотрено влияние скорости удара, высоты лавины, угла уклона местности, конфигурации и ориентации плотины. С помощью данной модели можно также исследовать эффект потери энергии при взаимодействии с препятствием.

Движение снега как непрерывного потока, можно рассматривать как жидкость подчиняющуюся законам гидравлики, гранулированный материал или набор отдельных блоков [15]. Гидравлические законы на основе уравнения мелкой воды (также называемые уравнениями *Сен-Венана* – при условии, что горизонтальный масштаб течения намного больше вертикального). Фактически предполагается, что глубины потока лавины мала по сравнению с горизонтальным распространением лавины, следствием чего является усреднение по глубине. Следовательно, в данном случае нельзя исследовать профиль распределения скорости или давления лавины по глубине потока.

Модель RAMMS. RAMMS разрабатывалась в WSL-SLF в Давосе (Швейцария), как эволюция модели AVAL-ID [12]. Верификация модели проводилась в научно-исследовательской лаборатории снежных лавин и селей географического факультета МГУ [16]. Данная модель относится к квазитрехмерным (двумерная модель с осреднением параметров потока по глубине), при этом движение лавины рассматривается как неустановившееся и неравномерное с разной средней скоростью $U(x, y, t)$ и глубиной потока h . В системе уравнений используется закон сохранения импульса [17 - 19]:

$$\begin{aligned} \partial_t(h) + \partial_x(hU_x) + \partial_y(hU_y) &= \dot{Q}(x, y, t) \\ \partial_t(hU_x) + \partial_x\left(hU_x^2 + g_z \frac{h^2}{2}\right) + \partial_y(hU_xU_y) &= G_x - S_x \\ \partial_t(hU_y) + \partial_x(hU_xU_y) + \partial_y\left(yhU_y^2 + k_{a/p} \frac{h^2}{2}\right) &= G_y - S_y. \end{aligned} \quad (5)$$

К уравнениям добавляется дополнительное уравнение для учета случайного распределения кинетической энергии $R(x, y, t) = \frac{1}{h} \int_0^h \frac{1}{2}(u_x^2 + u_y^2 + u_z^2)$ связанное с колебаниями скорости частиц u_x , u_y , и u_z :

$$\partial_t(hR) + \partial_x(hRU_x) + \partial_y(hRU_y) = \alpha(S\dot{U}) - \beta(Rh) \quad (6)$$

$G_x = g_x h$ и $G_y = g_y h$ – учитывают гравитационную составляющую, $S = (S_x, S_y)$ – трение:

$$\begin{aligned} S_x &= \frac{U_x}{\|U\|} \left[\mu(R)g_z h + \frac{g\|U\|^2}{\zeta(R)} \right] \\ S_y &= \frac{U_y}{\|U\|} \left[\mu(R)g_z h + \frac{g\|U\|^2}{\zeta(R)} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

В течении *Voellmy* коэффициенты μ (кулоновское трения) и ζ (турбулентное трение) уменьшаются с ростом R по следующему закону:

$$\begin{aligned} \mu(R) &= \mu_0 e^{\left(-\frac{R}{R_0}\right)} \\ \zeta(R) &= \zeta_0 e^{\left(-\frac{R}{R_0}\right)} \end{aligned} \quad (8)$$

где $\mu(R = 0) = \mu_0$ и $\zeta(R = 0) = \zeta_0$.

$\alpha(SU)$ – представляет флуктуацию энергии, а $\beta(Rh)$ – ее уменьшение. Вовлечение снега про-

исходит со скоростью $\dot{Q}(x, y, t) = \frac{\rho_i}{\rho} k_i U$. Следовательно, $\dot{Q}(x, y, t)$ зависит от значения скорости $U = \sqrt{U_x^2 + U_y^2}$, плотности лавины ρ и плотности i -го эродируемого слоя ρ_i , учитываемого через безразмерный коэффициент k_i ($k_i = 0,8 \div 1$), что позволяет учесть степень вовлечения или фронтальную эрозию [20] производимую более высоким потоком в голове лавины, в то время, как меньшие значения (менее 0,5) соответствуют эрозии основания потока [19]. Отложение снега происходит, когда средняя скорость движения равна нулю. Случайное распределение кинетической энергии, уменьшается по направлению к хвостовой части лавины, происходит также увеличение трения, в результате происходит отложение снежной массы и остановка лавин даже на крутых склонах. Некоторые приложения данной модели представлены в [21].

Модель NIS [22], рассматривает лавины как материал, описываемый через соотношения, учитывающие вязкость и вязкоупругость потока, в сочетании с пластичностью материала.

$$\tau_{xz} = a + bp_e^k + \rho m \dot{\gamma}^n \quad (9)$$

$$\sigma_x = -(p_e + p_u) - \rho(v_1 - v_2)\dot{\gamma}^n \quad (10)$$

$$\sigma_y = -(p_e + p_u) - \rho v_2 \dot{\gamma}^n \quad (11)$$

$$\sigma_z = -(p_e + p_u) \quad (12)$$

$$\tau_{yz} = \tau_{yx} = 0 \quad , \quad (13)$$

где p_e – эффективное давление, p_u – избыточное давление, ρ – плотность, v_1 и v_2 – нормальные напряжения вязкости, m – касательное напряжение вязкости, $\dot{\gamma}$ – скорость сдвига, a – степень уплотнения, b – коэффициент сухого трения снега и $n = 2$ – инерциальный режим лавины. С момента, когда напряжение сдвига становится отличным от нуля, профиль вертикального распределения скорости перестает быть постоянным. В частности, соотношение скоростей у основания u_0 и верхней части поверхности потока u_h на высоте h зависит от неровностей поверхности земли через коэффициент вязкого скольжения s :

$$\frac{u_h}{u_0} = \left[1 + \frac{2h}{3} \sqrt{\frac{s}{\rho(m - bv_2)}} \right] > 1 \quad . \quad (14)$$

Некоторые модели описывают лавину как гранулированный материал, несвязный, несжимаемый и подвергнутый внутреннему трению [23,24]. Для одномерного течения, при усреднении параметров по глубине потока уравнения имеют вид:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(hu) = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = \sin \zeta - \tan \delta \cdot \text{sgn}(u)(\cos \zeta + \lambda ku^2) - \varepsilon K_{ap} \cos \zeta \frac{\partial h}{\partial x} \quad , \quad (15)$$

где h и u – высота и скорость потока, ζ – угол уклона, δ – угол трения ложа (не постоянная величина), λ – соотношение между продольной длиной и радиусом кривизны профиля ложа,

k – кривизна, K_{ap} – коэффициент давления на поверхность, ε – соотношение между глубиной и продольной длиной.

Вследствие внутреннего трения, в теле лавины присутствуют продольные активные и пассивные напряжения. Тело является жестким и не деформируется при напряжениях ниже критического значения, поскольку предполагается условие текучести. Когда градиент скорости достигает критического значения, происходит деформация: удлинения (активное состояние) с увеличением скорости и сжатия (пассивное состояние) с уменьшением скорости.

Альтернативные модели. Общепринятым подходом при моделировании динамики лавин считается численное решение уравнений *Навье – Стокса* и его различных модификаций. При этом возникают трудности с моделированием турбулентного потока, вычислительной сложностью, что в свою очередь стимулирует поиск альтернативных методов, адаптированных для компьютерной реализации. Последнее время довольно распространенными становятся клеточно-автоматные методы моделирования, которые привлекают своей простотой, универсальностью, и естественным параллелизмом. В работе [25] впервые использована квазитрехмерная модель клеточных автоматов для расчета динамики движения лавин. Лавины делятся на маленькие элементы (клетки или элементарные автоматы), взаимодействующие по простым законам, при этом достигается упрощение с вычислительной точки зрения. Каждая клетка характеризуется своей высотой: не разрушаемая высота (т.е. высота поверхности земли), разрушаемая высота (т.е. слой снежного покрова), высота потока, сосредоточенная кинетическая энергия (т.е. высота, соответствующая кинетической энергии на единицу массы материала снега, связанной с ячейкой). Из каждой ячейки поток может перейти на соседние клетки, что приводит к изменению их высоты. Движение моделируется в предположении, что вся система стремится к максимальной стабильности. Возможности модели показаны на примере моделирования реальной лавины сошедшей западных Итальянских Альпах. Используя цифровую модель рельефа, модель способна корректно воспроизводить трехмерный путь лавина и объем отложений.

SPH модель (*Smoothed Particles Hydrodynamics*) также используется для исследования динамики лавин. Данный метод также реализован в **MPS** (*moving-particle semi-implicit*) модели (неявное перемещение частиц) в основе которого лежит преобразования сетки в частицы. Входными параметрами для расчета является рельеф местности и объем снежной массы. Снег рассматривается как гранулированный материал, при моделировании рассматривается несжимаемая среда, которая характеризуется плотностью, вязкостью и модулем сдвига. Учитывается сила трения. Результаты моделирования сравнивались с экспериментальными данными, в частности, рассматривалась скорость фронта, давление, удар и дальность выброса.

Модели пылевой лавины. Пылевую снежную лавину можно моделировать в виде блок,

потока переменной плотности или двухфазного потока. Модели плотности потока основываются на локальном балансе общей массы и линейного импульса. В них часто вводятся интегральные значения по высоте потока, или по каждому слою. В численном виде, уравнения баланса массы и импульса составляются для каждой из фаз, и их взаимное влияние учитывается за счет сил взаимодействия. Взаимодействие фаз описывается различными соотношениями. Промежуточный подход – рассматривает отдельно баланс масс снега и воздуха, и одно уравнение баланс импульса для смеси. Для приближенного описания относительного движения в уравнения баланса массы и импульса могут быть включены дополнительные условия для диффузии и адвекции. Поскольку аэрозольные лавины имеют высокую турбулентность, уравнения должны быть усреднены во времени и дополнены соотношениями для турбулентности. Часто вводят допущение о постоянстве потока, при этом используются простые дифференциальные уравнения, учитывающие колебания, происходящие в направлении перемещения потока.

В блочных моделях пылевая лавина рассматривается как материальная точка, описываемая обычными дифференциальными уравнениями, в которые вводятся дополнительные уравнения для учета изменения размера лавины. В таких ноль – мерных моделях, координата центр масс (или фронт) $x(t)$ является основной динамической переменной, по которой берется производная для получения скорости. Наоборот, в моделях, описывающих лавина, как поток, основной динамической переменной является скорость, а координата x играет роль параметра, также как и время. Тем не менее, при практическом применении указанных численных моделей для пылевых снежных лавин возможно моделирование дальности выброса и отложений в зоне торможения.

Модель *AVAEER* применяется в случае допущения, что аэрозольная часть не зависит от плотного ядра лавины. Это предположение сделано на основе результатов лабораторных экспериментов, проведенных с использованием воды, воды с солью [26] или порошка для того, чтобы имитировать пылевую лавину. Лавина сохраняет свою полу – эллипсоидную формы, при этом длина, высота и ширина растет за счет вовлечения воздушных потоков. Массовый баланс учитывает вовлечение воздуха, а степень вовлечение снега вводится пользователем. Упрощенная модель позволяет получить аналитические решения для скорости, объема и плотности лавины. Эродированный снег рассматривался как процент от снежного покрова. Эта модель также реализуется с использованием математического аппарата нечеткой логики. Такой подход позволяет задать степень изменчивости, или нечеткости, в параметрах модели (объем, разницу между плотностью снега и плотностью воздуха, высоту снежного покрова, добавлять массовые коэффициенты), при этом можно количественно определить влияние неопределенности на результаты моделирования (скорости и давления). В частности давление в

большей степени зависит от степени неопределенности входных параметров.

Пылевая лавина также рассматривается как облако установленной геометрической формы, которая изменяется во время движения. Рассматривается облако в виде эллиптического полу – цилиндра, в котором соотношение между длиной и высотой зависит от угла склона. Другие модели основаны на сходстве с перемещением объекта в глубине смешанных течений, как описано в [27]. При этом тело лавина, а точнее ее голова описывается с помощью четырех уравнений (уравнения сохранения массы потока, массы снежных частиц, уравнения движения облака и кинетической энергии турбулентного потока). Модель *SL-ID* описывает лавина через слои отложения (заиливания) и взвешенные слои [28]. Взвешенный слой описывается уравнениями баланса для воздушной массы, массы снега, общего импульса, кинетической энергии турбулентности и диссипации. В слое заиливания воздушной массой и импульсом пренебрегают, рассматривается только масса снега и ее импульс.

Смешанные модели. Смешанные модели используются для описания движения плотной и пылевой частей лавин. Модель *SL-ID* может использоваться в сочетании с моделью для плотных слоев лавины, при этом обеспечивается сопряжение моделей [28]. Некоторые модели рассматривают лавину в виде двух слоев: плотный слой и аэрозольный слой, взаимодействующие друг с другом. Скорость и плотность, усредняется по толщине слоя, как при гидравлическом подходе. Модель [29] использует квазитрехмерное сочетание, при этом моделируется плотная часть в качестве зернистого плотного потока с помощью уравнения мелкой воды. Величина трения τ позволяет описать разные реологические свойства, как гранулированный поток и течение *Voellmy*. Баланс массы и импульса представлен выражением:

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} h \\ hu \\ hv \end{pmatrix} + \frac{\partial}{\partial x} \begin{pmatrix} hu \\ hu^2 \\ huv \end{pmatrix} + \frac{\partial}{\partial y} \begin{pmatrix} hv \\ huv \\ hv^2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \partial_x \\ \partial_y \end{pmatrix} \left(\frac{1}{2} kg \cos \theta h^2 \right) = -gh \begin{pmatrix} 0 \\ \cos \theta_x \\ \cos \theta_y \end{pmatrix} - \frac{1}{\|\vec{u}_d\|} \begin{pmatrix} 0 \\ u \\ v \end{pmatrix} \frac{\tau}{\rho_d}, \quad (16)$$

где h - глубина потока, $u = (u, v)$ - скорость, θ_x и θ_y - уклон поверхности в направлениях осей x и y , k - коэффициент активного или пассивного давления на грунт.

Аэрозольная часть описывается потоком [29], состоящим из двух фаз – воздуха и снежных частиц в виде суспензии, на которые действует сила тяжести. Законы сохранения массы и импульса рассматриваются отдельно для каждой фазы (воздух и частицы).

Моделирование процесса вовлечения снежного покрова. Динамические характеристики движущейся лавины зависят от рельефа зоны транзита и количества вовлеченного в лавинное движение материала [9]. Для описания механизма вовлечения используются различные подходы [20,30]. Например, считают, что степень вовлечения α зависит от скорости движения лавины u :

$$\alpha = \alpha_{\infty} \left(1 - e^{-\frac{u}{u_m}} \right) , \quad (17)$$

где α_{∞} – значение при больших скоростях; u_m – константа.

В модели [31] вводят вовлечение снега в зависимости от высоты снежного покрова и элемента лавины, снежный покров полностью вовлекается во фронтальной части лавины, а не в теле лавины. В данной модели плотность ρ зависит от скорости следующим образом:

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + \alpha(u - u_0)} , \quad (18)$$

где ρ_0 - плотность снежного покрова в состоянии покоя; u_0 - порог скорости, при которой плотность изменяется; α - коэффициент вариации.

Модель [15] использует описание потока в виде быстро перемещающихся фрагментов. Поток представляется в виде серии блоков связаться друг с другом, свободно деформируемых, с постоянным объемом. Вовлечение и осаждение моделируется изменение значений на каждой границы и массы блоков, на каждом временном шаге, задаются зоны вовлечения или осаждения вдоль пути следования лавины, значения снижаются пропорционально пройденному расстоянию. Показатели осаждения и эрозии задаются в процентном отношении от поперечного сечения области. В модели [32] вовлечение на фронте потока моделируется как гидравлический скачок. Граница между движущейся лавиной снега и снежным покровом является ударной волной перпендикулярной течению. Вовлечение снега учитывается заданием соответствующих граничных условий. В работе [33] предложен механизм постепенного вовлечения с поверхности, предполагая, что на границе движущейся лавины и снежного покрова в состоянии покоя, действует ударная волна (вклинивающаяся в снежный покров), приводящая к разрушению и вовлечению в движение снежного покрова. Количество эродированного снега пропорционально нагрузке p (сумма гидростатического и динамического давления) порожденной воздействием движущегося снега на снежный покров. В модели учитывается сжатие эродированного снега. Эта теория использована в работе [13], в которой рассмотрена динамика лавины с учетом вовлечения и осреднением параметров по высоте потока, решалась также обратная задача для некоторых фактически сошедших лавин на тестовых участках. Снежный покров, подверженный эрозии образуется несколькими слоями с различной плотностью и высотой. Эрозионное трение считается незначительным по сравнению с другими источниками трения. В [34] рассматривают лавину в виде двух слоев: нижний плотный слой (с плотностью ρ_1 и скоростью u_1) и верхний аэрозольный слой (с плотностью ρ_2 и скорости u_2). Осуществляется масса–обмен между этими двумя компонентами, а также

между плотной/аэрозольной частями лавины и снежным покровом (с плотностью ρ_0). Степень обмена между плотным слоем и снежным покровом пропорциональна $|u_1| \frac{\rho_1 \rho_0}{\rho_1 + \rho_0}$, в то время как обмен между аэрозольной частью и снежным покровом пропорционален $|u_2| \frac{\rho_2 \rho_0}{\rho_2 + \rho_0}$. В работе [35] лавина рассмотрена как холодный, сухой и разреженный поток гранул, перемещающийся под действием гравитации, а рассмотрение процессов осаждения и эрозии основывается на свойствах гранулированного потока [29]. В модели *SAMOS* учитывается плотная и пылевая часть лавины. Используются отдельные модели для каждого из слоев. Для плотного ядра используется двумерная модель мелкой воды. Пылевая часть считается потоком переменной плотности, пропорциональной объемной доли частиц снега. В модели учитывается турбулентное трение. Модели связаны дополнительными уравнениями перехода, которые описывают обмен массой и импульсами между слоями. В передней части лавины происходит эрозия, эродированный снег переходит частично в плотную часть лавины и частично в аэрозольную часть в зависимости от соотношения между высотой потока и высотой эродируемого снежного покрова, соотношения между плотностью плотной части потока и плотностью эродируемого снежного покрова.

Заключение

На сегодняшний день, не существует универсальной математической модели, описывающей динамику движения лавин. Большинство моделей не обеспечивают расчет ряда необходимых параметров, например вертикального распределения профиля скорости потока по глубине (является необходимым при проведении расчетов, связанных с оценкой воздействия лавин на сооружения), либо не учитывается пылевая составляющая лавин, которая также может оказывать значительное разрушительное воздействие. Кроме того, следует отметить, что течение лавины по своей природе являются турбулентным и при численном моделировании, как правило, используют ту или иную модель турбулентности. При этом в опубликованных работах оставлен без рассмотрения вопрос о степени влияния учета турбулентности (как потока плотной части лавины, так и пылевой составляющей) на получаемое решение, равно как и вопрос о применимости используемой модели турбулентности для данного класса течений. Также зачастую не уделялось внимания вопросу качества полученного численного решения и его сопоставления с параметрами реальных лавин.

Список литературы

1. Залиханов М.Ч. Снежно-лавиный режим и перспективы освоения гор Кабардино–Балкарии. Нальчик, изд-во «Эльбрус», 1971. 192 с.
2. Козик С.М. Расчет движения снежных лавин. Л., Гидрометеиздат, 1962. 75 с.

3. Bertrand D., Naaim M., Brun M. Physical vulnerability of reinforced concrete buildings impacted by snow avalanches. *Natural Hazards and Earth Systems Sciences*, 10(7):1531–1545, 2010.
4. Chiou M., Wang Y., Hutter K. Influence of obstacles on rapid granular flows. *Acta Mechanica*, (175):105–122, 2005.
5. Favier L., Daudon D., Donzé F., Mazars J. Predicting the drag coefficient of a granular flow using the discrete element method. *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, p. 1–14, 2009.
6. Lied K., Bakkehoi S. Empirical calculations of snow-avalanche run-out distance based on topographic parameters. *Journal of Glaciology*, 26(94):165–177, 1980.
7. Гофф А.Г., Оттен Г.Ф. Экспериментальное определение силы удара снежных обвалов. *Изв. АН СССР, сер. геогр. и геофиз.*, №3, 1939.
8. Сулаквелидзе Г.К. К вопросу об образовании и движении снежных лавин. *Труды Института физики и геофизики АН Груз. ССР*, т. XI, 1949.
9. Жекамухов М.К., Жекамухова И.М., Основы механики снега. – Нальчик: Каб.-Бал. ун-т, 2003. –247 с.
10. Casassa G., Narita H., Maeno N. Measurements of friction coefficients of snow blocks. *Annals of Glaciology*, (13):40–44, 1989.
11. Perla R., Cheng T.T., McClung D. A two-parameter model of snow avalanche motion. *Journal of Glaciology*, 26(94):197–207, 1980.
12. Bartelt P., Salm B., Gruber U. Calculating dense-snow avalanche run-out using a Voellmy – fluid model with active/passive longitudinal straining. *Journal of Glaciology*, 45(150):242–254, 1999.
13. Sovilla B., Bartelt P. Observation and modeling of snow avalanche entrainment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, (2):169–179, 2002.
14. Irgens F., Schieldrop B., Harbitz C., Domaas U., Opsahl R. Simulations of dense-snow avalanches on deflecting dams. *Annals of Glaciology*, (26):265–271, 1998.
15. Hungr O. A model for the run-out analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches. *Can. Geotech. J.*, (32):610–623, 1995.
16. Турчанинова А.С., Селиверстов Ю.Г., Глазовская Т.Г. Моделирование снежных лавин в программе RAMMS в России. *Геориск*. №4 2015 с.42–47.
17. Bartelt P., Buser O. Frictional relaxation in avalanches. *Annals of Glaciology*, (54):98–104, 2009.
18. Bartelt P., Buser O. Production and decay of random kinetic energy in granular snow avalanches. *Journal of Glaciology*, 55(189):3–12, 2009.
19. Christen M., Kowalski J., Bartelt P. RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches

in three-dimensional terrain. *Cold Regions Science and Technology*, 63:1–14, 2010.

