

Российская академия наук  
Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского  
Высокогорный геофизический институт Росгидромета

---

# **VIII ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО АТМОСФЕРНОМУ ЭЛЕКТРИЧЕСТВУ**

**с международным участием**

(Нальчик, 23–27 сентября 2019 года)

**Сборник трудов**



Санкт-Петербург  
2019

Ответственный редактор:  
доктор физико-математических наук **Г.Г. Щукин**

**С 23 VIII Всероссийская конференция по атмосферному электричеству [с международным участием]: сборник трудов / отв. ред. Г.Г. Щукин. – СПб.: ВКА им. А.Ф. Можайского, 2019. – 213 с.**

**ISBN 978–5–6042484–6–1**

Сборник содержит труды VIII Всероссийской конференции по атмосферному электричеству, посвященной 185-летию гидрометеорологической службы России и 85-летию Высокогорного геофизического института Росгидромета, состоявшейся в Нальчике 23–27 сентября 2019 г.

Основная часть работ посвящена развитию методов и средств наблюдений за состоянием электрического поля атмосферы, грозоопасного состояния облаков и молниевой активности, взаимодействию электрических и метеорологических процессов в облаках, а также исследованию влияния процессов, протекающих в верхней атмосфере, на состояние электрического поля, связь его с протонами и солнечной активностью. Представлены результаты математического моделирования электрических процессов в приземном слое атмосферы, трехмерная модель конвективного облака с детальным учетом микрофизических, электрических и термодинамических процессов, а также вопросы моделирования грозовых процессов. Рассмотрены результаты экспериментальных и теоретических исследований влияния электрического поля на электризацию капель воды, на рост заряда ледяных частиц в облаках, на льдообразующие свойства реагента. Затронуты вопросы регулирования грозовой активности, а также влияния вариаций электрического поля на метеорологические явления, опасные для людей.

Сборник предназначен для широкого круга специалистов, занимающихся исследованием атмосферного электричества.

*Материалы издания выходят в редакции авторов*

© ВКА имени А.Ф. Можайского, 2019

© Высокогорный геофизический институт Росгидромета, 2019

---

Подписано к печ. 17.09.2019  
Гарнитура Times New Roman  
Уч.-печ. л. 54,00

Формат печатного листа 445×300/4  
Уч. изд. 26,50  
Заказ 3749/74-17  
Бесплатно

---

Типография ВКА имени А.Ф. Можайского

VIII Всероссийская конференция по атмосферному электричеству проводится Высогогорным геофизическим институтом Росгидромета.

Конференция является продолжением всероссийских конференций по атмосферному электричеству, последняя из которых состоялась в сентябре 2012 г. в Санкт-Петербурге.

***Программный комитет:***

*Почетный председатель* – Залиханов М.Ч., академик РАН, ФГБУ «ВГИ», Нальчик

*Председатель* – Шукин Г.Г., д-р физ.-мат. наук, проф., ВКА им. А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург

*Заместитель председателя* – Аджиев А.Х., д-р физ.-мат. наук, проф., ФГБУ «ВГИ», Нальчик

Асмус В.В. – д-р физ.-мат. наук, проф. (НИЦ «Планета», Москва)

Анисимов С.В. – д-р физ.-мат. наук, проф. (ГО «Борок» ИФЗРАН, пос. Борок)

Базелян Э.М. – д-р физ.-мат. наук, проф. (ЭНИН им. Г.М. Кржижановского, Москва)

Балега Ю.Ю. – академик РАН (РАН, Москва)

Бейтуганов М.Н. – д-р физ.-мат. наук, проф. (Северо-Кавказская ВС, Нальчик)

Беккиев А.Ю. – чл.-кор. РАН (Ростех, Москва)

Горбатенко В.П. – д-р геогр. наук, проф. (ТГУ, Томск)

Готюр И.А. – д-р техн. наук, доц. (ВКА им. А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург)

Грунская Л.В. – д-р физ.-мат. наук, проф. (ВлГУ, Владимир)

Жеребцов Г.А. – академик РАН (ИСЗФ СО РАН, Иркутск)

Зеленый Л.М. – академик РАН (ИКИ РАН, Москва)

Зернов Н.Н. – д-р физ.-мат. наук, проф., (СПбГУ, Санкт-Петербург)

Иванов В.Н. – канд. физ.-мат. наук (НПО «Тайфун», г. Обнинск)

Иудин Д.И. – д-р физ.-мат. наук, проф. (ИПФ РАН, Н. Новгород)

Кабанов М.В. – чл.-кор. РАН (ИМКЭС, Томск)

Караштин А.Н. – д-р физ.-мат. наук (ФГБНУ НИРФИ, Н. Новгород)

Козелов Б.В. – д-р физ.-мат. наук, проф. (ПГИ КНЦ РАН, Мурманск)

Козлов В.И. – канд. физ.-мат. наук (ИКФИА СО РАН, Якутск)

Куповых Г.В. – д-р физ.-мат. наук, проф. (ЮФУ, Таганрог)

Кузнецов В.Д. – д-р физ.-мат. наук, проф. (ИЗМИРАН им. И.В. Пушкова, Троицк)

Лукин Д.С. – д-р физ.-мат. наук, проф. (МФТИ, Москва)

Макоско А.А. – чл.-кор. РАН (ИФА РАН, Москва)

Мареев Е.А. – чл.-кор. РАН (ИПФ РАН, Н. Новгород)

Матвиенко Г.Г. – д-р физ.-мат. наук, проф. (ИОА СО РАН, Томск)

Морозов В.Н. – д-р физ.-мат. наук (ТГО им. А.И. Воейкова, Санкт-Петербург)

Мохов И.И. – академик РАН (ИФА им. А.М. Обухова, Москва)

Панасюк М.И. – д-р физ.-мат. наук, проф. (НИИЯФ МГУ, Москва)

Потехин А.П. – чл.-кор. РАН (ИСЗФ СО РАН, Иркутск)

Раков В.А. – проф. (Флорида, США)

Репин А.Ю. – д-р физ.-мат. наук, доц. (ИПГ, Москва)

Смышляев С.П. – д-р физ.-мат. наук, проф. (РГГМУ, Санкт-Петербург)

Собисевич А.Л. – чл.-кор. РАН (ИФЗ РАН им. О.Ю. Шмидта, Москва)

Тасенко С.В. – канд. техн. наук (Росгидромет, Москва)

Трошичев О.А. – д-р физ.-мат. наук, проф. (АНИИ Росгидромета, Санкт-Петербург)

Удриш В.В. – (ГМС ВС РФ, Москва)

Федченко Л.М. – д-р геогр. наук, проф., академик РАЕН и МАИ (ФГБУ «ВГИ», г. Нальчик)

Шевцов Б.М. – д-р физ.-мат. наук, проф. (ИКИР ДВО РАН, Паратунка)

Шулейкин В.Н. – д-р физ.-мат. наук (ИПНГ РАН, Москва)

***Организационный комитет:***

*Сопредседатель* – Беккиев М.Ю., д-р техн. наук, проф., директор ФГБУ «ВГИ»

*Сопредседатель* – Кулешов Ю.В., д-р техн. наук, проф., ВКА им. А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург

*Зам. председателя* – Калов Р.Х., канд. физ.-мат. наук, доц., заместитель директора по научной работе

*Секретарь* – Созаева Л.Т., канд. физ.-мат. наук, доц., ФГБУ «ВГИ»

## СОДЕРЖАНИЕ

### Секция 1. Электричество хорошей погоды, атмосферные ионы и аэрозоли

<i>Зайнетдинов Б.Г., Соколенко Л.Г.</i> Итоги совершенствования сети Росгидромета по наблюдениям за электрическими характеристиками атмосферы.....	7
<i>Морозов В.Н., Палей А.А., Писанко Ю.В., Соколенко Л.Г.</i> О влиянии коронного разряда на электрические параметры атмосферы.....	9
<i>Руленко О.П.</i> Образование отрицательных аномалий атмосферного электрического поля у земной поверхности при тектоносейсмическом процессе.....	10
<i>Антонова В.П., Крюков С.В., Луценко В.Ю.</i> Вариации атмосферного электрического поля на высокогорной станции Тянь-Шаня, обусловленные регулярными и спорадическими источниками.....	12
<i>Панчишкина И.Н., Петрова Г.Г., Петров А.И., Егоров Е.В.</i> Экспедиционные исследования влияния термодинамических условий в атмосфере на перенос зарядов под действием механических сил.....	14
<i>Казакова С.Т., Кулиев Д.Д., Жарашуев М.В.</i> Сезонные вариации суточного хода напряженности электрического поля атмосферы Земли.....	16
<i>Куповых Г.В., Кудринская Т.В., Тимошенко Д.В., Клово А.Г., Свидельский С.С., Литвинова В.С.</i> Результаты мониторинга атмосферного электрического поля в районе Эльбруса .....	18
<i>Шулейкин В.Н.</i> Повышение точности атмосферно-электрического мониторинга геологических неоднородностей и зон геодинамических процессов.....	20
<i>Шулейкин В.Н.</i> Молнии и воздухообмен почва-атмосфера от электричества хорошей погоды к грозовому электричеству.....	22
<i>Петров А.И., Петрова Г.Г., Панчишкина И.Н., Аджиев А.Х., Кочин А.В., Чхетиани О.Г., Егоров Е.В.</i> Результаты измерений электрического поля в приземном слое в степной и высокогорной зонах юга России.....	24
<i>Петрова Г.Г., Петров А.И., Панчишкина И.Н., Аджиев А.Х., Егоров Е.В., Бураева Е.А.</i> Исследования ионизации приземной атмосферы и природных радионуклидов в различных физико-географических условиях.....	26
<i>Петрова Г.Г., Панчишкина И.Н., Петров А.И., Чхетиани О.Г.</i> Атмосферно-электрические профили в приземном слое с учётом значимых факторов: перемешивание, радон, аэрозоли.....	28
<i>Кашлева Л.В., Баранова М.Е.</i> Расчет электрических параметров тропосферы в условиях «хорошей погоды» и при облачной погоде.....	30
<i>Амиранашвили А.Г., Поволоцкая Н.П., Сеник И.А., Чихладзе В.А.</i> Содержание легких аэроионов в некоторых районах Северного Кавказа и Грузии.....	32
<i>Амиранашвили А.Г.</i> Особенности образования легких ионов в условиях сильно загрязненной атмосферы.....	34

### Секция 2. Глобальная электрическая цепь

<i>Морозов В.Н.</i> Теоретические исследования по глобальной электрической цепи в Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова.....	37
---	----

### Секция 3. Электричество облаков

<i>Акбашев Р.Р., Фирстов П.П.</i> Отклик градиент потенциала электрического поля атмосферы на эруптивные облака в Шивелуч и в Эбеко (п-ов Камчатка, о. Парамушир, Россия).....	40
<i>Фирстов П.П., Малкин Е.И., Чернева Н.В., Дружин Г.И., Лобачева М.А.</i> Грозовая активность эруптивных облаков вулкана Шивелуч в 2017 г.....	42
<i>Михайловский Ю.П., Кашлева Л.В.</i> Роль льда в электризации облаков.....	45
<i>Синькевич А.А., Михайловский Ю.П., Попов В.Б.</i> Исследование процесса формирования грозоградового облака по данным дистанционных измерений.....	47
<i>Машуков Х.Х., Зекореев Р.Х., Камбиев М.М.</i> Ракетное исследование электрических характеристик грозовых облаков.....	48
<i>Инюхин В.С., Березинский И.Н.</i> Использование метеорологической базы данных для разработки эмпирической (физико-статистической) модели грозоградных облаков.....	50
<i>Аджиев А.Х., Кулиев Д.Д.</i> Параметры молниевых разрядов и характеристики грозовой активности на территории юга европейской части России.....	52

### Секция 4. Физика молнии

<i>Zhu Y., Ding Z., Rakov V.A., Tran M.D.</i> An upward negative lightning flash triggered from a tall tower by A +CG at a distance of 45 km from the tower.....	61
--	----

### Секция 5. Атмосферное электричество, метеорология и климат

<i>Бейтуганов М.Н., Чочаев Х.Х.</i> Опыты по предотвращению града инициированием искусственных молний с помощью противогордовых ракет с токопроводящей поверхностью.....	63
<i>Каранина С.Ю., Кочеева Н.А., Беликова М.Ю., Каранин А.В.</i> Апробация автоматического выделения грозовых очагов на юге Западной Сибири по данным WWLLN с помощью алгоритма кластеризации FRIS-TAX.....	72

<i>Кочеева Н.А., Каранина С.Ю., Каранин А.В., Беликова М.Ю.</i> Анализ молниевой активности на территории Алтае-Саянского региона по данным WWLLN за 2011-2018 годы.....	74
<i>Грунская Л.В., Исакевич В.В., Исакевич Д.В.</i> Геофизические и астрофизические процессы в электрическом поле Земли.....	76
<i>Грунская Л.В., Золотов А.Н., Бушуев А.С.</i> Универсальная система сбора данных для мониторинга характеристик природной среды.....	79
<i>Пустовалов К.Н., Корольков В.А., Нагорский П.М.</i> Классификация откликов в приземном электрическом поле на прохождение внутримассовых кучево-дождевых облаков.....	81
<i>Пустовалов К.Н., Кабанов М.В., Нагорский П.М., Смирнов С.В.</i> Электрическое поле приземной атмосферы во время интенсивных лесных пожаров на территории Сибири.....	83
<i>Козлов В.И., Корсаков А.А., Тарабукина Л.Д.</i> Вариация грозовых радишумов в 24-ом солнечном цикле.....	85
<i>Тарабукина Л.Д., Антохина О.Ю., Кононова Н.К., Козлов В.И., Иннокентьев Д.Е.</i> Формирование интенсивных гроз в Якутии в годы частых атмосферных блокирующих процессов в Западной Сибири.....	88
<i>Смирнов С.Э., Михайлов Ю.М., Михайлова Г.А., Капустина О.В.</i> К вопросу о природе зимних гроз на Камчатке.....	89
<i>Акселевич В.И., Мазуров Г.И.</i> Использование электричества для активных воздействий.....	92
<i>Ершова Т.В.</i> Грозовая активность над антропогенными и природными ландшафтами.....	93
<i>Кагермазов А.Х.</i> Прогноз грозоградовых процессов на основе расчетных полей метеоэлементов глобальной прогностической модели (GFS) для районов Западного Кавказа.....	96
<i>Нечепуренко О.Е., Константинова Д.А.</i> Долговременная изменчивость числа дней с грозой над территорией Сибири.....	98
<i>Горбатенко В.П., Ершова Т.В.</i> Характеристики конвекции над юго-востоком Западной Сибири в дни с сильными грозами.....	100
<i>Кужевская И.В., Волкова М.А., Нечепуренко О.Е., Чурсин В.В.</i> Климатология градовых процессов юга Западной Сибири.....	102
<i>Ерофеев В.Я., Кабанов М.В.</i> Результаты испытаний датчика на основе металла с памятью формы для мониторинга атмосферно-электрических процессов.....	104
<i>Малкандуева Л.М.</i> Анализ динамики электрического поля атмосферы при снегопаде и метелях.....	106
<i>Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Геккиева Ж.М., Аджиев А.Х.</i> Связь грозовой активности градовых облаков с их радиолокационными характеристиками.....	110
<i>Экба Я.А., Ахсалба А.К., Марандиди С.И.</i> Проявление экстремальных явлений погоды на территории Абхазии.....	116
<i>Ганжа А.А.</i> Квантовые преобразования энергии атмосферы.....	117
<i>Гергоков А.Х.</i> Исследование грозовых разрядов в мощных градовых облаках.....	120
<i>Зейналов И.</i> Применение низкоорбитальных спутников в развитии альтернативной энергетики на территории Азербайджана.....	122
<b>Секция 6. Электричество средней и верхней атмосферы; высокоэнергичные процессы в атмосфере</b>	
<i>Глатов А.Г., Тертышников А.В.</i> Мониторинг параметров космической погоды на основе национальных данных наземных наблюдений солнечной активности.....	124
<i>Панасюк М.И., Климов П.А., Гарипов Г.К., Свертилов С.И., Богомоллов В.В., Казначеева М.А., Петров В.Л., Хренов Б.А., Яшин И.В.</i> Транзиентные высокоэнергичные процессы в атмосфере по данным экспериментов на спутниках «Вернов» и «Ломоносов».....	126
<i>Хаердинов Н.С.</i> Особенности ночных гроз на средних широтах во время магнитосферных суббурь.....	127
<i>Панасюк М.И., Богомоллов В.В., Июдин А.Ф., Максимов И.А., Новиков А.А., Свертилов С.И., Яшин И.В.</i> Гамма излучение во время гроз по данным наземных и космических экспериментов.....	129
<i>Панасюк М.И., Свертилов С.И., Богомоллов В.В., Богомоллов А.В., Гарипов Г.К., Июдин А.Ф., Климов П.А.</i> Всплески гамма излучения из атмосферы Земли по данным наблюдений на спутнике «Вернов».....	131
<b>Секция 7. Гронопеленгация и грозозащита, вопросы безопасности</b>	
<i>Кононов И.И., Коровин Е.А., Щукин Г.Г., Юсупов И.Е.</i> Современное состояние и перспективы развития пассивных радиотехнических средств мониторинга грозовой активности.....	133
<i>Коровин Е.А., Готюр И.А., Кулешов Ю.В., Щукин Г.Г.</i> Регистрация молниевых разрядов по данным измерителя напряженности электрического поля.....	138
<i>Кононов И.И., Юсупов И.Е.</i> Исследование возможностей повышения точностных и вероятностных характеристик пассивных СДВ-средств мониторинга грозовой активности.....	142
<i>Аджиев А.Х., Кулиев Д.Д., Казакова С.Т., Муратов И.А., Будаев А.С., Жарашуев М.В.</i> Статистические параметры молниевых разрядов на юге европейской части России.....	143
<i>Константинова Д.А., Нечепуренко О.Е.</i> Параметры молниевой активности на территории Западной Сибири по данным гронопеленгатора.....	146

<i>Аджиева А.А., Шаповалов В.А.</i> Исследование пространственно-временной изменчивости хода параметров грозовой активности на Северном Кавказе по данным грозопеленгации.....	147
<i>Кузнецов И.Е., Белинский А.С.</i> Методика мониторинга молниевой активности по данным пространственно-распределенной наблюдательной сети.....	150
<i>Снегуров А.В., Снегуров В.С.</i> Грозопеленгационная система Росгидромета.....	152
<i>Богушов А.К., Панюков А.В.</i> Статистические пассивные методы локализации дипольного источника электромагнитного излучения.....	155
<i>Кузьмин В.А.</i> Характеристики токов молний на юге европейской части России.....	157
<b>Секция 8. Грозное электричество и химия атмосферы; экологические аспекты атмосферного электричества</b>	
<i>Доронин А.П., Кулешов Ю.В., Петроченко В.М., Щукин Г.Г.</i> Методы изменения грозового электричества путем модифицирования конвективных облаков естественного и искусственного происхождения.....	160
<i>Мазуров Г.И., Акселевич В.И.</i> Антропогенные факторы, приводящие к возникновению статического электричества.....	165
<i>Жинжакова Л.З., Отарова А.С.</i> Сравнительный анализ грозовой активности, интенсивности конвективного процесса и содержания соединений азота в осадках г. Нальчика 2017 года.....	167
<i>Машуков Х.Х., Ташилова А.А., Кешева Л.А., Машуков И.Х.</i> Классификационный анализ для ранжирования метеотропных реакций людей в зависимости от вариаций электрического поля атмосферы.....	169
<i>Зекореев Р.Х., Машуков Х.Х., Камбиев М.М.</i> Влияние загрязнения атмосферы на состояние электрического поля в районе карьера открытых горных разработок.....	171
<i>Жарашуев М.В., Текуева М.Т.</i> Статистический анализ молний типа земля – облако на территории Северного Кавказа и Ставропольского края.....	173
<b>Секция 9. Лабораторное моделирование электрических процессов в атмосфере</b>	
<i>Темников А.Г., Журавкова Д.С., Орлов А.В., Черненский Л.Л., Лысов Н.Ю., Белова О.С., Кившар Т.К., Воеводин В.В.</i> Исследование перспектив применения групп модельных гидрометеоров для искусственного инициирования молнии.....	176
<i>Темников А.Г., Белова О.С., Черненский Л.Л., Орлов А.В., Лысов Н.Ю., Кившар Т.К., Журавкова Д.С.</i> Исследование влияния групп модельных гидрометеоров на форму и характеристики импульсов электромагнитного излучения, регистрируемого вблизи искусственных грозовых ячеек.....	178
<i>Хучунаев Б.М., Ташилова А.А., Теунова Н.В., Будаев А.Х.</i> Влияние электрического поля на льдообразующие свойства реагента при реализации различных механизмов кристаллизации.....	180
<i>Балкарова С.Б., Созаева Л.Т., Геккиева С.О.</i> Влияние электрического поля на процессы кристаллизации капель воды в потоке воздуха.....	183
<b>Секция 10. Математическое моделирование электрических процессов в атмосфере</b>	
<i>Веремей Н.Е., Довгалак Ю.А., Торопова М.Л.</i> Исследование взаимосвязи осадкообразования и электрической структуры грозоградового кучево-дождевого облака по результатам трехмерного численного моделирования.....	186
<i>Станкова Е.Н., Хватков Е.В.</i> Алгоритм для обработки результатов моделирования грозовых процессов в конвективном облаке с использованием методов машинного обучения.....	188
<i>Кумыков Т.С.</i> Упрощенная модель роста заряда капель и ледяных частиц во фрактальной облачной среде.....	190
<i>Куповых Г.В., Кудринская Т.В., Тимошенко Д.В., Клово А.Г., Свидельский С.С., Литвинова В.С.</i> Математическое моделирование электрических процессов в приземном слое атмосферы.....	191
<i>Михайлов Ю.М., Гайдук В.И., Капустина О.В.</i> Возмущения магнитного поля, инициируемые при работе стенда «Сура», на расстоянии свыше 500 км от источника.....	193
<i>Хегай В.В., Карелин А.В.</i> Об эффективности проникновения электростатического поля крупномасштабных наземных источников в ионосферу с учетом анизотропии проводимости.....	196
<i>Калов Р.Х., Балкарова С.Б., Калов Х.М., Этезова М.Б.</i> Тепломассоперенос в грозовых облаках и технических устройствах.....	198
<i>Машуков И.Х., Аджиева А.А., Шаповалов В.А.</i> Анализ недельного хода напряженности электрического поля атмосферы для территории КБР по данным сети из четырех датчиков EFM550.....	201
<i>Созаева Л.Т., Макитов В.С.</i> Предварительные результаты оценки влияния деформации растущих в электромагнитном поле капель на их рассеивающие свойства.....	203
<i>Шаповалов В.А., Ашабоков Б.А., Шаповалов А.В., Шериева М.А.</i> Трехмерная математическая модель конвективного облака с детальным учетом термодинамических, микрофизических и электрических процессов.....	206
<i>Рубинштейн К.Г., Губенко И.М., Юсупов Ю.И., Тихоненко Н.Д.</i> Эксперименты по усвоению данных сети грозопеленгации: первые результаты.....	211

## СЕКЦИЯ 1. Электричество хорошей погоды, атмосферные ионы и аэрозоли

### ИТОГИ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ СЕТИ РОСГИДРОМЕТА ПО НАБЛЮДЕНИЯМ ЗА ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ АТМОСФЕРЫ

Б.Г. Зайнетдинов, Л.Г. Соколенко

ФГБУ «ГГО», г. Санкт-Петербург  
bulatoss@yandex.ru

С 2013 года специалистами ФГБУ «ГГО» были выполнены работы по переоснащению четырех действующих пунктов Воейково, Верхнее Дуброво, Иркутск и Южно-Сахалинск новыми автоматизированными средствами измерений, позволившими автоматизировать процесс измерений и обработки данных, а также получать конечную информационную продукцию в режиме реального времени. На основе современной элементной базы, новых цифровых и программных технологий были разработаны измерители напряженности электрического поля атмосферы «Поле-2М» и электрической проводимости воздуха «Электропроводность-2М», которые прошли испытания с целью утверждения типа, занесены в госреестр средств измерений и имеют утвержденные Росстандартом методики поверки [1].



Рисунок 1. Атмосферно-электрический измерительный комплекс АЭИК

Для обеспечения единства измерений разработано метрологическое обеспечение измерителей «Поле-2М» и «Электропроводность-2М». На рисунке 2 представлены рабочий эталон единицы напряженности электростатического поля на базе калибратора КНЭП-1М (слева) и единицы удельной электрической проводимости воздуха на базе эталонного измерителя «Электропроводность-2Э» и биполярного генератора легких ионов (справа).



Рисунок 2. Средства поверки измерителей «Поле-2М» и «Электропроводность-2М»

На основе разработанной концепции развития сети наблюдений за атмосферным электричеством в период 2014–2015 гг. дополнительно к существующим были организованы наблюдения на новых пяти пунктах на территории РФ. На рисунке 3 представлена карта расположения пунктов наблюдений. Выбор новых пунктов основывался на возросшем интересе к геофизическим исследованиям в Арктической зоне, а также на том, что влияние внешних генераторов

на электрическое поле атмосферы в высокоширотной зоне наиболее значимо, а антропогенные воздействия на окружающую среду минимальны. Также по инициативе Росгидромета в 2017 г. ФГБУ «ГГО» совместно с ФГБУ «ААНИИ» были организованы наблюдения на Северной Земле – самом северном пункте наблюдений (Ледовая база «Мыс Баранова»).



Рисунок 3. Карта расположения, с учетом вновь организованных, пунктов атмосферно-электрической сети на территории РФ

В связи с переходом на автоматизированные наблюдения разработан и в 2017–2018 годах внедрен на наблюдательной сети РД 52.04.168-2017 «Наблюдения за атмосферным электричеством с использованием автоматизированных средств измерений».