20. Gauer P., Issler D. Possible erosion mechanism in snow avalanches. *Annals of Glaciology*, (38):384–392, 2004.

21. Christen M., Bartelt P., Kowalski J. Back calculation of the In den Arelen avalanche with RAMMS: interpretation of model results. *Annals of Glaciology*, 54(51):161–168, 2010.

22. Norem H., Irgens F., Schieldrop B. Simulation of snow-avalanche flow in run-out zones. *Annals of Glaciology*, 13:218–225, 1989.

23. Savage S., Hutter K. The dynamics of granular materials from initiation to run-out: Part I. Analysis. *Acta Mechanica*, (86):201–231, 1991.

24. Wieland M., Gray J.M., Hutter K. Channelized free-surface flow of cohesion less granular avalanches in a chute with shallow lateral curvature. *Journal Fluid Mechanics*, (392):73–110, 1999.

25. Barpi F., Borri-Brunetto M., Veneri L. D. Cellular-automata model for dense-snow avalanches. *Journal of Cold Regions Engineering*, 21 (4):121–140, 2007.

26. Beghin P., Olagne X. Experimental and theoretical study of the dynamics of powder snow avalanches. *Cold Regions Science and Technology*, (19):317–326, 1991.

27. Fukushima Y., Parker G. Numerical simulation of powder-snow avalanches. *Journal of Glaciology*, 36(123):229–237, 1990.

28. Issler D. Modeling of snow entrainment and deposition in powder-snow avalanches. *Annals of Glaciology*, 26:253–258, 1998.

29. Naaim M., Gurer I. Two-phase numerical model of powder avalanche theory and application. *Natural Hazards*, (117):129–145, 1998.

30. Eglit M. E., Demidov K. S. Mathematical modeling of snow entrainment in avalanche motion. *Cold Regions Science and Technology*, (43):10–23, 2005.

31. Brugnot G., Pochat R. Numerical simulation study of avalanches. *Journal of Glaciology*, 27(95):77–88, 1981.

32. Briukhanov A., Grigorian S., Miagkov S., Shurova M. P. I., Eglit M., Yakimov Y. On some new approaches to the dynamics of snow avalanches. *Physics of Snow and Ice: proceedings*, 1(2):1223–1241, 1967.

33. Grigoryan S. S., Ostroumov A. V. Mathematical simulation of the process of motion of a snow avalanche. *Journal of Glaciology*, pages 664–665, 1977.

34. Eglit M. Mathematical and physical modeling of powder-snow avalanches in Russia. *Annals of Glaciology*, (26):281–284, 1998.

35. Naaim M., Faug T., Naaim-Bouvet F. Dry granular flow modelling including erosion and deposition. *Surveys in Geophysics*, (24):569–585, 2003.

СЕКЦИЯ 3. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТ ПО АКТИВНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ НА ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ОБЛАКА С ПОМОЩЬЮ САМОЛЕТНЫХ ПРИБОРНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Данелян Б.Г.¹, Кирин Д.В.¹, Петров В.В.¹, Корнеев В.П.², Колосков Б.П.²

¹ФГБУ «ЦАО», ²АНО «Агентство АТТЕХ»

Введение

Исследования эффективности воздействий на облака до сих пор является наиболее важной задачей в проблеме регулирования осадков. Для понимания физических процессов происходящих в облаках в результате засева, приводящих к изменению количества выпадающих из облаков осадков, необходимо проведение специальных экспериментов направленных на исследование микрофизических характеристик в облаках до и после проведения воздействий. Из-за отсутствия финансирования на проведение целенаправленных исследований происходящих изменений в облаках при их засеве реагентами, такие исследования в усеченном виде возможны в настоящее время только при проведении коммерческих работ. Основными коммерческими работами в настоящее время являются работы по улучшению погодных условий над мегаполисами. Ниже обсуждаются некоторые результаты микрофизических исследований, полученные в работе по улучшению погодных условий над Москвой 12 июня 2016 года с помощью микрофизического комплекса самолета лаборатории Як-42 «Росгидромет» [1,2].

1. Воздействие на кучево-дождевое облако

Основные методы воздействия с целью уменьшения интенсивности выпадающих осадков 12 июня 2016 года были направлены на создание перезасева в облаках и разрушение развивающихся конвективных облаков.

Выбранная для этого схема воздействий при засеве облаков пиропатронами, гранулированной твердой углекислотой и жидким азотом предусматривала засев облаков отстрелом пиропатронами массированными сбросами гранул углекислоты и выбросом жидкого азота максимальными дозировками с наветренной стороны от Москвы на удалениях двух часового переноса облачности ветровым потоком.

В первой половине дня в основном наблюдались слоистообразные облака с отдельными конвективными ячейками. Во второй половине дня наблюдались в основном облака конвективных форм. Метеорологическая ситуация формирования облаков приводится ниже.

Рассмотрим результаты засева мощно-кучевого облака йодистым серебром внесенным в облако пиротехническими изделиями ПВ-26.

1.1. Метеорологическая ситуация 12 июня 2016 г.

12 июня 2016 г московский регион находился под влиянием глубокого активного циклона над северо-западом ЕТР, который находился на стадии заполнения. Ночью и рано утром через регион с запада на восток перемещался холодный фронт с волновыми возмущениями, сопровождавшийся интенсивными осадками.

Далее, в течение дня синоптическая обстановка менялась мало: через регион перемещалась преимущественно конвективная облачность с осадками различной интенсивности (от слабой до умеренной). Характер осадков был очень кратковременным (размеры очагов вдоль потока были небольшими). Днем существенно увеличилась скорость ветра у земли (до 6-13 м/с в среднем, местами порывы до 15 м/с), он принимал порывистый характер, особенно под кучево-дождевыми облаками.

Примерно с 15 ч МСК высота верхней границы (ВВГО) кучево-дождевой облачности местами уже достигала 7-8 км и по московскому региону в отдельных местах отмечались грозы.

Согласно данным аэрологического зондирования за 15 ч МСК в тропосфере присутствовал конвективно-неустойчивый слой (от 500 до 7500 м), во всей толще наблюдалась высокая влажность воздуха. Высота нулевой изотермы располагалась на уровне около 1400 м, что являлось очень низким значением для данного времени года.

1.2. Описание воздействия

В 15:00 по местному времени самолёт совершил второй рабочий вылет с аэродрома Чкаловский. Температура у земной поверхности составляла около 10 °С.

В районе работ наблюдалось развитие кучевой и кучево-дождевой облачности.

В 17 часов 18 мин самолет Як-42Д «Росгидромет» находился на юге Смоленской области к югу от г. Вязьма. В этом районе было выбрано изолированное облако для проведения засева. Облако находилось на юго-западе от Москвы на удалении 240 км, и перемещалось по направлению к Москве. Верхняя граница облака находилась на высоте 5200 м, температура на верхней границе составляла -20,9 °С. В дальнейшем через верхнюю часть данного облака было совершено три прохода на высоте 5100 м. Первый проход был произведен в период 17:40:28 – 17:41:23, второй проход в 17:47:47 – 17:48:32, третий 18:30:59 – 18:31:43 (Рис.1).

В двух первых проходах были проведены воздействия пиропатронами. В общей сложности было израсходовано 44 пиропатрона. Третий (контрольный) пролёт через облако осуществили через 50 минут после начала активных воздействий.

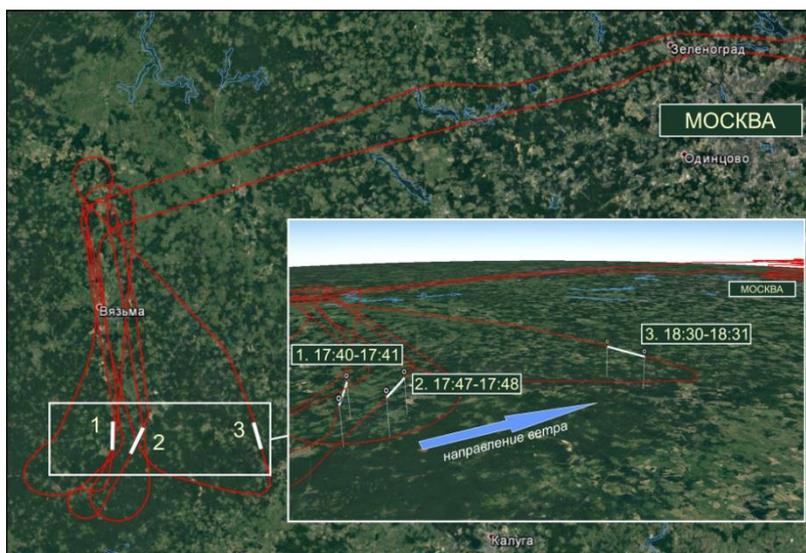


Рис. 1 Траектория полета самолета с отрезкам линий засева и контроля

На рисунке 2 приведены фотографии экспериментального облака до воздействия (а) и через 30 мин после воздействия (б). Мы отчетливо видим диссипацию облака после проведенного воздействия.

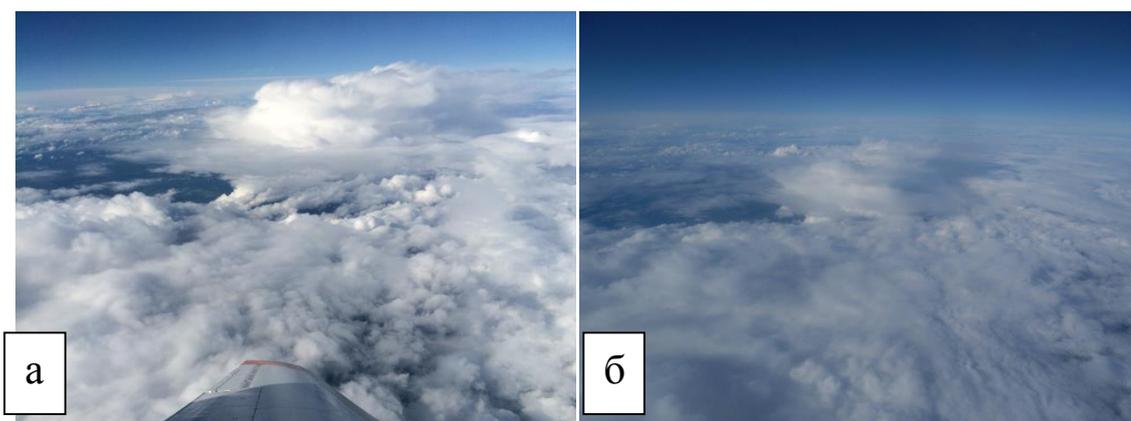


Рис. 2 Облако до воздействия(а) и после воздействия (б).

Особый интерес представляет анализ изменений микрофизических характеристик, происходящих в облаке после воздействий. На рисунке 3 представлены спектры облачных частиц в диапазоне размеров от 25 до 1525 мкм, измеренных в облаке на всех трех проходах. Мы видим, что при первых двух проходах, которые приурочены к началу воздействия, спектр облачных частиц практически не изменился. Совершенно другая картина наблюдается в облаке в период третьего прохода, который был выполнен через 50 мин после проведенного воздействия

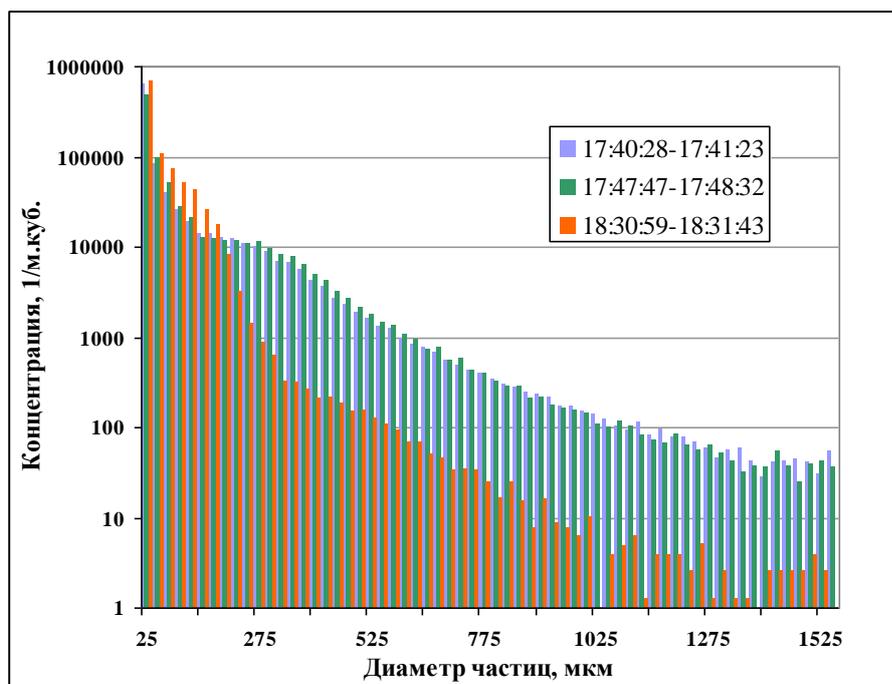


Рис. 3 Распределение облачных частиц по размерам от 25 до 1550 мкм

Мы видим, что концентрация мелких частиц размерами до 100 мкм увеличилась в несколько раз. Что нельзя сказать о правой части спектра, где концентрации частиц размерами более 1500 мкм уменьшилось до нуля. Этот же эффект наблюдается и на рисунке 4, на котором приведен спектр размеров частиц от 100 до 6200 мкм. На этом рисунке отчетливо видно отсутствие частиц размерами более 1300 мкм.

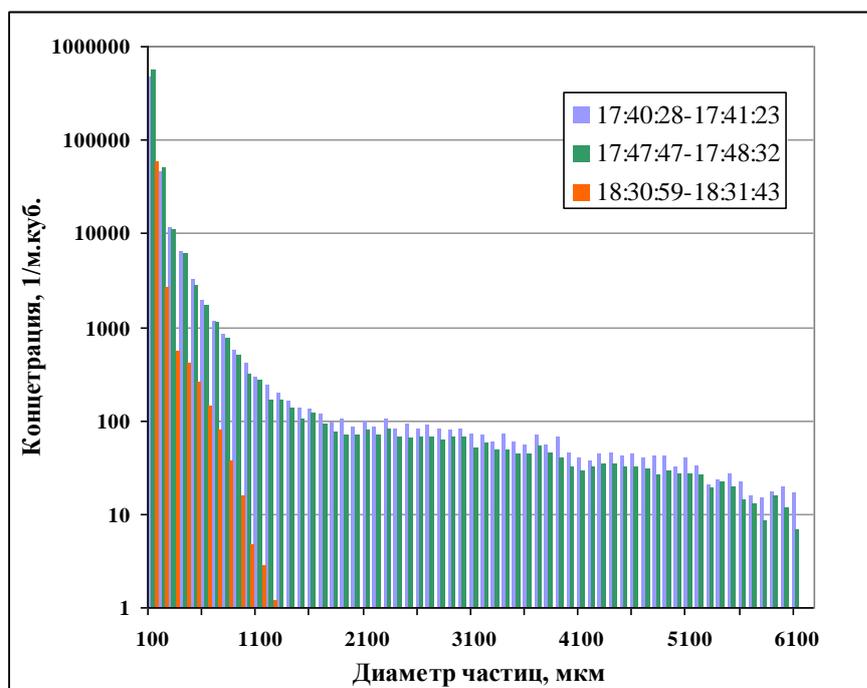


Рис. 4 Распределение облачных частиц по размерам от 100 до 6200 мкм

Полученный результат свидетельствует об образовании высоких концентраций мелких кристаллов в результате засева. Что привело к кристаллизации вершины облака и его дальнейшему разрушению.

Обращает на себя внимание также резкое уменьшение жидкокапельной водности в верхней части облака за 50 минут с $0,26 \text{ г/м}^3$ (2-й пролёт) до $0,02 \text{ г/м}^3$, что также свидетельствует о кристаллизации облака и его диссипации (рис. 5).



Рис. 5. Измерения жидкокапельной водности при пересечении облака.

Динамику развития облака после воздействия можно проследить по данным радиолокационных измерений (рис. 6). Перед началом воздействия высота верхней границы облака достигала 7 км, через 50 минут после воздействия она составляла 4-5 км, что подтверждалось в том числе и визуальными наблюдениями бортаэролога. Кроме того, к 18:30 наблюдался отрыв верхней закристаллизовавшейся части облака от его основания. Интенсивность осадков также начала уменьшаться, и к 18:30 составляла не более 1 мм/ч, хотя перед началом воздействия она достигала 3-5 мм/ч.

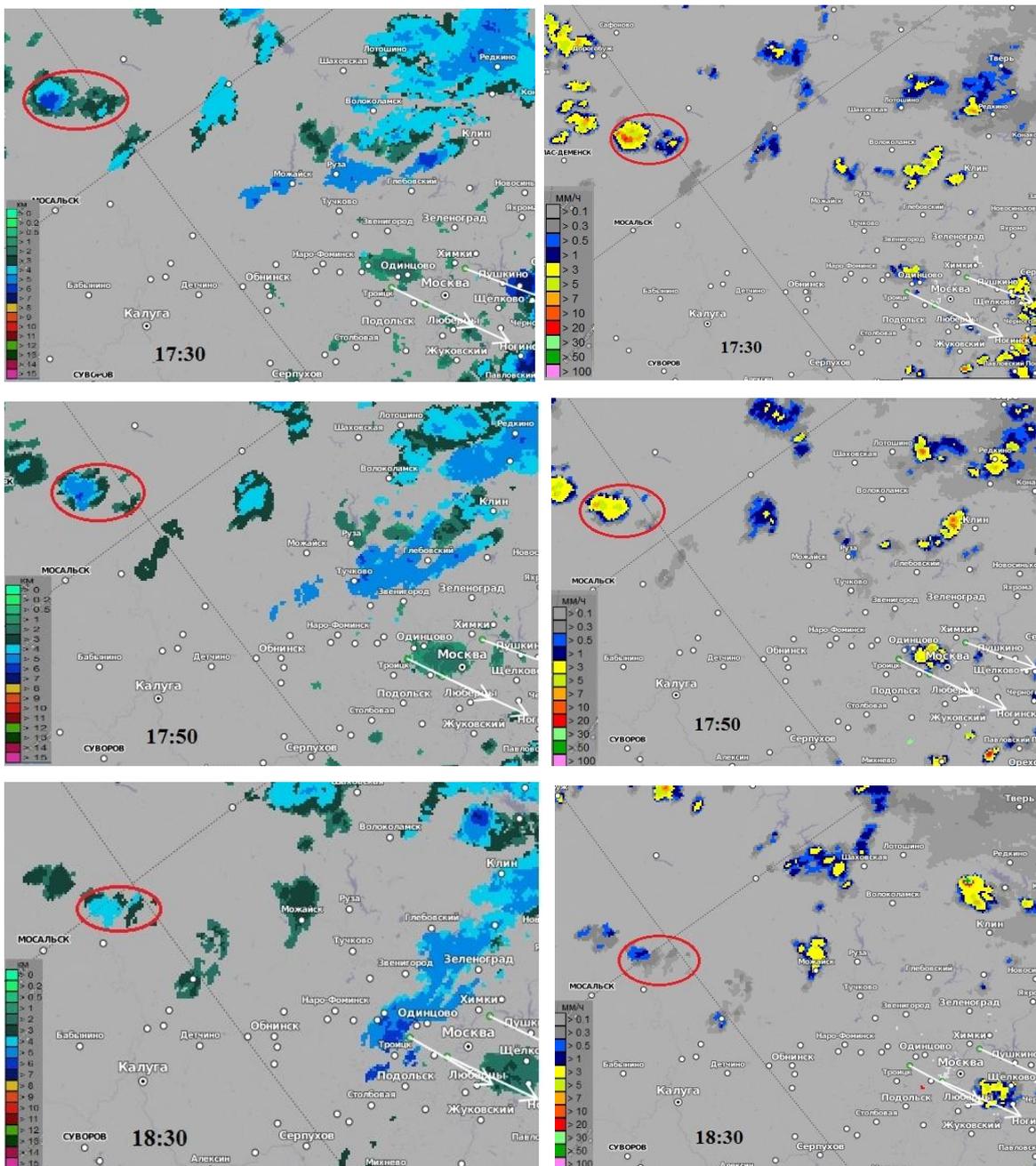


Рис. 5. Цифрокарты ДМРЛ с информацией о ВГО (левые карты) и интенсивности осадков (правые карты).

Заключение

В настоящее время в России появился самолет лаборатория, который оборудован всем необходимым для проведения специальных экспериментов по исследованию процессов происходящих в облаках при воздействиях. Приведенный пример такого эксперимента, проведенного в жестких условиях производственной работы, достаточно убедительно это подтверждает.

Список литературы

1. Азаров А.С., Борисов Ю.А., Вакуловский С.М., Данелян Б.Г., Петров В.В., Синькевич А.А., Струнин М.А., Фомин Б.А., Хаттатов В.У., 2013. «Самолет-лаборатория нового поколения для исследований атмосферы и подстилающей поверхности» // Сборник научных трудов

Международной научной конференции с элементами научной школы «Инновационные методы и средства исследований в области физики атмосферы, гидрометеорологии, экологии и изменения климата», СКФУ-ВГИ-РГГМУ, Ставрополь, 23 - 26 сентября 2013 г., с.102 – 105.

2. Базанин Н.В., Борисов Ю.А., Волков В.В., Дмитриев В.К., Живоглотов Д.Н., Маркоско А.А., Струнин А.М., Струнин М.А. Бортовые комплексы самолета-лаборатории нового поколения Як-42Д «Росгидромет» для измерения и регистрации навигационных параметров полета и термодинамических параметров атмосферы. - // Метеорология и Гидрология. // - 2014. - № 11. – сс. 109 – 116.

ПРИНЦИПЫ СОЗДАНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ БАЗЫ ДАННЫХ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ ПО АКТИВНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ НА ГРАДОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

Борисова Н.А., Геккиева Ж.М., Гергоков А.Х.

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

Одним из основных источников информации об изменениях состояния климатической системы в прошлом является эмпирико-статистический анализ данных наблюдений, на основе которого делается оценка возможных изменений в будущем. Первостепенную роль в создаваемой схеме климатического обслуживания играют фактические данные о состоянии всех компонент климатической системы Земли

Принципы формирования массивов архивированных данных во многом ограничивают возможности их непосредственного использования для исследовательских целей, что приводит к необходимости развития технологий формирования специализированных массивов данных, предназначенных для решения научно-прикладных задач в области исследования климата. Перечень создаваемых баз данных определен на основе требований Глобальной системы наблюдений за климатом и включает основные климатические параметры, такие как температура воздуха, атмосферные осадки, параметры свободной атмосферы и другие. Одним из главных требований к создаваемым массивам данных является их доступность. Поэтому должно быть обеспе-

чено функционирование открытого полноценного доступа к специализированным климатическим массивам исторических данных через Интернет, осуществляться регулярное пополнение и расширение состава массивов данными. [2]

Основными свойствами специализированных массивов, предназначенных для климатических исследований, являются: 1) *доступность*; 2) *распределенность баз климатических данных*; 3) *качество данных*; 4) *наличие метаданных*; 5) *регулярное обновление баз данных*; 6) *унификация баз данных*. Примерами крупных метеобаз данных могут служить такие базы как OpenGeoData.ru; meteonorm7 и т.д.

Градобития наносят большой ущерб агропромышленному производству, флоре, фауне и различным коммуникациям. В связи с этим в наиболее градоопасных регионах СССР с интенсивным сельскохозяйственным производством с 1967 г. осуществлялись работы по производственной защите сельхозкультур от градобитий. За 50-летний период работы противоградовых служб был накоплен обширный материал. Возникла необходимость логически систематизировать данные с целью обеспечения возможности их эффективного поиска и обработки информации в вычислительной системе и возможности получения этих данных другими пользователями. [3, 5]

Создание базы данных по материалам активных воздействий было разбито на несколько этапов. Первым этапом создания базы данных был первоначальный сбор данных по активным воздействиям из внешних источников информации, не относящимся к противоградовым службам. Основными источниками данных о выпадении града являются данные метеостанций, постов Росгидромета и других ведомств. Дополнительными источниками информации о выпадении града в районах, находящихся между пунктами наблюдений (метеостанциями и постами), являются данные сети МРЛ, органов сельского хозяйства, страховых компаний, пострадавших от градобития хозяйств и очевидцев.

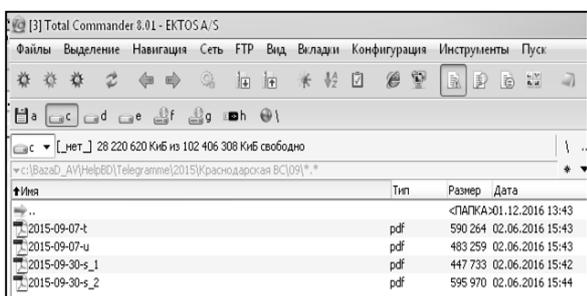


Рис.1. Название документа в БД по активным воздействиям, приходящего от ВС Росгидромета.

Вторым этапом создания базы данных была селекция данных, первичная обработка и приведение к унифицированному виду. На данном этапе весь массив информации собирался на один электронный адрес. Название каждого документа, отправляемого в базу данных о противоградовых работах, имеет определенный вид (см. рис.1). Расшифровка названия документов

входящих в БД по АВ представлена в таблице 1, где гг – год; мм – месяц; чч – число. Для

использования, а также осуществления внутреннего поиска и быстрого извлечения необходимых данных, информация, полученная от всех ВС Росгидромета, систематизировалась и заносилась в базу данных для хранения [1].

Третий этап создания базы данных – это систематизация и организация хранения накопленных данных, для последующего использования, а также осуществления внутреннего поиска и быстрого извлечения нужных документов.

Таблица 1

Расшифровка названия документов, входящих в БД по АВ

гг		мм		чч	Вид телеграмм	Номер документа за одно число, № п/п	
2015	-	08	-	30	- t (телеграмма) s (справка) и (уточнение) а (акт)	-	1

Были определены четыре основные задачи проектирования баз данных по материалам активных воздействий на градовые процессы: 1) *обеспечение хранения в базе данных всей необходимой информации*, которую могут предоставить противоградовые службы; 2) *обеспечение возможности получения данных по всем необходимым запросам*; 3) *сокращение избыточности и дублирования данных*; 4) *обеспечение целостности данных* (правильности их содержания): исключение противоречий в содержании данных, исключение их потери. [4] В таблице 2 более подробно рассмотрены задачи, решаемые в БД.

Таблица 2

Задачи, решаемые в БД

№	Группа задач	Задача	Используемые средства
1	Организация последовательности выполняемых операций	Выбор операции	Кнопочные формы, меню
2	Поиск информации	По совокупности признаков	Форма для поиска информации, запрос
		По числу	Форма, запрос
3	Ввод информации	Информация	Выбор операции, форма для ввода и корректировки информации
		Формирование справочника	Выбор операции, формы для ввода и корректировки информации справочника

№	Группа задач	Задача	Используемые средства
4	Корректировка информации	Корректировка информации	Выбор операции, поиск информации, форма для ввода и корректировки информации
		Корректировка справочника	Выбор операции, поиск информации, форма для ввода и корректировки информации справочника
		Удаление информации	Выбор операции, поиск информации, форма для ввода и корректировки информации
5	Удаление информации	Удаление информации из справочника	Выбор операции, поиск информации, форма для ввода и корректировки информации справочника
6	Просмотр информации	Информация в справочниках	Выбор операции, поиск информации, форма для просмотра информации справочника
8	Формирование сетевого варианта	Формирование сетевого варианта	Выбор сети, средства ОС
9	Разграничение доступа	Разграничение доступа	Средства Access, форма администратора
10	Создание копий данных	Создание копий данных	Средства ОС и Access
11	Архивирование СБД	Архивирование СБД	Средства Access, форма администратора
12	Формирование справочной системы	Формирование справочной информации	Средства формирования справочной информации

Основной вид информации, получаемой в результате противоградовых операций, является цифровым (в виде файлов обзора), графическим (в виде скриншотов карт-фрагментов воздействия) и текстовым (в виде телеграмм), то есть – большой спектр информации. Особенностью этой информации является ее важность для специалистов, занимающихся изучением проблем организации и проведения противоградовой защиты.

Четвертым этапом создания базы данных по материалам активных воздействий являлся глубокий анализ информации, систематизация и получение знаний. Основными объектами базы данных «Материалы активных воздействий на градовые процессы» являются: дата проведения активного воздействия и противоградовая служба. Противоградовая служба состоит из нескольких военизированных отрядов, которые проводят воздействия на градовые процессы. После воздействия противоградовые службы присылают телеграммы, в которых переданы основные характеристики проделанной работы за данную дату. Телеграммы (уточнения, акты и т.д.) переда-

ются по датам в течение всего сезона противоградовой защиты. В конце каждого сезона собирается полная информация за проделанную работу, и рассчитываются параметры определяющие эффективность работы противоградовых служб. [6, 7] Основными параметрами, описывающими активные воздействия в течение сезона (по датам) являются:

1. Описание градового процесса (тип градового процесса, вид осадков (дождь, град и т.д.), характеристики осадков по районам выпадения).
2. Ущерб (уточняют путем обследования полей специальной комиссией)
3. Израсходованное количество ракет.
4. Остаток ракет по службе.
5. Количество объектов воздействий (общее количество и количество объектов воздействия по категориям)
6. Площадь повреждения сельхоз культур (га).
7. Площадь повреждения сельхоз культур в пересчете на 100% гибель (га):
8. Общий предотвращенный ущерб по данным экспресс оценке, млн. руб. на данное число [7].

Площадь повреждения сельхоз культур и площадь градобитий в пересчете на 100 % повреждения определяют по данным радиолокационных наблюдений и уточняют путем обследований полей выпадения града комиссией

Выходная информация характеризуется высокой степенью организованности, пользователь базы данных может легко ориентироваться в большом количестве информации благодаря удобной группировке данных по названиям ВС Росгидромета, а так же по годам, месяцам и дням. Это информация поможет специалистам анализировать ход градового процесса, категорию объекта воздействия, число выпущенных по градовому облаку ракет, а также поможет судить об эффективности воздействия на градовый процесс или о факторах помешавших успешности воздействия.

Пятым этапом создания базы данных по материалам активных воздействий является создание структуры базы данных и внедрение ее в эксплуатацию.

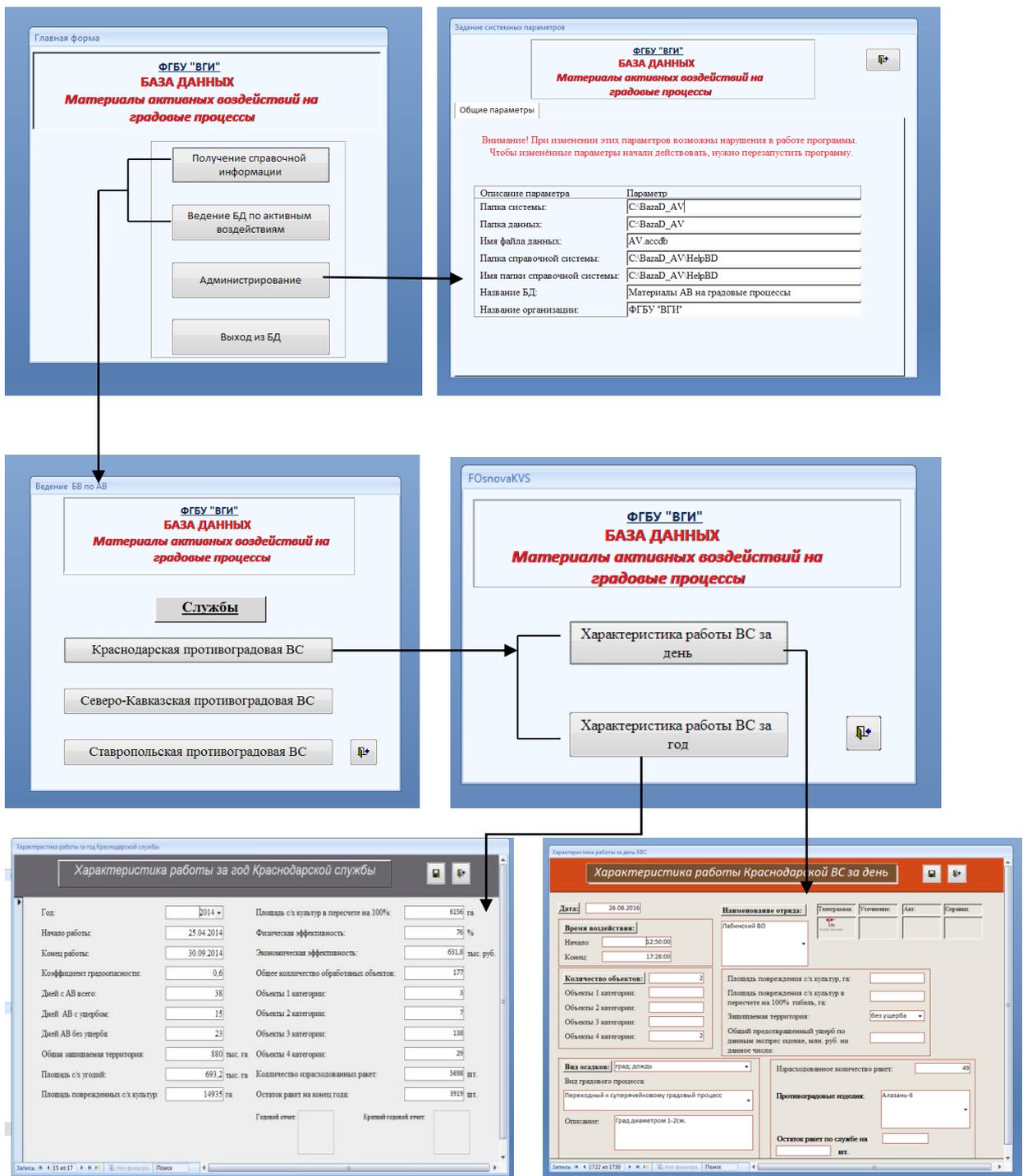


Рис. 2. Основные формы базы данных (на примере Краснодарской противоградовой службы)

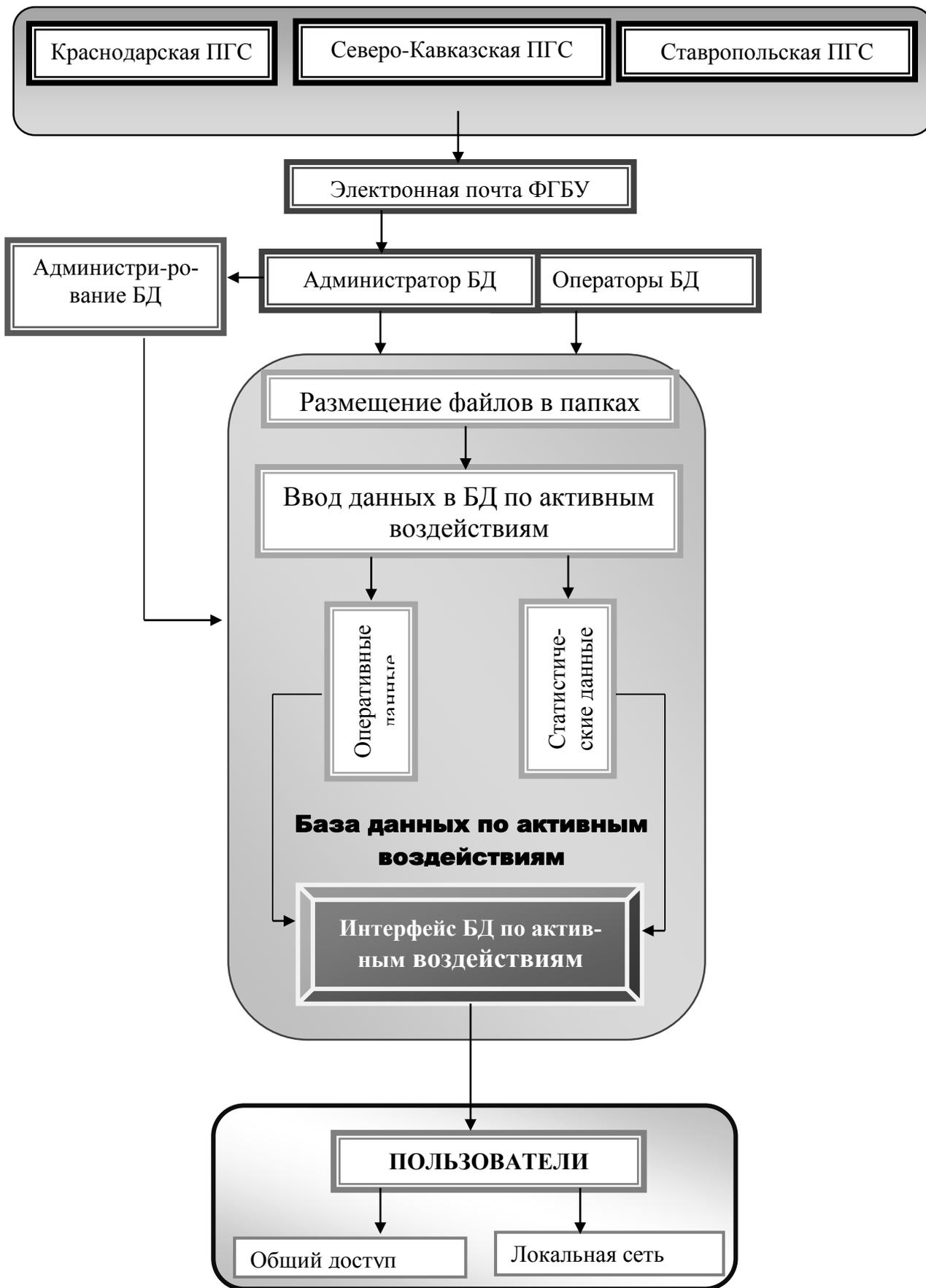


Рис.3. Схема организации ведения базы данных «Материалы активных воздействий на градовые процессы»

Важным преимуществом предлагаемой технологии создания информационных систем и электронных архивов является значительное расширение числа пользователей. Организованное хранение огромного эмпирического материала, всех описаний и взаимосвязей компонент в единой базе данных по материалам активных воздействий позволяет сохранить огромный объем научных результатов для исследователей. [2]

Уровень развития технологий, математических методов, наукоемкого прикладного программного обеспечения делают возможным создание нового поколения информационно-вычислительного инструментария для решения разнообразных научных задач, провести глубокий анализ информации, систематизацию и получить новые знания. На основе собранных и обработанных данных о выпадении града можно автоматически рассчитать среднее годовое и максимальное количество дней в году с градом, среднюю годовую площадь градобитий в пересчете на 100% повреждения, средний годовой процент потерь урожая и годовой ущерб от градобитий.

Таким образом, эта информация специалистам поможет более детально изучить ход градового процесса, категории объектов воздействия, число израсходованных ракет, провести оценку эффективности воздействия на градовый процесс или о факторах, помешавших успешности воздействия, с учетом накопившихся данных за период воздействия на градовые процессы. Каждый пользователь данной базы имеет возможность выбрать интересующую его информацию и использовать ее для изучения интересующей проблемы.

Список литературы

1. Абшаев М.Т. Оперативный контроль эффективности воздействия на градовые процессы // Тр. ВГИ. - 1981. - Вып. 72. - С. 81 - 99.
2. Сивачок С.Г. Методы создания информационной базы банка данных "Приземная метеорология и климат": автореферат дис. ... кандидата физ-мат. наук : 11.00.09.- Ленинград, 1990.- 18 с.:
3. Абшаев М.Т., Малкарова А.М., Борисова Н.В. О тенденции изменения климата на Северном Кавказе // Труды Всемирной конференции по изменению климата. - М.: Гидрометеиздат, 2003.
4. Епанешников А.М., Епанешников В.А. Практика созданий приложений в Access 2007. Москва. Диалог МИФИ. 2009. С. 440
5. Малкарова А.М. Статистическая оценка эффективности ракетно-артиллерийской технологии противоградовой защиты // Тезисы Всероссийской конференции по ФО и АВ на гидромет. процессы. - Нальчик. 2001. С.125-127.
6. РД 52.37.732-2010. Методы оценки эффективности активного воздействия на градовые процессы и порядок отчетности о проведении противоградовой защиты.
7. РД 52.37.746–2010 Порядок сбора и обработки данных о градобитии, Нальчик, 2010. -19с.

МЕТОД СНИЖЕНИЯ РИСКОВ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ, СВЯЗАННЫХ С ГРАДОБИТИЯМИ

Ашабоков Б.А.^{1,2}, Федченко Л. М.¹, Ташилова А. А.¹

¹ ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик,

² Институт информатики и проблем регионального управления КБНЦ РАН, г. Нальчик

Сельское хозяйство является одной из самых погодозависимых отраслей экономики, что делает ослабление зависимости от погодных условий одним из важнейших условий повышения устойчивости его функционирования. Особенно значительными для данной отрасли являются последствия опасных погодных явлений (засухи, заморозки, градобития и т.д.) - ежегодный ущерб, наносимый этими явлениями сельскому хозяйству страны, может исчисляться многими миллиардами рублей. При этом важно отметить, что вследствие потепления климата происходит увеличение частоты и разрушительной силы опасных погодных явлений, расширяются охваченные ими территории [4]. Количество таких явлений, способных нанести ущерб экономике и жизнедеятельности населения, на территории РФ доходит примерно до 500 в год. Значительную часть из них (около 25%) составляют локальные конвективные явления (ливень, град, шквал и т.д.). В настоящее время можно считать установленным, что в будущем характер функционирования сельского хозяйства и других отраслей экономики в существенной степени будет определяться величиной потерь, связанных с этими явлениями погоды [1,3].