Для сохранения схожести (однородности) рядов наблюдений при переходе на новые средства измерений в течение 1,5–2 лет были проведены параллельные сравнительные измерения, по итогам которых коэффициент корреляции для среднечасовых значений напряженности электрического поля и электрической проводимости воздуха в течение всего периода наблюдений составил порядка 0,9. Это позволило сделать вывод о достаточно корректной работе АЭИК и с большой достоверностью продолжить непрерывные ряды наблюдений на исторических пунктах, начатых в 60-х годах прошлого века.

Помимо продолжения длительных рядов наблюдений на исторических пунктах, также, начиная с 2014 года, ведутся наблюдения на прибрежных станциях Российской Арктики. В настоящее время получены уникальные данные об электрическом состоянии приземного слоя атмосферы в Арктической зоне [2]. Благодаря отсутствию антропогенной нагрузки в данном регионе, при выполнении условий «хорошей погоды» на станциях наблюдается унитарная вариация (рисунок 4).

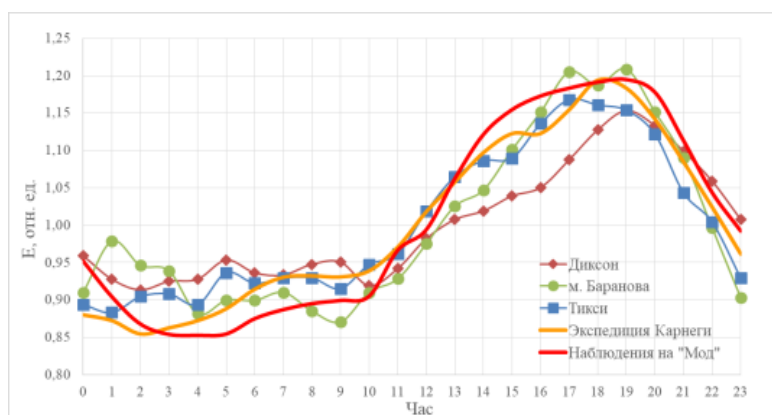


Рисунок 4. Суточный ход напряженности электрического поля атмосферы (в относительных единицах) на полярных станциях Росгидромета в сравнении с данными экспедиции Карнеги и наблюдениях на Земле королевы Мод



На рисунке 5 на фоне многолетних наблюдений представлены современные данные наблюдений за электрическими параметрами атмосферы.

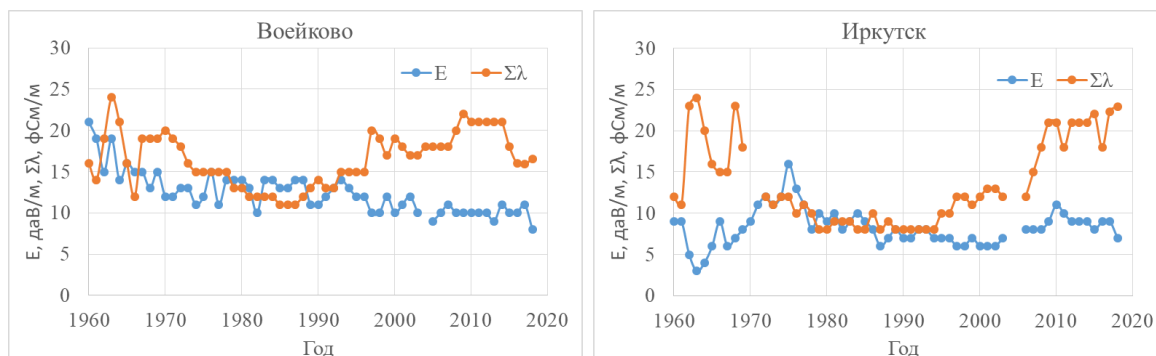


Рисунок 5. Среднегодовые значения напряженности электрического поля атмосферы (в декавольтах на метр) и суммарной электрической проводимости воздуха (фСм/м)

На фоне тенденций последнего десятилетия, кардинальных изменений градиента потенциала электрического поля атмосферы на пунктах, осуществляющих мониторинг электрического состояния атмосферы, не произошло. Что касается электрической проводимости воздуха, более низкие значения, чем в предыдущий период в Воейково, возможно связаны с приводящим к росту аэрозольного загрязнения активным освоением территории между Санкт-Петербургом и Воейково, включая жилищное строительство и организацию промышленных зон.

### Литература

1. Соколенко Л.Г., Зайнетдинов Б.Г. Результаты модернизации и расширения сети наблюдений за атмосферным электричеством // Труды ГГО. 2018. Вып. 589. С. 156–166.
2. Зайнетдинов Б.Г. Результаты наблюдений за электрическими характеристиками приземного слоя атмосферы в полярном регионе // Труды ГГО. 2018. Вып. 588. С. 47–61.

### О ВЛИЯНИИ КОРОННОГО РАЗРЯДА НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ АТМОСФЕРЫ

В.Н. Морозов<sup>1</sup>, А.А. Палей<sup>2</sup>, Ю.В. Писанко<sup>2</sup>, Л.Г. Соколенко<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова, С. Петербург

<sup>2</sup>Институт прикладной геофизики им. академика Е.К. Федорова, Москва  
a\_paley@mail.ru

Лабораторные исследования, выполненные в лаборатории Института прикладной геофизики, показали, что электрические разряды сопровождаются существенным аэрозольным загрязнением воздуха в нанометровом диапазоне размеров частиц [1]. Существенное загрязнение атмосферы от электрических разрядов наблюдается и в полевых условиях. Вблизи ЛЭП зарегистрировано увеличение численной концентрации аэрозольных частиц, которая более чем на порядок превышает фоновую численную концентрацию [2, 3].

Результаты экспериментальных исследований, выполненных с участием специалистов НПО «Тайфун» (Н.П. Романова, В.Г. Еранькова и др.) в большой аэрозольной камере (объем камеры 3200 м<sup>3</sup>), показали, что через 20 минут после генерации коронного разряда в очищенном от всех аэрозолей объеме атмосферного воздуха появляются аэрозоли нанометрового диапазона размеров (концентрация ~ 10<sup>5</sup> см<sup>-3</sup>). Генерация коронного разряда (ток –3 мА) осуществлялась путем подачи высокого напряжения (35 кВ) на коронирующие электроды, установленные с зазором (8 см) относительно заземленной свободной для прохождения воздушного потока решетчатой конструкции площадью 1,2 м<sup>2</sup>. Суммарная мощность коронного разряда составляла ~ 100 Вт [4].

Как показали результаты совместного мониторинга аэрозольных частиц и электрических параметров атмосферы, проведенных в ГГО с участием Б.Г. Зайнетдинова, электрическая проводимость атмосферы и значение электрического поля практически полностью коррелируют с

численной концентрацией аэрозольных частиц. Расчеты коагуляции на основе уравнения Смолуховского также подтверждают результаты экспериментов представленных в [4]. Это позволяет сделать вывод о существенном влиянии коронного разряда, и, в частности, ЛЭП на электрические параметры атмосферы и необходимости проведения более полных исследований в естественных полевых условиях.

### Литература

1. Толпыгин Л.И. О перспективах возможности очистки воздуха от аэрозольных частиц посредством неоднородного электрического поля / Л.И. Толпыгин, С.Н. Дубцов, М.А. Васильева., Н.В. Жохова, А.А.Палей // Журнал «Экология и промышленность России» М.: Калвис, Октябрь, 2014. С. 48–51.
2. Васильева М.А. Полевые исследования по влиянию ЛЭП на концентрацию атмосферных аэрозолей / М.А.Васильева, С.Н. Дубцов, Н.В. Жохова, А.А. Палей // РАН. ГО «Борок». Глобальная электрическая сеть. Материалы второй Всероссийской конференции. Борок 5–9 октября 2015г.
3. Васильева М.А. Оценка уровня концентрации аэрозольных частиц у автомобильной дороги и ЛЭП в сравнении с фоновыми показателями субмикронных частиц естественной атмосферы / М.А.Васильева, С.Н. Дубцов, Н.В. Жохова, А.А. Палей, Ю.В. Писанко, Л.И. Толпыгин // Труды ГГО. Вып. 580. 2016. С. 99–109.
4. Васильева М.А. Формирование аэрозолей путем генерации коронного разряда и характеристики их эволюции / М.А. Васильева, В.Г. Ераньков, Н.В. Жохова, А.А. Палей, Н.П.Романов // РАН. ГО «Борок». Глобальная электрическая сеть. Материалы третьей Всероссийской конференции. Борок, 2017.

## ОБРАЗОВАНИЕ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ АНОМАЛИЙ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ У ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ТЕКТОНОСЕЙСМИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ

*О.П. Руленко*

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский  
rulenko@ksnet.ru

К настоящему времени в различных сейсмоактивных регионах мира зарегистрированы аномальные возмущения атмосферного электрического поля (АЭП) у земной поверхности. Наиболее часто среди них наблюдаются бухтообразные уменьшения АЭП с изменением знака. Такие отрицательные аномалии появляются в условиях хорошей и близкой к ним погоды перед умеренными и сильными локальными землетрясениями [1–5 и др.], а также в сейсмически спокойные периоды вместе с увеличением акустической эмиссии приповерхностных осадочных пород при усилении их деформирования [6, 7]. Длительность этих аномалий обычно 0.7–4 ч. При слабых землетрясениях наблюдается уменьшение АЭП без изменения знака [8].

Все это свидетельствует о том, что отрицательные аномалии АЭП связаны с тектоносейсмическим процессом, который постоянно протекает в сейсмоактивных регионах и вызывает изменения напряженно-деформированного состояния горных пород перед землетрясениями и в сейсмически спокойные периоды. Землетрясения являются сейсмической составляющей этого процесса как результат интенсивного деформирования пород под действием тектонических сил [9].

Отрицательные аномалии АЭП наблюдаются у границы земля – атмосфера, которая характеризуется сильными изменениями свойств контактирующих сред, широким перечнем одновременно существующих разнородных полей, их взаимодействием и преобразованием. Обмениваясь различными субстанциями и энергией, на этой границе наиболее активно взаимодействуют твердая и газообразная геосферные оболочки [10, 11]. Составной частью взаимодействия является воздействие литосферы на атмосферу, которое интенсивно протекает в сейсмоактивных регионах и сопровождается возмущениями в обеих средах приповерхностных полей, в частности увеличением радона и торона в почвенном газе и воздухе перед землетрясениями [12, 13], когда усиливается деформирование пород.

При хорошей погоде в приземном воздухе иногда появляется отрицательный объемный заряд ([14–16] – обзор). Электрическое поле этого заряда накладывается на атмосферное электрическое поле глобального происхождения и возникает локальное уменьшение АЭП, в том числе с изменением знака [17, 18]. Отрицательный объемный заряд сохраняется и при слабом ветре, но масштаб его распределения увеличивается, а величина уменьшается [15]. Эти результаты получены для

асейсмичных регионов, где скорость поступления тектонической энергии и деформирования пород меньше, чем в сейсмоактивных [9]. Появление такого заряда перед землетрясением обнаружено в [19].

Отрицательный объемный заряд возникает при увеличении интенсивности ионообразования в приземном воздухе в результате увеличения содержания повсеместно диффундирующего из земли радона [14–16]. Участие торона в образовании ионов не рассматривалось, хотя эта эманация регистрируется на высоте до 15 м над землей [20], а ее концентрация у земной поверхности может быть больше, чем радона [21].

Таким образом, отрицательные аномалии АЭП есть одно из проявлений воздействия тектоносейсмического процесса на приземную атмосферу. Их источником является локальный отрицательный объемный заряд, который возникает у земной поверхности и имеет деформационно-эманационную природу. Образование и диссипация этого заряда формируют бухтообразную отрицательную форму данных аномалий.

### Литература

1. Руленко О.П. Оперативные предвестники землетрясений в электричестве приземной атмосферы // Вулканология и сейсмология. 2000. № 4. С. 57–68.
2. Смирнов С.Э. Особенности отрицательных аномалий квазистатического электрического поля в приземной атмосфере на Камчатке // Геомагнетизм и аэронавигация. 2005. Т. 45. № 2. С. 282–287.
3. Токтоналиев А.М. Электромагнитные предвестники землетрясений. Каракол: Иссык-Кульский гос. университет. 2007. 312 с.
4. Choudhury A., Guha A., De B. K., Roy R. A statistical study on precursory effects of earthquakes observed through the atmospheric vertical electric field in northeast India // Annals of Geophysics. 2013. V. 56. № 3. P. 331–340.
5. Kachakhidze N., Kachakhidze M., Kereselidze Z., Ramishvili G. Specific variations of the atmospheric electric field potential gradient as a possible precursor of Caucasus earthquakes // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2009. V. 9. P. 1221–1226.
6. Маратулец Ю. В., Руленко О. П., Мищенко М. А., Шевцов Б. М. Связь высокочастотной геоакустической эмиссии с электрическим полем в атмосфере при сеймотектоническом процессе // ДАН. 2010. Т. 431. № 2. С. 242–245.
7. Маратулец Ю. В., Руленко О. П., Ларионов И. А., Мищенко М. А. Одновременный отклик высокочастотной геоакустической эмиссии и атмосферного электрического поля на деформирование приповерхностных осадочных пород // ДАН. 2011. Т. 440. № 3. С. 403–406.
8. Kondo G. The variation of the atmospheric electric field at the time of earthquake // Mem. Kakioka Magnet. Observ. 1968. Vol. 13. № 1. P. 11–23.
9. Садовский М.А., Болховитинов Л.Г., Писаренко В.Ф. Деформирование геофизической среды и сейсмический процесс. М.: Наука. 1987. 101 с.
10. Адушкин В.В., Спивак А.А. Приповерхностная геофизика: комплексные исследования литосферно-атмосферных взаимодействий в окружающей среде // Физика Земли. 2012. № 3. С. 3–21.
11. Адушкин В.В., Спивак А.А. Физические поля в приповерхностной геофизике. М.: ГЕОС. 2014. 360 с.
12. Руленко О.П., Кузьмин Ю.Д. Увеличение радона и торона в районе Верхне-Паратунской гидротермальной системы Южной Камчатки перед катастрофическим землетрясением в Японии 11 марта 2011 г. // Вулканология и сейсмология. 2015. № 5. С. 36–42.
13. Yang T. F., Walia V., Chyi L. L. et al. Variations of soil radon and thoron concentrations in a fault zone and prospective earthquakes in SW Taiwan // Radiation Measurements. 2005. V. 40. P. 496–502.
14. Чалмерс Дж. А. Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеиздат. 1974. 421 с.
15. Куновых Г.В., Морозов В.Н., Шварц Я.М. Теория электродного эффекта в атмосфере. Таганрог: ТРТУ. 1998. 123 с.
16. Kulkarni M., Kamra A.K. Vertical profiles of atmospheric electric parameters close to ground // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. № D22. P. 28209–28221.
17. Kamra A.K. Fair weather space charge distribution in the lowest 2 m of the atmosphere // J. Geophys. Res. 1982. V. 87. № C6. P. 4257–4263.
18. Pawar S.D., Karma A.K. Comparative measurements of the atmospheric electric space charge density made with the filtration and Faraday cage techniques // Atmospheric Research. 2000. V. 54. P. 105–116.
19. Руленко О.П. Новая методика выявления и изучения предвестника землетрясений в электричестве приземной атмосферы // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2008. № 2. Вып. № 12. С. 42–47.
20. Druilhet A., Guedalia D., Fontan J., Laurent J. L. Study of radon 220 emanation deduced from measurement of vertical profile in the atmosphere // J. Geophys. Res. 1972. V. 77. № 33. P. 6508–6514.
21. Israelsson S., Knudsen E., Ungethum E. Simultaneous measurements of radon ( $Rn^{222}$ ) and thoron ( $Rn^{220}$ ) in the atmospheric surface layer // Tellus. 1973. V. XXV. № 3. P. 281–290.

# ВАРИАЦИИ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ВЫСОКОГОРНОЙ СТАНЦИИ ТЯНЬ-ШАНЯ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ РЕГУЛЯРНЫМИ И СПОРАДИЧЕСКИМИ ИСТОЧНИКАМИ

В.П. Антонова, С.В. Крюков, В.Ю. Луценко

Институт ионосферы Национального Центра космических исследований и технологий  
Республика Казахстан  
valanta@rambler.ru

В работе представлены результаты исследования вариаций атмосферного электрического поля, Ez компоненты, по измерениям на высокогорной Тянь-Шаньской станции (3340 м над уровнем моря, 20±25 км от г. Алматы) за 12-летний период. Поскольку измерительный комплекс устанавливался с целью изучения инициирования молниевых разрядов и их взаимосвязи с космическими лучами его временное разрешение во время гроз чрезвычайно высокое. В данном исследовании использовались записи электрического поля только в условиях хорошей погоды с 50 мс разрешением. Динамику атмосферного электрического поля в этих условиях отражают, главным образом, вариации, обусловленные регулярными, периодическими источниками возмущений. Для их выявления и исследования нами используется методика спектрального анализа временных рядов Блэкмана-Тьюки [1]. Для детального исследования динамики отдельных спектральных составляющих весь исследуемый диапазон от  $10^{-5}$  до 1 Гц был разделен на 5 и более узких диапазонов: ( $10^{-5} \div 10^{-4}$ ) Гц, ( $10^{-4} \div 10^{-3}$ ) Гц, ( $10^{-3} \div 10^{-2}$ ) Гц, ( $10^{-2} \div 10^{-1}$ ) Гц, ( $10^{-1} \div 1$ ) Гц. В диапазонах ( $10^{-4} \div 10^{-3}$ ) Гц и ( $10^{-2} \div 10^{-1}$ ) Гц не обнаружено устойчивых вариаций.

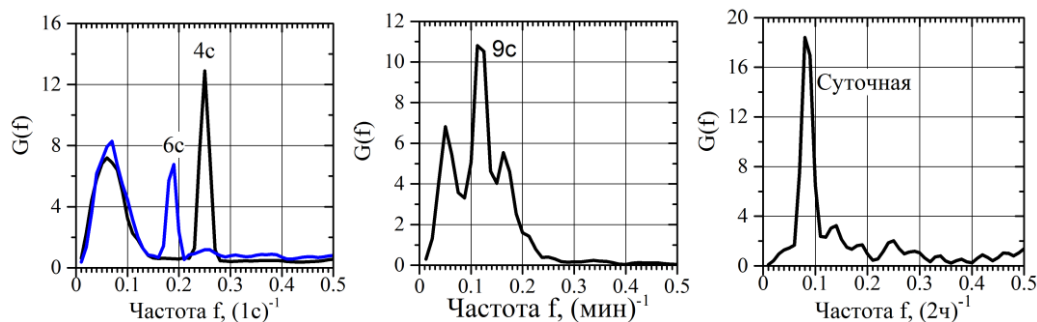


Рисунок 1. Нормированные спектры мощности вариаций электрического поля в диапазонах ( $10^{-1} \div 1$ ) Гц, ( $10^{-3} \div 10^{-2}$ ) Гц и ( $10^{-5} \div 10^{-4}$ ) Гц

Главной особенностью диапазона ( $10^{-1} \div 1$ ) Гц частот является присутствие устойчивого спектрального пика на частоте  $\sim 0,2$  с $^{-1}$  (период  $T \sim 5$  с) в течение всего периода измерений атмосферного электрического поля с 2007 по 2018 годы. Установлена тенденция к последовательному уменьшению частоты или увеличению периода этой вариации от 4 секунд в дневное время до 6 секунд в ночное, рисунок 1 (слева). Именно устойчивость этой вариации вызывает сомнение в ее природном происхождении.

В диапазоне ( $10^{-3} \div 10^{-2}$ ) Гц эпизодически в дневное время выявляются вариации от 5 до 20 минут, рисунок 1 (средний). В диапазоне ( $10^{-5} \div 10^{-4}$ ) Гц четко выделяется спектральный пик, соответствующий суточной вариации, рисунок 1 (справа). Известно, что классическим примером суточной вариации электрического поля является унитарная вариация, с максимумом около 19 часов UT, кривая Карнеги, [2]. Однако результаты ее измерения существенно отличаются друг от друга в разных частях земного шара. По измерениям на Тянь-Шаньской станции суточные вариации атмосферного электрического поля имеют следующие характерные особенности: отсутствие унитарной вариации (кривая Карнеги) независимо от сезона; изменения значений электрического поля в течение суток, имеющие бухтообразную форму с глубиной бухты 50±150 В/м в дневное время суток; ширина (длительность) бухты имеет явную сезонную зависимость (рисунок 2 слева). Рассчитана годовая вариация по среднемесячным значениям атмосферного электрического поля, имеющая максимум в зимнее время и минимум в летнее время (рисунок 2 справа).

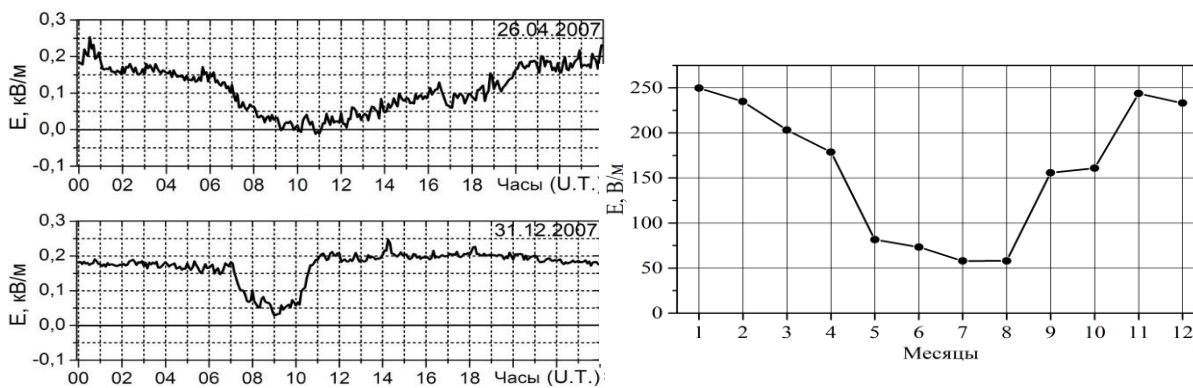


Рисунок 2. Суточная вариация электрического поля в разные сезоны: весна, зима (слева), годовая вариация (справа)

Выброс корональных масс на орбиту Земли (потоков плазмы с вмороженными магнитными полями) вызывает развитие форбуш-эффектов в космических лучах и геомагнитной бури. Зачастую форбуш-эффекты и магнитные бури рассматривают неразрывно друг от друга как следствие одного источника возмущений. Однако самое существенное различие между ними в том, что форбуш-эффект определяется условиями в протяженной гелиосферной области, тогда как геомагнитная активность зависит от локальной ситуации вблизи Земли. На рисунке 3 (слева) представлены значения электрического поля во время форбуш-эффекта в космических лучах  $\sim 3,9\%$  (пунктирная линия – начало ФЭ). Заметно уменьшение значений электрического поля по сравнению с предыдущими сутками. На рисунке справа представлены значения электрического поля во время магнитной бури, но с небольшим форбуш-эффектом. Видно изменение характера суточного хода по сравнению с предыдущим невозмущенным периодом (07.12.2013 г).

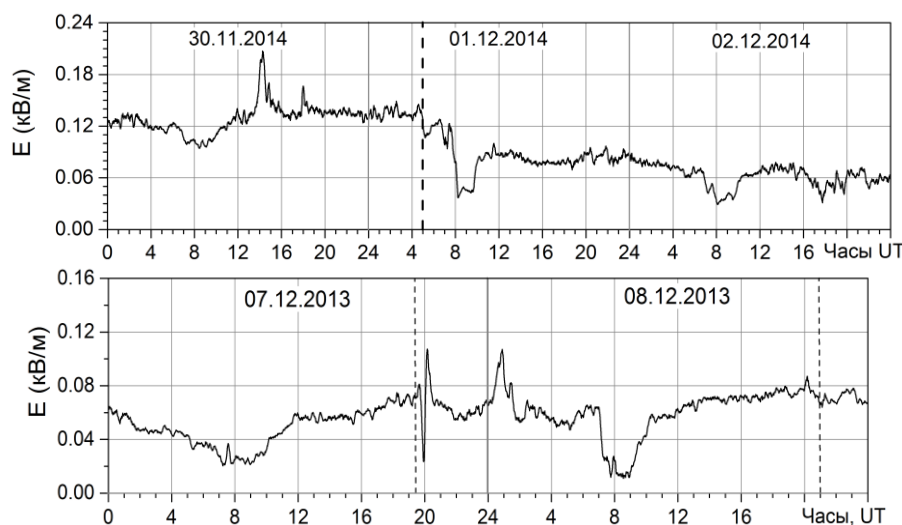


Рисунок 3. Вариации электрического поля накануне и во время форбуш-эффекта (слева), накануне и во время магнитной бури (справа)

Важное прикладное значение имеют измерения атмосферного электрического поля вблизи г. Алматы, поскольку он окружен рядом потенциальных источников сильных землетрясений. Проблема их прогноза всегда была и будет актуальной для города и его окрестностей. Расположение установки вблизи разлома земной коры позволяет эффективно использовать измерения для проведения исследований в этом направлении. Обнаружены длительные аномальные изменения во временных характеристиках электрического поля накануне и во время значительных землетрясений с магнитудой более 5,0 (рисунок 4), а также перед слабыми землетрясениями, но с эпицентрами, расположенными в непосредственной близости от установки.