В настоящей работе рассматривается проблема снижения рисков в сельском хозяйстве, связанных с градобитиями. Обсуждаются основные задачи, возникающие на пути решения данной проблемы, возможные подходы к снижению связанных с этими явлениями рисков.

1. Постановка задачи снижения рисков в сельском хозяйстве, связанных с градобитиями, и особенности информационного ее обеспечения

Для снижения потерь от градобитий возможно использование двух подходов. Одним из них является подход, основанный на вмешательстве в процессы осадкообразования в градовых облаках путем активного воздействия на них. Методы воздействия на градовые облака начали свое интенсивное развитие во второй половине прошлого века, и оно продолжается до настоящего времени, а противоградовые работы уже достаточно длительный период времени ведутся в широких масштабах в разных странах мира. Но, несмотря на это, применяемые методы активного воздействия на градовые облака до настоящего времени основаны на использовании различных концепций воздействия на град, а не на научно обоснованных методах. Следует также отметить, что из-за расширения охваченных градобитиями территорий (вследствие потепления климата) возможности использования данного подхода становятся все более ограниченными.

Другой подход предполагает снижение потерь от градобитий без вмешательства в процессы образования и развития градовых облаков. Он основан на использовании того факта, что повреждаемость сельскохозяйственных культур градом существенно различна для различных культур. Этот подход до настоящего времени не получил широкого распространения. Это можно объяснить тем, что на пути эффективного его использования встречаются задачи, решение которых связано с серьезными трудностями. К ним можно отнести, например, такие задачи, как оценка градоопасности рассматриваемой территории в предстоящем году, а также его последствий (в предстоящем году), выбор наиболее эффективного из множества мероприятий, использование которых возможно для снижения рисков от градобитий, и другие. Основные трудности решения этих задач обусловлены проблемами информационного их обеспечения. Отметим, что, если градоопасность предстоящего года можно оценить более или менее надежно при наличии достаточно длинных временных рядов характеризующих их показателей, то прогноз места и времени выпадения града и возможных его последствий возможен лишь на короткие сроки.

Особенности информационного обеспечения делают перспективным рассмотрение данной проблемы в рамках теории принятия решений. В этом случае возникает необходимость решения таких задач, как формирование множества мероприятий (действий), которых можно использовать для снижения потерь от градобитий, и выбор наиболее приемлемого (с точки зрения лица, принимающего решение) мероприятия из этого множества.

Остановимся на используемой в данном подходе информации и на методах решения задач данного подхода. Как было отмечено, подход основан на использовании для снижения рисков различия в повреждаемости сельскохозяйственных культур градом, отсюда и механизмом управления рисками от градобитий становится структура производства сельхоз культур. Кроме этого, подход позволяет учитывать и использование таких пассивных средств защиты растений от града, как сетки. Последствия градобитий для сельского хозяйства определяются многими факторами. К ним относятся характеристики градовых осадков (распределение по размерам градин, их концентрация, продолжительность и площадь выпадения града и т.д.) и производственно-экономические показатели сельского хозяйства (повреждаемость сельскохозяйственных культур градом, фазы их развития в момент выпадения града, структура производства сельскохозяйственных культур и другие). А, как известно, имеющаяся информация о градовых процессах на защищаемой территории ограничена приближенными и часто неполными данными о радиолокационных параметрах градовых облаков, о частоте и площади выпадения града. Кроме этого, исследования повреждаемости сельскохозяйственных культур градом, которая сложным образом зависит от характеристик градовых осадков и фазы развития культур, пока еще существенно ограничены.

Остановимся в общем случае на формулировке задачи снижения рисков, связанных с опасными погодными явлениями [2,5]. Пусть имеется некоторое множество \mathbf{A} допустимых действий (мероприятий), которые можно использовать для снижения рисков в той или иной отрасли экономики или сфере деятельности, связанных с конкретным опасным явлением погоды. Каждое действие из этого множества должно привести к снижению рисков в результате перехода отрасли экономики в состояние, более предпочтительное по сравнению с состоянием без его проведения. Каждому действию \mathbf{a} из этого множества поставлено в соответствие n числовых показателей $X_1(\mathbf{a}), X_2(\mathbf{a}), \dots, X_n(\mathbf{a})$, которые отображают каждое действие \mathbf{a} из множества \mathbf{A} в точку n -мерного пространства исходов (x_1, x_2, \dots, x_m) . Из имеющегося набора действий необходимо выбрать одно, которое в большей степени удовлетворяет лицу, принимающее решение.

Можно заметить, что полученная задача является многомерной неопределенной задачей принятия решений - оценка предпочтительности возможных исходов осуществляется с помощью n критериев. Наиболее эффективным и универсальным подходом к решению подобных задач является использование теории полезности [2]. Процедура построения данной функции является достаточно сложной и требует использования специальной информации.

Часто задачи снижения рисков в различных сферах деятельности, включая и сельское хозяйство, можно рассматривать как одномерные неопределенные задачи. Снижение рисков в сельском хозяйстве от градобитий тогда будет связано с выбором и проведением определенного мероприятия (или действия, если пользоваться терминологией теории принятия решений) из некоторого их множества $A_1, A_2, A_3, \dots, A_M$. Каждое действие из этого множества должно привести к снижению рисков в результате его перехода в состояние, более предпочтительное по сравнению с исходным. Состояния сельского хозяйства после проведения мероприятий по снижению рисков, связанных с градобитиями, обозначим через $U_1, U_2, U_3, \dots, U_N$. Тогда каждой паре (A_i, U_j) можно поставить в соответствие S_{ij} , который называется исходом и равен снижению потерь сельского хозяйства от града в результате проведения конкретного мероприятия. Для выбора наиболее приемлемого из множества мероприятий далее следует составить таблицу 1.

Таблица 1

Исходы S_{ij} , соответствующие мероприятиям A_i и состояниям $U_1, U_2, U_3, \dots, U_N$ сельского хозяйства

	U_1	U_2	U_3	---	U_N
A_1	S_{11}	S_{12}	S_{13}	---	S_{1N}
A_2	S_{21}	S_{22}	S_{23}	---	S_{2N}
A_3	S_{31}	S_{32}	S_{33}	---	S_{3N}
---	---	---	---	---	---
A_M	S_{M1}	S_{M2}	S_{M3}	---	S_{MN}

Остановимся на формировании множества мероприятий (действий), которое является одной из важнейших задач рассматриваемой проблемы. При решении данной задачи необходимо учитывать, что проведение того или иного мероприятия из заданного множества связано с затратами материальных и других ресурсов. Кроме этого на объемы производства сельскохозяйственных культур должны быть наложены определенные условия. Поэтому финансовые и другие ресурсы сельхозпроизводителя и требования к объемам производства сельскохозяйственных культур являются основными факторами, формирующими множество $A_1, A_2, A_3, \dots, A_M$. Следует отметить, что качество решения задачи снижения рисков в существенной степени будет зависеть от удачного формирования этого множества.

2. Методы решения задачи снижения рисков, связанных с градобитиями

В случае градобитий возможны два способа формирования множества $A_1, A_2, A_3, \dots, A_M$, которым можно поставить два способа решения задачи снижения рисков. Первый способ основан на определении элементов множества $A_1, A_2, A_3, \dots, A_M$ путем перебора структур производства сельскохозяйственных культур с учетом ограничений, наложенных на объемы производства культур и на объемы используемых для этой цели ресурсов. Недостатком данного способа можно считать, что множество $A_1, A_2, A_3, \dots, A_M$ может оказаться достаточно ограниченным. После формирования данного множества определяются исходы S_{ij} . Затем для выбора наиболее приемлемого из имеющегося набора мероприятий можно пользоваться одним из существующих критериев [5]. Основные проблемы решения задачи в этом случае, как можно заметить, наряду с формированием множества действий $A_1, A_2, A_3, \dots, A_M$ связаны с определением исходов S_{ij} . Качество выбираемого способа действия также зависит от корректного вычисления значений S_{ij} .

Остановимся на результатах некоторых модельных расчетов, для проведения которых был использован первый способ. Они были проведены для природно-климатических и производственно-экономических условий Прохладненского района КБР (степная зона КБР). Для решения данной задачи был проведен анализ градоопасности рассматриваемого района и были получены вероятности, соответствующие различным числам дней с градом (таблица 2). Эти результаты следует уточнять с получением новых данных о градовых процессах.

Важно отметить, что наличие таких данных об опасных погодных явлениях сводит решение рассматриваемой задачи к решению задачи принятия решений в условиях риска.

Таблица 2.

Число дней с градом (N) и соответствующие различным его значениям вероятности, полученные по данным за 1958-2008 гг.

N	0	1	2	3
p(N)	0,59	0,31	0,08	0,02

При проведении расчетов, исходя из данных таблицы 2, было предположено, что выпадение града в районе будет наблюдаться максимальное число раз (три раза), кроме этого случаи выпадения града рассматриваются как независимые события. Площади выпадения града в этих случаях были оценены, исходя из многолетних наблюдений. Для проведения расчетов были использованы следующие значения: $S_1=600$, $S_2=1000$, $S_3=700$ га. Предположим, что на рассматриваемых территориях производятся следующие сельскохозяйственные культуры: пшеница, кукуруза, овес, картофель. Кроме этого, при проведении расчетов использовались данные Госкомстата КБР о показателях сельского хозяйства республики за последние годы. Что касается повреждаемости культур градом, то были использованы результаты полевых исследований для пшеницы и кукурузы, которые были проведены в Высокогорном геофизическом институте. По результатам исследований в данной работе, при одних и тех же характеристиках града повреждаемость пшеницы заметно выше, чем повреждаемость кукурузы. В случае, когда кинетическая энергия градин равна 100 дж/м^2 , например, повреждаемость кукурузы получается равной примерно $k_k=0,37$ (или 37%), а повреждаемость пшеницы - около $k_n=0,7$ (или 70%). А для остальных культур, из-за отсутствия результатов таких исследований, использовались данные, полученные в результате опроса специалистов сельского хозяйства. Повреждаемость овса, по этим данным, меньше чем пшеницы. Поэтому было предположено, что соответствующее отмеченному значению кинетической энергии градин значение повреждаемости овса равно 60%.

Расчеты проводились для следующих структур производства отмеченных культур (указаны площади, занимаемые пшеницей, кукурузой, овсом и картофелем на первом, втором и третьем участках), для которых было предположено, что выполняются отмеченные выше требования:

1. 300,100,100,100 га, 500,200,200,100 га, 300, 200, 100, 100 га.
2. 300,100,100,100 га, 500,200,200,100 га, 300, 200, 100, 100 га.
3. 240,160,100,100 га, 400,300,200,100 га, 240, 260, 100, 100 га.
4. 210,190,100,100 га, 350,350,200,100 га, 210, 290, 100, 100 га.
5. 150,250,100,100 га, 250,450,200,100 га, 150, 350, 100, 100 га.
6. 240,100,160,100 га, 400,200,300,100 га, 240, 200, 160, 100 га.
7. 150,100,250,100 га, 250,200,450,100 га, 150, 200, 250, 100 га.
8. 240,100,100,160 га, 400,200,200,200 га, 300, 200, 100, 100 га.
9. 150,100,100,250 га, 250,200,200,350 га, 150, 200, 100, 250 га.
10. 300,100,80,120 га, 500,200,160,140 га, 300, 200, 80, 120 га.

Валовые объемы производства продукции (млн. руб.) при отсутствии града (V_0) и при его выпадении (V_T) на рассматриваемых участках приводятся в таблице 3. Значения этих показателей на i – ом участке были вычислены на основе следующих выражений:

$$V0_i = \sum_{j=1}^4 x_{ij} Y_{ij} C_{ij} \quad (1)$$

$$VГ_i = \sum_{j=1}^4 (1-k_{ij}) x_{ij} Y_{ij} C_{ij} \quad (i=1, 2, 3) \quad (2)$$

где $x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, x_{i4}$ – площади, занимаемые соответственно пшеницей, кукурузой, овсом и картофелем на i -ом участке, $Y_{i1}, Y_{i2}, Y_{i3}, Y_{i4}$ – урожайности, $C_{i1}, C_{i2}, C_{i3}, C_{i4}$ – цены реализации и $k_{i1}, k_{i2}, k_{i3}, k_{i4}$ – повреждаемости градом этих же культур на i -ом участке ($i = 1, 2, 3$).

Таблица 3.

Валовой объем производства продукции на рассматриваемых участках при отсутствии града ($V0_1, V0_2, V0_3$) и при его выпадении ($VГ_1, VГ_2, VГ_3$) ожидаемые значения валового сбора культур (V), соответствующие действиям 1-10 (млн. руб.)

	$V0_1$	$VГ_1$	$V0_2$	$VГ_2$	$V0_3$	$VГ_3$	V
	$P_{10} = 0,59$	$P_{1Г} = 0,31$	$P_{20} = 0,92$	$P_{2Г} = 0,08$	$P_{30} = 0,98$	$P_{3Г} = 0,02$	
1	46,5	30,3	60,9	36,6	51,8	33,6	147,2
2	47,1	31,0	61,8	37,7	52,4	34,3	149,4
3	47,7	31,7	62,8	38,9	53,0	35,0	151,5
4	48,2	32,4	63,7	40,1	53,5	35,7	153,4
5	49,4	33,8	65,6	42,4	54,7	37,1	157,7
6	45,8	30,2	59,7	36,5	51,1	33,6	145,0
7	44,8	30,1	58,0	36,3	50,1	33,4	141,8
8	61,7	43,5	86,2	58,5	67,0	46,8	200,5
9	84,5	63,2	124,2	91,5	89,8	66,6	280,4
10	51,8	34,7	71,5	45,4	57,1	38,1	167,5

Обращает на себя внимание то, что валовые объемы производства продукции на всех участках при отсутствии града и при его выпадении существенно зависят от структуры сельскохозяйственных культур. Разброс между значениями данного показателя на втором участке для вариантов 7 и 9, например, при отсутствии града составляет 66,2 млн. руб., что заметно больше минимального значения. В случае выпадения града он равен 55,2 млн. руб. Это указывает на то, что подбор соответствующей структуры сельскохозяйственных культур может быть эффективным механизмом снижения рисков. Для выбора более эффективной структуры производства сельскохозяйственных культур из отмеченных выше критериев был использован критерий Лапласа. Согласно данному критерию, наилучшей из рассматриваемых структур сельскохозяйственных

культур является та, которой соответствует максимум ожидаемого валового объема производства продукции с учетом выпадения града. В связи с этим, пользуясь данными таблицы 2, следует определить вероятности отсутствия (P_{10}, P_{20}, P_{30}) и выпадения града ($P_{1Г}, P_{2Г}, P_{3Г}$) на участках 1, 2 и 3. Эти вероятности указаны в таблице 3. Ожидаемые объемы производства продукции, соответствующие различным мероприятиям (различным структурам сельскохозяйственных культур), вычисляются с помощью выражения

$$V = P_{10} V_{01} + P_{20} V_{02} + P_{30} V_{03} + P_{1Г} V_{Г1} + P_{2Г} V_{Г2} + P_{3Г} V_{Г3} .$$

Из таблицы 3 видно, что наилучшим является 9 мероприятие, которому соответствует $V=280,4$ млн. руб. Можно еще заметить, что наихудшим является мероприятие 7, которому соответствует $V=141,8$ млн. руб. Разброс между этими значениями V , как видно из таблицы, составляет 138,6 млн. руб. Он незначительно меньше ожидаемого объема производства продукции в случае варианта 7. Вместе с тем, разница между структурами производства продукции в этих вариантах заключается лишь в том, что площадь пашни, занимаемая картофелем, увеличена на 100 га на всех участках за счет площади пашни, занимаемой овсом.

Результаты решения модельных задач показывают, что предложенный подход к снижению рисков в сельском хозяйстве, связанных с градобитиями, является достаточно эффективным и его можно использовать для решения практических задач.

3. Формулировка линейно – программной задачи снижения рисков, связанных с градобитиями

Остановимся далее на другом способе формирования возможных мероприятий по снижению рисков (структур производства сельскохозяйственных культур). Он основан на использовании модели, связывающей структуру производства сельскохозяйственных культур с другими производственно-экономическими показателями. В качестве такой модели можно использовать модель оптимизации структуры производства сельскохозяйственных культур с учетом ограничений, наложенных на объемы производства продукции, на используемые для этой цели ресурсы и т.д. Запишем данную модель в простейшем случае (с учетом ограничений на объемы производства сельскохозяйственных культур, на площади пашни, на финансовые ресурсы).

Введем следующие обозначения. Пусть в сельском хозяйстве района на m участках производится n культур. Площади пашни, занимаемые этими культурами на этих участках, обозначим x_{ij} ($i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n$).

Общая площадь пашни пусть будет равна x_0 . Себестоимости производства культур s_{ij} , а также их урожайности Y_{ij} , ($i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n$) считаются известными. Объем финансовых ресурсов, используемых для производства сельскохозяйственных культур, обозначим через Φ_0 .

При определении объемов производства этих культур должны учитываться, например, потребности сельского хозяйства и перерабатывающих предприятий W_j . Тогда систему ограничений модели, описывающих производство сельскохозяйственных культур на i – ом участке, в общем случае можно записать в виде:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} \leq x_0, \quad (i = \overline{1, m}) \quad (3)$$

$$x_{ij} = \alpha_{ij} x_{i0}, \quad (i = \overline{1, m}) \quad (4)$$

где α_{ij} - доля пашни, занимаемой i –ой сельскохозяйственной культурой на участке x_{i0}

$$\sum_{i=1}^m y_{ij} x_{ij} \geq W_j, \quad (j = \overline{1, n}) \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m y_{ij} s_{ij} x_{ij} \leq \Phi_0. \quad (6)$$

Получена система линейных ограничений, которым удовлетворяют производственно-экономические показатели сельского хозяйства.

Остановимся на записи целевой функции модели. В качестве такой функции можно использовать один из критериев, которые используются для выбора наилучшего из имеющегося множества мероприятий. Как в предыдущем случае, можно использовать критерий Лапласа (максимум ожидаемого валового объема производства продукции). Тогда задача принятия решений сводится к задаче оптимизации структуры производства сельскохозяйственных культур, в которой при $i=3$ целевая функция записана в виде:

$$V = P_{10} V_{01} + P_{20} V_{02} + P_{30} V_{03} + P_{1Г} V_{Г1} + P_{2Г} V_{Г2} + P_{3Г} V_{Г3}. \quad (7)$$

В этом выражении V - ожидаемый объем производства сельскохозяйственной продукции, V_{0i} и $V_{Гi}$ ($i=1,2,3$ номера участков) определяются с помощью выражений (1) и (2). Неизвестными переменными задачи (3)–(7) являются площади пашни, занимаемые сельскохозяйственными культурами на различных участках x_{ij} ($i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n$). Модель (3) - (7) можно дополнить и другими ограничениями, описывающими использование тех или иных ограниченных ресурсов или технологию производства сельскохозяйственной продукции.

Список литературы

1. Балкизова А.Х, Ташилова А.А., Пшихачева И.Н. Основные этапы и задачи проблемы адаптации аграрного сектора к изменениям климата/Материалы Международного симпозиума

«Устойчивое развитие: проблемы, концепции, модели». КБНЦ РАН, Нальчик, 28 июня – 3 июля, т.1, 2013. – С. 106–109.

2. Кини Р.Л., Райфа Х. Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения. М.: Радио и связь, 1981. -560 с.

3. Орсоева И.М., Бекшокова А.Б., Блиев А. А. Об одном подходе к решению задачи снижения рисков в сельском хозяйстве, связанных с опасными погодными явлениями//Изв. КБНЦ РАН, №1, 2016.

4. Парниковый эффект, изменение климата и экосистемы./Под ред. Б. Болина, Б. Дееса, Дж. Ягера, Р. Уорика, Л.: Гидрометеиздат, 1989. 558с.

5. Таха Х. Введение в исследование операций. Т.2. М.: Мир, 1985.-496 с.

СЕКЦИЯ 4. ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ АКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

К ВОПРОСУ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ РОССИЙСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ АКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ОБЛАКА

Ким Н.С.¹, Корнеев В.П.¹, Частухин А.В.¹, Щукин Г.Г.²

¹ АНО «Агентство АТТЕХ», г. Москва

² ВКА имени А.Ф. Можайского, г. Санкт Петербург

Введение

Работы по активным воздействиям (АВ) на облака в целях искусственного увеличения осадков (ИУО) и борьбы с градом проводятся в нашей стране более шестидесяти лет. В последние два десятилетия все большее распространение получают работы по защите мегаполисов и других объектов от неблагоприятных погодных явлений, связанных с облаками, такие как рассеяние облаков, снижение интенсивности ливневых осадков и пр. АВ на основе российских технологий успешно проводятся также в странах СНГ и дальнем зарубежье.

И хотя экологическая безопасность применяемых при АВ реагентов подтверждена многолетними исследованиями их влияния на окружающую среду, результаты таких исследований широкой общественности малоизвестны. Это подчас вызывает неоднозначные суждения о целесообразности тех или иных работ (проектов) по АВ даже кратковременного характера. Для

того, чтобы внести определенную ясность в эти проблемы, рассмотрим характеристики реагентов, используемых при проведении работ по АВ на облака, технологии проведения воздействий, а также результаты исследований, посвященные этим вопросам, полученные в специализированных НИИ России и за рубежом.

1. Реагенты, используемые в работах по регулированию осадков

Современные концепции АВ базируются на возможности трансформации микрофизической структуры облаков, находящихся в фазовой и коллоидальной неустойчивости, посредством реагентов с задаваемыми физико-химическими свойствами [4,6]. При реализации этих концепций в качестве реагентов используются, в основном, вещества, обладающие высокой льдообразующей способностью в переохлажденной облачной среде - льдообразующие аэрозоли, хладореагенты. Гигроскопические реагенты используются преимущественно при воздействиях на теплые облака и в работах по АВ на территории России практически не применяются. Отдельную группу представляют порошкообразные реагенты, используемые для подавления развития (разрушения) конвективных облаков, когда при наличии конвективной (вертикальной) неустойчивости атмосферы в развивающихся конвективных облаках достаточно воздействовать малым импульсом, чтобы в облаках создавались мощные нисходящие потоки, приводящие к прекращению роста и разрушению облаков.

1.1 Льдообразующие реагенты

Льдообразующие реагенты это вещества (смесь веществ) для воздействия на переохлажденные облака с целью получения дополнительных ледяных частиц. Применение льдообразующих реагентов основано на наличии в осадкообразующей облачности наряду с кристаллами обширных зон жидко-капельной влаги (вплоть до температур -35° -40° °С). Поскольку насыщающая упругость водяного пара надо льдом меньше, чем над водой, то при введении в такой объем достаточного количества зародышевых ледяных частиц начинается процесс «перегонки» водяного пара на эти частицы и испарение облачных капель.

В мировой практике АВ, включая Россию, наибольшее распространение получили льдообразующие пиротехнические составы на основе йодистого серебра (AgI). Это обусловлено высокой льдообразующей способностью аэрозоля этого вещества, устойчивостью к термической возгонке, экологической безопасностью. При сгорании грамма пиротехнических смесей с 8% содержанием AgI выход активных ядер кристаллизации при температуре среды -10° °С составляет не менее $5 \cdot 10^{12}$ частиц. Высокая активность AgI объясняется наибольшей близостью его кристаллографической структуры к структуре льда.

1.2. Хладореагенты

В качестве хладореагентов в российских технологиях АВ используются сухой лед (CO_2) и жидкий азот (N_2). Сухой лед вызывает образование кристаллов льда при температуре облака до -1°C . Принцип засева сухим льдом состоит в том, что при падении в толще облака гранул CO_2 за счет их низкой температуры (около -80°C) воздух в непосредственной близости от траектории падения охлаждается до температуры ниже -40°C . В результате происходит спонтанное замерзание переохлажденных капель, являющихся в последующем основой механизма осадкообразования.

Применение жидкого азота (температура кипения -196°C) также основывается на использовании его низкой температуры для резкого охлаждения облачной среды. Выход активных ядер кристаллизации с 1 грамма жидкого азота составляет примерно 10^{13} ядер/г.

В отличие от засева гранулами твердой углекислоты, образование частиц льда под действием N_2 происходит лишь вдоль трассы полета самолета. Поэтому на практике такой метод используется преимущественно для засева относительно тонких переохлажденных облачных слоев или как дополнительное средство при использовании AgI или CO_2 . Существенными достоинствами жидкого азота являются его наиболее высокие среди всех реагентов температурный порог действия ($-0,5^\circ\text{C}$) и экологичность.

1.3. Порошкообразные реагенты

При проведении работ по уменьшению осадков и борьбе с градом для подавления развития конвективных облаков или их разрушения применяют также грубодисперсные порошкообразные реагенты, вводимые в вершины облаков с помощью самолетных средств. При этом в облаке создаются мощные динамические импульсы скорости, направленные вниз. Эффективность действия реагентов зависит от их состава, гидрофильности, удельного веса и дисперсности. Взаимодействие гидрофильных частиц с облачными каплями приводит к быстрому укрупнению последних до размера дождевых и усилению нисходящего потока выпадающими осадками. Вследствие этого при прочих равных условиях процесс разрушения облаков за счет более высоких скоростей нисходящих движений протекает быстрее, чем их рост.

Детальное описание методов и технических средств АВ на облака в целях искусственного увеличения и уменьшения осадков представлено в [7,9].

2. Загрязнение окружающей среды реагентами

2.1. Загрязнение льдообразующими реагентами на основе AgI

Повышенное внимание к реагентам на основе AgI связано с тем, что это вещество, а также йод, содержащийся в продуктах сгорания пиротехнических смесей, относятся в соответствии с ГОСТ 12.1.007-76 ко второму классу опасности. Йодид серебра практически не растворяется в воде. Однако постоянное присутствие в атмосфере аммиака, соединений цинка, сульфатов

приводит к быстрому разложению AgI, вследствие чего в водных средах всегда имеются не связанные ионы серебра и йода. В связи с этим фактически речь идет об экологическом влиянии на природную среду этих веществ при введении данного реагента в облачную атмосферу. Спрогнозировать уровень загрязнения окружающей среды серебром при работах по модификации осадков можно, проанализировав данные о содержании компонентов реагента в районах систематического и интенсивного его применения, например, в районах проведения противогололедных работ.

Исследованиями установлено, что концентрация серебра в воздухе в сезоны градозащиты на Северном Кавказе составляла в среднем от $6,4 \cdot 10^{-5}$ до $8,3 \cdot 10^{-5}$ $мкг/м^3$ [2], в Молдавии – $0,001–0,043$ $мкг/м^3$ [11], что на несколько порядков ниже величины предельно допустимых концентраций (ПДК = 10 $мкг/м^3$).

Низкое содержание серебра отмечается и в открытых водоемах, расположенных на защищаемых от града территориях (ЗТ). Так, в Молдавии в водоемах ЗТ за весь девятилетний период наблюдений после сезонов противогололедной защиты концентрация серебра находилась в пределах $1,7–7,4$ $мкг/л$, в водоемах контрольной территории (КТ) – $0,9–4,1$ $мкг/л$ при ПДК серебра в воде 50 $мкг/л$.

Для оценки нагрузок AgI на окружающую среду при проведении работ по ИУО самолетным методом в таблице 1 приведены сравнительные данные по АВ в Сирии, Иране и Якутии [8].

Таблица 1

Сравнительные характеристики расхода AgI в различных проектах АВ

<i>Цель проекта, страна</i>	<i>Годы реализации проектов</i>	<i>Площадь проведения работ по АВ, тыс. км²</i>	<i>Среднее количество дней с АВ за сезон</i>	<i>Средний сезонный расход AgI в год, г/км²</i>	<i>Средний расход AgI за сезон АВ, г/км²</i>
Сирия, ИУО	1992 – 1997	150	35	81759	0,545
Иран, ИУО	1999 – 2001	125 (1999 г)	31	13432	0,107
		280 (2000 г)		15394	0,055
		385 (2001 г)		17849	0,046
Якутия, ИУО	1995 – 1997, 2003 – 2005	1500	9	7337	0,005

Сирийский проект по увеличению осадков является наиболее масштабным из всех известных к настоящему времени. Сезонный расход йодистого серебра в этом проекте составлял более 81 кг при площади работ 150 тыс. км². Таким образом, ежегодно количество йодистого

серебра, рассеянного в слое атмосферы от 2 до 5 км в районе АВ, составляло в среднем 0,545 г/км².

В этой связи можно утверждать, что изменение природного фона серебра, с точки зрения его накопления и отрицательного действия на объекты природной среды при работах по АВ с использованием пиротехнических составов с 8% содержанием йодистого серебра, при реализации российских технологий отсутствует.

Отсутствуют также примеры отрицательного влияния йода как результат использования в качестве реагента при проведении воздействий на облака йодистого серебра. Йод достаточно широко распространен в природе и является одним из жизненно важных химических элементов. Каких либо превышений содержания йода за пределами вариации его природной концентрации не наблюдалось. Фоновое содержание йода в осадках на Европейском континенте в удаленных от антропогенных источников районах составляет 0,0023 мг/л, в воздухе вблизи морей концентрации могут достигать 50,0 мг/л. Исследования на Северном Кавказе в период противоработ показали среднюю концентрацию йода в осадках в дни с воздействиями 0,011 мг/л, при средних значениях без проведения воздействий 0,0015 мг/л [3], что является, также одним из фактов, подтверждающих вымывание вносимого в облака AgI на земную поверхность.

При использовании в АВ на облака наземных генераторов попадание льдообразующего реагента в почву и в водоемы возможно двумя путями: при непосредственном взаимодействии аэрозольной струи из генератора с подстилающей поверхностью и выпадение реагента с осадками. При этом, основным загрязняющим веществом при работе ацетоновых и пиротехнических генераторов является йодистое серебро, поступающее в атмосферу в виде высокодисперсных частиц размером менее 0,1 мкм скорость гравитационного осаждения которых чрезвычайно мала [11]. Проведенные оценки [1,11] показали, что количество йодистого серебра, осаждаемого на поверхность земли вблизи места установки генератора пренебрежимо мало по сравнению с общим количеством иодида серебра, поступившим в атмосферу. Эти оценки подтверждаются экспериментальными данными, полученными при изучении загрязнения почвы после проведения работ по активным воздействиям на территории Греции [13,14] и данными, полученными на территории Сьерра-Невады (США) [12], где применялись наземные генераторы.

2.2. Загрязнения окружающей среды хладореагентами

Экологическая безопасность применения при АВ хладореагентов достаточно очевидна. При использовании твердой углекислоты и жидкого азота происходит их переход в газообразное состояние и смешение с атмосферным воздухом, природными составляющими которого они являются. Содержание данных газов в общем составе сухого воздуха оценивается в

0,033% и 78% соответственно. Поэтому даже при максимальном введении в облака, например, сухого льда увеличение концентрации углекислого газа в атмосфере составляет менее 10^{-9} от его поступления от природных и 10^{-6} от антропогенных источников.

2.3. Загрязнения окружающей среды порошкообразными реагентами

При оценках возможного отрицательного влияния АВ на окружающую среду часто акцентируют внимание на применении порошкообразных реагентов, в частности, цемента. Цементная пыль в высоких концентрациях способна вызывать заболевания глаз, кожи, дыхательных путей. ПДК цемента в воздухе – $6,0 \text{ мг/м}^3$. Достаточной нормой реагента для засева облаков мощностью 1 км является 5 кг порошка, а для мощных кучевых и кучево-дождевых облаков – 25-30 кг. Простые расчеты показывают, что при введении такого количества цемента в вершину конвективного облака высотой 5 км (диаметр ячейки 1 км) и перемещающегося с $V \approx 30$ км/ч, кратковременная предельная концентрация частиц реагента в подоблачном слое составит не более 1 мг/м^3 . Анализ суммарного расхода порошкообразного реагента при проведении работ по созданию благоприятных погодных условий в мегаполисах показывает, что максимальное количество выпадающего грубодисперсного порошка на 1 км^2 не превышает 20-30 г за один день воздействий. Это составляет ничтожную долю от выпадающих на подстилающую поверхность частиц природного происхождения (перенос ветром почвы, песка, выбросов вулканической деятельности, солевых частиц от испарения капель над поверхностью океанов и т.д.).

Таким образом, очевидно, что при проведении работ по АВ загрязнение атмосферы, водоемов и почвы территорий вносимыми в облака реагентами ничтожно мало и отрицательные последствия АВ исключаются.

Выводы

1. Реализуемые на основе российских технологий проекты по активному воздействию на облака не представляют угрозы загрязнения окружающей среды используемыми реагентами в районах многолетних работ.

2. Расширение работ по активным воздействиям на облака и возрастающий интерес к проблемам экологического характера диктуют необходимость дальнейших исследований последствий работ по активным воздействиям на облака.

Список литературы

1. Бызова Н.Л. Рассеяние примеси в пограничном слое атмосферы // Институт экспериментальной метеорологии, Гидрометеиздат, Москва, 1974, 191 с.

2. Воробьева Т.И. О влиянии противогололедных работ на изменение концентрации серебра на Северном Кавказе // Труды ВГИ, 1982, вып. 51, с.127-139.

3. Гаджиева М.М. Содержание йода в атмосферных осадках в районе активных воздействий – Труды ВГИ, 1987, вып.69, с. 87-92.
4. Денис А. Изменение погоды засевом облаков. – М.: «Мир», 1983. 271 с.
5. Диневич Л.А., Диневич С.Е., Леонов М.П., Серегин Ю.А., Берюлев Г.П. Изменение осадков противорадовой защитой. – Иерусалим, 1998, 296 с.
6. Качурин Л.Г. Физические основы воздействия на атмосферные процессы. – Л, Гидрометеоиздат, 1978, 455 с.
7. Колосков Б.П., Корнеев В.П., Щукин Г.Г. Методы и средства модификации облаков, осадков и туманов. – СПб, РГГМУ, 2012, 341 с.
8. Корнеев В.П. Опыт работ по искусственному вызыванию осадков методами активных воздействий – Сборник докладов Международной конференции, посвященной 50-летию начала работ по защите сельскохозяйственных культур от градобитий в Республике Молдова, «Специальная Служба по активному воздействию на гидрометеорологические процессы РМ», 2014, с. 100-109
9. Корнеев В.П., Кулешов Ю.В., Щукин Г.Г. Современное состояние и перспективы применения авиационной технологии активного воздействия на облака для метеозащиты от аномальных явлений погоды и последствий техногенных катастроф. – Труды ВКА им. А.Ф. Можайского, 2016, вып.650, с.109-121.
10. Потапов Е.И. Влияние долговременных работ по активным воздействиям на градовые процессы в Республике Молдова на содержание компонентов кристаллизующих реагентов в объектах природной среды и характеристики ледяных ядер./ В сб.: Вопросы физики облаков. Атмосферные аэрозоли, активные воздействия. Сборник статей памяти Н.О. Плауде. – Обнинск, ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2015, с. 281–303.
11. Фукс Н.А. Механика аэрозолей // Издательства АН СССР, Москва, 1955, 351 с.
12. Stone, R.H. (1986).Sierra Lakes Chemistry Study// Final Report to Southern California Edison Co., Contract No. C2755903.
13. Tsiouris E.S., A.F. Aravanopoulos, N.L. Papadoyiannis, K.M. Sofoniou, N. Polyzopoulos, M.M. Christodoulou, F.V. Samanidou, A.G. Zachariadis, H.-I.A. Constantinidou (2002a). Soil Silver Content of Agricultural Areas Subjected to Cloud Seeding with Silver Iodide//Fresenius Environmental Bulletin, 11, 697-702.
14. Tsiouris E.S., A.F. Aravanopoulos, N.L. Papadoyiannis, K.M. Sofoniou, F.V. Samanidou, A.G. Zachariadis, H.-I.A. Constantinidou (2002b). Soil Silver Mobility in Areas Subjected to Cloud Seeding with AgI// Fresenius Environmental Bulletin, 12, 1059-1063.

Рельеф Красноярского края разнообразен. На большом протяжении северной части края река Енисей проложила долину на стыке двух тектонических структур. Юг края занимают горы и межгорные впадины Алтае-Саянской горной страны. В северо-западной части плоскогорья поднимается плато Путорана, высоты которого местами превышают 1600 м, а высшая точка – гора Камень – 1701 м. В южной части края высятся хребты Восточного и Западного Саян и Кузнецкого Алатау. Западный Саян протянулся на южной границе Красноярского края более чем на 650 км. Он состоит из многих хребтов и древних поверхностей выравнивания. На юго-западе протянулся Кузнецкий Алатау, отделяющий Минусинскую впадину от Кузнецкой.

Поскольку край сильно вытянут вдоль меридиана, то в нем выделяют арктический, субарктический и умеренный климатические пояса. В связи с этим климат очень неоднороден. Средняя температура января составляет от -36°C на севере до -18°C на юге, средняя температура июля изменяется от $+13^{\circ}\text{C}$ на севере до $+20+25^{\circ}\text{C}$ на юге.

В крае выделяют северную, центральную, южную, западную и восточную климатические области. Климат северной части особенно суров. Длительная зима сопровождается сильными ветрами и высокой влажностью. Прохладное северное лето очень коротко. В равнинной центральной области климат характеризуется относительно жарким и коротким летом, продолжительной холодной зимой, значительными колебаниями температур. Южная часть края отличается теплым летом и умеренной зимой. Сухой и чистый воздух, обилие солнечных дней, целебные воды создают благоприятные климатические условия для лечения и отдыха. В западной части Края выпадает большее количество осадков. Зона тайги занимает значительную часть территории Края. Типичная степь расположена на юге Края и занимает большую часть Минусинской впадины, Чулымско-Енисейской котловины.

Говоря об эколого-климатических аспектах опасных природных и техногенных явлений в первую очередь заострим внимание на пожарах, засухах и выпадении осадков на территории Красноярского края. В Красноярском крае в 2017 году очень рано, в марте-апреле, начались пожары в тайге. Это произошло, когда еще не сошел снежный покров. Скорее всего это следует объяснить антропогенными причинами. Пожары продолжаются и в июне 2017 года.

Обширные лесные пожары, приводят к отрицательным экологическим последствиям. Этим пожарам способствуют малое количество осадков в весенне-летний период и засухи, которые наблюдаются в Красноярском крае через каждые 2-3 года. С возможным потеплением климата повторяемость засух будет увеличиваться. Анализ показал, что обширные засухи являются крупномасштабным явлением погоды, если не планетарного, то полушарного масштаба. В последние годы повторяемость засух увеличивается, что можно объяснить, как потеплением климата, так и антропогенным влиянием. Чаще наблюдаются локальные засухи. Они возникают при выпадении малого количества осадков в отдельном районе, что способствует возникновению

лесных пожаров. Такие пожары, тем более в обширной тайге, наносят большой ущерб лесному хозяйству.

Исходный материал и методика исследования

При проведении исследования в качестве исходного материала была использована информация о месячном количестве осадков за период 1992-2014 гг. по 3 станциям: Енисейск, Красноярское опытное поле (г. Красноярск) и Абакан. Эти данные были заимствованы в [4]. Всего было привлечено более 820 месячных данных. Кроме того, привлечена информация о количестве пожаров с 1990 по 1999 г.г. вблизи авиабазы Красноярского края, площади пройденной огнем и числе пожаров по Красноярскому краю, их возникновении в период 2000-2016 г.г. и количестве потушенных пожаров за 2000-2006 г.г., когда проводились работы по тушению пожаров с использованием авиации.

Перечисленные станции расположены в достаточно различных физико-географических районах, на разных широтах: 58° , 56° и 53° с.ш. соответственно и примерно на одинаковой долготе (92° и 91° в.д.). Однако метеостанция Абакан расположена в котловине на высоте около 250 м и не является достаточно репрезентативной. Станции севернее широты 60° с.ш. не привлекались, так как там начинается лесотундра, где деревьев мало и они низкорослые, а далее к северу располагается тундра, где деревьев нет. Расчеты по характеристикам осадков были выполнены для 6-ти месяцев холодного периода (октябрь - март) и для 2-х кварталов теплого периода года. За квартал 2 принимались стандартные месяцы: апрель - июнь, а за квартал 3: июль - сентябрь. Как правило, дождей больше во вторую половину лета и осенью, чем весной и в начале лета. Поэтому теплый сезон разделен на 2 квартала.

При проведении исследования ставилась цель связать малое количество осадков в холодное полугодие с ранним началом лесных пожаров и проследить зависимость площади горения и количества пожаров от количества осадков, выпавших за кварталы 2 и 3 и скоростью ветра. Расчеты производились по среднемесячным значениям (n) количества осадков за холодный период (135 значений для каждого пункта) и для 2-х кварталов (69 значений для каждого квартала и пункта) теплого периода для 3-х пунктов за все 23 года. При проведении расчетов была выполнена статистическая обработка количества выпавших осадков по месяцам за период с 1992 по 2014 годы по данным 3-х метеостанций.

Расчеты производились по формулам математической статистики. Так, среднемесячное количество осадков (n) за холодное полугодие или квартал рассчитывалось по формуле:

$$n = \sum x/m \quad (1),$$

где x - количество осадков за каждый месяц;

для холодного периода $m=6$, а для кварталов $m=3$.

Средняя многолетняя норма осадков рассчитывалась по формуле:

$$N = \sum X / m \quad (2),$$

где X - сумма осадков за 23 холодных полугодия или за 23 квартала теплого полугодия.

После этого рассчитывались среднее многолетнее значение осадков (норма N) за 23 года для каждого пункта и отклонение от него для каждого месяца и пункта (Δ):

$$\Delta = n - N \quad (3)$$

Поскольку информацию удалось получить не за все годы и то только о пожарах по всему Красноярскому краю, то значения n , N , Δ , рассчитанные для каждого из 3-х пунктов осреднялись и получали средние значения, которые относились ко всему краю: n_c , N_c , Δ_c . Они сопоставлялись с началом пожаров в крае, их количеством и площадью выгорания. Далее сравнивалось значение Δ в холодный период года со временем начала пожаров, их количеством и площадью выгорания.

Основные результаты расчета и их анализ

Возгорания лесных массивов можно объяснить малым количеством выпадающих атмосферных осадков, а раннее начало пожаров весной - малым количеством снега, выпавшим в течение холодного полугодия. Последнее приводит к углубленному промерзанию почвы и малому запасу влаги в ней, а также к быстрому стоку талой воды по промерзшей почве и, следовательно, должно вызывать ранние пожары весной. Для выявления влияния количества осадков, их интенсивности, температурного и ветрового режима на возникновение лесных пожаров в качестве рабочих гипотез были приняты следующие шесть:

1. Раннее начало пожаров весной следует объяснить малым количеством осадков в холодное полугодие.
2. Началу пожаров должно соответствовать малое количество осадков в предыдущий месяц.
3. Быстрому увеличению количества пожаров способствует сильный ветер в период разрастания пожаров.
4. Высокие температуры воздуха должны соответствовать большому количеству пожаров.
5. Отрицательное отклонение количества осадков от нормы должно соответствовать большому количеству пожаров.
6. Прекращению быстрого разрастания пожаров может способствовать увеличение количества осадков и ослабление скорости ветра.