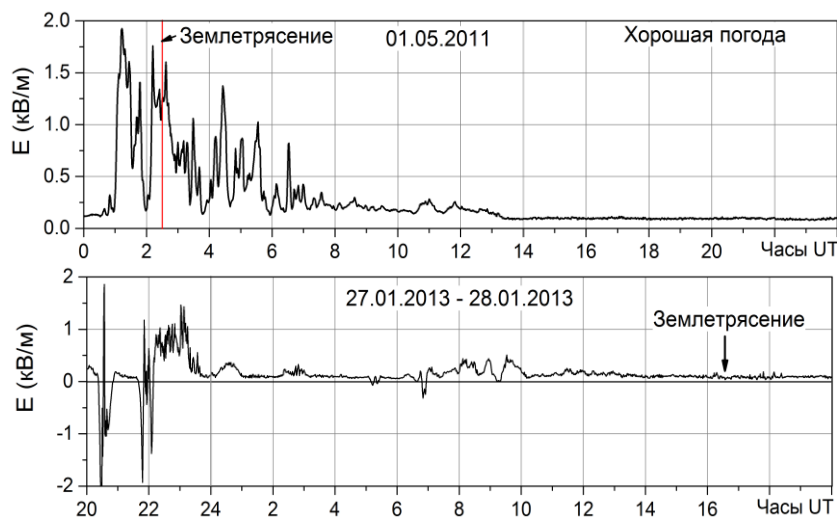


Рисунок 4. Аномальные вариации электрического поля накануне и во время землетрясений 1 мая 2011 г (слева) и 28 января 2013 г (справа)

### Литература

1. Дженкинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения. М: Мир. 1971. 287 с.
2. Mauchly S.J. Studies in atmosphere electricity based on observations made on the Carnegie, 1915–1921 // Researches of the Department of Terrestrial Magnetism. Washington: Carnegie Institution, Publ. 1926. Vol. 5, № 175. P. 385-424.

## ЭКСПЕДИЦИОННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В АТМОСФЕРЕ НА ПЕРЕНОС ЗАРЯДОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ МЕХАНИЧЕСКИХ СИЛ

*И.Н. Панчишкина, Г.Г. Петрова, А.И. Петров, Е.В. Егоров*

Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону  
georgpu@rambler.ru

В приземной атмосфере в условиях «хорошей погоды» перенос заряда по вертикали под действием механических сил осуществляется в результате действия двух механизмов: диффузии и конвекции. На границе «атмосфера-земля» вертикальная скорость движения воздуха становится равной нулю, и механический перенос зарядов обусловлен в основном диффузионными процессами. Плотность тока механического переноса из атмосферы на землю  $i_{mn}$  аналитически не определяется, о величине  $i_{mn}$  можно судить по результатам прямых измерений. Диффузия (турбулентная и молекулярная) – это необходимое, но не достаточное условие существования диффузионной составляющей вертикального тока механического переноса. Диффузионный перенос заряда по вертикали возможен только в том случае, если плотность объемного заряда в атмосфере изменяется с высотой. В нижней атмосфере существуют различные механизмы образования объемного заряда. Объемный заряд вблизи земной поверхности формируется в результате действия электродного эффекта, дивергенции плотности тока проводимости, процессов электризации аэрозолей, переноса с воздушными массами с других территорий и т.д. Обнаружено, что в исследуемом нижнем четырехметровом слое атмосферы в пунктах Ростовской области, как правило, наблюдается чередование по вертикали двух или трёх слоёв объемного заряда разного знака [1], что определяют значительные градиенты его плотности. Результаты наблюдений показывают, что плотность объемного заряда, образованного ионами всех подвижностей, в том числе и заряженным аэрозолем, в среднем на порядок выше, чем плотность объемного заряда легких ионов.

Таким образом, можно ожидать, что в процессах формирования объемного заряда атмосферные аэрозоли играют существенную роль, и изменение их концентрации оказывает влияние на плотность тока механического переноса в атмосфере и из атмосферы на землю. Следует отметить, что знак плотности тока механического переноса будет определяться градиентом плотности объемного заряда,

а интенсивность турбулентной (или молекулярной) диффузии и изменение концентрации аэрозолей будет влиять на абсолютную величину  $|i_{mn}|$ .

В настоящей работе результаты прямых измерений плотности тока механического переноса из атмосферы на землю рассматриваются в комплексе с другими атмосферно-электрическими и метеорологическими характеристиками, что позволяет оценить влияние термодинамических условий в атмосфере на перенос зарядов под действием механических сил. В разных пунктах наблюдений использовался один и тот же измерительный комплекс [2], использующий общепринятые в атмосферном электричестве методы. Учитывая важность изучения влияния аэрозолей на атмосферно-электрические процессы, измерительный экспедиционный комплекс в 2017 году был дополнен счетчиком концентрации и дисперсного состава аэрозолей субмикронного диапазона ЛАС-П.

Для выяснения достоверности влияния метеорологических параметров и концентрации аэрозолей на плотность тока механического переноса, а также для оценки силы этого влияния применялся метод однофакторного дисперсионного анализа. В качестве факторов, влияющих на плотность тока механического переноса, были выбраны метеорологические параметры, характеризующие термодинамический режим атмосферы вблизи земной поверхности: разность температуры воздуха  $\Delta t$  на высотах 0,50 м и 2,0 м, разность скоростей ветра  $\Delta U$  на тех же уровнях и коэффициент турбулентности  $D_T$ , который рассчитывался по методу Орленко по измеренным температурам воздуха и скорости ветра на высотах 0,5 и 2 метра. Было также проанализировано влияние концентрации аэрозолей  $N_a$  на плотность тока механического переноса.

Для оценки влияния метеофакторов на плотность тока механического переноса были выбраны четыре пункта Ростовской области, в которых в течение ряда лет проводились экспедиционные измерения атмосферно-электрических и метеорологических параметров. Измерение концентрации аэрозолей в Цимлянске позволило оценить влияние аэрозольного состояния приземного воздуха на перенос заряда под действием механических сил. Для выполнения дисперсионного анализа каждый влияющий фактор был представлен в виде трех-четырёх градаций, которые включали в себя несколько десятков часовых серий наблюдений. Расчет критерия Фишера  $F_\phi$  при разложении статистического комплекса данных  $|i_{mn}|$  на выборки, соответствующие разным градациям влияющего фактора, позволил оценить достоверность этого влияния.

Оказалось, что для всех исследуемых факторов фактические значения критерия Фишера  $F_\phi$  превышали табличные  $F_{st}$  для соответствующего объема выборки, что позволяет считать достоверным их влияние на вариации плотности тока механического переноса с уровнем значимости, не превышающим 0,03. В силу многофакторности процессов, влияющих на механический перенос заряда в атмосфере и из атмосферы на землю, показатель силы влияния метеорологических факторов для исследуемых периодов, рассчитанный по методу Снедекора [3], оказался в пределах от 6% до 37%. Как и ожидалось, существенное влияние на плотность тока механического переноса оказывает и концентрация аэрозолей, показатель силы этого влияния оказался равным 16%.

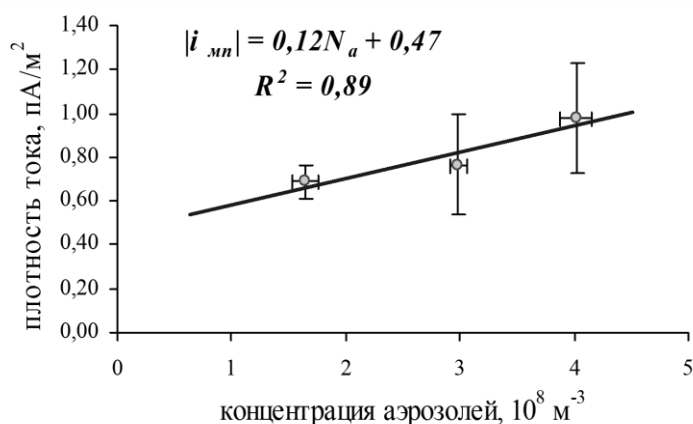


Рисунок 1. Ряд регрессии абсолютного значения плотности тока механического переноса по концентрации аэрозолей субмикронного диапазона Цимлянск, август 2017 г. (планками показаны значения стандартной погрешности)

По данным, полученным в экспедиции в августе 2017 года, построен ряд регрессии абсолютного значения плотности тока механического переноса  $|i_{mn}|$  по концентрации аэрозолей  $N_a$  (рисунок 1). Полученная эмпирическая зависимость аппроксимируется линейной функцией  $|i_{mn}| = 0,012 N_a + 0.47$  с достоверностью аппроксимации 0,89 и показывает, что с ростом концентрации аэрозолей поток заряда под действием механических сил из атмосферы на земную поверхность увеличивается.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-05-41121 РГО\_а.

### Литература

1. Petrova G.G., Petrov A.I., Panchishkina I.N. Formation of the Electric Structure in the Lower Layer of the Atmosphere: Experimental Studies and Generalization of the Data // Radiophysics and Quantum Electronics (Springer) . 2014. Volume 56, Issue 11. P. 723–738.
2. Петров А.И., Петрова Г.Г., Панчишкина И.Н., Кудринская Т.В., Петров Н.А. Измерительный комплекс для исследования электричества приземного слоя атмосферы // Известия высших учебных заведений Сев.-Кав. рег., Естест. науки. 2010. №3. С. 47–52.
3. Лакин Г.Ф. Биометрия М.: Высшая школа. 1990. 352 с.

## СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ СУТОЧНОГО ХОДА НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

С.Т. Казакова<sup>1</sup>, Д.Д. Кулиев<sup>1</sup>, М.В. Жарашуев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБУ «Высокогорный геофизический институт»  
saniya\_07@mail.ru

Вариации напряженности электрического поля в приземном слое атмосферы в течение суток обусловлены как глобальными, так и локальными факторами [1, 2]. Глобальная составляющая проявляется в существовании унитарной суточной вариации атмосферного электрического поля над океанами и полярными областями Земли (кривая Карнеги) [1]. Локальными факторами, влияющими на напряженность электрического поля атмосферы, являются природные явления (облачность, осадки, ветер, грозы и т.д.) и антропогенное воздействие. В данной работе проведены исследования суточной и сезонной вариации напряженности электрического поля атмосферы, полученные с использованием флюксметра EFM550, установленного на здании ФГБУ «ВГИ», в городе Нальчик.

Для измерения и сохранения значений напряженности электрического поля атмосферы использовался комплекс оборудования, состоящая из измерителя поля EFM550 фирмы Vaisala (Финляндия) и персонального компьютера с установленным специальным программным обеспечением. EFM550 производит измерения значения напряженности электрического поля атмосферы с частотой 2 раза в секунду в непрерывном режиме. Диапазон измеряемых значений  $\pm 10000$  вольт/метр. Установленное специальное программное обеспечение сохраняет измеренные EFM550 значения напряженности электрического поля атмосферы в файлы на жестком диске. Измеритель EFM550 установлен в пункте с координатами: широта –  $43,4694^\circ$ , долгота –  $43,5861^\circ$ .

Суточные и сезонные вариации напряженности электрического поля атмосферы исследовались отдельно для дней с «хорошей» (дни без облачности) погодой и для всех дней, без разделения на дни с «хорошей» и «нарушенной» (дни с облачностью, осадками и т.д.) погодой.

По данным значений напряженности электрического поля атмосферы за все дни, без разделения дней на дни с «хорошей» и «нарушенной» погодой, получены суточные вариации напряженности для 4 сезонов – зимы, весны, лета и осени. Данные усреднялись по часовым интервалам по всем дням соответствующего периода.

На рисунке 1 представлены графики суточных вариации напряженности электрического поля атмосферы для 4 сезонов – зимы, весны, лета и осени.

Из графика видно, что максимальные значения, получаются в осенний период, поменьше зимой, еще меньше весной и летом.

Более характерные графики получаются при разбивке года на два полугодия, взяв за границы полугодий дни весеннего и осеннего равноденствия: теплое полугодие – с 22 марта по 21 сентября, и холодное полугодие – с 22 сентября по 21 марта. В таблице 1 приведены статистические параметры значений напряженности по сезонам и полугодиям.



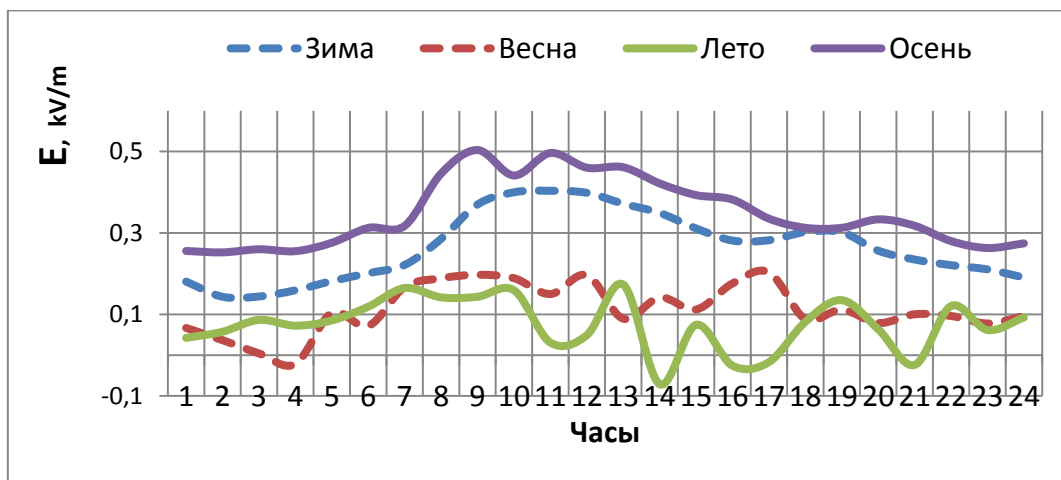


Рисунок 1. Графики суточных вариации напряженности электрического поля атмосферы по всем сезонам

Таблица 1

Статистические параметры значений напряженности электрического поля атмосферы по сезонам и полугодиям

Периоды	Среднее значение, В/м	Максимальное значение, В/м	Минимальное значение, В/м	Стандартное отклонение, В/м
Зима	289	404	143	84
Весна	123	204	-21	61
Лето	82	173	-71	65
Осень	378	503	252	84
Холодное полугодие	314	454	194	84
Теплое полугодие	122	210	51	44

Как известно, величина максимумов и минимумов поля и его среднее значение различны для разных станций [1, 3]. Так, например, среднее значение напряженности поля в Слуцке (Ленинград) составляет 171 В/м, в Упсале (Швеция) – 70 В/м, в Кью (Англия) – 304 В/м, на Яве – 86 В/м, в Антарктике – 88 В/м [2]. Для нашего пункта средним является значение 218 В/м. Это значение получается как среднее по двум полугодиям или как среднее по четырем сезонам.

Также были посчитаны суточные вариации для дней с «хорошей» погодой, отдельно для двух полугодий. На рисунке 2 показаны графики суточных вариаций напряженности для этих случаев.

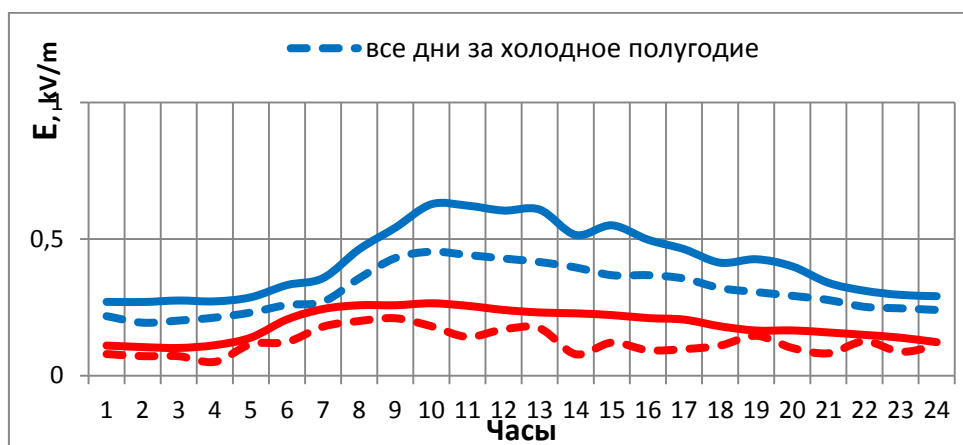


Рисунок 2. Суточные вариации напряженности электрического поля атмосферы по теплому и холодному полугодиям, по всем дням и по дням с «хорошей» погодой

Из этого рисунка хорошо видно, что дни с «нарушенными» условиями, не зависимо от сезона, вносят понижающий вклад в ход суточной вариации напряженности электрического поля атмосферы.

Полученные данные отчетливо показывают, что осредненные значения напряженности электрического поля атмосферы имеют большие значения в «холодный» период года, чем в «теплый» период. Средние значение напряженности являются максимальными в осенний период, меньше зимой, еще меньше весной и минимальные значения летом.

Из полученных результатов следует, что атмосферные явления, такие как облачность, осадки, грозы и т.д., то есть дни с «нарушенными» условиями, вносят понижающий вклад в ход суточной вариации напряженности электрического поля атмосферы.

### Литература

1. *Имянитов И.М., Шифрин К.С.* Современное состояние исследований атмосферного электричества // Успехи физических наук. 1962. Т. 76. Вып. 4. С. 593–642.
2. *Тверской П.Н.* Атмосферное электричество. Л.: Гидрометеоздат. 1949.
3. *Аджиев А.Х., Куповых Г.В.* Вариации атмосферного электрического поля на высокогорных пунктах наблюдения // Доклады академии наук. 2015. Т. 462, № 2. С. 213–216.

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОНИТОРИНГА АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В РАЙОНЕ ЭЛЬБРУСА

*Г.В. Куповых<sup>1</sup>, Т.В. Кудринская<sup>1</sup>, Д.В. Тимошенко<sup>1</sup>, А.Г. Клово<sup>1</sup>, С.С. Свидельский<sup>1</sup>,  
В.С. Литвинова<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Южный федеральный университет, г. Таганрог  
kupovykh@sfedu.ru

Как известно, атмосферно-электрическое поле приземного слоя отражает состояние континентальной радиоактивности, содержания аэрозолей, метеорологических явлений, кроме того, характеристики атмосферного электричества могут служить связующим звеном между изменениями солнечной активности и климатическими характеристиками тропосферы. Исследования электрических характеристик атмосферы на высокогорных станциях Северного Кавказа позволяют решать задачи выделения глобальных эффектов на фоне локальной изменчивости, так как исключают антропогенную составляющую и характеризуются низким уровнем радиоактивности приземного слоя.

С 2012 г. ведутся регулярные измерения атмосферного электрического поля на станциях «Кызбурун» (700 м н.у.м., 43°40' N, 43°27' E) и высокогорной станции Пик Чегет (3040 м н.у.м., 43°16' N, 42°30' E). Для регистрации напряженности электрического поля в указанных пунктах наблюдений используется измеритель электрического поля EFM 550 фирмы Vaisala, датчики установлены на крыше зданий высотой 3,5–4,5 м [1].

В таблице 1 представлены результаты статистического анализа вариаций напряженности электрического поля приземного слоя атмосферы для летних месяцев за период 2012–2016 гг. в двух пунктах измерений.

Таблица 1

### Средние статистические характеристики напряженности атмосферно-электрического поля (В/м), Пик Чегет, июль–август

Пункт	Пик Чегет					Кызбурун		
	2012	2013	2014	2015	2016	2012	2013	2016
Среднее	651	694	630	650	622	247	267	210
Стандартная ошибка	7	13	8	14	10	4	3	3
Медиана	649	720	600	635	618	250	253	195
Коэффициент вариации, %	32	33	37	32	26	33	29	35

Можно отметить, что значения напряженности поля для высокогорного пункта Пик Чегет разных лет близки между собой, значения для равнинного пункта отличаются в 2,5 раза, что связано с орографией высокогорной местности. Кроме того, диапазон измеряемой величины для летнего сезона достаточно широкий и степень рассеивания величины составляет 30–40%. Устойчивая закономерность суточного хода атмосферно-электрического поля обусловлена глобальной унитарной вариацией ионосферного потенциала.

Суточный ход напряженности атмосферного электрического поля приземного слоя в летние месяцы в горных пунктах наблюдения характеризуется ярко выраженным максимумом в (12<sup>h</sup>–15<sup>h</sup> UT) и минимумом в (05<sup>h</sup>–08<sup>h</sup> UT). Максимум в вариациях приходится на дневные часы по местному времени, что связано с действием конвективного генератора. На рисунке 1 приведены среднесуточные вариации напряженности атмосферно-электрического поля в относительных величинах для указанных пунктов наблюдения. Полученные результаты достаточно хорошо согласуются с результатами более ранних работ при измерениях 1989 г. и 2003–2004 гг. [2].

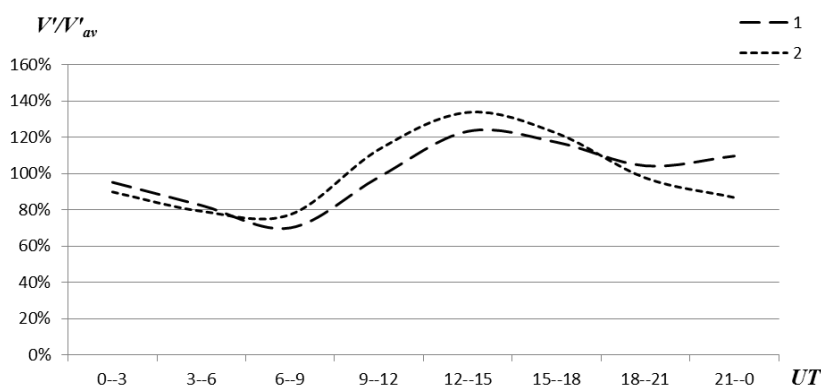


Рисунок 1. Среднесуточные вариации напряженности электрического поля приземного слоя атмосферы (в % относительно среднего значения):  
1 – Пик Чегет, 2 – Кызбурун; июнь–август 2014, 2016

Концентрации легких ионов для высокогорных пунктов имеют стабильно высокие значения, а суточные изменения не имеют выраженного хода, характерного для континентальных станций. Средние значения концентраций полярных аэроионов, полученные на высокогорной станции Пик Чегет составили:  $n_+$ =800–900 ион/см<sup>3</sup>,  $n_-$ =500–700 ион/см<sup>3</sup>. Горные условия характеризуются низким уровнем радиоактивного  $\alpha$ -излучения – концентрация радона менее 30 Бк/м<sup>3</sup> и повышенным уровнем  $\gamma$ -излучения – мощность эквивалентной дозы 0,25 мкЗв/ч (по сравнению с равнинными территориями) [3, 4].

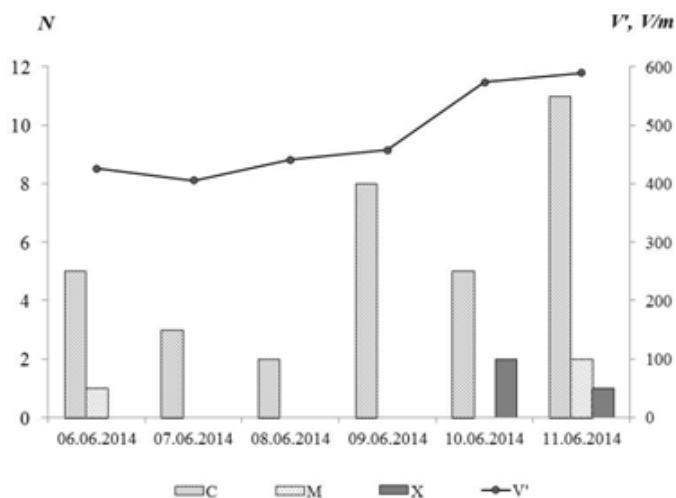


Рисунок 2. Среднесуточные вариации напряженности электрического поля приземного слоя атмосферы и количество вспышек на Солнце, Пик Чегет, 2014 г.

Для исследования связи солнечной активности с атмосферно-электрическим полем приземного слоя использовались следующие данные: число наблюдаемых солнечных пятен, планетарный индекс, количество вспышек на Солнце (рентгеновское излучение) [<http://tesis.lebedev.ru>]. Исследования показывают связь количества солнечных пятен и потока солнечного излучения на длине волны 10,7 см с величиной напряженности электрического поля приземного слоя атмосферы [5].

На рисунке 2 показаны среднесуточные вариации напряженности атмосферно-электрического поля приземного слоя и количество вспышек класса С, М и X, при этом мощность рентгеновского излучения вспышек ( $\text{Вт/м}^3$ ): С –  $10^{-6}$ , М –  $10^{-5}$ , X –  $10^{-4}$ .

### Литература

1. *Аджиев А.Х.* Измерения электрического поля атмосферы в высокогорных условиях Приэльбрусья / А.Х. Аджиев, Г.В. Куповых // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51, № 6. С. 710–715.
2. *Аджиев, А.Х.* Атмосферно-электрические явления на Северном Кавказе / А.Х. Аджиев, Г.В. Куповых // Таганрог. Изд-во ТРТУ. 2004. 137с.
3. *Adzhiev, A.H.* Alpine Atmospheric Electricity Monitoring and Radon-222 Measurement near Elbrus / A.H. Adzhiev, A.S. Boldyreff, A.N. Dorina, T.V. Kudrinskaya, G.V. Kupovykh, O.V. Novikova, I.N. Panchishkina, D.A. Pestov, A.I. Petrov, G.G. Petrova, A.A. Redin // Proc.14th Int. Conf. Atm. Electricity. Rio de Janeiro, Brazil. 2011.
4. *Кудринская Т.В.* Исследования ионизационного состояния приземного слоя атмосферы в разных геофизических условиях / Т.В. Кудринская, Г.В. Куповых, А.А. Редин // Метеорология и гидрология. 2018. № 4. С. 77–84.
5. *Кудринская Т.В.* Влияние солнечной активности на вариации электрического поля в приземном слое атмосферы / Т.В. Кудринская, Г.В. Куповых, А.А. Редин // Известия высших учебных заведений. Физика. 2016. Т. 59, №12/3. С. 215–219.

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ АТМОСФЕРНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ГЕОЛОГИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ И ЗОН ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

*В.Н. Шулейкин*

Институт проблем нефти газа РАН, г. Москва  
shvn1947@yandex.ru

Последние десятилетия атмосферно-электрический мониторинг геологических неоднородностей и зон геодинамических процессов успешно используется при решении задач прикладной геофизики [1–3]. По пространственным вариациям атмосферного электрического поля и полярных проводимостей воздуха с поверхности земли выделяются разломные зоны, определяется контур рудного тела и нефтяной залежи, контролируется динамика ее разработки, отслеживается процесс растекания метан по плату-коллектору газохранилища.

В ходе многочисленных экспериментальных наблюдений удалось обнаружить ряд метеорологических факторов, внешне не заметных, но способных вызвать существенные изменения АЭП и полярных проводимостей, искажающих искомый сигнал, связанный с локальной геологией и геодинамикой.

При полевых исследованиях на территории Ставропольского края 09 июня 2005 года осуществлялся контроль стабильности АЭП. Во временном интервале  $10^{\text{h}32^{\text{m}}}$ – $11^{\text{h}07^{\text{m}}}$  на записях стационарного флюксметра был зарегистрирован мощный всплеск поля (рисунок 1). Средний фоновый уровень поля до и после аномальных изменений  $\sim 90$  В/м; максимальная амплитуда всплеска  $\sim 150$  В/м. Для демонстрации нормальной фоновой вариации поля в стационарной точке наблюдений график дан по двум шкалам – крупномасштабной –  $E(t)$  и мелкомасштабной –  $E_1(t)$ .

Причиной наблюдаемых изменений поля является солнечный прогрев подстилающей поверхности, вызвавший испарение росы и влаги, накопленной за ночь в поровом пространстве. С одной стороны, этот процесс привел к инжекции нейтральных ядер конденсации, что и вызвало зарегистрированные изменения поля. С другой – к полному открытию приповерхностных пор, что увеличило эксхалацию почвенного радона. В записях объемной активности радона атмосферы в этот

период так же был зарегистрирован рост сигнала. Заметных изменений объемной активности радона грунта, как отмечалось во введении, не наблюдалось.

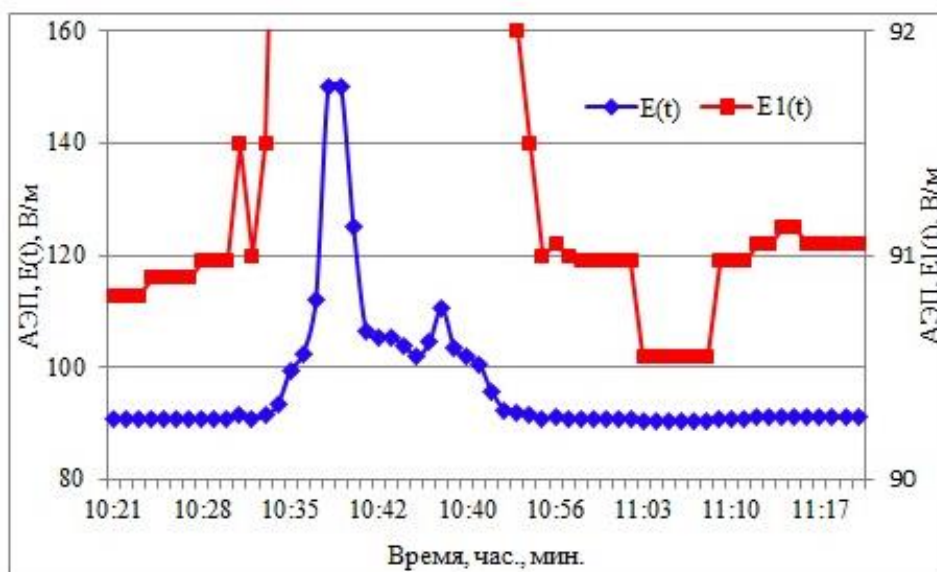


Рисунок 1. Всплеск поля в точке стационарных наблюдений 09.06.2005 г.

На рисунке 2 представлена запись измеренных значений тока воздух-земля –  $j(t)$  и расчетных величин тока, как функции вариаций уровня воды в наблюдательной скважине  $j(z)$  при падении атмосферного давления перед грозой и его вариациях при мороси.

Перед грозой рост уровня воды составил величину  $\sim 3$  мм; при мороси вариации уровня варьировались в пределах 0–3 мм. Коэффициент корреляции между измеренными и расчетными значениями  $k[j(t), j(z)] = 0,92$ .

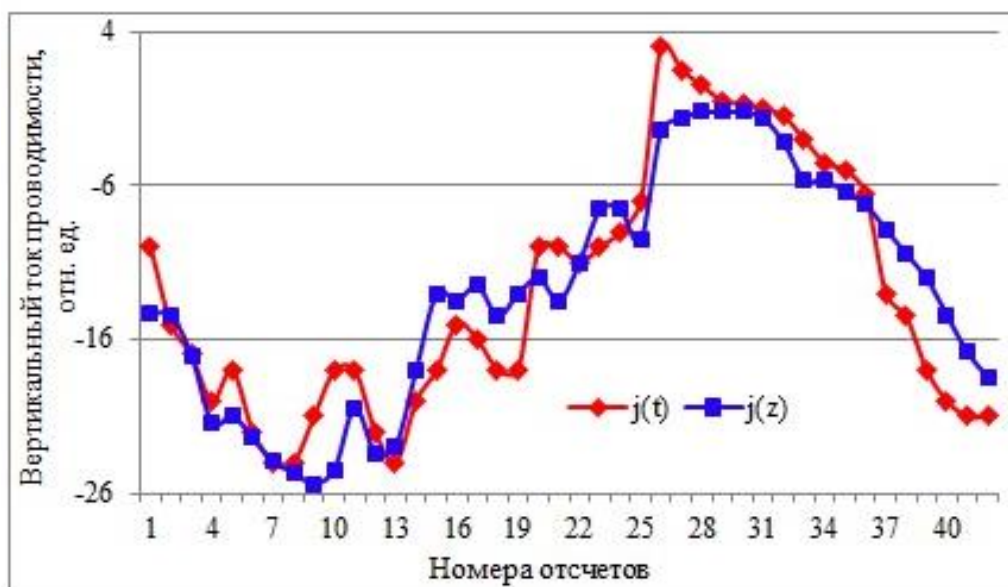


Рисунок 2. Измеренные  $j(t)$  и расчетные  $j(z)$  значения тока атмосфера–земля как функция вариаций уровня воды в наблюдательной скважине  $z$

Аналогичные связи наблюдаются между измеренными значениями атмосферного электрического поля – АЭП и расчетными величинами поля, как функции уровня воды в наблюдательной скважине, но уже не на всем массиве данных, а на двух отдельных массивах – перед грозой и при мороси (рисунок 3).

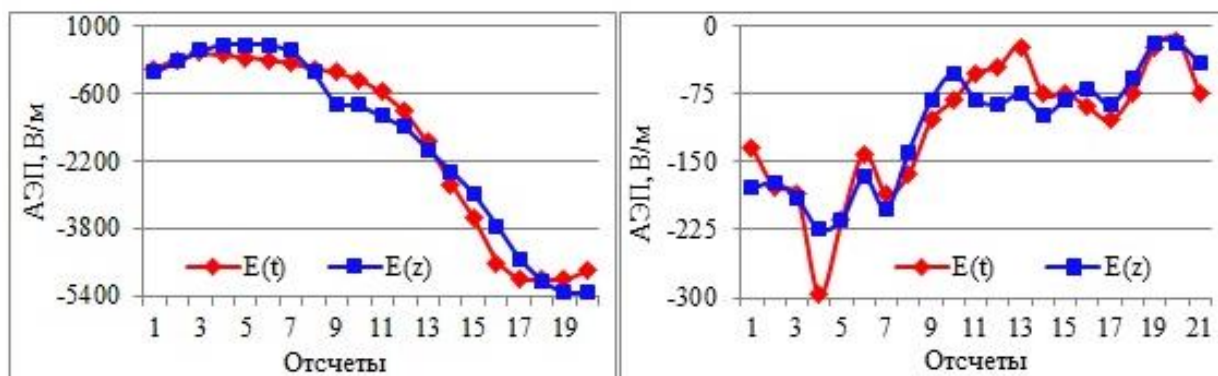


Рисунок 3. Измеренные  $E(t)$  и расчетные  $E(z)$  значения АЭП как функция вариаций уровня воды в наблюдательной скважине  $z$  перед грозой и при мороси

Коэффициенты корреляции между измеренными и расчетными кривыми очень велики –

$k=[E(t), E(z)]_{\text{гроза}} = 0,98$ ,  $k=[E(t), E(z)]_{\text{морось}} = 0,91$ . Ток атмосфера–земля считается самой стабильной атмосферно-электрической характеристикой  $j=E \cdot \lambda$ , где  $\lambda$  – суммарная полярная проводимость воздуха. В предгрозовом периоде при отсутствии осадков и при морозящем дожде полярные проводимости, очевидно, были различны. В рассмотренных примерах рост воздухообмена почва–атмосфера связан с подъемом уровня грунтовых вод – весной на месте установки измерительных инструментов стояла вода; урез воды в близлежащем пруду  $\sim 0,8$  м.

Рассмотренные примеры связей атмосферно-электрических характеристик атмосферы с относительной влажностью воздуха (процессом испарения) уверенно указывают на необходимость аппаратного контроля этого параметра. Вторым параметром, подлежащим контролю при наблюдениях АЭП, является атмосферное давление. Его колебания будут провоцировать вариации уровней водоносных пластов, способных менять режим эксхалляции почвенного радона.

### Литература

1. Зубарев А.П., Шулейкин В.Н. Комплексный геофизический и геохимический контроль при эксплуатации подземных газохранилищ. М.: Из-во ООО «Газпром ПХГ». 2009. 264 с.
2. Шулейкин В.Н., Щукин Г.Г., Куповых Г.В. Развитие методов и средств прикладной геофизики – атмосферно-электрический мониторинг геологических неоднородностей и зон геодинамических процессов. СПб.: Типография ЦОП РГГМУ. 2015. 206 с.
3. Shuleikin V.N. Earth and atmospheric electricity. New York: Nova science publishers. 2018. 143 p.

## МОЛНИИ И ВОЗДУХООБМЕН ПОЧВА-АТМОСФЕРА ОТ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА ХОРОШЕЙ ПОГОДЫ К ГРОЗОВОМУ ЭЛЕКТРИЧЕСТВУ

В.Н. Шулейкин

Институт проблем нефти и газа РАН  
shvn1947@yandex.ru

Еще в начале XX века профессор Л.Н. Богоявленский связал территориальную повторяемость молниевых разрядов облако-земля с уровнем радиоактивности. По набранной им статистике под г. Сестрорецком высокий уровень радиоактивности – высокая ионизация воздуха, привел к высокой частоте поражаемости этой территории молнией. По современным данным под г. Сестрорецк находится уникальное радоновое озеро Лопухинка, объемная активность радона в котором достигает  $\sim 400$  Бк/л. На территории Сестрорецка, поселков Белоостров и Песочный находится Государственный природный заказник «Сестрорецкое болото» площадью 1900 гектаров. В западной части болота объемная активность радона лежит на уровне  $\sim 252$  Бк/л.

По данным Л.Н. Богоявленского присутствие в земле гранитов, сланцев, руд металлов сильно меняет локальную ионизацию воздуха. Примером тому может служить Курская магнитная аномалия – до 32 гроз ежегодно, Тихвинская – до 25 гроз.

Повышенная грозовая активность наблюдается в районах залегания сланцев в Северной Америке – рисунок 1.

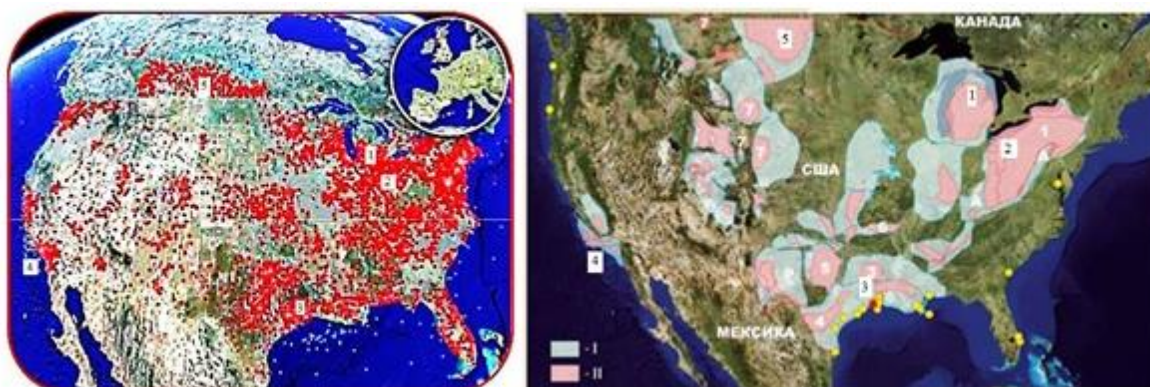


Рисунок 1. Размещение очагов грозовой активности на территории Северной Америки по данным крупнейшей сети грозопеленгации – более 150 датчиков (слева), карта залежей и разработок сланцевого газа в Северной Америке (справа)

Разработки сланцевого газа сопровождаются избыточным сбросом в приземную атмосферу метана – основного компонента сланцевого газа. Метан, в свою очередь, транспортирует радон в приповерхностную атмосферу.

Самый высокий молниеотвод в России – Останкинская телебашня, построена на заболоченной территории. В течение многих лет специалисты Энергетического института им. Г.М. Кржижановского одновременно фотографировали башню с нескольких окрестных домов. В непосредственной близости от Останкинской башни молнии бьют в заболоченную территорию так же часто, как и до ее строительства. Это позволяет предположить, что избыточный сброс биогенного метана, а, соответственно, и радона, в предгрозовую период за счет падения атмосферного давления приводит к росту проводящих характеристик приземных слоев атмосферы.

В июле 2003 года при работах на Касимовском газохранилище на подушке насыпного грунта на заболоченной территории проводились наблюдения радона, водорода и АЭП в предгрозовую период таблица 1.

Таблица 1

**Объемная активность радона грунта, атмосферы, водорода и АЭП при падении атмосферного давления в предгрозовую период**

Время перед грозой (время падения давления)	Rn, Бк/л	Rn(a), Бк/л	H <sub>2</sub> , x10 <sup>-4</sup> об. %	АЭП, В/м
43 минуты	0,67	0,32	4,2	312
23 минуты	4,73	1,75	10,5	-1180
3 минуты	11,59	4,9	35,2	-7500
Рост содержания радона и водорода за 40 минут	17,3 раза	15,3 раза	8,3 раза	

Увеличение объемной активности радона грунта и атмосферы за 40 минут перед грозой ~16 раз. Увеличение содержания водорода грунта практически в 2 раза меньше. Дополнительный перенос ионизатора осуществлялся метаном, в том числе и биогенной природы, которого на заболоченной территории заметно больше.

За 2-х недельный период работы на газохранилище была только одна ночная гроза; остальные грозы приходились на вторую половину дня – термические грозы. Из рассказов сотрудников газохранилища, живущих в 5–20 км от места работы, грозы гремели исключительно над территорией газохранилища – дома вечерами им приходилось заниматься поливом.

На момент наблюдений шел 3 месяц закачки метана. По сравнению с начальным содержанием летучих газов в приповерхностных слоях грунта за десятилетия эксплуатации оно увеличилось на 2 порядка. С учетом роста эксхалляции радона в предгрозовую период (таблица 1) это вызывало повышенную площадную ионизацию воздуха на площадях кустов нагнетательных скважин и растекания горючего газа к купольной части газохранилища.

В середине прошлого века во Франции для получения эффекта молниевых отводов родилась идея принудительной искусственной радиоактивной ионизации воздуха. Радиоактивные молниеотводы увидели свет, хотя и выпускались очень недолго. Причина неудач заключалась в невозможности безопасного использования мощного источника ионизирующего излучения. Однако, ионизирующий эффект, который можно достичь мощным точечным источником, достигается источником менее мощным, но площадным. При близости грунтовых вод и верховодки согласно связям водорода, метана, радона и элементов приземного атмосферного электричества рост ионизации заметно увеличивается за счет предгрозового падения атмосферного давления.

В системе связей газовых и электрических полей земли и атмосферы к объемному заряду приземного воздуха прямое отношение имеет только эксхалирующий почвенный радон; водород и метан выступают лишь в качестве газов-носителей ионизатора в атмосферу. Основная часть молниевых разрядов облако-земля приходится на глинистые, влажные участки грунта, пологие речные берега и заболоченные территории, площадь которых определяется квадратными километрами. Близкий подход воды к поверхности земли гарантирует наличие глинистого водоупора, содержание материнского вещества в котором всего лишь в 2 раза меньше, чем в гранитах. Заболоченная территория, в свою очередь, указывает на присутствие метана биогенной природы – газа-носителя радона. В Северной Америке грозовая активность приходится на территории добычи сланцевого газа, основной ингредиент которого метан. На Касимовском подземном газохранилище носителями ионизатора являются метан и водород. Концентрация этих летучих газов-носителей радона в приповерхностных слоях грунта заметно возрастает в ходе закачки. Второй газ-носитель ионизатора – водород, входит в шлейфы рудных месторождений, обширные площади которых подвержены частыми молниевыми разрядами. Предгрозовое падение давления способно привести к увеличению сброса водорода, метана и радона практически на порядок, а территории, где это наблюдается, начинают работать как площадные молниеотводы.

Образование кучево-дождевого облака неизбежно сопровождается падением атмосферного давления. Более того, порядка 60% гроз, гремящих в течение года на земном шаре, приходится на грозы термические, на временной интервал которых приходится суточный минимум атмосферного давления и максимум эксхалляции почвенного радона.

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ В СТЕПНОЙ И ВЫСОКОГОРНОЙ ЗОНАХ ЮГА РОССИИ**

*А.И. Петров<sup>1</sup>, Г.Г. Петрова<sup>1</sup>, И.Н. Панчишкина<sup>1</sup>, А.Х. Аджиев<sup>2</sup>, А.В. Кочин<sup>3</sup>,  
О.Г. Чхетиани<sup>4</sup>, Е.В. Егоров<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону

<sup>2</sup>Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик

<sup>3</sup>Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный

<sup>4</sup>Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, г. Москва  
georgpu@rambler.ru, adessa1@yandex.ru, amar1@mail.ru ochkhetai@rssi.ru

Особенностью экспериментальных исследований в природной среде является отсутствие возможности произвольного варьирования параметров среды подобно тому, как это осуществляется при лабораторном экспериментировании. Поэтому для возможности параметризации моделей атмосферных процессов серии комплексных наблюдений проводятся в различных физико-географических условиях, что достигается периодической сменой пункта наблюдений. При этом появляется возможность накопления экспериментальных данных для различных вариантов сочетания природных факторов, определяющих параметры атмосферных процессов. В работе предлагается физико-статистический анализ массивов данных о градиенте электрического потенциала, полученных в разных физико-географических условиях. Совместный анализ данных, накопленных за



много лет в ряде районов Ростовской области, с результатами измерений в других регионах позволяет обнаруживать особенности формирования электрической структуры приземного слоя в разных условиях.

В работе анализируются результаты атмосферно-электрических измерений в летних экспедициях на территории Ростовской области (Кашарский район, Цимлянск), а также в высокогорных условиях. В июле-августе 2010 года измерения проводились в рамках совместной экспедиции Южного федерального университета и Высокогорного геофизического института в Приэльбрусье (пик Чегет, 3050 м). В период 2014–2018 гг. экспедиции Физического факультета ЮФУ проводились совместно с Институтом физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН на полигонах научных станций ИФА: Цимлянской (2014–2017) и Кисловодской высокогорной (плато Шаджатмаз, 2100 м, 2018). Для обеспечения сравнимости экспериментальных результатов, получаемых год за годом в разных пунктах наблюдений, чтобы иметь возможность производить совместный анализ всех многолетних данных, измерения проводились на одной и той же инструментальной базе и по выверенным и установившимся методикам. Градиент потенциала на уровне земли в экспедициях измерялся с помощью флюксметра «Поле-2» системы ГГО им. А.И.Воейкова. В Цимлянске в 2014 году поле на уровне земли измерялось также флюксметром EFS-2/50 (ООО «НТЦР»). Получено хорошее совпадение результатов измерения градиента потенциала флюксметрами двух систем. Известным в физике атмосферы методом радиоактивного коллектора измерялись значения потенциала атмосферы на заданных высотах, что позволяло рассчитывать среднечасовые значения градиента потенциала для разных уровней и оценивать плотность объёмного заряда в пределах нижнего 4-метрового слоя.

При анализе данных, представленных на рисунке 1, обращают на себя внимание сравнительно низкие значения поля в пункте Первомайское Кашарского района. Этот пункт Ростовской области представлен здесь в качестве примера, типичного для региона, и характеризуется заметным

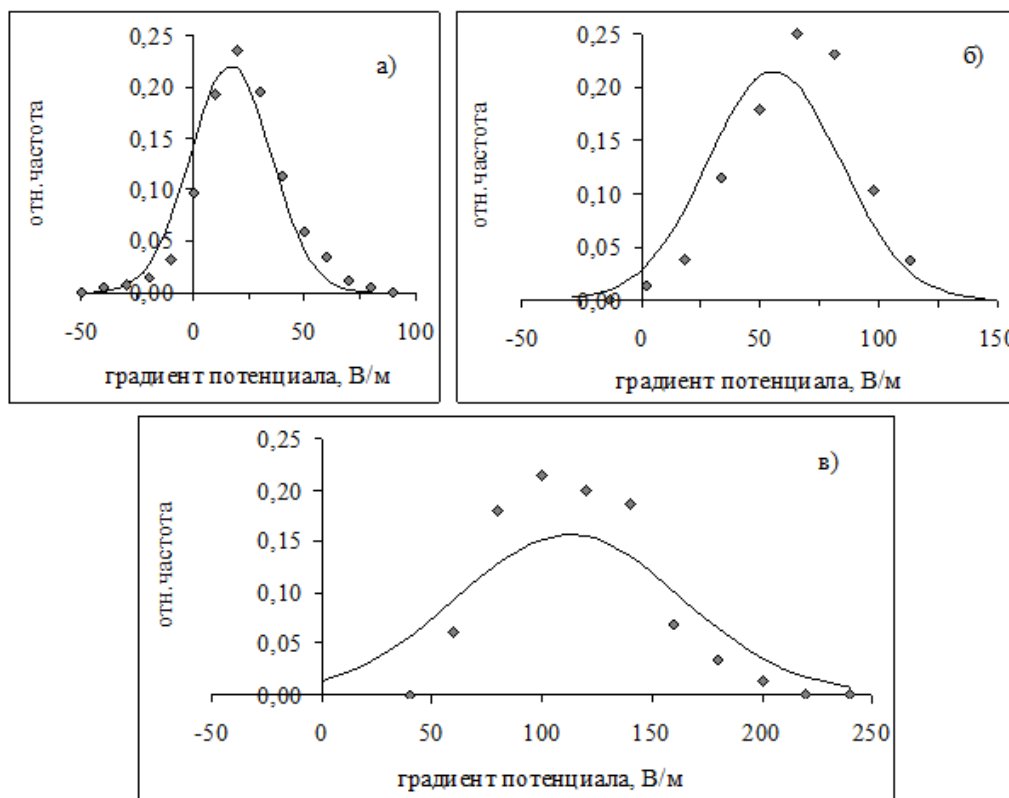


Рисунок 1. Эмпирическое (точки) и нормальные (линии) распределения относительных частот градиента потенциала атмосферы на уровне земли («Поле-2» системы ГГО им. А. И. Воейкова) в разных пунктах наблюдений:

- а) Первомайское Кашарского района Ростовской области, август 1992 г;
- б) Кисловодская высокогорная научная станция Института физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН (плато Шаджатмаз, 2100 м) август 2018 г;
- в) Приэльбрусье (пик Чегет, 3050 м), июль – август 2010 г

эманированием почвы. Повышенное содержание радона-222 в почвенном газе, обнаруживаемое при измерениях, и хорошо прогретая сухая почва способствуют выходу радиоактивных эманаций в атмосферу. В отсутствие турбулентного перемешивания в ночные часы без ветра, что типично для летней поры на юге России, радон накапливается в нижних слоях атмосферы. Это способствует образованию больших вертикальных градиентов электропроводности атмосферы и образованию слоёв отрицательного объёмного заряда, снижающего поле вблизи земли в ночные периоды.

При неустойчивой стратификации в дневные жаркие часы с ветром в условиях засушливого лета в степной зоне юга России наблюдается уменьшение значений поля по мере приближения к земной поверхности. Причём по результатам измерений в Цимлянске в 2017 году при более высоком содержании аэрозолей в атмосфере поле в целом ниже и уменьшается по мере приближения к земле значительней, чем в случае меньших концентраций аэрозоля. При условии горизонтальной однородности площадки наблюдений такое поведение поля в соответствии с уравнением Пуассона есть признак отрицательного объёмного заряда в атмосфере. Объёмный заряд обусловлен, видимо, увеличением количества отрицательно заряженной пыли в воздухе, поднимаемой ветровыми потоками с иссушенной земной поверхности: при усилении ветра от 0 до 10 м/с концентрация аэрозолей по данным 2017 года в Цимлянске возросла вдвое.

Уравнения регрессии градиента электрического потенциала атмосферы на уровне земли  $G_0$ , (В/м) по значениям концентрации аэрозолей  $N$  ( $\text{см}^{-3}$ ) для измерений в Цимлянске в августе 2017 года:  $G_0 = 57 - 0,07 N$  (диаметр частиц 0,1–0,2 мкм),  $G_0 = 6 - 0,04 N$  (диаметр частиц >0,1 мкм).

Измерения на высокогорных станциях обнаружили низкое содержание радона-222 в атмосферном воздухе из-за плохой газопроницаемости грунта (скала). По результатам измерений на КВНС ИФА в условиях высокой влажности градиент потенциала при увеличении концентрации аэрозолей обнаруживает тенденцию к росту. Это свидетельствует о преимущественно положительном заряде частиц аэрозоля: знак заряда аэрозолей зависит от их физико-химических свойств и коэффициентов присоединения к ним лёгких ионов.

Таким образом, факторы, снижающие в летний период градиент потенциала в степных условиях, на высокогорных станциях не проявляют себя.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), грант № 17-05-41121 РГО\_а.