Анализ данных показывает, что в холодное полугодие наблюдается небольшое количество осадков. Особенно в Абакане - почти в 3 раза меньше, чем в Красноярске и почти в 4 раза меньше, чем в Енисейске. Отклонение от нормы в обе стороны незначительно, кроме большого в 2001-2002 г.г. в Енисейске и в 2009-2010 г.г. в Красноярске, а также значительного уменьшения осадков в Красноярске в 1993-1994 г.г. Последнее может провоцировать раннее возникновение пожаров. Однако, по имеющейся информации о пожарах, этого не наблюдается. Совершенно в другие годы наблюдаются малоснежные зимы и даже при превышении нормы осадков летом до +11 мм отмечается аномально высокое число пожаров - до 1600 в 2003 и 2011 г.г. и до 1700 - в 2012 г. Это в 6 раз больше, чем в 2001 году (260 ед), когда выпало около нормы осадков. Только в квартале 3 выпало меньше нормы на 10,6 мм, но в этот период уже выпадает снег и пожары прекращаются, хотя в 2016 г. они отмечались и в ноябре. Но этот год не анализировался из-за недостатка данных. В 2016 году было много торфяных пожаров. особенно в северных районах Края. При таких пожарах беспламенное горение распространяется в слое подстилки или торфа. Почвенные пожары в зависимости от горючего материала делятся на подстилочные, дерновые и торфяные. Последние, в свою очередь, подразделяются на одноочаговые и многоочаговые. Одноочаговые пожары возникают в основном от костра или удара молнии, а многоочаговые - в результате прохождения через заболоченный участок низового пожара, когда на болотах он прерывается.

Сравнение суммарного количества осадков показывает, что за весь холодный период выпадает примерно столько же осадков, как в квартале 2. Анализ данных показывает, что в теплый период года значительно чаще отмечаются случаи выпадения осадков за квартал более, чем на 10 мм больше и меньше нормы. Таким образом, в теплый период года интенсивность осадков резко меняется по времени. Кроме того, в третьем квартале выпадает больше осадков, чем во втором примерно в 1,5 раза.

При этом норма выпадения осадков в трех пунктах существенно изменяется от 9,1 мм в холодное полугодие в Абакане до 63,0 мм в третьем квартале в Красноярске. Зимой количество осадков уменьшается с севера (58° с.ш.) на юг (53° с.ш.). В теплый период года максимальное количество осадков наблюдается в районе Красноярска. Естественно, будет по-разному складываться пожароопасная обстановка. Это зависит как от географического положения, так и от гидрометеорологических условий района.

За 2000 год имеются данные по площади пожаров и скорости их нарастания. Сравнивая эти данные с количеством пожаров на 1 октября за этот же год, можно получить средний размер очагов пожаров. В 2000 г. это будет 51,3 га. Тогда в 2000 г. за 5 суток пройдено пожарами 16,9

тыс. га (51,3 га x 66 ед. x 5 суток). Таким образом, скорость распространения огня в 2000 г. составляла 140,8 га в час. Это объясняется большими скоростями ветра, тем более, что в начальный момент распространение идет по расширяющемуся конусу [3].

Из анализа данных получается, что средняя площадь одиночного пожара колеблется в больших пределах от 26,7 га в 1995 г. до 222,6 га в 1996 г., а средняя площадь одиночного пожара за все 10 лет составляет 78,25 га. Это не больше, чем в 2000 году, но тоже много. С такими темпами распространения огня при тушении не справиться. Поэтому стоит проводить профилактические мероприятия. В 2003 и 2004 годах скорость распространения составляет по 42 пожара за сутки, но в течение 35 и 30 суток соответственно.

Таблица 1

Многолетняя норма (N, мм) выпадения осадков (за 23 года), отклонение от нее (Δ) и среднегодовое количество (N_c) на трех метеостанциях Красноярского края

Метеостанции	Холодное полугодие	Квартал 2	Квартал 3	Среднее за год
Енисейск	$N_{EX}=32,0$ $\Delta_{EX}=9,5$	$N_{E2}=42,1$ $\Delta_{E2}=0,6$	$N_{E3}=56,5$ $\Delta_{E3}=-1,4$	$N_{EG}=43,6$ $\Delta_{EG}=2,9$
Красноярск	$N_{KX}=27,0$ $\Delta_{KX}=4,2$	$N_{K2}=47,8$ $\Delta_{K2}=6,3$	$N_{K3}=63,0$ $\Delta_{K3}=5,1$	$N_{KG}=45,9$ $\Delta_{KG}=5,2$
Абакан	$N_{AX}=9,1$ $\Delta_{AX}=-13,7$	$N_{A2}=34,5$ $\Delta_{A2}=-7,0$	$N_{A3}=54,3$ $\Delta_{A3}=-3,6$	$N_{AG}=32,6$ $\Delta_{AG}=-8,1$
Среднее N_c	$N_{CX}=22,8$	$N_{C2}=41,5$	$N_{C3}=57,9$	$N_{CG}=40,7$

Из анализа данных табл.1 средняя N_c на трех метеостанциях меняется от 22,8 мм в холодное полугодие до 57,9 мм в квартале 3 и отклонение Δ изменяется от 0,6 мм в Енисейске в квартале 2 до 13,7 мм в Абакане в холодное полугодие. В целом очень большой разброс по N.

Таблица 2

Площадь погашенных пожаров, тыс. га [1]

Год	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	итого за 7 лет
	Авиабаза							
Красноярская	0,026	0,13	3,50	10,17	7,01	2,215	19,03	42,081
Количество погашенных пожаров	1	3	3	12	7	9	20	55

Из анализа данных табл.2 получается, что в общей сложности за 7 лет погашено пожаров на площади более 42 тыс. га, а в 2006 г. - почти 20 тыс.га. После чего договора на вызывание осадков для тушения пожаров не возобновлялись.

Из рис. 2 следует, что было резкое увеличение площади пожаров в 2012 и 2016 годах. В 2003 г. осадков в холодный период выпало около нормы (в среднем на 0,8 мм больше нормы). Это привело к началу пожаров 5.05. 2003 г., что совпадает со средним сроком начала пожаров, аномально раннее начало пожаров 15.03. 2000 г. отмечено при почти нормальном 130 мм количестве осадков в холодное полугодие.

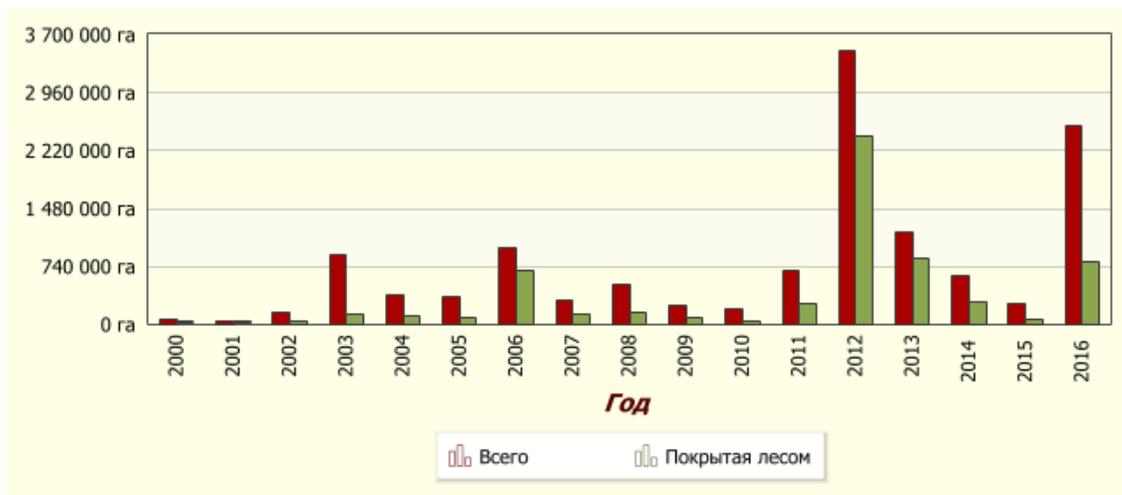


Рис. 2. Площадь, пройденная огнем по Красноярскому краю 2000-2016 г.г.

Из анализа данных следует, что из 15 рассмотренных лет пожары в девяти годах начинаются во второй половине апреля, в 4-х случаях - в начале мая и в 2-х случаях - в конце марта (2000 и 2014 годах).

В работе окончательное количество пожаров в Красноярской тайге приведено на 1 октября анализируемого года, хотя в 2016 г. они отмечались в ноябре месяце на площади более 1 млн. км² в Иркутской и Амурской областях (рис. 3) и в количестве более 1000 единиц по Красноярскому краю.

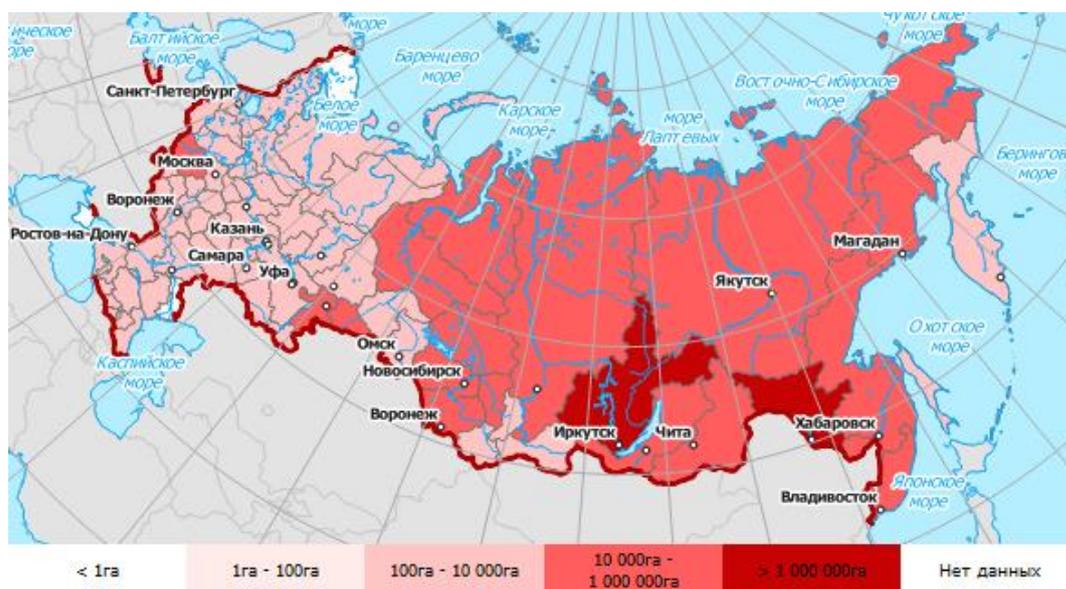


Рис. 3. Площадь, пройденная огнем по России к 12.11.16 г.

Заключение

Выполненный анализ возникновения пожаров в тайге в Красноярском крае и их связи с неблагоприятными климатическими и метеорологическими условиями показал, что практически редкие из предложенных 6 гипотез подтвердилась. Только в 2000 г быстрое разрастание пожаров (по 66 пожаров за сутки в течение 5 суток) можно с натяжкой объяснить сильным ветром (3-6 м/с). Надо полагать, что большинство пожаров возникало за счет антропогенного фактора, влияние которого трудно выявить, а затем пожары распространялись под влиянием сильного ветра. Наиболее хорошо подтверждается гипотеза б о связи прекращения быстрого разрастания пожаров с началом дождей и ослаблением ветра. Это подтверждает идею о том, что целесообразно привлекать авиацию для искусственного вызывания осадков с целью тушения пожаров. Экологические аспекты пожаров проявляются в выгорании больших лесных массивов, на восстановление которых требуется 90-100 лет и сгорании поселков, а также в задымлении огромных территорий.

Анализ показывает, что пожароопасная обстановка складывается при небольшом количестве осадков, то есть меньше нормы на 5-10 мм. Возгорание лесных массивов легче предотвратить, когда складывается хотя бы третья стадия пожароопасности, чем тушить. В противном случае может возникнуть ситуация, которая описана в статье Г.И. Мазурова [2] о катастрофе Ил-76. Кроме того, при тушении пожаров из-за высоких температур горения большая часть воды испаряется.

Список литературы

1. Козлов В.Н. Методы искусственного вызывания осадков для борьбы с лесными пожарами. СПб. - Изд.: Инфо-да. – 2011. – 202 с.
2. Мазуров Г.И. Возможные причины катастрофы Ил-76 при тушении лесного пожара 1 июля 2016 года в Иркутской области. // «Метеоспектр» № 3. - 2016. - С. 142-145.
3. Справочник по опасным природным явлениям в республиках, краях и областях Российской Федерации. - СПб.: Гидрометеиздат. -1997. - 590 с.
4. meteo.ru.

ОБ ОПТИМАЛЬНОМ СООТНОШЕНИИ ВНУТРИ ПУСТЫННО-СТЕПНЫХ ЗОН ПЛОЩАДЕЙ, ЗАНЯТЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ И ЕСТЕСТВЕННЫМИ АРЕАЛАМИ

Курбаткин В.П., Ушинцева В.Ф.

Научно-исследовательский гидрометеорологический институт
Узгидромета, г. Ташкент

В докладе представлены результаты осмысления проблемы экологической оценки человек-окружающая среда в полосе физико-географических поясов земного шара.

Площадь поверхности Земли составляет 510 км²; площадь суши - 149 км² (29% от общей площади Земли). На суше различают шесть материков: Евразия занимает 53,5 млн. км², что составляет ~30% суши. Крайние точки Евразии: на севере - мыс Челюскина (77°43' с. ш.); на юге - мыс Пиай (1°16' с.ш.); на юго-западе - мыс Баба (26°10' в.д.); на востоке - мыс Дежнева (163° 40' з. д.). Материк с севера омывается Северным ледовитым океаном, на востоке - Тихим, на юге - Индийским. Его Европейская часть омывается Атлантическим океаном и морями Средиземным (Эгейское, Мраморное), Черным и Азовским [4].

Занимая ½ территории северного полушария, Евразия располагает всеми географическими поясами Земли. Очевидно, что морские поверхности формируют климатические зоны в полосе влияния морских воздушных масс. Климат Западной Европы определяется ее положением в умеренных широтах и преобладанием переноса воздушных масс с запада на восток. Умеренный морской над основной частью западной Европы, тропический морской на ее юге и арктический воздух на севере. До восточной Европы эти воздушные массы доходят как континентальные. И только юг восточной Европы короткое время может оказаться в морском воздухе чаще умеренных широт над Черным морем и Кавказом.

Влияние морского воздуха с Тихого океана вследствие преобладания западного переноса воздушных масс простирается на узкую восточную окраину Евразии.

На юге Евразии преобладают тропические экваториальные воздушные массы. Широтные хребты затрудняют обмен теплом и влагой между Центральной Азией и более низкими широтами. Следует заметить, что летом эти воздушные массы проникают на Памир.

Как расположены географические пояса над центром Евразии, показано в табл. 1. С запада на восток они простираются от западной границы восточной Европы до Восточной Сибири.

Климатический разрез вдоль 55 меридиана (А. А.Борисов)

Природные зоны	Сумма солнечного тепла за 1 мин на 1 см горизонтальной поверхности	Характерные воздушные массы	Средняя июльская t° С воздуха	Годовое количество осадков, мм	Характерные климатические явления
Арктика (73°с.ш.)	110-20	АВ	0,0-1,9	100-150	Инверсии температур
Тундра(73-57°)	20-30	АВ	10-12	200-300	Волны холода, (мощные снегопада)
Тайга (67-57°)	30-40	мУВ	15-18	400-4500	Мощные снегопады
Лиственные леса и лесостепь (57-53°)	40-60	кУВ	16-20	300-40	Оттепели
Степь (53-50°)	60-70	кУВ, УВ	21-23	300-350	Засухи
Полупустыня (50-45°)	70-80	кУВ	23-26	200-300	Гололедица, мгла
Пустыня (45-35°)	80-100	кУВ кТв	20-32	100-200	Пыльные туманы, гармсили

Лесостепная и степная природные зоны простираются с запада на восток - от Карпат до Восточной Сибири. Пустынная зона, расположенная в полосе широт 45-35° с.ш., располагается узкой полосой под вышеуказанными зонами, но их надо разделять на северную, расположенную на территории Казахского мелкосопочнике и южную – Турана (Туранская низменность). Они отличаются по погодным условиям не только из-за высоты Солнца, но и режимом увлажнения. Туранская низменность зимой находится в полосе умеренного климата, а в теплое время в субтропическом. Поэтому влага в почве накапливается с декабря по март, частично в апреле-мае, когда наблюдаются также влажные погодные условия и прорываются арктические воздушные массы сквозь климатический полярный фронт. Климат формируется при сочетании трех факторов: радиационного, циркуляционного и рельефа:

- лесостепей, под влиянием проходящей здесь осью высокого давления, влиянием лесного и степного климатов соседних зон и внутриматериковым ее положением;

- степей под воздействием Азиатского максимума в зимнее полугодие и влиянием Атлантики и южных морей в теплое полугодие. В этом географической зоне зимой возрастает континентальность в восточном направлении; лето, более увлажненное по сравнению со степной зоной южной части Западной Сибири;

- полупустынь определяется сравнительно низким широтным расположением, удаленностью от водных бассейнов, влияющих на климат, равнинной поверхностью, воздействием Азиатского и Азорского антициклонов с одной стороны и Среднеазиатского минимума с другой;

- пустынь Средней Азии, раскинувшихся в полосе широт 36-37°с. ш., защищенностью с юга или востока системой высоких горных цепей, с севера сравнительной доступностью волнам холода, тем более что барический градиент зимой убывает с севера на юг. Господство тропического воздуха в большую часть года является одним из главных климатообразующих факторов данной области. Резко континентальный климат пустынь характеризуется продолжительным жарким летом, короткой, но холодной для этих широт зимой, сухостью воздуха. Так в сжатой форме Борисов А.А. определяет факторы, формирующие погоду в географических поясах. Географические пояса проявляются “визуально” и они отмечались не одно столетие.

Как видно из табл. 1, из природных зон на территории Узбекистана имеются полупустынная и пустынная. По мнению многих авторов, занимающихся физико-географическим районированием территорий, Докучаевское определение понятия «природной зоны», как определенные типы природы (тундра, лес, степь, пустыня и др.) одновременно представленные на всех материках, приблизительно в одних и тех же широтах, является наиболее оптимальным, поскольку в нем видится объем природной зоны, четко очерченное ее географическое пространство и комплексное содержание ее природной структуры». При выделении географических зон учитываются как зональные, так и незональные особенности физико-географических комплексов и ее выделение базируется на климатических факторах (радиационный, температурный и влажностный). Из существующих на настоящее время классификациях климата была выбрана классификация М. И. Будыко-А.А. Григорьева. Этот метод относится к классической климатологии, где ряды наблюдений обрабатываются статистически с целью получения количественной зависимости между метеопараметрами с одной стороны и показателями одновременного и последующего состояния изучаемого объекта с другой. Метеорологические ряды центрируются и нормируются, выявляются законы распределения ряда, объем выборки, необходимой для получения устойчивого среднего значения, колебания которого малы. Члены рядов равновероятны, т. е. в выборке исключены цикличность, ритмичность и т. п. в результате чего данные климатических справочников можно использовать как стандарт погодных условий на ближайшее тридцатилетие согласно требованиям ВМО.

В основу классификации М.И. Будыко-А.А. Григорьева положено деление: 1) по условиям увлажнения (по значениям индекса сухости $K=R/Lr$); индекс меньше единицы описывает избыточное увлажнение, если больше – то имеют место засушливые условия; 2) по температурным условиям теплого периода (сумма температур подстилающей поверхности за i -тый период; 3) по температурным условиям и степени снежности зимы (средняя температура января). По комбинации трех указанных признаков выделены 30 типов климата, свойственных географическим зонам на территории б. СССР. Первый признак обозначается римскими цифрами; второй арабскими и третий заглавными буквами латинского алфавита.

Рассмотрим температурно-влажностный режим на территории Узбекистана по данным 80 ГМС за период 1981-2015 годы [5].