## ИССЛЕДОВАНИЯ ИОНИЗАЦИИ ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ И ПРИРОДНЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В РАЗЛИЧНЫХ ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

*Г.Г. Петрова<sup>1</sup>, А.И. Петров<sup>1</sup>, И.Н. Панчишкина<sup>1</sup>, А.Х. Аджиев<sup>2</sup>,  
Е.В. Егоров<sup>1</sup>, Е.А. Бураева<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону

<sup>2</sup>Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик  
georgpu@rambler.ru, adessa1@yandex.ru

Электрические процессы в приземной атмосфере отличаются многофакторностью, что осложняет их исследование. Анализ экспериментальных данных позволяет выявить среди множества действующих факторов те, которые выступают в качестве основных в различных физико-географических условиях. Это способствует более глубокому пониманию атмосферно-электрических процессов и, в частности, помогает созданию их адекватных математических моделей.

Ионизационный режим приземной атмосферы определяется совокупным влиянием ионизаторов и факторов, способствующих пропаданию и «старению» (эволюции) атмосферных ионов. Вблизи земной поверхности на континентах основным ионизатором атмосферы наряду с космическими лучами являются излучения радиоактивных элементов. Наибольшее значение имеет естественный природный изотоп радон-222 ( $^{222}\text{Rn}$ ) из радиоактивного семейства урана-238 ( $^{238}\text{U}$ ). Бесцветный инертный газ без вкуса и запаха, радон-222 поступает из земных недр в атмосферу через естественные поры и трещины и обнаруживается в ней до высот 3–5 км, поскольку имеет достаточный для этого период полураспада 3,8 суток. Радон-222  $\alpha$ -радиоактивен, что обуславливает

его большую ионизирующую способность: каждый  $\alpha$ -распад радона порождает в приземной атмосфере  $2 \cdot 10^5$  пар ионов.

В работе обобщаются данные о содержании радона-222 в атмосфере и почвенном газе и характеристиках ионизации приземного слоя, полученные на территории Ростовской области в степной зоне, а также в условиях высокогорья: (пик Чегет, 3050 м; плато Шаджатмаз, 2100 м). В период 2014–2018 гг. экспедиции Физического факультета Южного федерального университета проводились совместно с Институтом физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН на научных станциях ИФА: Цимлянкой (2014–2017) и Кисловодской высокогорной (2018). В рамках совместной экспедиции Южного федерального университета и Высокогорного геофизического института в июле-августе 2010 года измерения проводились в Приэльбрусье на пике Чегет (3050 м).

Полярные удельные электропроводности регистрировались на высоте 1 метр и вблизи земной поверхности посредством приборов «Электропроводность-2» (ГГО им. А.И.Воейкова). Содержание радона-222 в атмосферном воздухе и почвенном газе контролировалось посредством радон-монитора «AlphaGUARD PQ2000 PRO» с внешними устройствами: датчиком почвенного газа «AlphaGUARD Soil GasUnit» и газовым электронным насосом «AlphaPUMP». Производились градиентные измерения термодинамических параметров нижней атмосферы. На основании данных о температуре воздуха и скорости ветра на высоте 0,5 и 2 метра по методу Л.Р. Орленко определялся коэффициент турбулентности для прилегающего к земле слоя атмосферы.

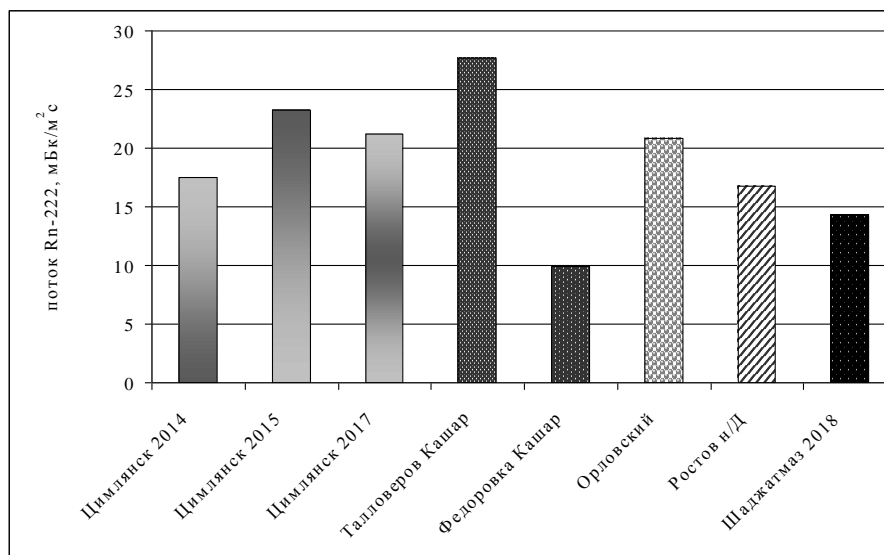


Рисунок 1. Плотность потока радона-222 в ряде пунктов Ростовской области и на КВНС ИФА им. А.М. Обухова РАН, плато Шаджатмаз, 2100 м (радон-монитор «AlphaGUARD PQ2000 PRO» с внешними устройствами: датчиком почвенного газа «AlphaGUARD Soil GasUnit» и газовым электронным насосом «AlphaPUMP»)

На рисунке 1 представлены результаты определения плотности потока радона-222 в атмосферу. Для пунктов Ростовской области оценки выполнены на основании измерений объёмной активности  $^{222}\text{Rn}$  на глубине 0,1; 0,6; 0,9 метра [1, 2]. На высокогорных станциях в силу особенностей грунта измерить содержание радона в почвенном газе на глубине 0,9 и даже 0,6 метра не всегда представляется возможным. Поэтому на КВНС ИФА плотность потока радона-222, представленная на рисунке 1, определялась с помощью накопительной камеры. Измерение плотности потока  $^{222}\text{Rn}$  (ППР) с поверхности грунта основано на определении количества  $^{222}\text{Rn}$ , накопленного в пробоотборнике или в измерительной камере за счет поступления с поверхности грунта известной площади и широко используется в геологии, сейсмологии, инженерно-экологических изысканиях и в радиоэкологии.

По данным радон-монитора «AlphaGUARD PQ2000 PRO» с датчиком почвенного газа «AlphaGUARD Soil GasUnit» и газовым электронным насосом «AlphaPUMP» объёмная активность радона в грунте измерительной площадки на КВНС на глубине 0,6 м составила 25 кБк/м<sup>3</sup>. Для сравнения в Цимлянске в 2017 году эта величина была ниже: 13,5 кБк/м<sup>3</sup>. При этом оценка плотности потока радона-222 из почвы в атмосферу для КВНС дала 14,3 мБк/м<sup>2</sup>с, для Цимлянска,

соответственно, 21,2 мБк/м<sup>2</sup>с. Сравнительно низкий по сравнению с Цимлянском поток радона из почвы на высокогорном плато обусловлен, видимо, очень влажным грунтом. Аналогичная ситуация была характерна в период измерений на берегу озера Байкал, где препятствием для выхода радона в атмосферу являлись грунтовые воды [2]. Перед серией измерений на КВНС в пункте наблюдений несколько дней шли обильные дожди, что снизило газопроницаемость грунта и затрудняло выход эманаций в атмосферу. Как следствие, средние значения объёмной активности радона в атмосфере по данным радон-монитора «AlphaGUARD PQ2000 PRO» на разных уровнях в слое от 0 до 3 метров были очень низкими и составили 7-9 Бк/м<sup>3</sup>, а отдельные значения не превышали 35 Бк/м<sup>3</sup>. Возможно, поэтому полярные электропроводности на плато Шаджатмаз оказались в среднем невысокими: отрицательная 15 и положительная 17 фСм/м, – и аналогичны значениям этих величин для равнинной Цимлянской станции. На Чегете объёмная активность радона в воздухе на высоте 1 метр за период наблюдений, как правило, не превышала 50 Бк/м<sup>3</sup>, а среднее значение составило 11 Бк/м<sup>3</sup>. При этом средние за период значения электропроводностей были высокими: отрицательная 22 и положительная 35 фСм/м. Очевидно, это следствие более высокой интенсивности космических лучей на высоте 3 км над уровнем моря, что способствовало повышенному ионообразованию, а также более высокой подвижности лёгких ионов в условиях пониженного давления атмосферы.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), грант № 17-05-41121 РГО\_а.

### Литература

1. Petrova G.G., Petrov A.I., Panchishkina I.N. Formation of the Electric Structure in the Lower Layer of the Atmosphere: Experimental Studies and Generalization of the Data // Radiophysics and Quantum Electronics (Springer). Volume 56, Issue 11 (2014), P. 723–738.

2. Панчишкина И.Н., Петрова Г.Г., Бураева Е.А., Петров А.И., Егоров Е.В., Петров Н.А., Маслов С.А. Результаты измерений характеристик ионизации приземного слоя и содержания радона-222 в почве и атмосфере на берегу озера Байкал // Труды VII Международной конференции «Солнечно-земные связи и физика предвестников землетрясений», Петропавловск-Камчатский, ИКИР ДВО РАН, 2016. С. 132–135.

### АТМОСФЕРНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРОФИЛИ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ С УЧЁТОМ ЗНАЧИМЫХ ФАКТОРОВ: ПЕРЕМЕШИВАНИЕ, РАДОН, АЭРОЗОЛИ

Г.Г. Петрова<sup>1</sup>, И.Н. Панчишкина<sup>1</sup>, А.И. Петров<sup>1</sup>, О.Г. Чхетиани<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону

<sup>2</sup>Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, г. Москва  
georgpu@rambler.ru, ochkhети@rssi.ru

На основании результатов летних экспедиционных измерений, проводимых как в последние годы, так и в более ранние периоды, главным образом, на территории донских степей анализируются процессы формирования вертикальных профилей электрических характеристик приземной атмосферы. Для обеспечения сравнимости экспериментальных результатов, получаемых год за годом в разных пунктах наблюдений, измерения проводятся на одной и той же инструментальной базе и по выверенным и установившимся методикам. В период 2014–2018 гг. экспедиции научной лаборатории геофизических исследований Физического факультета Южного федерального университета проводились совместно с Институтом физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН на Цимлянской научной станции, а в 2018 году – на Кисловодской высокогорной научной станции ИФА РАН.

Удельные полярные электропроводности воздуха измеряются посредством приборов Гердиена: датчиков «Электропроводность-2» системы ГГО им. А.И. Воейкова и датчика системы Литвинова. Напряжённость электрического поля атмосферы на уровне земли регистрируется флюксметрами «Поле-2» (ГГО им. А.И. Воейкова). Для компьютерной регистрации сигнала этих датчиков использована плата АЦП L761 фирмы L-Card. Электрический потенциал атмосферы определяется известным методом радиоактивного коллектора (изотоп тория ионий <sup>230</sup><sub>90</sub>Th).

Содержание радона-222 в атмосферном воздухе и почвенном газе контролируется посредством радон-монитора «AlphaGUARD PQ2000 PRO» (Genitron Instruments GmbH) с внешними устройствами: датчиком почвенного газа «AlphaGUARD Soil GasUnit» и газовым электронным насосом «AlphaPUMP». Одновременное измерение вертикальных профилей полярных

электропроводностей и объёмной активности радона в ходе эксперимента осуществляется путем последовательного помещения приборов на шести различных уровнях деревянной мачты (0,05; 0,3; 0,6; 1,0; 2,0; 3,0 м). Радон-монитор настроен так, что осреднение объёмной активности Rn-222 по времени осуществляется для 10-минутных интервалов.

Регистрация концентрации аэрозолей в экспедициях 2012–2016 гг. осуществлялась счетчиком аэрозолей АЗ-10 в шести субмикронных и микронных размерных диапазонах: 0,3-0,4; 0,4-0,5; 0,5-1,0; 1,0-2,0; 2,0-5,0; > 5,0 мкм, – а в 2017 и 2018 гг. – лазерным аэрозольным спектрометром ЛАС-П системы НИФХИ им. Л.Я.Карпова в шести субмикронных диапазонах размеров: 0,1-0,2; 0,2-0,3; 0,3-0,4; 0,4-0,5; 0,5-0,7; >0,7 мкм.

Непрерывная регистрация основных метеорологических параметров производится цифровой метеостанцией М-49м. Наряду с этим ежечасно проводятся градиентные измерения температуры воздуха и его влажности аспирационными психрометрами Ассмана и скорости ветра чашечными и крыльчатými анемометрами. Измерения термодинамических параметров позволяют вычислять коэффициент турбулентности по методу Орленко Л.Р., значения которого непременно учитываются при группировке и анализе экспериментальных данных.

На основе анализа результатов измерений показано, что существенные различия активности радона в атмосфере, обнаруженные в разных пунктах наблюдений, являются следствием как локальных особенностей эманирования почвы, так и особенностей динамики атмосферы [1]. Обсуждается, как это сказывается на особенностях вертикальных профилей электропроводности, полученных при устойчивой и неустойчивой стратификации нижней атмосферы в разных районах Ростовской области в степной зоне. Эмпирические зависимости полярных электропроводностей от объёмной активности радона-222 в атмосфере, полученные на Цимлянкой научной станции ИФА в августе 2016 года, надёжно аппроксимируются линейной функцией:  $\lambda_+ = 16 + 0,2 \cdot A_{Rn}$  для положительной электропроводности и  $\lambda_- = 15 + 0,2 \cdot A_{Rn}$  – для отрицательной. Электропроводность дана в фСм/м, активность радона  $A_{Rn}$  – в Бк/м<sup>3</sup>. Всего для построения данных рядов регрессии использовано 657 10-минутных серий синхронных круглосуточных измерений полярных электропроводностей и объёмной активности радона на высоте 1 метр.

Результат обобщённых исследований многолетних данных позволяет типизировать наблюдаемые атмосферно-электрические профили с учётом стратификации приземного слоя, содержания радона-222 в воздухе и почвенном газе. Уверенно можно говорить о формировании типичных вертикальных профилей электрического поля при ослабленном перемешивании в случае значительного эманирования почвы. Вид этих профилей свидетельствует об образовании слоёв отрицательного объёмного заряда [2].

Исследования последних лет позволяют предположить, что важнейшим механизмом образования заряженных слоёв в приземной атмосфере может являться избирательная адсорбция аэрозолями разных по знаку зарядов ионов, что приводит к появлению неоднородных электрических полей. Измерение концентрации аэрозолей субмикронного и микронного диапазонов в экспедициях дополнило измерительный комплекс с 2012 года. В работе обсуждаются возможные механизмы формирования наблюдаемых типов атмосферно-электрических профилей с учётом, в том числе, содержания аэрозолей в приземной атмосфере. В таблице 1 представлены уравнения регрессии полярных удельных электропроводностей атмосферы  $\lambda_+$  и  $\lambda_-$  по концентрации аэрозолей для сгруппированных данных на научных станциях ИФА РАН: Цимлянской ЦНС и Кисловодской высокогорной КВНС (2100 м).

Таблица 1

Эмпирические уравнения регрессии полярных удельных электропроводностей атмосферы  $\lambda_+$  и  $\lambda_-$  (фСм/м) по значениям концентрации аэрозолей  $N$  (108 м<sup>-3</sup>)

Размер частиц	Год	Приборы, пункты наблюдений			$\lambda_+$	$\lambda_-$
		ЦНС	АЗ-10	Датчик Гердиена системы Литвинова		
$d > 0,3$ мкм	2015	ЦНС	АЗ-10	Датчик Гердиена системы Литвинова	$\lambda_+ = 20 e^{-2,5N}$	$\lambda_- = 19 e^{-3,3N}$
	2017	ЦНС	ЛАС-П	Датчик Гердиена, ГГО	$\lambda_+ = 21 e^{-4,4N}$	$\lambda_- = 17 e^{-2,5N}$
$d > 0,1$ мкм	2017	ЦНС	ЛАС-П	Датчик Гердиена, ГГО	$\lambda_+ = 24 e^{-0,16N}$	$\lambda_- = 18 e^{-0,09N}$
	2018	КВНС	ЛАС-П	Датчик Гердиена, ГГО	$\lambda_+ = 43 e^{-0,21N}$	$\lambda_- = 46 e^{-0,21N}$

Коэффициенты корреляции между электропроводностью атмосферы и концентрацией аэрозолей отрицательны и в массиве данных для высокогорного плато оказались более высокими ( $-0,5 \div -0,7$ ), чем в цимлянском ( $-0,2 \div -0,4$ ). Известно, что снижение электропроводности атмосферы при росте концентрации аэрозолей связано с эффектом пропадания лёгких атмосферных ионов, ответственных за её электропроводность, из-за присоединения к аэрозолям. Коэффициенты присоединения зависят от физико-химических свойств аэрозоля. В Цимлянске в условиях засухи при очень высокой температуре воздуха и почвы свойства аэрозоля отличаются от условий низкой температуры и высокой влажности, которые наблюдались во время экспедиции на плато Шаджатмаз.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), грант № 17-05-41121 РГО\_а.

#### Литература

1. *Petrov A.I., Petrova G.G., Panchishkina I.N.* Profiles of polar conductivities and of radon-222 concentration in the atmosphere by stable and labile stratification of surface layer // *Atmospheric Research (Elsevier)*. 91 (2009). P. 206–214.

2. *Petrova G.G., Petrov A.I., Panchishkina I.N.* Formation of the Electric Structure in the Lower Layer of the Atmosphere: Experimental Studies and Generalization of the Data // *Radiophysics and Quantum Electronics (Springer)*. Volume 56, Issue 11 (2014). P. 723–738.

### РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТРОПОСФЕРЫ В УСЛОВИЯХ «ХОРОШЕЙ ПОГОДЫ» И ПРИ ОБЛАЧНОЙ ПОГОДЕ

*Л.В. Кашлева, М.Е. Баранова*

РГГМУ, г. Санкт-Петербург  
kashleval@yandex.ru

Предложена одномерная модель электрической структуры атмосферы в условиях «хорошей погоды». Модель позволяет рассчитывать электрические параметры тропосферы. В модели атмосфера представляет собой конденсатор, нижняя обкладка которого – земная поверхность – заряжена отрицательно, изменение вертикальной составляющей напряженности электрического поля с высотой является следствием существования положительного объемного заряда атмосферы.

Основные допущения:

1. Время релаксации электростатических процессов в атмосфере значительно меньше интервала 1 ч. Поэтому разработана электростатическая модель тропосферы в условиях «хорошей погоды».

2. Перенос зарядов в тропосфере целиком обусловлен проводимостью атмосферного воздуха. Это позволяет использовать закон Ома для вертикального столба атмосферы.

3. Вертикальный градиент напряженности электрического поля атмосферы в областях «хорошей погоды» значительно больше горизонтального градиента. Поэтому использована для анализа одномерную модель.

4. Электрическое поле атмосферы является результатом разности потенциалов земной поверхности и ионосферы, но в тропосфере сосредоточен объемный заряд, частично компенсирующий заряд земной поверхности.

В модели атмосфера представляет собой конденсатор, нижняя обкладка которого – земная поверхность – заряжена отрицательно, изменение вертикальной составляющей напряженности электрического поля с высотой является следствием существования положительного объемного заряда атмосферы.

- напряженности электрического поля,  $E_z$ ,

- проводимости атмосферы,  $\lambda_z$ ,

- концентрации ионов, их подвижностей,  $(n_+)_z, (n_-)_z, (k_+)_z, (k_-)_z$ ,

- плотности объемного заряда атмосферного воздуха,  $\rho_z$ ,

- распределение по высоте объемного заряда вертикального столба атмосферы единичного сечения от поверхности земли до уровня  $z$ ,  $Q_{\text{атм},z}$ , и плотность поверхностного заряда Земли,  $\sigma_3$ .

Основные уравнения: модель подробно рассмотрена в [1].

Исходные данные: универсальная суточная вариация напряженности электрического поля [2] и типичный суточный ход полярных проводимостей атмосферы [3] по данным измерений в Воейково, проводимых с интервалом 1 ч, а также данные вертикального профиля температуры воздуха и давления стандартной атмосферы.

Граничные условия: на нижнем уровне  $z_0$  все параметры определяются исходными данными. Верхняя граница области расчета  $z_H$  определяется в соответствии с [1], точностью измерения напряженности электрического поля атмосферы с помощью СПНП, установленного на самолете, до уровня, где 5 В/м.

Результаты расчетов приведены на рисунках 1 и 2.

1. Проведенные расчеты согласуются с имеющимися данными, представленными в литературе. Это позволяет использовать представленную модель для построения профилей электрических параметров тропосферы в условиях «хорошей погоды».

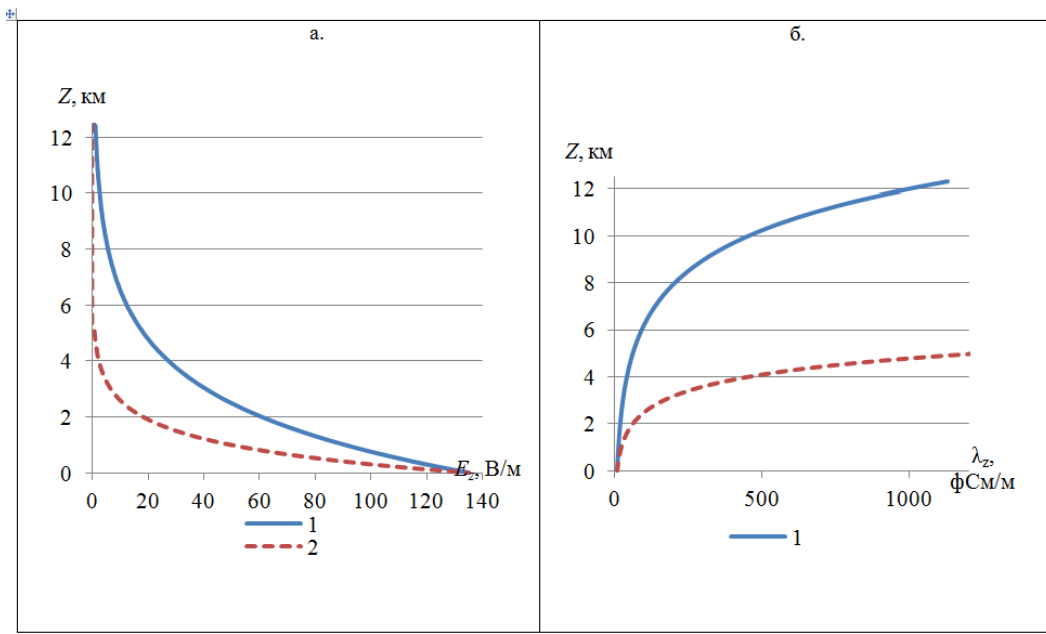


Рисунок 1. Вертикальные профили напряженности электрического поля атмосферы  $E_z$  (а) и проводимости атмосферы  $\lambda_z$  (б) над океаном и над сушей. (1 – океан, 2 – суша)

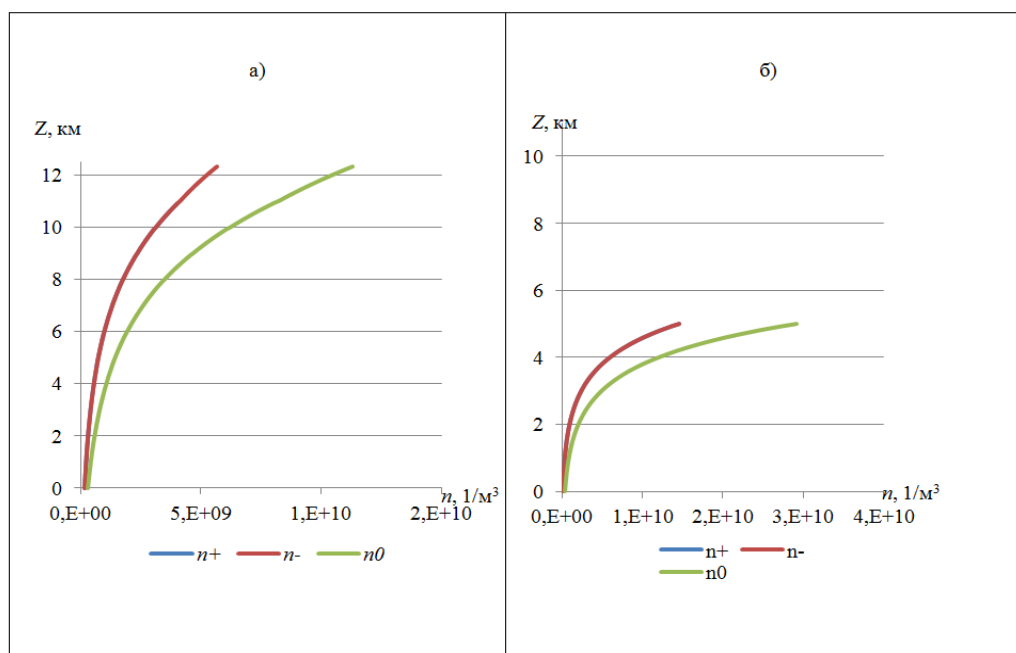


Рисунок 2. Вертикальные профили концентрации ионов  $n$  (положительных  $n_+$ , отрицательных  $n_-$  и суммарная концентрация  $n_0$  ионов): а) над океаном, б) над сушей

2. Проведенные расчеты показали, что в тропосфере существует объемный заряд атмосферы, более чем на 95% компенсирующий заряд земной поверхности. Причина появления заряда атмосферы – низкая проводимость воздуха в нижней тропосфере и резкий рост проводимости воздуха с высотой. В загрязненных регионах уровень, на котором скомпенсировано более 95% заряда земной поверхности, расположен ниже 5 км, в чистых регионах-около 10 км. Вероятно, этот вывод соответствует регионам, удаленным от береговой зоны.

### Литература

1. *Каишева Л. В., Баранова М. Е., Михайловский Ю. П.* (К расчету электрических параметров тропосферы в условиях «хорошей погоды»). Труды ГГО. 2018. Вып. 588.
2. *Морозов В.Н.* Глобальная атмосферно-электрическая токовая цепь / В справочнике «Атмосфера» Л.: Гидрометеоздат. 1991. С. 395–408.
3. *Шварц Я.М., Огуряева Л. В.* Многолетний ход величин атмосферного электричества в приземном слое // Метеорология и гидрология. 1987. № 7. С. 59–64.

## СОДЕРЖАНИЕ ЛЕГКИХ АЭРОИОНОВ В НЕКОТОРЫХ РАЙОНАХ СЕВЕРНОГО КАВКАЗА И ГРУЗИИ

*А.Г. Амиранашвили<sup>1</sup>, Н.П. Поволоцкая<sup>2</sup>, И.А. Сенник<sup>3</sup>, В.А. Чихладзе<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Институт геофизики им. М. Нодиа Тбилисского государственного университета им. И. Джавахишвили, г. Тбилиси, Грузия

<sup>2</sup> ФГБУ Пятигорский государственный НИИ курортологии Федерального медико-биологического агентства, г. Ессентуки

<sup>3</sup> Кисловодская высокогорная научная станция, ФГБУН Института физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, г. Москва

[avtandilamiranashvili@gmail.com](mailto:avtandilamiranashvili@gmail.com), [nina194101@gmail.com](mailto:nina194101@gmail.com), [senik\\_ia@list.ru](mailto:senik_ia@list.ru)

Содержание легких ионов в атмосфере играет существенную роль в формировании физиологического состояния человека и, одновременно, является индикатором чистоты воздуха. Результаты исследований концентрации легких ионов в воздухе часто используются для выявления курортно-туристических ресурсов местности [1–5], а также для косвенной оценки уровня загрязненности атмосферы [2, 6]. Подобные исследования достаточно давно проводятся как в России, так и в Грузии. В данной работе представлены некоторые результаты исследований ионизационного состояния воздушной среды в различных районах Северного Кавказа и Грузии, проведенных в последние годы.

На Северном Кавказе измерения содержания легких ионов в воздухе проводились с помощью малогабаритного аэроионного счетчика МАС-01 (ООО «НТМ-Защита», Москва) [3], а в Грузии – с использованием портативного счетчика производства фирмы “AlphaLab, Inc.” США и прибора типа Гердиена [6]. Введены следующие обозначения:  $N_+$  и  $N_-$ , соответственно, концентрация положительных и отрицательных ионов (ион/см<sup>3</sup>), КУИ – коэффициент униполярности ионов (КУИ =  $N_+/N_-$ ), МТ – маршруты терренкура.

Результаты работы приведены в таблице 1.

Как следует из этой таблицы, на Северном Кавказе на территории Бештаугорского лесопарка концентрация положительных ионов колеблется в пределах от 188 до 271 ион/см<sup>3</sup>, а отрицательных – от 642 до 932 ион/см<sup>3</sup>; значение КУИ – от 0.23 до 0.42. В национальном парке «Кисловодский» значения  $N_+$  изменяются от 450 до 670 ион/см<sup>3</sup>,  $N_-$  – от 620 до 1340 ион/см<sup>3</sup>, КУИ – от 0.40 до 0.86. В целом в указанных пунктах исследования ионизация отрицательная.



## Природная аэроионизация в различных пунктах Северного Кавказа и Грузии

Точки наблюдения	N <sub>+</sub>	N <sub>-</sub>	КУИ
Бештаугорский лесопарк на курорте Железноводска (600–630 м над кровнем моря)	188–271	642–932	0,23–0,42
1. Под пологом дуба черешчатого	188	810	0,23
1а. Открытая поляна в 50 м, разнотравье	252	642	0,39
2. Под пологом ели колючей	219	829	0,26
2а. Открытая местность в 30 м, аллея	258	667	0,39
3. Под пологом явора	219	932	0,23
3а. Открытая местность, аллея	271	652	0,42
Национальный парк «Кисловодский»	450–670	620–1340	0,40–0,86
Туя западная, у МТ2Б ст.№ 75, полог	530	1340	0,40
Туя западная, у МТ2Б ст.№ 75, поляна	545	730	0,75
Хвойный лес в районе МТ2Б (ель европейская), полог	620	880	0,70
Хвойный лес в районе МТ2Б (ель европейская), поляна	535	620	0,86
Насаждения осины в районе МТ №2Б поляг	480	775	0,77
Насаждения осины в районе МТ №2Б поляна	530	620	0,85
Насаждения сосны обыкновенной, Сосновая горка, полог	450	990	0,45
Насаждения сосны обыкновенной, Сосновая горка, поляна (вершина)	490	740	0,76
Олимпийский комплекс, Сосновый лес, полог	670	1080	0,62
Олимпийский комплекс, Сосновый лес, поляна	620	940	0,66
Тбилисский национальный ботанический сад, 21 точка	90–825	420–1350	0,13–0,92
Тбилисский национальный ботанический сад, вблизи водопада (высота 24 м), 33 точки	200–1200	700–4500	0,1–0,86
Тбилиси, парк Ваке	445	285	1,56
Тбилиси, парк Ваке, около фонтана	269	4491	0,06
Боржоми, 10 точек	300–1502	400–1598	0,2–1,25
Парк Боржоми, 3 точки	300–550	500–1100	0,5–0,61
Парк Боржоми, вблизи реки Боржомула, 6 точек	498–754	824–9952	0,05–0,82
Парк Боржоми, водопад, вблизи водопада (высота 120 м), 6 точек	379–850	850–3000	0,15–1,00
Тбилиси, территория института геофизики (термобарокамера), 725 дней, 2010–2011 гг.	140–1333	108–1365	0,62–1,87
Тбилиси, территория института геофизики (термобарокамера), среднее	522	469	1,13
Тбилиси, разные пункты города, 20 точек, 462 измерения	44–1230	56–1230	0,57–2,27
Тбилиси, разные пункты города, 20 точек, среднее	423	377	1,12

В Грузии в парковых и лесопарковых зонах, даже в окрестностях сильно загрязненной (Тбилиси) и малозагрязненной (Боржоми) местности также зачастую наблюдается отрицательная ионизация воздуха. Так, например, в Тбилисском национальном ботаническом саду значения N<sub>+</sub> изменяются от 90 до 825 ион/см<sup>3</sup>, N<sub>-</sub> – от 420 до 1350 ион/см<sup>3</sup>, КУИ – от 0,13 до 0,92. В Боржомском парке значения N<sub>+</sub> изменяются от 300 до 550 ион/см<sup>3</sup>, N<sub>-</sub> – от 500 до 1100 ион/см<sup>3</sup>, КУИ – от 0,5 до 0,61. Высокая концентрация отрицательных ионов наблюдается вблизи водопадов, фонтанов и около быстро текущих рек (до 4500 ион/см<sup>3</sup> – около водопада в Тбилисском национальном ботаническом саду, 4491 ион/см<sup>3</sup> – около фонтана в парке Ваке, 3000 ион/см<sup>3</sup> – около водопада в Боржомском парке, 9952 ион/см<sup>3</sup> – вблизи реки Боржомула).

В Тбилиси на территории института геофизики содержание N<sub>+</sub> варьирует от 140 до 1333 ион/см<sup>3</sup>, N<sub>-</sub> – от 108 до 1365 ион/см<sup>3</sup>, КУИ – от 0,62 до 1,87 при средних значениях соответственно: 522, 469 ион/см<sup>3</sup> и 1,13. В различных пунктах города величина N<sub>+</sub> меняется от 44 до 1230 ион/см<sup>3</sup>, N<sub>-</sub> – от 56 до 1230 ион/см<sup>3</sup>, КУИ – от 0,57 до 2,27 при средних значениях соответственно: 423, 377 ион/см<sup>3</sup> и 1,12.

## Литература

1. Slepikh V.V., Povolotskaya N.P., Korshunova Z.V., Terre N.I., Fedorov V.A. Ionization Background of the Trees and Plants of Kislovodsk Park // Voprosy kurortologii, fizioterapii i lechebnoy fizicheskoy kul'tury. 2006. № 3. P. 37–39, (in Russian).

2. Kudrinskaya T. V., Kupovykh G. V., Redin A. A. Studying the Ionization of Atmospheric Surface Layer in Different Geophysical Conditions // Russian Meteorology and Hydrology. 2018. Vol. 43, Issue 4. P. 258–263.
3. Поволоцкая Н.П., Ефименко Н.В., Жерлицина Л.И., Кириленко А.А., Кортунова З.В., Трубина М.А., Урвачева Е.Е., Сеник И.А., Слепых В.В., Слепых О.В. Природные ресурсы климатоландшафтотерапии в национальном парке „Кисловодский“ // Тр. 6-ой Междунар. конф. „Современные проблемы экологии“ / г. Кутаиси, Грузия, (сентябрь 2018 г.). Т. 6. Кутаиси, 2018. С. 196–200.
4. Амиранашвили А.Г., Амиранашвили В.А., Блиадзе Т.Г., Тархан-Моурави И.Д., Чихладзе В.А. Содержание легких аэроионов в некоторых курортных и туристических зонах Боржоми и Тбилиси // Сб. научн. статей „Актуальные проблемы патологии, терапии и медицинской реабилитации“. Тбилиси-Москва: ТБК-РАМ-ТН. 2014. С. 69–74.
5. Amiranashvili A., Bliadze T., Chikhladze V., Machaidze Z., Melikadze G., Saakashvili N., Khatiashvili E., Tarkhan-Mouravi I., Sikharulidze Sh., Nakaidze T., Tavartkiladze M. New Data about the Aeroionization Characteristics of the Territory of National Botanical Garden of Georgia as the Factor of the Expansion of its Sanitation Properties for the Visitors // Journal of the Georgian Geophysical Society. Tbilisi. 2013. Vol. 16, Issue B. P. 24–30.
6. Амиранашвили А.Г., Блиадзе Т.Г., Чихладзе В.А. Фотохимический смог в Тбилиси // Моногр., Тр. Ин-та геофизики им. М. Нодиа. Тбилиси. 2012. Т. 63. 160 с. (на грузинском яз.).

## ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ЛЕГКИХ ИОНОВ В УСЛОВИЯХ СИЛЬНО ЗАГРЯЗНЕННОЙ АТМОСФЕРЫ

*А.Г. Амиранашвили*

Институт геофизики им. М. Нодиа Тбилисского государственного университета  
им. И. Джавахишвили, Тбилиси, Грузия  
avtandilamiranashvili@gmail.com

Как известно, образование легких ионов в атмосфере происходит в результате ионизирующего излучения (космические лучи, гамма излучение почвы, радон и короткоживущие продукты его распада). Исчезновения ионов происходит за счет их рекомбинации и присоединения к аэрозольным частицам (минеральные и так называемые вторичные аэрозоли, образующиеся по схеме газ → частица). В последние годы выявилось, что образование вторичных аэрозолей, как и легких ионов, также зависит от интенсивности ионизирующего излучения [1, 2]. Недавние исследования влияния ионизирующего излучения на образование вторичных аэрозолей в условиях города Тбилиси выявили наличие невозможной в естественных условиях обратной связи этого излучения с концентрацией легких ионов в воздухе, вызванной образованием вторичных аэрозолей в количестве, которое в совокупности с первичными частицами способно присоединять к себе больше ионов, чем их образуется при ионизации (Тбилисский тип смога) [3–6]. Предполагается, что Тбилисский тип смога может иметь место также и в других городах с сильно загрязненной атмосферой.

Данная работа является продолжением предыдущих исследований.

Измерения концентрации легких ионов (ниже,  $N(+/-)$  – суммарная концентрация ионов,  $см^{-3}$ ) проводились прибором типа Гердиена. Содержание радона ( $Rn$ ,  $Бк/м^3$ ) определялось методом отбора проб воздуха через фильтр с последующим счетом альфа-частиц короткоживущих продуктов его распада. Общее количество субмикронных аэрозолей диаметром  $\geq 0.1$   $мкм$  ( $N$ ,  $см^{-3}$ ) измерялось с помощью прибора ФАН, который работал в режиме счета. Указанные измерения проводились 4 раза в день на высоте 3 этажа здания облачной камеры Института геофизики (8 метров над уровнем почвы,  $41.754^\circ$  с.ш.,  $44.927^\circ$  в.д., высота – 450 м над ур. моря), в 9, 12, 15 и 18 часов (в зимнее время – 17 часов) [5]. Анализ данных проводился с использованием методов математической статистики для случайных событий и неслучайных временных рядов. Ниже представлены результаты исследования особенностей вариации концентрации легких ионов и их связей с содержанием в воздухе радона и субмикронных аэрозолей в условиях сильно загрязненной местности на примере города Тбилиси по данным о среднедекадных значениях исследуемых параметров в период 2010–2011 гг. (72 декады, с 9 до 17–18 ч). Результаты работы приведены на рисунке 1 и в таблице 1 (размерности исследуемых параметров опущены).

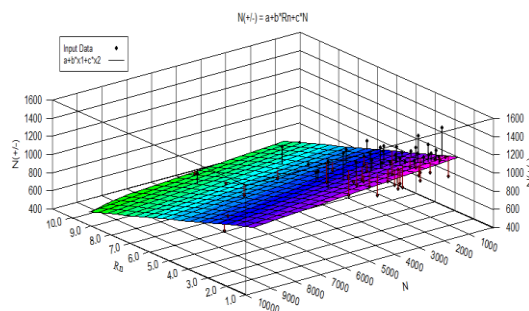


Рисунок 1. Связь суммарной концентрации легких ионов с содержанием в воздухе радона и субмикронных аэрозолей

Таблица 1

**Статистические характеристики среднедекадных значений содержания в воздухе радона, субмикронных аэрозолей и легких ионов**

Параметр	Rn	N	N(+/-)
Среднее	3,8	2691	991
Минимум	1,6	963	424
Максимум	10,6	9215	1449
Стандартное отклонение	1,78	1525	203
Стандартная ошибка	0,21	181	24
Коэффициент вариации, $C_v$ , %	46,5	56,7	20,5
Коэффициент автокорреляции	Первые три лага	Первые два лага	Первые три лага
Пики периодичности	18 (основной), 12, 9	12 (основной), 18, 14,4	18
Регрессия временного хода	Полином десятой степени		
Коэффициент детерминации, ( $R^2$ )	0,7256	0,4063	0,6367
Корреляционная матрица	Правая верхняя часть – реальные данные, Левая нижняя часть – остаточные компоненты,		
Rn	1	0,38	-0,71
N	0,35	1	-0,39
N(+/-)	-0,60	-0,47	1
Регрессия: $N(+/-) = f(Rn, N)$	$N(+/-) = 1326,927 - 74,3074Rn - 0,01902 \cdot N$ , ( $R^2 = 0,5186$ )		

В частности, получено, что: наибольшие вариации наблюдаются для концентрации субмикронных аэрозолей, наименьшие – легких ионов ( $C_v = 56,7$  и  $20,5\%$  соответственно); автокорреляция в рядах наблюдений для радона и ионов отмечается в первых трех лагах, а для аэрозолей – в первых двух лагах (лаг – декада); для содержания радона и легких ионов основной пик периодичности приходится на 18 декад (полгода), тогда как для аэрозолей на 12 декад (4 месяца); временной ход всех исследуемых параметров удовлетворительно описывается полиномом десятой степени; линейная корреляция между реальными значениями исследуемых параметров, а также их остаточными компонентами, имеет сходный характер – положительная корреляция между содержанием в воздухе радона и вторичных аэрозолей и отрицательная зависимость концентрации ионов от содержания радона и аэрозолей.

Для наглядности на рисунке 1 представлен график двумерной линейной зависимости суммарной концентрации легких ионов от содержания в воздухе радона и субмикронных аэрозолей.

### Литература

1. *Muraleedharan T.S., Subba Ramu M.S. Vohra K.G.* Experimental Studies of the Formation of Aitken Nuclei in the Atmosphere // Proc. 11<sup>th</sup> Int. Conf. on Atmospheric Aerosols, Condensation and Ice Nuclei / Budapest, Hungary, (September 1984). Vol. 1. Budapest. 1984. P. 52–57.
2. *Smirnov V.V., Savchenko A.V.* Effect of Ionizing Radiation on the Formation of Nanoparticles in the Atmosphere // Chemistry for Sustainable Development. 2005. No 5. P. 649–654, (in Russian).

3. *Amiranashvili A.* Negative Correlation Between of Light Ions Content and Radon Concentration: Particularity of Tbilisi City Air Pollution, or Norm for the Urbanized Locality? // Proc. 14th Int. Conf. on Atmospheric Electricity / Rio de Janeiro, Brazil, (August 2011). <http://www.icae2011.net.br/>.
4. *Amiranashvili A.* Tbilisi Type of Smog as Attribute of Feedback Effect Between the Air Ionization Intensity and Small Ions Concentration. // Proc. 7th Asia-Pacific Int. Conf. on Lightning /Chengdu, China, (November 2011). P. 496–499. ([http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs\\_all.jsp?arnumber=6110175](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=6110175), <http://www.apl2011.net/>.)
5. *Амиранашвили А.Г., Бладзе Т.Г., Чихладзе В.А.* Фотохимический смог в Тбилиси // Моногр., Тр. Ин-та геофизики им. М. Нодиа. Тбилиси. 2012. Т. 63. 160 С., (на грузинском яз.).
6. *Amiranashvili A., Chargazia Kh.* Intra-Annual and Seasonal Variations of Sub-Micron Aerosols Concentration and their Connection with Radon Content in Surface Boundary Layer of Tbilisi City // Bull. of the Georgian National Academy of Sciences. 2016. Vol. 10, No. 2. P. 72–78.

## СЕКЦИЯ 2. Глобальная электрическая цепь

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ГЛОБАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ В ГЛАВНОЙ ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ ИМ. А.И. ВОЕЙКОВА

В.Н. Морозов

Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова  
vn.morozov@inbox.ru

За последние 40 лет, начиная примерно с 1979 г, в ГГО были рассмотрены и решены следующие задачи в области теории глобальной электрической цепи (ГЭЦ):

1. Построена аналитическая стационарная модель влияния конвективного токового генератора на параметры глобальной электрической цепи. Результаты расчетов по этой модели опубликованы в работах [1, 2].

2. Разработана нестационарная модель ГЭЦ, в которой учитываются релаксационные процессы, рассматривается влияние молниевых процессов различных типов [3, 4, 7]. Рассматривается также влияние гармонических процессов на ГЭЦ [8–10].

3. Построена аналитическая физико-математическая модель, описывающая проникновение электрических полей, возникающих в верхних слоях атмосферы в нижние [5, 8, 9].

Начало исследований в этой области датируется 80-ми годами XX века, когда появилась первая модель ГЭЦ, развитая в работах Хейса и Робла [9, 10]. Импульсом для развития этой модели послужил тот факт, что оценки потенциала ионосферы, сделанные на основе этой работы, дали величину 250–300 кВ, что потребовало больших величин электрических зарядов в дипольной модели грозового генератора, которая использовалась в этой модели. Вместе с А. Н. Селезневой, сотрудницей нашего отдела, мы решили расширить эту модель, включив в нее модель конвективного пограничного слоя, сохраняя при этом дипольную модель грозового генератора. В результате проведенных расчетов было получено следующее выражение для потенциала ионосферы, величина которого является глобальной характеристикой электрического поля атмосферы:

$$\varphi_{\infty} = \frac{1}{4\pi R^2 \alpha} \sum_{i=1}^N I_i \left( \frac{1}{\lambda_{i-}} - \frac{1}{\lambda_{i+}} \right) \frac{K_i \lambda_i}{K_i + \alpha} / \left\langle \frac{K \lambda}{K + \alpha} \right\rangle, \quad I_i = 4\pi \lambda_{i+} q_{i+} = -4\pi \lambda_{i-} q_{i-}$$
$$\left\langle \frac{K \lambda}{K + \alpha} \right\rangle = \frac{1}{4\pi} \iint \frac{K \lambda}{K + \alpha} dS, \quad K = \left| \int_{z_0}^H E'(z) dz \right|^{-1}, \quad E(z) = \frac{j}{\lambda} E'(z) \quad (1)$$

где  $R$  – радиус Земли,  $\alpha$  – показатель экспоненты в аналитическом представлении электрической проводимости  $\lambda(r) = \lambda_0 e^{\alpha(r-R)}$ .

При  $K, K_i \rightarrow \infty$  получим решение, следующее из работы [6]. Величина  $K$  определяется переносом электрического заряда в конвективно-неустойчивом пограничном слое [11]. Результаты численных экспериментов, рассмотренных в этой работе, показали, что  $K = 4 \times 10^{-4} \text{ м}^{-1}$  при  $H = 10^3 \text{ м}$ . Все другие стратификации дают величину  $K$  более высокую, чем величина  $K$  для конвективно-неустойчивого пограничного слоя. В случае однородного распределения пограничного слоя по земной поверхности в модели сферической Земли  $K=1$  и вклад конвективного генератора равен нулю. В таблице 1 приведена зависимость изменений

относительных значений отношения  $\frac{\varphi_{\infty}}{\varphi_0}$  от площади земной поверхности, занятой

пограничным слоем ( $S/S_0$ ) и средней величины  $\left\langle \frac{K \lambda}{K + \alpha} \right\rangle$ .

Таблица 1 – Зависимость относительного изменения потенциала ионосферы от площади, занимаемой конвективно-неустойчивым пограничным слоем

$\frac{S}{S_0}$	0,9	0,5	0,1
$\langle \frac{K\lambda}{K+\alpha} \rangle$	0,7	0,84	0,97
$\frac{\varphi_\infty}{\varphi_\infty^0}$	1,42	1,20	1,03

Как следует из таблицы, конвективный токовый генератор в пограничном слое атмосферы может давать вклад 20% (максимальная величина 42%). Отметим также, что этот генератор работает только при наличии электрического поля атмосферы, которое создает вследствие электродного эффекта электрический заряд, который затем переносится конвективными движениями воздуха в пограничном слое. Впервые идея о влиянии конвективных движений в атмосфере на ее электрическое поле была высказана в работе Имянитова и Колоколова [11].

Нестационарная модель рассматривалась на основе уравнения для потенциала электрического поля  $\varphi(r, \theta, \phi)$ , записанного в сферической системе координат  $(r, \theta, \phi)$  с центром в начале Земли [3, 6]:

$$\left(\frac{1}{4\pi} \frac{\partial}{\partial t} + \lambda(r)\right) \left[\frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \Delta_{\theta, \phi} \varphi\right] + \alpha \lambda \frac{\partial \varphi}{\partial r} = - \sum_{s=1}^N \text{div} \vec{j}_s \quad (2)$$

$$\Delta_{\theta, \phi} \varphi = \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial \varphi}{\partial \theta}\right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \phi^2}$$

Токовый источник в правой части уравнения (2) записывается в следующем виде:

$$- \sum_{s=1}^N \text{div} \vec{j}_s = - \sum_{s=1}^N \left\{ \left[ \frac{I_{cs}(t)}{r^2} + \frac{I_{cc}^s(t)}{r^2} \right] [\delta(r - r_{s0}) - \delta(r - r_{s1})] + \frac{I_{cg}^s(t)}{r^2} [\delta(r - R) - \delta(r - r_{si})] \right\} \delta(\cos \theta - \cos \theta_s) \delta(\phi - \phi_s)$$

где  $\varphi$  – потенциал электрического поля атмосферы,  $\lambda(r) = \lambda_0 e^{\alpha(r-R)}$  – электрическая проводимость атмосферы,  $I_{cs}(t)$  – ток электризации, формирующий электрическую структуру грозового облака,  $I_{cc}^s(t)$  – электрический ток, обусловленный разрядом «облако-облако» в s-ом грозовом генераторе,  $I_{cg}^s$  – электрический ток, создаваемый разрядом «облако-земля» в s-ом грозовом генераторе,  $\delta(u)$  – дельта-функция Дирака,  $r_{s0}, r_{s1}$  – радиальные координаты положительного и отрицательного заряженных центров в s-ом грозовом генераторе ( $r_{s0} > r_{s1}$ ),  $\theta_s, \phi_s$  – угловые координаты заряженных центров в s-ом грозовом генераторе,  $i=1$  соответствует разряду нижнего отрицательного заряда на землю,  $i=0$  положительного верхнего заряда на землю,  $N$  – число гроз, действующих в данный момент времени по всему земному шару,  $R$  – радиус Земли,  $\alpha^{-1} = (0,2-0,3) \text{ км}^{-1}$ .

Решение уравнения (2) находилось на основе следующих начальных и граничных условий:

$$\varphi(r = R, t) = 0, \quad \varphi(r \rightarrow \infty) = \varphi_\infty(t), \quad \Delta \varphi(r, t = 0) = 0, \quad I_{cs}(t) = I_{cso} \theta(t) \quad (3)$$

Было получено аналитическое решение уравнения (2) с использованием метода разложения по сферическим гармоникам и временного преобразования Лапласа. Анализ релаксационной задачи показал наличие трех стадий в установлении стационарного состояния при включении грозовых генераторов в некоторый момент времени.

1. Первая стадия. Кулоновское приближение, когда электрическая проводимость не влияет на электрическое состояние атмосферы. Характерное время для этой стадии определяется из неравенства:

$$4\pi\lambda_0 e^{\alpha(r-R)} t \ll 2 / \alpha R .$$

2. Вторая стадия. Здесь появляется масштаб  $h(t) = \alpha^{-1} \ln \frac{\tau_0}{t}$ , где  $\tau_0 = (4\pi\lambda_0)$  и электрические токи проводимости текут при  $z > h(t)$  и токами проводимости можно пренебречь при  $z < h(t)$ .

3. Третья стадия имеет место при  $t > (4\pi\lambda_0)^{-1}$ . При этих временах система эволюционирует к стационарной.

Потенциал ионосферы рассчитывается на основе баланса токов проводимости и токов смещения:

$$\oint_s (\lambda \vec{E} + \frac{1}{4\pi} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}) d\vec{S} = 0 . \quad (4)$$

Соответствующие выражения для нестационарных выражений потенциала ионосферы приведены в работах [3, 6]. Аналогичное рассмотрение было проведено при исследовании влияния гармонических колебаний потенциала ионосферы или тока грозового генератора [8, 9, 10].