Диапазон индекса сухости М. И. Будыко-А.А. Григорьева ($K_{Б-Г}$) по территории Узбекистана очень широк: от 0,6 до 8,8. При этом условия “избыточное увлажнение” ($K_{Б-Г}$ менее 0,45) не наблюдаются. Условия “влажные климаты” ($K_{Б-Г}=0,45-1,0$) наблюдаются на севере Казахстана (ГМС Уральск и Семипалатинск) и в Узбекистане (ГМС Кызылча (1530 м н.у.м.). “Недостаточно влажный” климат ($K_{Б-Г}=1÷3$) наблюдается в предгорной зоне Тянь-Шаня и Памиро-Алая, во внутренних долинах (котловинных) этих горных систем ($R=1400-1790$ мДж/м², количество осадков - 380 и 375 мм), а также отмечается приморскими станциями (ф. Шевченко, Аральское море (до его высыхания), где $R=1400-1790$ мДж/м², количество осадков - 380 и 375 мм. По классификации М. И.Будыко-А.А. Григорьева такой $K_{Б-Г}$ характерен для 9 типов климата (лесостепи, степи, горные степи, степи Сибири). В Узбекистане “недостаточно влажный” тип климата отмечается в предгорьях в зонах орошаемого земледелия (ГМС Ташкент, Самарканд). “Сухой” тип климата ($K_{Б-Г}>3,0$) характерен для горных, северных и субтропических пустынь. В Средней Азии и Казахстане “сухой” тип климата фиксируется 13 метеостанциями, в Узбекистане пятью из восьми рассматриваемых (северо-запад Узбекистана - ГМС Каракалпакия и Хорезм), Кызылкум (ГМС Тамды), Ферганская долина (ГМС Фергана) и самая южная ГМС Узбекистана – Термез.

По второму признаку (температурные условия теплого периода года) выделено 5 климатов. Для Узбекистана характерен очень теплый (рис. 1).

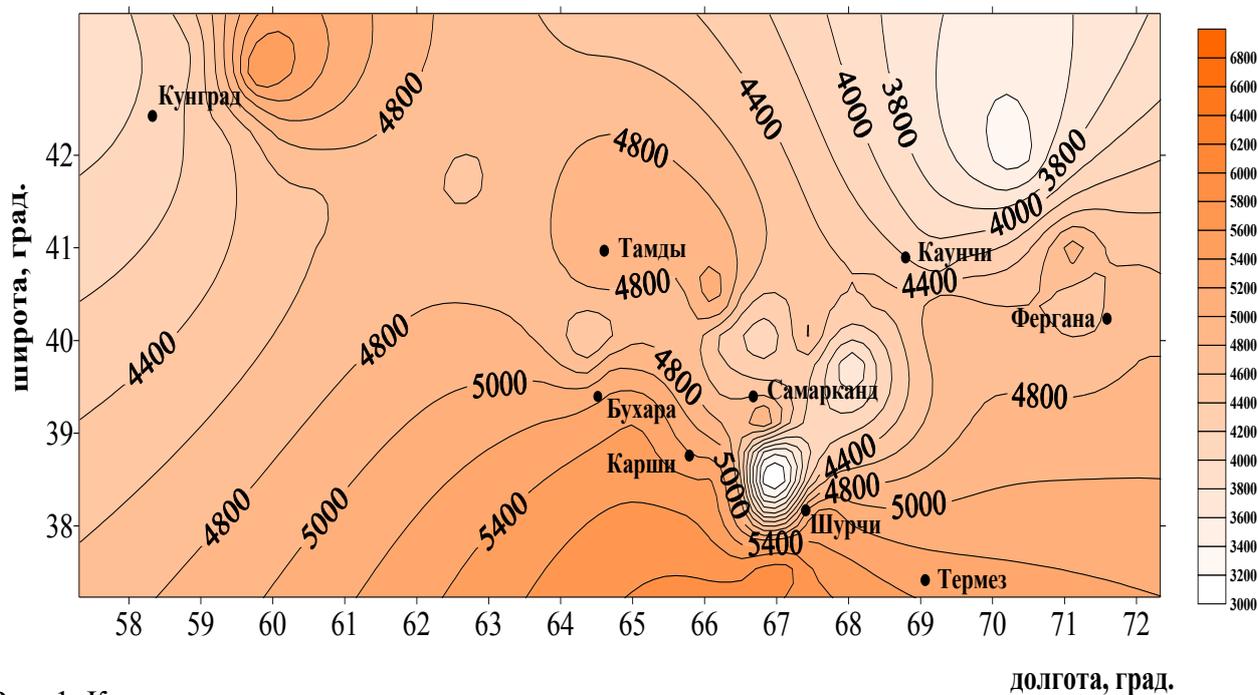


Рис. 1. Карта-схема сумм температур поверхности почвы в период от перехода $t_{\text{воздуха}} \geq +10^{\circ}\text{C}$ весной до перехода $t_{\text{воздуха}} \geq +10^{\circ}\text{C}$ осенью (когда сумма температур больше 4400°C , климат называется очень теплый (5)).

По температуре воздуха в январе для всей территории наблюдается умеренно мягкая зима с температурой в диапазоне 0-(-13°C) и на юге мягкая с температурой выше 0 °С.

Таким образом, из 30 климатов, выделенных М.И.Будыко-А.А. Григорьевым большая часть территории Узбекистана относится к субтропическим пустыням (IY, 5, E) и (IY, 5, F). Климат сухой (IY), очень теплый (5), умеренно мягкая зима (температура воздуха в январе от 0 до минус 13°C). Небольшая южная территория относится к типу III, 5, F – очень сухой, теплый, зима мягкая (температура января выше 0°C), что обеспечивает произрастание ксерофитной субтропическая растительности.

Условия увлажнения для Узбекистана являются одним из важнейших элементов при рассмотрении климата. Существуют различные индексы оценки увлажнения территории. Суть их сводится к определению отношения количества атмосферных осадков или количества тепла, необходимого для их испарения за некоторый период времени, к испаряемости, радиационному балансу или сумме температур за период со средней суточной температурой воздуха или почвы выше некоторого значения за тот же период. Из-за редкой актинометрической сети наблюдений, достаточной для представления параметров в зональных физико-географических поясах, но не отражающих, в первую очередь, мезомасштабного климата, а тем более микроклимата, к которому можно отнести условия поливных угодий мы остановились на методе Н.Н. Иванова (коэффициент увлажнения $K_{\text{Иванов}}$)

$$K_{\text{Иванов}} = \frac{R}{E}, \quad (1)$$

где R –сумма осадков (мм) за i-тый период; E - приближенная испаряемость с водной поверхности за тот же период. Н.Н Иванов выделил 7 типов климата, характеризующих степные, лесостепные, полупустынные и пустынные ландшафты.

“Постоянно влажный” (ПВ) и “постоянно засушливый” (ПЗ) климат в течение всех месяцев года не наблюдается ни на одной из 35 рассмотренных станций Узбекистана. “Постоянно засушливый” (ПЗ) климат ($K_{\text{увлаж}}$ менее 25) наблюдается в течение летне-осенних месяцев (май-октябрь) на всех станциях Узбекистана. И только на севере Узбекистана (Ургенч, Хива) и на юге (Термез) ПЗ наблюдается больше полугода. Самыми влажными месяцами ($K_{\text{увлаж}}$ не менее 100) в предгорьях являются декабрь-март, на остальных станциях декабрь-февраль.

$K_{\text{увлажн.}} \geq 25 \leq 100$ на 50% станций наблюдается в течение трех-четырёх месяцев, реже пяти.

Таким образом, благодаря классической климатологии и многолетним метеорологическим данным наблюдений, в любой точке можно определить климатические зоны географических поясов, выделить сезоны с осадками, когда можно получить оптимальный урожай.

Как отмечал Федорович А. А. [10], “для человека, научившегося сеять хлеб, косить траву и заготавливать пищу для себя и корм для домашних животных на зиму не страшны ни долгая

зима, ни глубокие снега. Для первобытного человека наоборот пригодны были лишь такие места, где животные, будь то дикие, позже домашние, были бы круглый год обеспечены подножным кормом, хотя и скудным, но, который бы позволял им прокормиться. Такие места наблюдаются как на севере (оленоводство), так и в пустыне. При овладении земледелием человек нарушил природное равновесие. Так, например, согласно [9], с восемнадцатого столетия буряты начали заниматься земледелием. «По другим источникам земледелие в лесостепной зоне и на севере степной земледелием занимались 2-3 тыс. лет тому назад. Развитое земледелие постоянно поглощает естественные лесостепи. В природе остались отдельные нетронутые участки лесостепи там, где невозможно заниматься земледелием. Для экологов должно быть интересным, что состав травостоя в лесостепной зоне сохраняется до настоящего времени. Те участки лесостепной зоны и части северной степной, которые были разрушены полностью и заброшены со временем восстанавливаются. Из сказанного видно, что земледелие лишает нас естественных ландшафтов. При этом, чем больше разнообразие как растительного, так животного мира, тем меньше сохраняются естественные ареалы.

Таким образом, с появлением земледелия следует разделять территории, занятые сельхозугодиями и естественными ландшафтами и где проживает человек. В рассматриваемых природных зонах (лесостепи -пустыни) тепловой режим человека сильно отличается [1]. Можно выделить условия теплового дискомфорта (холодного и теплого) и комфортные условия. Следует заметить, что в самой северной части лесостепной зоны выращивается пшеница, вегетационный период которой начинается с перехода средней суточной температуры воздуха через 10°C , а оптимальной является $20\text{-}25^{\circ}\text{C}$. Согласно [1] эти условия, близки к комфортным.

Решение вопроса по созданию благоприятного теплового режима можно найти в исторических источниках, где описываются жилища, одежда разных народов. Так, например, у узбеков и равнинных таджиков строят прямоугольные дома из сырцового кирпича, где с одной стороны имеется навес-терраса (айван). Отдельные усадьбы, особенно в пустынной зоне обносились высокими глинобитными стенами, высота которых при небольшой площади двора сокращает его освещенность с 16 до 4-6 ч в сутки. Двухметровая высота отсекала проникновение на территорию двора нагретого воздуха приземного слоя.

В Ферганской долине дом с айваном, да еще стоящий на холме, окруженный садом, создает благоприятные условия для человека. Прохладным утром у восточной стены, человек попадает в другие тепловые условия. При невысоком положении Солнца стена нагревается, ее инфракрасное излучение, лучи которого поглощаются кожей человека до 80%, создавая комфортные условия. Днем при подъеме Солнца, стена дома не нагревается. Температура листьев деревьев не нагревается до температуры оголенной поверхности земли. При наличии местных ветров будет ощущаться прохлада.

Лесостепные-пустынные зоны Евразии обеспечивают жизнь более 100 млн. человек. Зоны лесостепи и степи - главные хлебные житницы центральной части Евразии. Здесь сосредоточены основные посевные площади зерновых культур, прежде всего пшеницы. Кроме пшеницы на полях возделываются также ячмень, просо. Большие площади заняты кукурузой. Поэтому представляет интерес рассмотреть эту территорию с позиций экологической географии. Отметим, что экологическая география есть раздел географии, изучающий воздействие современной среды на географическое распространение организмов. И здесь, нам кажется, до настоящего времени нет ответов на ряд вопросов. Во многих источниках отмечалось, что состав растительности в указанных зонах сохраняется несколько столетий. Это отмечалось и в [3, 8]. Вопрос насколько консервативен состав видов естественной растительности внутри ареалов, а также преобразование фактора местообитания самим растительным покровом.

Северная степь отличается удивительной видовой насыщенностью - очень большим числом видов на единицу площади. На 1 м² площадки может оказаться до 70-80 видов растений. Южная степь – царство ковылей. В южной степи довольно небольшая видовая насыщенность. На 1 м² площади можно насчитать не более 12-15 видов растений [8]. Здесь тоже возникает вопрос, как 72 вида растений распределяют воду, делят солнечный свет и СО₂? По всей видимости, у этих растений разделяются начало и длительность периодов вегетации; возможно разделение корней по слоям в почве. Для облегчения решения задач можно начать с южных степей, где всего 12-15 видов. Важно определиться являются ли данные виды трав прародителями зерновых. Ответ поможет понять, почему при высоком положении Солнца растения приостанавливают процесс фотосинтез. По всей видимости, перенос растений из одного географического пояса в другой требует создания соответствующего микроклимата для нормального, привычного для них роста.

Список литературы

1. Айзенштат Б.А., Лукина Л.П. Тепловой режим человека.-Гидрометеиздат.-С-П.-1993.-167 с.
2. Борисов А. А. Климаты СССР в прошлом, настоящем и будущем.-Л.:ЛГУ, 1975.-430 с.
3. Кожевников А. В. По тундре, лесостепи, степи и пустыне.-«Общество испытателей природы».-М.-1951.-200 с.
4. Кратка географическая энциклопедияция.-Т.1-5.-1960-1966.
5. Курбаткин В. П., Ушинцева В. Ф. Гидрометеорологические условия сезона осадков в Узбекистане.-Ташкент, 2015.-137 с.
6. Курбаткин В.П., Ушинцева В.Ф. Атмосферные осадки – источник водных ресурсов в Средней Азии Ташкент, 2012.-137 с.

7. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Серия 3. Многолетние данные. Части 2-3.-Вып.19.-Узбекская ССР.-Книга 1.
8. Петров В. В. Растительный мир нашей Родины.- “ Просвещение”.-1991.-205 с
9. Токарев С. А. Этнография народов СССР.-1958.-615 с.
10. Федорович Б. А Лик пустыни.-“ Молодая гвардия”.-1954.-365 с.

ОСОБЕННОСТИ ВЫМЫВАНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ ОСАДКАМИ В ВЫСОКОГОРЬЕ

Керимов А.М.

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

Введение. Основными источниками химических примесей для ледников являются атмосферные аэрозоли. Поступление аэрозольных частиц в снежный покров зависит от различных механизмов их удаления из атмосферы. Находящиеся в атмосфере частицы эффективно удаляются из нее либо с атмосферными осадками, либо путем их сухого осаждения. Соотношение между сухими и влажными выпадениями примесей из атмосферы определяется взаимодействием различных факторов: длительность холодного периода, в течение которого сохраняется снежный покров, частота снегопадов и их интенсивность, физико-механические свойства загрязняющих веществ, размер аэрозолей.

Цель исследования. В настоящей статье предпринята попытка оценить особенности поступления аэрозольных частиц в снежный покров путем их вымывания и сухого осаждения в условиях высокогорья на примере оледенения южного склона Эльбруса.

Материалы и методы исследования. Осадки являются важным фактором самоочищения атмосферы от примесей естественного и искусственного происхождения. Процессы вымывания примесей из атмосферы осадками включают в себя два типа: «вымывание в облаке» и «вымывание осадками». Оба механизма вместе представляют собой «влажное осаждение» [14]. Считается [11], что на долю мокрого выпадения аэрозолей приходится около 60% от общего осаждения аэрозольных частиц.

Вымывание загрязняющих веществ осадками зависит от формирования осадков в облаке и последующей трансформации при выпадении на земную поверхность. На всех этапах захват загрязняющих веществ может осуществляться каплями воды и ледяными кристаллами [1].

Процессы «вымывания в облаке» состоят из поглощения микрочастиц в виде ядер конденсации, присоединении неактивных аэрозольных частиц к облачным каплям и реакции газов в облачных элементах. А процессы «вымывания осадками» включают в себя прикрепление аэрозольных частиц к выпадающим осадкам, испарение осадков, растворение и реакция газов в осадках [10].

Во время образования облаков и туманов при влажности воздуха 100% и чуть более влага конденсируется на аэрозолях как на ядрах конденсации. Растворение солевых компонент аэрозоля дает первоначальный химический состав атмосферных аэрозолей [5].

Чем больше частица и лучше ее растворимость, тем больше она подходит для конденсации. В качестве ядер конденсации обычно выступают частицы радиусом более 0,1 мкм. Часть аэрозольных частиц, не ставших ядрами конденсации, в дальнейшем могут присоединяться к облачным каплям внутри облака, при этом существенную роль играют процессы соударения с выпадающими кристаллами снега или льда [10].

Основная часть химических примесей в осадках формируется ниже облаков и в приземном слое тропосферы. Эффективность удаления аэрозолей осадками сильно зависит от размера частиц. Мелкие частицы диффундируют быстрее, чем более крупные, и очень быстро присоединяются к облачным элементам, которые в дальнейшем вовлекаются в осадки. С другой стороны, более крупные частицы вымываются осадками значительно быстрее, чем мелкие [13].

Укрупнение капель и ледяных кристаллов приводит к выпадению осадков. За время движения вниз капли или снежинки захватывают аэрозоль, что повышает минерализацию осадков [2,4,5]. Капли дождя или кристаллы снега при своем падении захватывают («вымывают») из нижнего слоя атмосферы значительное количество аэрозолей, причем, считается [10], что очищение атмосферы от микрочастиц пыли диаметром 0,5-2 мкм кристаллами снега и льда происходит в 4 раза активнее, чем дождевыми каплями.

Выведение газов из атмосферы определяется их химической реакционной способностью а также растворимостью в воде. Газы, которые являются сравнительно инертными и нерастворимыми в воде (CH_4 , N_2O) могут оставаться в воздухе в течение многих месяцев и даже лет. Другие более реакционноспособные, например, NH_3 , SO_2 , эффективно и быстро удаляются из атмосферы, а время их жизни исчисляется часами [13].

Поступление аэрозольных частиц в снежный покров за счет сухого осаждения в дни без осадков, осуществляется при помощи одновременно взаимодействующих процессов: седиментации, диффузного и инерционного осаждения [3,14].

Седиментация - процесс удаления взвешенной пыли из атмосферы в отсутствие конденсации и осадков под действием силы тяжести [12].

Механизм инерционного осаждения заключается в захвате частиц из-за того, что частицы не повторяют путь газового потока вокруг объекта, вследствие чего она сталкивается с препятствием, и во многих случаях прилипает к нему. Если частицы с помощью атмосферного перемешивания переносятся к поверхности, то скорость их осаждения в дальнейшем может определяться диффузными процессами [3,13].

Диффузный перенос атмосферного аэрозоля заключается в том, что частицы могут мигрировать внутри объема или из него за счет либо их собственного термического перемещения (броуновское движение), либо за счет турбулентного движения воздуха [13].

Механизм удаление аэрозольных частиц из атмосферы во много определяется размером самого аэрозоля. Верхний предел размеров аэрозольных частиц определяется седиментацией. Наиболее крупнодисперсные частицы диаметром более 10 мкм быстро выводятся из атмосферы за счет седиментации. Установлено, что когда радиус частиц меньше 1 или 2 мкм процессом седиментации можно пренебречь [3,13].

Нижний предел размера аэрозольных частиц определяется коагуляцией, вызывающей быстрое присоединение частиц размером 0,005 мкм к более крупным частицам. Очень мелкие частицы довольно быстро удаляются за счет диффузного присоединения или внутриоблачного вымывания. При этом диффузный эффект начинает преобладать в размерном диапазоне частиц с диаметром менее 0,2 мкм [3].

Частицы диаметром 0,1-1 мкм медленно оседают и в меньшей степени подвержены инерционному и диффузному удалению. Эти частицы остаются в атмосфере в течение сравнительно более длительного времени, чем самые крупнодисперсные частицы [13].

Оценить вклад атмосферного аэрозоля в снежном покрове за счет сухого осаждения можно следующим образом. Для этого необходимо отбор проб проводить в период без осадков между двумя снегопадами. Причем считается, что чем больше этот промежуток, тем больше происходит накопление аэрозолей за счет сухого осаждения. Отбор проб проводится в неглубоком шурфе из средней его части, отложенного за период последнего снегопада и с поверхности снега (в слое 1-2 см), а также в начале следующего снегопада. Измерив концентрацию примесей выпавших на его поверхность между двумя снегопадами, и сравнив его с содержанием примесей в средней его части, можно оценить величину сухого выпадения. Исследования, проведенные в работах [7,8] показывают, что концентрации микрочастиц на поверхности оказываются в 3-4 раза, более чем в середине слоя.

Содержащие ТМ аэрозольные частицы, имеют размеры от 10^{-3} до 40-60 мкм. Установлено [15], что в аэрозолях доля водорастворимых форм свинца составляет 11-32 %, кадмия 43-82 %, цинка 15-16 %, никеля и мышьяка соответственно 39-50 %, 28-58 %. Частицы растворимых форм аэрозоля, содержащих ТМ, имеют радиус меньше 0,028 мкм.

В настоящей работе проведены расчеты вымывания ТМ на основе экспериментальных данных полученных на южном склоне Эльбруса. Отбор проб производился в снежном покрове (свежевыпавшем и сезонном) по высотному профилю от 3500 м н.у.м. до восточной вершины Эльбруса (высота-5621м). Отбор проб свежевыпавшего снега проводился в день снегопада. Пробы в шурфах отбирались из слоев с одинаковыми структурностратиграфическими характеристиками. Отсчет слоев в шурфах ведется от световой поверхности.

Результаты исследования и их обсуждение. Обработка и анализ проб свежевыпавшего снега, позволил определить функцию распределения по размеру водонерастворимых аэрозольных частиц, вымытых снежинками. Эта функция с хорошей точностью аппроксимируется логарифмически нормальным распределением. В табл. 1 приведены значения геометрического диаметра d_0 и стандартного геометрического отклонения σ_0 функции распределения частиц по размеру в пробах одного холодного сезона.

В пятом столбце таблицы приведены значения интервала диаметров частиц аэрозоля в 1 см^3 пробы, в котором находятся 95 % частиц. Как видно, интервал, в котором лежат 95 % частиц в основном начинается в области субмикронных размеров аэрозоля и заканчивается в области больших размеров.

Таблица 1

Параметры функции распределения водонерастворимых частиц по размеру

Пункт отбора пробы	Номер слоя	d_0 , мкм	σ_0	Интервал, мкм
4090	1	0,293	2,645	0,055-1,550
4000	1	0,258	3,045	0,042-1,571
4000	2	0,370	1,857	0,100-1,374
4000	3	0,252	2,864	0,044-1,144
4000	1	0,449	2,668	0,084-2,396
4000	2	0,228	2,650	0,042-1,208
4000	3	0,137	3,598	0,019-0,986
3830	1	0,403	3,023	0,052-2,436
4090	1	0,916	3,889	0,118-7,142
4090	2	0,315	2,941	0,054-1,834
H=5621 м н.у.м	1	0,158	2,847	0,128-0,900

В табл. 2 приведены результаты теоретических расчетов и экспериментально определенных концентраций аэрозольных частиц, вымытых снегом в указанном диапазоне размеров.