### Литература

1. Морозов В.Н., Селезнева А.Н. К обобщению модели глобальной атмосферно-электрической цепи с учетом влияния пограничного слоя атмосферы // Труды ГГО. 1985. Вып. 514. С. 60–74.
2. Morozov V.N. The influence of convective current generator on global current // Nonlin. Processes Geophys. 2006. V.13., No2. P. 243–246.
3. Морозов В.Н. Модель нестационарного электрического поля в нижней атмосфере // Геомагнетизм и аэрономия. 2005. Т.45, №2. С. 268–278.
4. Морозов В.Н. Расчет электрических полей грозовых облаков для инициирования электрических разрядов облако- верхние слои атмосферы // Геомагнетизм и аэрономия. 2002. Т.42, №1. С. 121–129.
5. Морозов В.Н., Трошичев О.А. Моделирование вариаций полярного атмосферного электрического поля в полярной атмосфере, связанного с магнитосферными продольными токами // Геомагнетизм и аэрономия. 2008. Т.48, №6. С. 759–769.
6. Морозов В.Н., Куповых Г.В. Математическое моделирование глобальной атмосферной электрической цепи и электричества приземного слоя –СПб: Астерион. 2017. 307 с.
7. Морозов В.Н. Влияние молниевых разрядов грозовых облаков на глобальную электрическую цепь // Труды ГГО. 2013. Вып. 569. С. 249–257.
8. Морозов В.Н. Проникновение ионосферных нестационарных электрических полей в нижние слои атмосферы. Труды ГГО. 2014. Вып. 571. С. 162–171.
9. Морозов В.Н. Проникновение нестационарных ионосферных электрических полей в нижние слои атмосферы в модели глобальной электрической цепи // Геомагнетизм и аэрономия. 2017. Т. 5, №1. С. 119–124.
10. Морозов В.Н. Вариации электрического поля атмосферы, обусловленные гармоническими вариациями токов грозовых генераторов в модели глобальной электрической цепи в атмосфере // Труды ГГО. 2013. В. 569. С. 249–257.
11. Имянитов И.М., Колоколов В.П. Исследование электрического поля атмосферы // Труды ГГО. 1974. В. 334. С. 232–250.

### СЕКЦИЯ 3. Электричество облаков

#### ОТКЛИК ГРАДИЕНТ ПОТЕНЦИАЛА ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ АТМОСФЕРЫ НА ЭРУПТИВНЫЕ ОБЛАКА В. ШИВЕЛУЧ И В. ЭБЕКО (П-ОВ КАМЧАТКА, О. ПАРАМУШИР, РОССИЯ)

Р.Р. Акбашев<sup>1,2</sup>, П.П. Фирстов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», г. Петропавловск-Камчатский

<sup>2</sup>Камчатский государственный университет им. Витуса Беринга, г. Петропавловск-Камчатский  
arr@emsd.ru, firstov@emsd.ru

Взаимодействие геосферных оболочек характерно для мощных геодинамических событий, к которым можно отнести землетрясения и вулканические извержения. Такое взаимодействие проявляется возмущением в электрическом поле атмосферы (ЭПА), которые можно контролировать при мониторинге градиента потенциала электрического поля атмосферы ( $V'$  ЭПА).

На п-ове Камчатка с 2013 г. действует сеть пунктов наблюдения (ПН)  $V'$  ЭПА. Пункты наблюдения организованы на базе сейсмологических станций КФ ФИЦ ЕГС РАН в п. Козыревск (KZVG) с 2013 г., в п. Ключи (KLYG) с 2016 г., в п. Крутоберегово (KBGG) с 2018 г. и сейсмостанции СФ ФИЦ ЕГС РАН в г. Севера – Курильск (SKRG) с 2018г. На рисунке 1 а показана схема сети ПН  $V'$  ЭПА. Для автоматизации процесса сбора и первичной обработки данных в 2018 г. разработан программно-аппаратный комплекс регистрации  $V'$  ЭПА на основе электростатического датчика ЭФ-4 [1], АЦП Е-24, фирмы L-Card и микрокомпьютера серии Thiner Board фирмы Asus [2] (рисунок 1б).

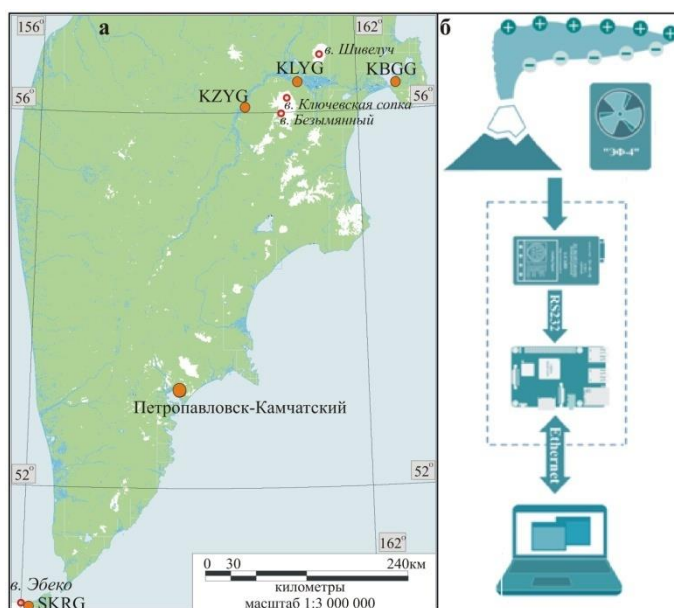


Рисунок 1. Пункты наблюдения  $V'$  ЭПА (а); принципиальная схема работы комплекса регистрации  $V'$  ЭПА (б)

Комплексный анализ геофизических наблюдений (сейсмические наблюдения, инфразвуковые наблюдения, метеорологические данные) обеспечивает точное выделение сигналов  $V'$  ЭПА, характеризующие возмущения ЭПА от прохождения пепло – газовых шлейфов эксплозивных извержений. В результате анализа формируется каталог событий. Составляется Таблица параметров зарегистрированных сигналов (Таблица 1). Таким образом, за период наблюдений 2013–2018 г. в ПН KZYG, KLYG зарегистрировано 4 события связанных с мощными эксплозивными извержениями в. Шивелуч [3, 4].



Параметры сигналов  $V'$ ЭПА, зарегистрированных в пунктах наземного базирования при прохождении эруптивных облаков от извержений вулкана Шивелуч

Дата	$t_0$	KZYG			KLYG			
		полярность	$V'$ , В/м	$\Delta t$ , мин.	полярность	$V'$ , В/м	$\Delta t$ , мин.	$\delta$ , гр/м <sup>2</sup>
14.12.2014	10:17:55	+	170	85	Пункт не работал			
16.12.2016	22:31:32	Облако прошло мимо			-	-1249	51	20
14.06.2017	16:26:37	+	+1082	140	-	-5877	40	~300
30.12.2018	00:34:46				-	-588	90	

Примечание.  $t_0$  – время начала извержения,  $\Delta t$  - длительность сигнала,  $\delta$  - количество пепла на 1 кв. м.

В качестве примера на рисунке 2 приведен отклик  $V'$  ЭПА на прохождение эруптивного облака, возникшего во время извержения вулкана Шивелуч 14 июня 2017 г. [4]. В этом случае наблюдалось удачное сочетание направления ветра и условий хорошей погоды, позволившие зарегистрировать вариации  $V'$  ЭПА при прохождении эруптивного облака над пунктами KLYG и KZYG.

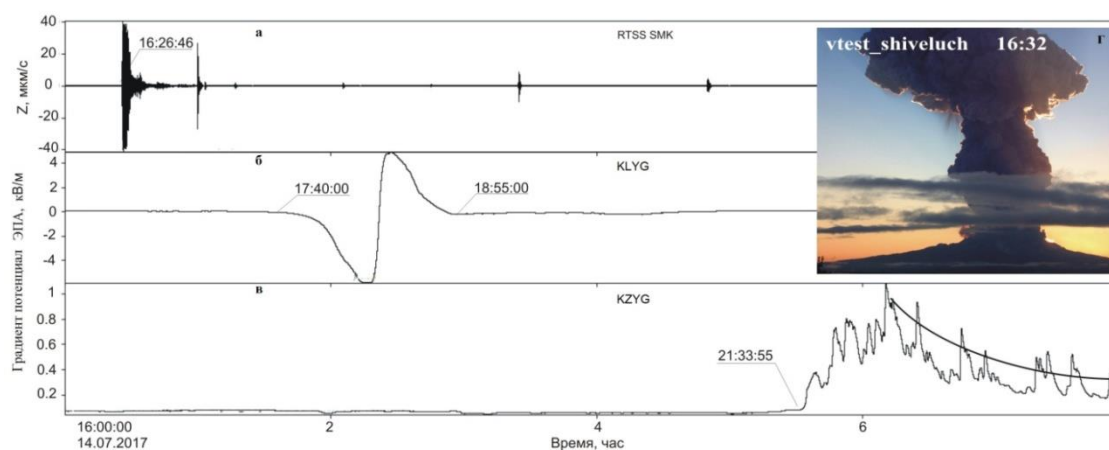


Рисунок 2. Фрагмент записи скорости смещения грунта на сейсмической станции SMK во время извержения (а), градиент потенциала ЭПА в пунктах KLYG и KZYG (б, в) при прохождении эруптивного облака от извержения вулкана Шивелуч 14 июня 2017 г., фрагмент видеонаблюдения на в. Шивелуч (г)

На основании записи сейсмического сигнала (рисунок 2а), возникшего во время извержения, высота эруптивного облака была оценена в 12 км н.у.м. При этом в атмосферу было выброшено значительное количество пепла, что согласуется с большими значениями дипольного сигнала  $V'$  ЭПА (см. таблица 1). Форма записи  $V'$  ЭПА указывает на источник типа горизонтального диполя (рисунок 2б). На расстоянии более 100 км над пунктом KZYG эруптивное облако уже представляло аэрозольную структуру, отклик на которую имел положительную полярность и значительно меньшую амплитуду сигнала.

Действующий стратовулкан Эбеко ( $50^{\circ}41'20''$  с. ш.,  $156^{\circ}00'54''$  в. д) высотой 1156 м н.у.м., по частоте извержений является одним из активнейших вулканов Курильской островной дуги. Извержения сопровождаются газо-пепловыми выбросами на высоту 3–5 км н.у.м. Большой удачей стала установка комплекса аппаратуры в г. Северо-Курильск. За период работы с 1 октября по 31 декабря ПН SKRG зарегистрировано 34 случая, когда эруптивные облака распространялись над ПН. Эти события, соответственно, происходили в различных метеорологических условиях, зарегистрированы положительные и отрицательные аномалии в вариациях  $V'$  ЭПА. Стоит отметить, что зарегистрированы случаи при УХП (условия хорошей погоды) с различным откликом  $V'$  ЭПА, в том числе и случаи с отсутствием возмущения ЭПА в ПН. Длительность аномалий варьируется от 10 до 30 мин, максимальные значения превышали порог чувствительности датчика ЭФ-4 (более  $\pm 2000$  В/м). Второй датчик с расширенным

порогом чувствительности ( $\pm 8000$  В/м), был установлен 3 ноября 2018 г. Максимальное значение зарегистрированной аномалии 2888 В/м.

На рисунке 3 показан пример отклика  $V'$  ЭПА на прохождение газо – пеплового облака над ПН SKRG. Зарегистрирована отрицательная аномалия с максимальным значением  $V'$  ЭПА – 102 и – 120 В/м (на ПН установлено два электростатических датчика на разных высотах от поверхности земли).

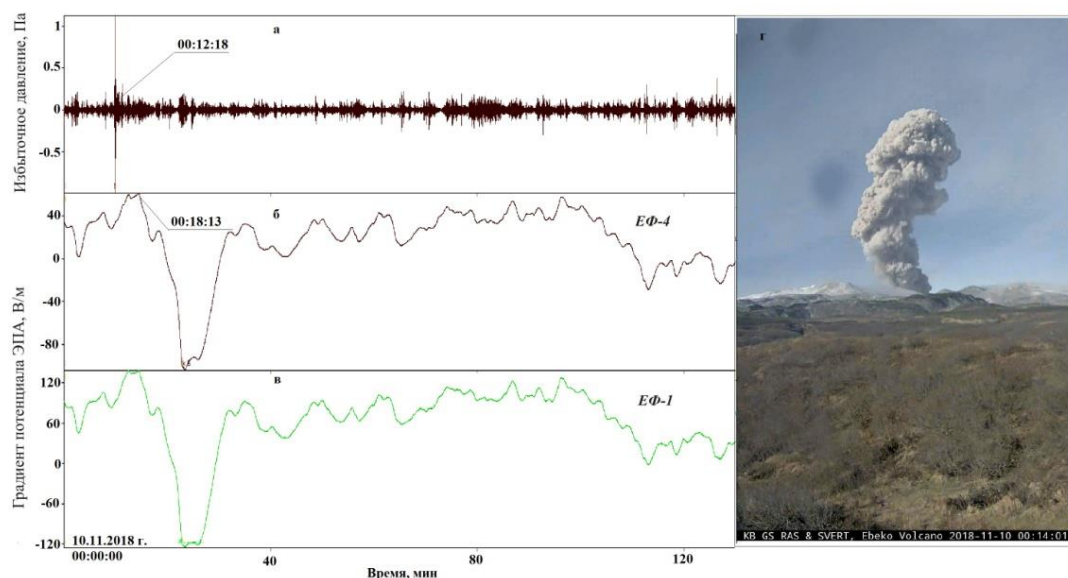


Рисунок 3. Фрагмент записи акустического сигнала на станции SRKG во время извержения (а),  $V'$  ЭПА (б, в) при прохождении эруптивного облака от извержения вулкана Эбеко 11 ноября 2018 г.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 18–35–00175\18.

### Литература

1. Ефимов В.А., Орешкин Д.М., Фирстов П.П., Акбашев Р.Р. Применение электростатического флюксметра ЭФ-4 для исследований геодинамических процессов // Сейсмические приборы. 2013. Т. 49, №4. С. 35–46.
2. Будилов Д.И., Акбашев Р.Р., Фирстов П.П. Development of hardware-software complex for registration the atmospheric electric potential gradient // 10th Biennial workshop on Japan-Kamchatka-Alaska subduction processes (JKASP-2018): Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, August 20–26: [http://www.kscnet.ru/ivs/conferences/jkasp2018/pdf/file\\_name.pdf](http://www.kscnet.ru/ivs/conferences/jkasp2018/pdf/file_name.pdf), P. 34–35.
3. Фирстов П.П., Акбашев Р.Р., Холзворт Р. и др. Атмосферно-электрические эффекты во время эксплозии вулкана Шивелуч 16 ноября 2014 г. // Известия РАН. ФАО. 2017. Т.53. № 1. С. 29–37.
4. Firstov P., Cherneva N., Akbashev R. Natural factor impact on atmospheric electric field variations in Kamchatka // E3S Web of Conferences 20, 01003. 2017 – DOI: 10.1051/e3sconf/20172001003.

### ГРОЗОВАЯ АКТИВНОСТЬ ЭРУПТИВНЫХ ОБЛАКОВ ВУЛКАНА ШИВЕЛУЧ В 2017 г.

П.П. Фирстов<sup>1</sup>, Е.И. Малкин<sup>2</sup>, Н.В. Чернева<sup>2</sup>, Г.И. Дружин<sup>2</sup>, М.А. Лобачева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Камчатский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН»

<sup>2</sup>Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН  
firstov@emsd.ru

В последние годы атмосферно-электрическим эффектом, сопровождающим эксплозивные извержения, уделяется большое внимание. Это связано с возрастающей плотностью населения на Земле и пепловой опасностью для населения и урбанизированных территорий, в первую очередь для авиации [1, 2]. В работе [3] ретроспективно анализировалось возникновение вулканических молний на 80 вулканах мира для 212 эксплозивных извержений.

Исследовалась связь молниевых разрядов с индексом вулканической эксплозивности (Volcanic Explosivity Index–VEI). Он был распределен следующим образом: VEI=6 составляли менее 2%, VEI=3–5 составляли 10%, а остальные слабые извержения имели VEI=1–2. Это говорит о большой роли статического электричества при формировании эруптивных облаков даже при слабых извержениях и убедительно показывает информативность вулканических молний для извержений с различным индексом VEI. Поэтому изучение электромагнитных импульсов (ЭМИ) от разрядов «вулканических молний» расширяет информативность, как о самом процессе извержения, так и о динамике распространения эруптивного облака.

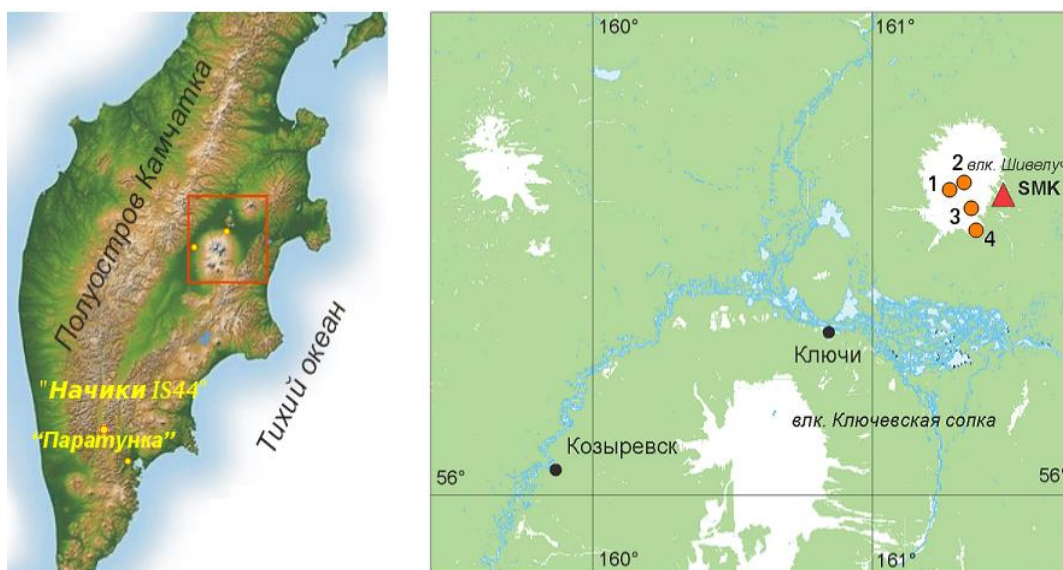


Рисунок 1: а) Схема расположения ОНЧ пеленгатора (ИКИР) и вулкана Шивелуч на Камчатке; б) пункты наблюдений за вулканами (КФ ФИЦ ЕГС РАН) в районе Северной группы вулканов и очаги разрядов, зарегистрированные сетью WWLLN

На полуострове Камчатка, Северная группа вулканов является уникальным объектом для изучения электризации эруптивных облаков (рисунок 2б). Частые эксплозивные извержения андезитовых вулканов Шивелуч и Безымянный создают благоприятные условия для слежения за грозовой активностью, сопровождающей формирования и распространения эруптивных облаков. Вблизи этих вулканов работают пункты наблюдений за вулканической активностью (ПНВА) Камчатского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (КФ ФИЦ ЕГС РАН). На ПНВА «Ключи» (КЛЧ,  $R_{швл} = 45$  км) и «Семкорок» (SMK,  $R_{швл} = 7$  км) работают сейсмические станции, кроме того, в КЛЧ установлен микробарограф, что позволяет определять точное время эксплозий, и дает представление о развитии эруптивного процесса.

В настоящее время для наблюдений за грозами широко используется мировая сеть WWLLN (World Wide Lightning Location Network), позволяющая регистрировать (ЭМИ) от грозовых разрядов на всей планете. Так как пункты сети WWLLN находятся на большом удалении от полуострова Камчатки, и регистрирует лишь мощные грозовые разряды, то она фиксирует ~10% грозовых разрядов, принятых из того же района пеленгатором электромагнитных сигналов в диапазоне очень низких частот (ОНЧ).

Пеленгатор изготовлен в Институте космофизических исследований и распространения радиоволн (ИКИР ДВО РАН) и установлен на обсерватории «Паратунка». С помощью ОНЧ-пеленгатора регистрируются электромагнитные импульсы в диапазоне 0,5–60 кГц, превышающие пороговый уровень 1 В/м, что позволяет регистрировать электромагнитные излучения от региональных гроз и лоцировать азимут их прихода [4].

Основными узлами ОНЧ-пеленгатора являются: антенная система, блок аналоговой и блок цифровой обработки сигнала. Антенная система состоит из двух взаимно-перпендикулярных, идентичных рамочных магнитных антенн и одной штыревой электрической антенны (ЭА). Магнитные антенны расположены вертикально и ориентированы

плоскостью по сторонам света и имеют эффективную площадь  $S_{эфф} = 3200 \text{ м}^2$ . Действующая высота ЭА составляет  $h_E = 4,5 \text{ м}$ .

Таблица 1

**Характеристика эруптивной и молниевой активности explosивных извержений вулкана Шивелуч в 2017 г.**

№	Дата	Характеристика эксплозии					Характеристики зарегистрированного ЭМИ					
		$t_0$	$H$	$A_{max}$	$\Delta t$	$\Delta P$	$\Delta t_1$	$C_{max}$	$N_1$	$\Delta t_2$	$C_{max}$	$N_2$
1	11.05.	18:24:19	10	19,7	660	37,9/3,5	4	13	36	28	12	144
2	16.05.	07:05:52	10	9,3	540	1,2/0,02	2	4	6	11	2	16
3	14.06.	16:26:44	12	14,2	480	22,9/2,7	3	20	41	10	7	42
4	18.06	16:26:57	11	18,5	744	0,8/0,01	4	9	15	38	15	207
5	23.07	17:23:43	8	4,2	3700	-/0,7	3	3	6	36	14	158

Примечание.  $H$  - высота эруптивного облака по спутниковым снимкам, км;  $A_{max}$  - максимальная амплитуда смещения грунта в ПНВА KLY, мкм/с;  $\Delta t$  - длительность сейсмической записи в ПНВА SMK, с;  $\Delta P$  - амплитуда избыточного давления в фазе сжатия в ПНВА KLY IS44, Па;  $\Delta t_1$ ,  $\Delta t_2$  - длительность первой и второй фазы вулканической грозы, мин;  $C_{max}$  - максимальная скорость счета, имп/мин;  $N_1$ ,  $N_2$  - общее количество молний, зарегистрированное в первой и второй фазе вулканической грозы.

Были рассмотрены 5 наиболее сильных эксплозий вулкана Шивелуч в 2017 г. (<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>). Explosивные извержения сопровождаются акустическим и сейсмическим излучениями. Рассматривались следующие параметры: максимальная амплитуда скорости колебания грунта explosивного землетрясения (KLY) и его продолжительность (SMK); амплитуда избыточного давления в воздушной волне по двум станциям KLY и IS44. По данным ОНЧ - пеленгатора формирование эруптивных облаков сопровождалось ЭМИ с азимута на вулкан Шивелуч  $25,6^\circ \pm 10^\circ$ . На рисунке 2. показана динамика скорость счета ЭМИ для этих случаев.

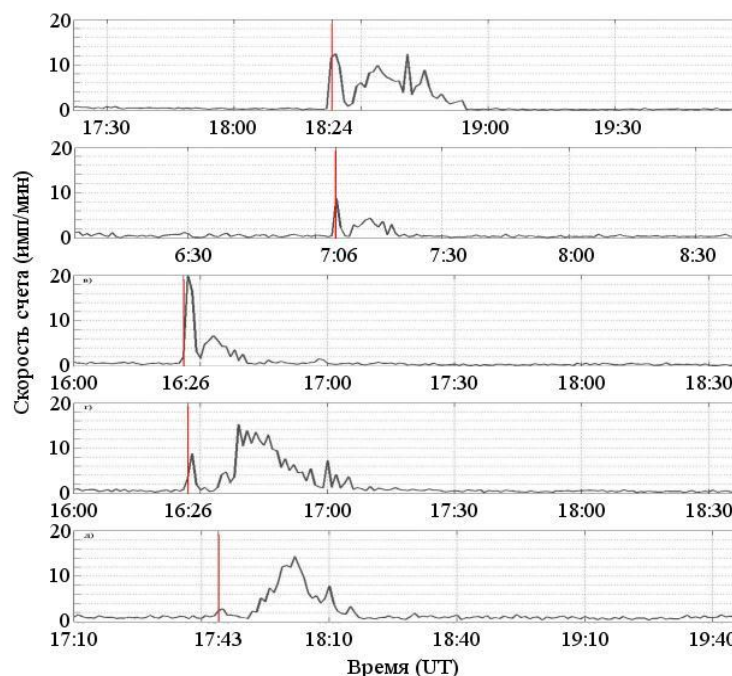


Рисунок 2. Скорость счета ЭМИ в минутных интервалах с азимута на вулкан Шивелуч ( $25,6^\circ \pm 10^\circ$ ). Номера панелей согласно таблице 1

Для всех 5 случаев характерна двух стадийность вулканических гроз (ВГ), которая была обнаружена при извержениях вулканов св. Августина и Редаут на Аляске [5, 6]. Обе стадии четко выражены и разделены фоновым значением скорости счета длительностью 1–3 минуты. Интервал первой стадии ВГ длительностью 2–5 минуты связан с началом эксплозии и

формированием термика за счет выброса горячей пепло-газовой смеси в атмосферу. Вторая стадия связана с формированием эруптивного облака в точке его зависания (высота тропопаузы). Продолжительность ВГ, по-видимому, зависит от количества изверженного материала, на что указывает корреляция скорости счета с  $A_{\max}$ .

Глобальная сеть WWLLN не регистрирует большинство разрядов происходящих в эруптивном облаке, что связано со структурой ЭМИ вулканической молнии. Однако при дрейфе эруптивного облака могут возникать и классические молнии. При извержении 18.06.2017 сеть WWLLN зарегистрировала 4 молниевых разряда, которые возникли на фронте эруптивного облака (рисунок 1б).

Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 19–05–00543.