**Экспериментальные n_k , и вычисленные значения n_b концентрации
водонерастворимых аэрозольных частиц**

Интервал диаметров, мкм	Проба №2 Н=4090 м н.у.м.,		Проба №3 Н=3500 м н.у.м.,	
	$d_0 = 0,315$ мкм, $\sigma_0=2,941$		$d_0 = 0,299$ мкм, $\sigma_0 = 2,334$	
	$n_k, \text{см}^{-3}$	$n_b, \text{см}^{-3}$	$n_k, \text{см}^{-3}$	$n_b, \text{см}^{-3}$
0,01-0,08	$1,3 \cdot 10^5$	$1,21 \cdot 10^5$	$2,1 \cdot 10^6$	$1,27 \cdot 10^6$
0,08-0,20	$5,8 \cdot 10^5$	$5,8 \cdot 10^5$	$2,8 \cdot 10^6$	$5,49 \cdot 10^6$
0,20-0,40	$5,8 \cdot 10^5$	$7,62 \cdot 10^5$	$8,4 \cdot 10^6$	$6,74 \cdot 10^6$
0,40-0,60	$5,8 \cdot 10^5$	$5,00 \cdot 10^5$	$4,9 \cdot 10^6$	$3,41 \cdot 10^6$
0,60-0,80	$4,5 \cdot 10^5$	$3,24 \cdot 10^5$	$2,8 \cdot 10^6$	$2,73 \cdot 10^6$
0,80-2,0	$6,4 \cdot 10^5$	$6,57 \cdot 10^5$	$1,2 \cdot 10^6$	$2,34 \cdot 10^6$
2,0-4,0	$9,6 \cdot 10^4$	$1,56 \cdot 10^5$	$1,3 \cdot 10^5$	$2,40 \cdot 10^6$
4,0-8,0	$6,0 \cdot 10^3$	$3,44 \cdot 10^5$	$2,8 \cdot 10^4$	$2,22 \cdot 10^6$
8,0-20,0	$4,9 \cdot 10^3$	$4,93 \cdot 10^3$	$4,0 \cdot 10^3$	$1 \cdot 10^3$

В табл.3 приведены значения концентрации ТМ, вымытых свежеснегоснегом в сезонной толще.

Таблица 3

Значения концентрации ТМ, вымытых свежеснегоснегом в сезонной толще

Пункт отбора пробы	Номер слоя	Концентрация элементов, мкг л ⁻¹				
		Ag	Cr	Ni	Mn	Pb
3500	1	0,021	1,70	1,30	1,41	1,49
4090	1	-	-	0,73	0,81	0,92
4000	1	-	3,10	1,51	2,01	-
4000	2	0,012	1,34	1,24	3,69	5,67
4000	3	0,035	1,38	0,73	0,94	0,92
4000	4	0,015	0,96	0,73	3,43	1,62
3830	1	0,046	6,41	1,63	4,75	2,52

Прочерки в таблице означают, что концентрация элемента в пробе была ниже порога обнаружения. Обнаружено, что тяжелых металлов в летний период вымывалось больше, чем в зимний.

Известно [9, 15], что различные фракции аэрозоля тесно связаны с их химическим составом. Средне- и грубодисперсный аэрозоль в основном состоит из вещества, характерного для частичек почвы. Они представляют такие элементы как алюминий, кремний, магний, марганец, никель, титан, железо. С учетом этого была исследована связь концентрации водонерастворимого аэрозоля, вымытого из облаков и подоблачного слоя, с концентрацией ТМ. Корреляция между ТМ и концентрацией водонерастворимых аэрозолей по спектру их размеров является нелинейной.

В табл. 4 приведены значения концентрации ТМ в пробах свежеснежного покрова, определенные экспериментально $C_{э}$ и вычисленные $C_{в}$.

Таблица 4

Экспериментальные и вычисленные значения концентрации ТМ, мкг л⁻¹

Высота отбора пробы, н.у.м.	Сг		Ni		Mn	
	$C_{э}$	$C_{в}$	$C_{э}$	$C_{в}$	$C_{э}$	$C_{в}$
H = 3500 м	7,31	7,308	2,24	2,240	10,73	10,731
H=3700 м	44,34	44,340	12,75	12,750	84,15	84,150
H =4000 м	14,99	14,991	7,58	7,939	35,11	33,852
H = 4020 м	16,45	18,469	5,46	5,462	32,60	33,852
H =4300 м	20,49	18,469	8,30	7,939	20,86	20,867

Как видно из таблицы для указанных элементов их концентрация почти функционально связана с концентрацией водонерастворимых аэрозольных частиц. Коэффициенты детерминации для этих элементов, включая цинк и свинец, выше 0,98.

В пробах свежеснежного покрова для обнаруженных серебра, хрома, никеля и марганца коэффициенты детерминации превосходили значение 0,97.

Полученные результаты, по оценке степени связи концентраций ТМ и водонерастворимых частиц, указывают на то, что вымываемые микропримеси ТМ довольно тесно связаны как с мелкодисперсной фракцией, так и с крупно - и грубодисперсными фракциями водонерастворимых частиц. Гидрометеоры облаков и осадков интенсивно поглощают аэрозольные частицы и благодаря этому формируют свой химический состав.

Основной захват аэрозольных частиц и преобразование их размера происходит в облаке. Связано это с тем, что частицы находятся в облаке больше времени, чем в осадках. В течение этого времени они могут использовать все механизмы укрупнения и таким образом преобразоваться в частицы осадков. Параллельно, с увеличением размера, частицы интенсивно коагулируют с микропримесями. Время пребывания частиц в осадках ограничено из-за малого расстоя-

ния между облаком и подстилающей поверхностью и относительно большей скоростью их падения по сравнению с облачными частицами. При этом удаление аэрозольных частиц в подоблачном слое происходит в основном благодаря инерционному захвату их снежинками и каплями.

Облако служит стоком для мелких аэрозольных частиц и источником крупных, в том числе облачных ядер конденсации и ледяных ядер. После образования капли на ядре конденсации в облаке происходит захват ею аэрозольных частиц в процессе диффузии. Замерзание капель дает начало образованию кристаллов, а их коагуляция приводит к образованию снежинок. Таким образом, в основном, первичным является образование капель, захват ими аэрозольных частиц, коагуляция и образование частиц осадков в виде дождя или снега.

Заключение. В результате проведенных исследований получены основные выводы:

1. Экспериментальным путем определен спектр размеров водонерастворимых аэрозольных частиц, вымытых свежеснегавшим снегом в сезонном снежном покрове в условиях высокогорья. Спектр размеров частиц подчиняется логарифмически нормальному распределению. По экспериментальным данным определены параметры этого распределения.

2. Установлена связь концентрации тяжелых металлов, вымытых снегом, с концентрацией водонерастворимых аэрозольных частиц по интервалам их размера. Коэффициенты детерминации больше 0.97.

Список литературы

1. Василенко В.Н. Мониторинг загрязнения снежного покрова. [Текст] / В.Н. Василенко, И.М. Назаров, Ш.Д. Фридман. - Ленинград: Гидрометеиздат, 1985. - 181 с.
2. Грабовский Р.И. Атмосферные ядра конденсации. [Текст] / Р.И. Грабовский. - Ленинград: Гидрометеиздат, 1956. - 240 с.
3. Грин Х. Аэрозоли - пыли, дымы и туманы. [Текст] / Х. Грин, В. Лейн. - Изд. 2-е, стер. Изд-во «Химия», 1972. - 428 с.
4. Дроздова В. М. Химический состав атмосферных осадков на Европейской территории СССР [Текст]: / В.М. Дроздова, О.П. Петренчук, Е.С. Селезнева и др. - Ленинград: Гидрометеиздат, 1964. -209 с.
5. Иванов А.В. Теория криогенных и гляциогенных гидрохимических процессов [Текст] / А.В. Иванов. - Москва: ВИНТИ. - Итоги науки и техники. Сер. Гляциология. - 1987.- Т.5.-236 с.
6. Ивлев Л.С. Оптические свойства атмосферных аэрозолей. [Текст] / Л.С. Ивлев, С.Д. Андреев. - Ленинград: ЛГУ, 1986. - 320 с.
7. Керимов А.М. Микрочастицы в снежном покрове и ледниках [Текст] / А. М. Керимов // Известия КБНЦ РАН. - 1998. - №1. - С. 96-103.

8. Керимов А.М. Особенности формирования химического состава ледников Кабардино-Балкарии [Текст] / А.М. Керимов, О.В. Рототаева, И.Ф. Хмелевской // МГИ. - № 84. - 1998. - С. 66-71.
9. Кондратьев К.Я. Атмосферный аэрозоль. [Текст] / К.Я. Кондратьев, Н.И. Москаленко, Д.В. Поздняков. - Ленинград: Гидрометеиздат, 1983. - 224 с.
10. Котляков В.М. Изотопная и геохимическая гляциология [Текст] / В.М. Котляков, Ф.Г. Гордиенко. - Ленинград: Гидрометеиздат, 1982, - 288 с.
11. Летувнинкас А.М. Антропогенные геохимические аномалии и природная среда. [Текст]/ А.М. Летувнинкас. -Томск: Изд-во НТЛ, 2002. - 290 с.
12. Хромов С.П. Метеорологический словарь. [Текст] / С.П. Хромов, Л.И. Мамонтова. - Ленинград: Гидрометеиздат, 1974. - 568 с.
13. Химия нижней атмосферы [Текст] / Под ред. С. Расула. - Москва: Мир, 1976. - 408 с.
14. Юнге Х. Химический состав и радиактивность атмосферы. [Текст] / Х. Юнге. - Москва: Мир, 1965. - 423 с.
15. Юшкан, Е.И. Подвижные формы тяжелых металлов в аэрозолях и атмосферных осадках фонового района / Е.И. Юшкан // Мониторинг фонового загрязнения природных сред. Сб. науч. трудов. Вып. 7. - СПб.: Гидрометиздат, 1991. - С. 219-224.

АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ НАНОЧАСТИЦ В ОКРУЖАЮЩИХ СРЕДАХ, ИХ ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОПАСНОСТЬ И РИСКИ

Хучунаев Б.М.¹, Балкарова С.Б.², Машоков Р.А.²

¹ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик

²КБГУ, Физико-математический институт, кафедра геофизики и экологии,
г. Нальчик

Введение

За последние десятилетия исследования в различных областях науки привело к необходимости выделения в отдельную область знания изучение объектов с размерами от 1 до 100 нм. В этой области размеров, описания взаимодействия частиц известными законами квантовой и классической физики затруднено. Это связано с возрастанием роли поверхностных сил. Особые свойства таких частиц проявляются при воздействии их на окружающую среду и на здо-

ровые людей. В связи с этим, появление производства процессов, где используются нанотехнологии и наноматериалы приводит к необходимости оценки их воздействия на окружающую среду и на здоровье населения.

Существуют как естественные источники поступления наночастиц, так и множество источников намеренного и ненамеренного антропогенного загрязнения окружающей среды [1]. Природные и антропогенные источники поступления наночастиц в окружающую среду приводятся в таблице.

Таблица

Источники поступления наночастиц в окружающую среду

Природные	Антропогенные	
	ненамеренные	намеренные
Кластеризация в газах и образование аэрозолей	Сжигание топлива в двигателях, на электростанциях и т.д.	Сконструированные нанообъекты
Лесные пожары	Сжигание мусора	Фуллерены
Вулканические выбросы	Сварка, пайка	Нанотрубки
Пыль, поднятая с поверхности взмучивания вод	Добыча полезных ископаемых (карьеры, шахты)	Неорганические нанокристаллы, квантовые точки
Вирусы	Бытовые отходы	Лекарства «точного» действия
Продукты жизнедеятельности (пленки, коллоиды и т.д.)	Промышленное производство, строительство	Нанопленки, мицеллы, коллоиды
Биообъекты (пыльца растений, споры, бактерии и т.д.)	Приготовление пищи и другие бытовые нужды	Применение наноматериалов в быту

Основными источниками поступления наночастиц в окружающую среду являются производственные процессы, нефтеперерабатывающие заводы, переработка химических веществ и материалов, выхлопные газы транспортных средств, износ тротуаров, промышленные материалы, пестициды, открытое сжигание твердых отходов и даже в помещениях, таких как химические пары в лабораториях, курение, сжигание древесины, стеновые краски, и др. Наноматериалы широко используются в электронике, косметологии, здравоохранении, информационных технологиях. Например, нано-серебро используется в носках, пищевой упаковке, зубной пасте, детских продуктах, стиральных машинах, раневых повязках и пищевых добавках [Batley and McLaughlin 2010].

К перечисленным источникам поступления наночастиц в атмосферу можно добавить активные воздействия на облачные процессы.

Используемым в настоящее время для активного воздействия на облачные процессы является реагент AgI с удельным выходом льдообразующих ядер 10^{13} г^{-1} общее количество аэрозолей 10^{15} при плотности $5,5 \text{ г/см}^3$.

Средний диаметр частицы можно рассчитать по формуле:

$$D = \sqrt[3]{\frac{6m}{\pi\rho} \times 10^{-15}} \quad (1)$$

Подставив известные значения в (1) и вычислив, получили, что $D = 35$ нм. Такой результат означает, что такая частица входит в диапазон наночастиц и является льдообразующей. Поэтому токсическое воздействие регентом необходимо исследовать с учетом этих факторов.

Возрастающее использование наноматериалов в потребительских и промышленных изделиях и увеличение количества наночастиц поступающих в атмосферу в результате их производства увеличивает их выброс в атмосферный воздух, воду и почву, что приводит к неблагоприятным воздействиям на окружающую среду [Kaegi et al., 2008, 2010].

Наноматериалы представляют собой по существу небольшие частицы в диапазоне от 1 нм до 100 нм. Они имеют высокое отношение площади поверхности к объему и имеют значительную поверхностную энергию. Благодаря этому наноматериалы проявляют особые электрические и оптические свойства, которые делают их наиболее перспективными для промышленного использования. Однако их экологические последствия после поступления в окружающую среду имеют проблемы из-за опасностей для здоровья человека и животных. Наночастицы из-за малости размеров долго сохраняются в атмосфере и переносятся на большие расстояния от источника выбросов. Это облегчает попадание в организм путем ингаляции, через кожу и во время приема пищи, созданного из множества источников различной природы, и поэтому воздействие на здоровье имеет решающее значение. По мере развития нанотехнологии увеличивается количество исследований оценок экологических рисков использования инженерных наноматериалов для живых организмов и на окружающую среду [Hou et al., 2013].

Размер, наноструктура и химия поверхности - три важных свойства наноматериалов. Из них физический размер является самым критическим свойством. Их размер и площадь поверхности определяют вредные потенциалы [Donaldson et al., 2004]. В соответствии с Европейским союзом [European Commission, 2003, 2011a, b] наноматериалы представляют собой природные, случайные или изготовленные материалы, содержащие частицы, в несвязанном состоянии или в виде агрегата, агломерата и где для 50% или более частиц, один или несколько внешних размеров находится в диапазоне от 1 нм до 100 нм. Наноматериалы по существу содержат наночастицы менее 100 нм, по крайней мере, в одном измерении. Наночастицы также называют сверхтонкими частицами. Наноматериалы имеют типичное экологическое поведение, которое контролирует его потенциальное воздействие и биологические, и экологические накопления в различных средах. Поэтому они потенциально опасны для экосистемы.

Вопрос о применимости методов исследований наночастиц очень важен. Х. Круг в своем докладе [2] подчеркнул, что на данные о токсичности углеродных нанотрубок (УНТ) наряду с присутствующими в них примесями металлов (признанный эффект) могут повлиять и реактивы, применяемые для экспериментов *in vitro*! В этом случае выводы о вреде нанотрубок могут оказаться ложными. Поэтому при оценке токсичности очень важно правильно охарактеризовать не только сами наноматериалы, но и аналитические методы, используемые в исследованиях.

В настоящее время одним из перспективных методов получения продукции без нанесения вреда окружающей среде является использование методов «зеленой» химии. «Зеленая» химия, «зеленая» энергетика... Эти термины появились в конце прошлого века и сразу стали очень популярными. «Зеленая» химия - принципиально новый инновационный подход к сокращению или полному отказу от использования опасных и токсичных химических веществ. «Зелёная» химия (Green Chemistry) — научное направление в химии, к которому можно отнести любое усовершенствование химических процессов, положительно влияющих на окружающую среду.

В последние годы чрезвычайно возрос интерес к ресурсосберегающим экологически чистым «зеленым» технологиям, инвестиции в фирмы «зеленых» технологий постоянно увеличиваются. «Зеленой нанотехнологии» посвящен доклад Б. Карн [3]. Он объясняет, что – это способ создания и использования наноматериалов без нанесения ущерба окружающей среде и здоровью человека. Таким образом, с одной стороны к «зеленой нанотехнологии» относится производство наноматериалов и материалов с использованием принципов «зеленой» химии и «зеленых технологий» (что улучшает окружающую среду косвенным образом), с другой – создание нанопродуктов, которые непосредственно участвуют в решении прошлых, настоящих и будущих проблем, связанных с защитой природы и здоровьем людей (например, сорбенты для очистки сточных вод или питьевой воды, новые катализаторы, энергетические системы).

Результаты компьютерного моделирования транспорта трех наиболее распространенных видов наночастиц (УТН, нано-Ag, нано-TiO₂), представленные в докладе швейцарских ученых Б.Новак и Н.Мюллер оказались настолько интересными, что были полностью опубликованы в журнале «Environmental Science & Technology» [4] и прокомментированы в июньском выпуске «Nature Nanotechnology» [5].

Наночастицы Ag и TiO₂ наиболее широко представлены в потребительских товарах. Считается, что нано-серебро обладает противомикробными, противогрибковыми и другими полезными свойствами, а нано-TiO₂ производится в больших количествах для использования

в самоочищающихся, необрастающих, противомикробных покрытиях и красках, а также в косметических средствах как поглотитель УФ (только в Австралии имеется более 300 зарегистрированных солнцезащитных продуктов, содержащих наночастицы TiO_2).

В модели использовались следующие входные данные: оценки объемов мирового производства, концентрации наночастиц в различных изделиях, выход наночастиц из изделий и параметры потоков в окружающую среду (от установок для сжигания отходов, мусорных свалок, и/или установок для очистки сточных вод) и между ее областями (воздух, почва, вода). Рассмотрен весь цикл использования продуктов, содержащих наночастицы – от производства до утилизации. Модель такого типа обычно применяется в определении воздействия химических продуктов.

К сожалению, невозможно найти перечень всей продукции, содержащей наночастицы. Многие производители не информируют об их наличии. Вероятно, в ближайшие годы ситуация изменится в лучшую сторону.

В [3] качестве оценки рисков, связанных с токсичностью действия наночастиц предлагается использовать отношение прогнозируемой концентрации наночастиц в окружающей среде к некоторой критической концентрации наночастиц. Если эта концентрация меньше единицы, считается безопасным, если больше единицы, то представляет опасность для окружающей среды. Критическая концентрация для каждого вещества определяется на основе токсикологических исследований. Здесь необходимо отметить, что критическая концентрация для веществ не подменяет общеизвестные предельно допустимые концентрации (ПДК). Для наночастиц необходимо разработать свой ПДК так как их отрицательное воздействие на окружающую среду значительно выше. На основе выше изложенного можно заключить, что для оценки рисков воздействия на окружающую среду проведение мероприятий по активным воздействиям на атмосферные процессы необходимо исследовать на токсикологические действия наночастиц образующихся при возгонке пиротехнических составов. Особенно вопрос актуален при использовании наземных генераторов, так как при этом у поверхности земли концентрации регентов(наночастиц) достигают больших значений.

Список литературы

1. Воздействие наноматериалов на окружающую среду [электронный ресурс]. –URL.: <http://www.nanonewsten.ru>
2. H.F. Krug et al., nanoECO Book of Abstracts 2–7 March, 2008, p.53
3. B. Karn. nanoECO Book of Abstracts 2–7 March, 2008, p.77
4. N. Mueller, B. Nowack., Environ. Sci. Technol. 42, 4447 (2008)
5. M. Scheringer, Nature Nanotechnol., 3, 332 (2008)

Научное издание

**ДОКЛАДЫ
ВСЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
ПО ФИЗИКЕ ОБЛАКОВ И АКТИВНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ
НА ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ**

Сборник научных трудов

В авторской редакции

Издательство не несет ответственности за опубликованные материалы.

Все материалы отображают персональную позицию авторов.

Мнение Издательства может не совпадать с мнением авторов

Подписано в печать 20.09.2017 г. Формат 60x84/16.

Усл. печ. л. 19,8. Тираж 350. Заказ 652.



АЭТЕРНА

НАУЧНО-ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР

**Отпечатано в редакционно-издательском отделе
НАУЧНО-ИЗДАТЕЛЬСКОГО ЦЕНТРА «АЭТЕРНА»**

450076, г. Уфа, ул. М. Гафури 27/2

<http://aeterna-ufa.ru>

info@aeterna-ufa.ru

+7 (347) 266 60 68