### Литература

1. *Bennett A.J., Odams P., Edwards D., Arason P.* Monitoring of lightning from the April–May 2010 Yjafjallajökull volcanic eruption using a very low frequency lightning location network // *Environ. Res. Lett.* 2010. V.5, 044013. P.1–8. doi:10.1088/1748-9326/5/4/044013.
2. *Firstov, P.P., Akbashev, R.R., Holzworth, R., Cherneva, N.V., Shevtsov, B.M.*, 2017: Atmospheric electric effects during the explosion of Shiveluch volcano on November 16, 2014 // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, v. 53, N 1. P. 24–31, doi:10.1134/S0001433817010066.
3. *McNutt S.R., Williams E.R.* Volcanic lightning: global observations and constraints on source mechanisms // *Bull Volcanol.* 2010. V. 72, N 10. P. 1153–1167. DOI 10.1007/s00445-010-0393-4
4. *Дружин Г.И., Чернева Н.В., Мельников А.Н.* Гроза в районе полуострова Камчатка по данным наблюдений за ОНЧ-излучением // *Метеорология и гидрология.* 2011 № 7. С. 32–39.
5. *Thomas R.J., McNutt S.R., Paul R., Krehbiel P.R., et al.* Lightning and electrical activity during the 2006 eruption of Augustine volcano // *The 2006 eruption of Augustine volcano, Alaska.* Ch 25. 2010. Power J.A., Coombs M.L., Freymueller J.T., editors. U.S. Geological survey professional paper 1769.
6. *Behnke S.A., Thomas R.J., McNutt S.R., et al.* Observations of volcanic lightning during the 2009 eruption of Redoubt Volcano // *J.V.G.R.* 2012. N259. P. 214–234.

## РОЛЬ ЛЬДА В ЭЛЕКТРИЗАЦИИ ОБЛАКОВ

*Ю.П. Михайловский<sup>1</sup>, Л.В. Кашлева<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>ГГО им. А.И. Воейкова, г. Санкт-Петербург

<sup>2</sup>РГГМУ, г. Санкт-Петербург

yupalych@yandex.ru, kashleval@yandex.ru

Исследования механизмов электризации конвективных облаков имеют достаточно длительную историю и обширную географию [1, 2, 3, 6, 7]. Однако, существенного улучшения понимания вопроса за последние десятилетия, по-видимому, не достигнуто. Не дало ожидаемого результата, на наш взгляд, и использование современных нестационарных численных моделей. Физика процессов осадкообразования и электризации на микроуровне остается во многом загадкой, процессом с множеством неопределенных параметров, вариации которых могут привести к различным результатам.

Основой исследований являются достоверные экспериментальные данные, представленные в виде эмпирической модели различной степени детализации. В работе обобщены данные лабораторных и полевых исследований электризации облаков, выполненных как ранее, так и в последнее время.

При анализе результатов удалось выделить общие закономерности развития электризации конвективных облаков. Эти закономерности следующие:

- процесс электризации облака начинается, т.е.  $E$  над облаком увеличивается до сотен В/м и более, только тогда, когда в облаке появляются условия для роста крупных ледяных частиц (верхняя граница конвективного облака находится выше изотермы  $-8^\circ$ , в вершине облака начался процесс кристаллизации, максимальная величина отражаемости под облаком (ниже уровня конденсации) ( $Z_{oc}$ ) по самолетному радиолокатору превышает 0 дБZ, толщина переохлажденной части облака ( $dN_{T<0}$ ) превышает 1,6 км [3];
- электризация облака наблюдается обязательно, если в вершине облака идет интенсивный процесс кристаллизации (образования крупных ледяных частиц) (облако выше

изотермы  $-22^{\circ}\text{C}$ , отражаемость осадков выше 40 дБZ, толщина переохлажденной части более 2,6 км, визуальное состояние вершины свидетельствует об интенсивной кристаллизации вершины [3]. Для каждого параметра можно определить интервалы, при которых электризация в облаке отсутствует ( $E=0$ ), может быть, а может и не быть ( $E=0v1$ ), присутствует обязательно ( $E=1$ ).

Уравнение множественной шаговой регрессии с выбором существенных факторов для зависимой переменной  $E$  ( $0v1$ ) и 7 независимых выглядит:

$$E = 0.17 \Delta H_{T \leq 0} + 0.004 Z_{обл} + 0.004 Z_{ос} + 0.02 D + 0.08 \Delta H + 0.08 H_{вг} + 0.001 T_{вг} - 0.32$$

По результатам самолетных экспериментов с синхронным измерением радиолокационных характеристик и напряженности электрического поля ( $E$ ) облаков установлено, что интегральные радиолокационные параметры, характеризующие количество крупных ледяных частиц в облаке (объем переохлажденной части облака), определяют  $E$  над облаком [3].

$$E_{max} = 0.00072 S_{Z35}^{-} (кв \cdot м) - 500$$

Используя этот подход, в экспериментах с использованием МРЛ-5 и LS8000 были определены статистические связи частоты разрядов в VHF и LF диапазоне с объемом переохлажденной части облака с отражаемостью более 35 дБZ ( $dV_{35}$ ,  $км^3$ ) за весь цикл жизни облака [4, 5].

$$r = 0,88 \text{ , } p = 0,00 \text{ ; } F_{LF} = -0,04 + 0,03dV_{35} \text{ ;}$$

$$r = 0,77 \text{ , } p = 0,00 \text{ ; } F_{VHF} = 9,7 + 0,58dV_{35} \text{ .}$$

Еще более тесные связи наблюдаются, если рассматривать только стадии развития и зрелости облака, без стадии диссипации. Высокие коэффициенты корреляции наблюдаются и для одноячейковых, и многоячейковых облаков, для облаков Северного Кавказа и Северо-Западного региона России. Таким образом, мы наблюдаем устойчивые корреляционные связи мощности электрического генератора, характеризуемой частотами молний, и радиолокационных параметров, определяемых количеством крупных ледяных частиц в облаке ( $dV_{35}$ ,  $км^3$ ) [3, 4, 5].

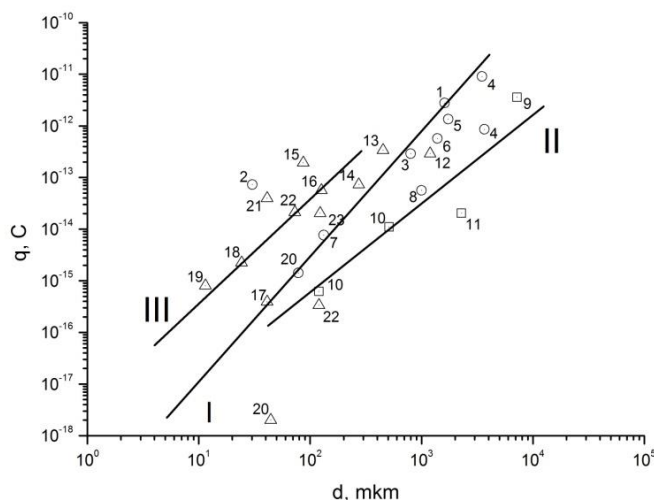


Рисунок 1. Заряды, приобретаемые градиной в результате столкновения с ней облачных кристалликов и капель, по экспериментальным работам разных авторов:

I (○) – взрыв кристаллизующихся капель (спонтанно или при ударе о ледяную поверхность), II (□) – разрывание ледяных капель на градине, III(Δ) – столкновение и отскок ледяных частиц

Большинство исследователей поддерживает гипотезу о решающей роли льда в электризации конвективных облаков [1, 2, 3, 6, 7]. Однако при дальнейшей детализации механизмов обнаруживаются существенные различия и особенности, демонстрирующие отсутствие единого понимания процессов. В работе [3] представлен обобщающий график

разделяющихся зарядов при различных контактных взаимодействиях частиц. Наибольшие заряды разделяются при взрывах кристаллизующихся капель (I). При оценке роли каждого механизма, помимо их эффективности, необходимо оценивать вероятностные пространственно-временные характеристики этих процессов.

Работа подготовлена при финансовой поддержке РФФИ, гранты № 17-05-00965\_а, БРИКС\_т 18-55-80020.

### Литература

1. *Веремей Н.Е., Довгалюк Ю.А., Морозов В.Н.* О параметризации микрофизических процессов в численных моделях грозовых облаков. Метеорология и гидрология. 2006. N 11. С.5 – 18.
2. *Кашлева Л.В., Михайловский Ю.П., Михайловский В.Ю.* Механизмы электризации облачных гидрометеоров в грозовых облаках. Ученые записки РГГМУ. 2016. № 45. С. 119 – 131.
3. *Михайловский Ю.П.* О верификации численных моделей конвективных облаков на основе результатов самолетных исследований электризации. Труды ГГО, 2016. Вып. 580. С.125 – 138.
4. *Михайловский Ю.П., А. А. Синькевич, С. Д. Павар, В. Гопалакришнан, Ю. А. Довгалюк, Н. Е. Веремей, Е. В. Богданов, А. Б. Куров, А. Х. Аджиев, А. М. Малкарова, А. М. Абшаев.* Исследования развития грозо-градового облака. Часть 2. Анализ методов прогноза и диагноза электрического состояния облаков. Метеорология и гидрология. 2017. № 6. С. 31 – 45.
5. *А. М. Абшаев, М. Т. Абшаев, А.Х. Аджиев, Я. А. Садыхов, А. Б. Чочаев, А. А. Синькевич, Ю. П. Михайловский.* Анализ развития и взаимодействия ячеек в грозоградовых облаках. Тр. ГГО. 2017. Вып. 586. С. 93 – 116.
6. *Jayarathne I Rohan, Clive Saunders.* Wet Hail and Thunderstorm Electrification . XV International Conference on Atmospheric Electricity, 15 – 20 June 2014, Norman, Oklahoma, U.S.A.
7. *Saunders C.* Charge Separation Mechanisms in Clouds. Space Sci Rev. 2008. v. 137. P. 335 – 353.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ГРОЗОГРАДОВОГО ОБЛАКА ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

*А.А.Синькевич, Ю.П. Михайловский, В.Б.Попов*

ГГО им. А.И. Воейкова, г. Санкт-Петербург  
sinkevich51@mail.ru

В Санкт-Петербурге 22 июля 2017 года прошел крупный град. В результате образовался его мощный слой толщиной 5 см, диаметр градин достигал 2 см. Наибольшая интенсивность града отмечалась в Московском и Адмиралтейском районах города. После того, как он растаял, некоторые районы города подтопило. Выпадение града сопровождалось интенсивной грозовой деятельностью.

Для изучения процесса формирования грозо-градового кучево-дождевого облака использовались данные измерений следующих приборов и систем: поляризационного радиолокатора ДМРЛ-С; радиометра SEVIRI, установленного на спутник Метеосат; грозопеленгационных систем (ГПС) «Blitzortung» и «Алвес».

Анализ состояния атмосферы показал, что величина энергии неустойчивости равнялась 1348 Дж/кг, указывая на то, что в анализируемый день могли развиваться мощные конвективные облака. Уровень конвекции был равен 9,0 км ( $-47,4^{\circ}\text{C}$ ), далее начинался задерживающий слой, связанный с тропопаузой. Высота нулевой изотермы была равна 2,2 км, это способствовало выпадению твердых осадков, которые не успевали растаять.

Исследуемое облако существовало 230 минут. На 30 минуте наблюдений исследуемое мощное кучевое облако трансформировалось в кучево-дождевое. На 80 минуте развития облако стало грозовым. В этот момент времени его верхняя граница по измерениям со спутника находилась на высоте 8,1 км. Температура на верхней границе составляла  $-42,1^{\circ}\text{C}$ . Анализ поляризационных радиолокационных характеристик показал, что осадки из облака носят ливневой характер, в них присутствуют крупные капли и обводненные градины. По данным радиометрических измерений в верхней части облака были зарегистрированы кристаллы, присутствовала жидкая фракция.

Появление электрических разрядов произошло значительно позже, чем можно было ожидать согласно современным представлениям о формировании грозы. Уже на 30 минуте развития были зарегистрированы частицы града, которые далее фиксировались на каждом скане радиолокатора. Отметим, что в период 30–70 минута максимальная интенсивность осадков не превосходила 30 мм/час, она увеличилась скачком на 80 минуте, составляя здесь 77 мм/час по радиолокационным измерениям.

Максимальная частота электрических разрядов была зарегистрирована на 190 минуте развития. Она составила соответственно  $7,9 \text{ мин}^{-1}$  и  $21,3 \text{ мин}^{-1}$  по данным грозопеленгационных систем «Blitzortung» и «Алвес». В это время исследуемое облако представляло собой мультячейковое Сb с тремя выраженными зонами высокой отражаемости. В двух из них отражаемость превышала 50 дБZ. Здесь необходимо отметить, что максимальная частота молний фиксируется на зрелой стадии развития облака при переходе к стадии разрушения. Максимальное значение радиолокационной отражаемости за весь рассматриваемый период, равное 61,5 дБZ, было отмечено на 30 мин раньше, здесь произошло существенное его уменьшение до 57 дБZ. Продолжались ливневые осадки, интенсивность которых составляла 82 мм/час по радиолокационным данным и 43,9 мм/час по данным измерений со спутника. Интенсивность осадков начала снижаться, присутствовала жидкая и ледяная фазы в облаке, градовые частицы, продолжалось увеличение размеров наковальни. Температура на верхней границе облака была равна  $-47,0^\circ\text{C}$ .

Анализ корреляционных связей частоты молний с радиолокационными характеристиками показал, что наибольшие коэффициенты корреляции имеют место с объемом переохлажденной части облака и потоком осадков. Был выполнен расчет кросскорреляционной функции между объемом переохлажденной части облака с отражаемостью более 35 дБZ и частотами молний, зарегистрированных грозопеленгационными системами. Установлено, что максимальное значение коэффициента корреляции наблюдается при временном сдвиге между исследуемыми кривыми в 20 минут. Максимальной частоте молний предшествует максимальный объем переохлажденной части облака с большими значениями отражаемости, а также максимальное значение потока осадков. Максимальное значение коэффициента корреляции (более 0,84) отмечено для кросскорреляционной функции между частотой молний и объемом переохлажденной части облака с отражаемостью более 55 дБZ. Столь высокая отражаемость в облаках связана с наличием градовых частиц, отсюда следует вывод о том, что они вносят существенный вклад в электризацию облака.

При анализе развития облака выявлены существенные расхождения в определении высоты верхней границы облака по радиолокационным измерениям и радиометрическим измерениям. Верхняя граница по радиолокационным данным существенно превосходит, рассчитанную по результатам радиометрических измерений со спутника Метеосат. На 220 минуте высота верхней границы облака, полученная из результатов радиолокационных измерений, превышает на 4,5 км соответствующую величину, определенную из данных аэрологического зондирования и на 4,6 км из радиометрических измерений. Учитывая, что максимальная отражаемость от облака в это время была достаточно велика (58,5 дБZ), можно предположить, что значение высоты верхней границы облака по результатам радиолокационного зондирования завышено вследствие влияния боковых лепестков диаграммы направленности антенны.

Работа подготовлена при финансовой поддержке РФФИ, гранты № 17-05-00965\_а, БРИКС\_т 18-55-80020.

## **РАКЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРОЗОВЫХ ОБЛАКОВ**

*Х.Х. Машуков, Р.Х. Зекореев, М.М. Камбиев*

Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик  
hazret53@rambler.ru

Наибольший интерес при проведении экспериментальных исследований электрических характеристик грозовых облаков представляют прямые ракетные измерения внутри облака при их вертикальном зондировании. Для вертикального зондирования грозовых облаков нами использовалась разработанная в Высокогорном геофизическом институте ракетная



радиотелеметрическая система (РТС) включающая в себя ракетный зонд, приемный наземный комплекс и аппаратуру наблюдения и выбора цели [1].

Ракетный зонд представляет собой модернизированную противораковую ракету «Облако», в головной части которой установлена научно-исследовательская аппаратура, предназначенная для измерения и передачи по радиоканалу информации о напряженности электрического поля внутри облака и других электрических параметров, а также активный ответчик для сопровождения зонда и регистрации траектории полета с помощью РЛС 1Б18 «Шквал». При создании ракетного зонда уделено большое внимание обоснованию достоверности измерений.

Ракетный зонд состоит из: датчиков электрических параметров; устройства преобразования информации; передатчика СВЧ; блока питания бортовой аппаратуры.

Для измерения трех ортогональных компонент напряженности электрического поля применяется цилиндрический электростатический флюксметр ротационного типа. Для определения напряженности поля, параллельного оси ракеты, она измеряется в двух точках, разнесенных вдоль длины ракеты, что позволяет учесть поле заряда ракеты. При измерении перпендикулярных к оси ракеты компонент напряженности электрического поля облака флюксметр не чувствителен к заряду ракеты.

Для измерения плотности тока статической электризации, генерируемого бомбардирующим ракету облачным аэрозолем, используется датчик, представляющий собой проводящую измерительную пластину, размещенную в верхней части ракетного зонда. Для измерения электрических зарядов гидрометеоров в качестве датчиков используются индукционные кольца.

Устройство преобразования информации обеспечивает усиление и преобразование сигналов, полученных от датчиков электрических параметров, а также осуществляет кодирование информации для передачи ее по радиоканалу на наземную приемную станцию, в качестве передатчика телеметрической информации используется модернизированный радиозонд 1Б25-2. Подробное описание ракетного зонда и его метрологические характеристики приведены в работе [2].

Приемный наземный комплекс ракетной радиотелеметрической системы [3] обеспечивает прием, дешифровку и регистрацию информации, поступающей по радиоканалу с ракетного зонда, параллельно по девяти каналам, а также сопровождение зонда в радиусе 150 км с одновременной регистрацией текущих координат.

Приемный наземный комплекс включает в себя: радиолокационную станцию 1Б18 «Шквал»; устройство приема и преобразования информации (УППИ-9к); устройство регистрации; устройство записи и воспроизведения информации.

Модернизированная радиолокационная станция 1Б18 «Шквал» обеспечивает прием СВЧ-сигнала и выделение видеоимпульсов телеметрической информации, а также автосопровождение по координатам исследовательской ракеты «Облако-М». Текущие координаты радиозонда регистрируются устройством радиолокатора 1Б18 «Шквал». Скорость регистрации задается с пульта автоматического вычислительного устройства радиолокатора.

Устройство приема и преобразования информации состоит из: входного устройства; селектора импульсов; дешифратора; коммутатора; аналогового запоминающего устройства; регистрирующего устройства; видеоконтрольного устройства. Во входном устройстве осуществляется согласование уровней сигналов РЛС 1Б18 и УППИ-9к.

В селекторе импульсов входная последовательность телеметрической информации разделяется на каналные и кадровые синхроимпульсы, которые управляют работой коммутаторов каналов и одновременно контролируются видеоконтрольным устройством.

В дешифраторе и аналоговом запоминающем устройстве происходит преобразование интервалов времени между каналными импульсами в амплитуду и полярность выходных напряжений.

Аналоговые напряжения с выхода запоминающего устройства параллельно по девяти каналам подаются на регистрирующее устройство. В процессе приема информации с радиозонда видеоимпульсы телеметрической информации записываются на хранилище информации,

Модернизированная метеорологическая радиолокационная станция «Гроза-26» используется для обнаружения кучево-дождевого облака, измерения его радиолокационных

характеристик и выбора зоны облака, подлежащей зондированию. Основные характеристики ракетной радиотелеметрической системы приводятся в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики ракетной радиотелеметрической системы (РТС)

Измеряемые параметры	Диапазон измерений	Погрешность измерений, %	Высота зондирования
$E_z$ , В/м	$10^2 - 10^6$	17	До 8 км
$E_r$ , В/м	$10^2 - 10^4$	10,5	
Q, Кл	$10^{-7} - 10^{-5}$	17	
$j_k$ , А/м <sup>2</sup>	$10^{-7} - 10^{-5}$	11	
q, Кл	$10^{-13} - 10^{-9}$	10	

Примечание:

$E_z$ , В/м – вертикальная составляющая напряженности электрического поля;

$E_r$ , В/м – горизонтальная составляющая напряженности электрического поля;

Q, Кл – заряд на ракетном зонде;

$j_k$ , А/м<sup>2</sup> – плотность тока статической электризации;

q, Кл – заряд гидрометеоров.

Анализ результатов ракетного зондирования показал, что профили напряженности электрического поля в грозовых облаках отличаются разнообразием в зависимости от метеорологических условий района возникновения облака, взаимного расположения системы основных зарядов облака и траектории зондирования облака. Ракетные зондирования позволили уточнить величины напряженности электрического поля, характерные для активной зоны грозовых облаков, они оказались равными  $(1-2) \cdot 10^5$  В/м. Зоны с такой напряженностью могут иметь вертикальную протяженность 1 км и более. По результатам измерения вертикальной составляющей напряженности электрического поля в грозовых облаках можно оценить пространственную структуру и величины основных объемных зарядов в облаках.

### Литература

1. Машуков Х.М., Машуков Х.Х., Юрицын П.А. Радиотелеметрическая система для исследования метеорологических явлений. Труды II Всесоюзного симпозиума по атмосферному электричеству. Ленинград. 1984. С. 133–135.
2. Машуков Х.М. К вопросу о ракетных измерениях напряженности электрического поля в грозовых и градовых облаках. Труды ВГИ, 1976. Вып. 35. С. 38–50.
3. Зекореев Р.Х., Машуков Х.Х. Ракетный радиотелеметрический комплекс для исследований контроля эффективности активных воздействий на электрическое состояние грозоградовых облаков. – Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. Физика атмосферы. Спецвыпуск, г. Ростов. 2010.

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ БАЗЫ ДАННЫХ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ЭМПИРИЧЕСКОЙ (ФИЗИКО-СТАТИСТИЧЕСКОЙ) МОДЕЛИ ГРОЗОГРАДОВЫХ ОБЛАКОВ

В.С. Инюхин<sup>1</sup>, И.Н. Березинский<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик  
inuhin51@mail.ru

Информационные системы могут принести огромную пользу для исследователя за счет автоматизации задач, которые раньше решались вручную. Применение базы данных (БД) обеспечивает существенное повышение эффективности обработки большого количества данных [1–5]. Результаты комплексных исследований грозоградовых облаков на НИП ВГИ в весенне-летний период ежегодно пополняют соответствующие таблицы метеорологической БД [6]. Ниже представлена общая схема организации хранения информации о грозоградовых процессах (рисунок 1). Каждый прямоугольник на схеме представляет отдельную таблицу. Реляционные связи обозначены линиями со стрелкой.

В БД поступает информация о грозовых разрядах с грозопеленгатора LS8000, сенсоры которого расположены в четырех точках Северного Кавказа (Черкесск, Кызбурун, Ставрополь и Зеленокумск).



Рисунок 1. Схема организации хранения разнородной информации о грозоградовых процессах

В качестве грозопеленгационных данных используется информация о грозовых разрядах, полученная с помощью низкочастотных и высокочастотных сенсоров. В этом случае можно говорить о двух источниках данных, представленных таблицами *ls8000lf* и *ls8000vhf*. Все типы хранимой информации по наличию привязки измерительной аппаратуры к географической точке можно разделить на две группы.

Для модели хранения грозопеленгационных данных системы LS8000, снимков ИСЗ и прогнозов погоды, передаваемых по противоградовым службам, географическая привязка не используется.

Каждая запись в таблице с информацией имеет поле с указанием времени, позволяющим связывать разнородные записи друг с другом. Для корректной установки связи используется либо стандарт UTC (всемирное координированное время), либо время указывается с учетом временной зоны. Каждая запись грозопеленгационных данных представляет информацию о разряде молнии, полученную с помощью низкочастотных (таблица *ls8000lf*) или высокочастотных сенсоров (таблица *ls8000vhf*), данные ИСЗ – ссылка на фотоснимок (таблица *satellites*), а прогноз погоды, помимо собственно прогноза, включает также некоторые измерения радиозонда (таблица *forecast*).

При наличии географической привязки схема доступа к данным несколько усложняется. Для учета координат радиолокационных и метеорологических станций формируется таблица *stations*, включающая название и идентификатор объекта.

Вся основная информация хранится в таблицах метеопараметров для сетевых синоптических метеостанций (*synopraw*, *synopdaily*, *metar*) и гидропостов (*hydropost*), автоматических метеостанций DavisVantagePro (*wlkarc*, *wlksun*) и MAWSVaisala (*maws10*, *maws1h*, *maws24h*) или в виде ссылок (*mrldata*) на файлы радиообзоров (доступ к которым возможен либо по *ftp*-серверу, либо по *http* с помощью GET и POST запросов).

Вторичная обработка радиолокационных данных заключается в переработке и визуализации поступающей информации. При этом параллельно в автоматическом режиме решается ряд задач по пространственному отображению той или иной характеристики облаков.

Для поиска в базе данных градовых процессов различных типов необходимо сформировать запросы к базе метеорологических и синоптических данных для выбора дней с градом и выбора из них дней, удовлетворяющих критериям развития градовых процессов искомого типа.

Последовательность выполнения действий следующая [5]: Производится выбор дней с градом из БД метеорологических данных по некоторым критериям, определяющим условия формирования данного типа процессов. Это, например, скорость восходящих потоков более 10

м/с; температура воздуха днем более 25°C; относительная влажность воздуха более 45%. Далее осуществляется выбор дней, соответствующих критериям одноячейковых процессов: дни с внутримассовым развитием; скорость ведущего потока менее 30 км/ч; сдвиг ветра в слое 1–4 км менее  $10^{-4}$  с<sup>-1</sup>. Значения радиолокационных параметров: скорость перемещения ячейки менее 20 км/ч; время жизни ячейки менее 40 мин. Радиолокационная структура ячейки удовлетворяет условиям: имеется один локальный максимум отражаемости.

Выводы:

1. Хранение разнородной информации, собираемой в результате комплексных исследований грозоградовых облаков, производится в отдельных таблицах, объединенных в единую базу данных *weatherdata*.

2. Для каждой таблицы разработаны правила ее заполнения в автоматическом, полуавтоматическом или ручном режимах.

3. Для дальнейшего практического использования полученной информации удаленный пользователь может подключаться своей локальной БДMS Access к СУБД PostgreSQL, расположенной на сервере.

4. Для выявления закономерностей, связывающих различные параметры, собранные в БД, разрабатываются соответствующие запросы к базе данных.

5. Рассмотрена методика поиска в базе данных градовых процессов различных типов.

### Литература

1. Аксенов С.А., Инюхин В.С. Пространственное сопоставление радиолокационной и другой информации. // Материалы VII конференции молодых ученых КБНЦ РАН. Нальчик - Президиум КБНЦ. 2006. С. 12–16.

2. Инюхин В.С. База радиолокационных данных. Труды ВГИ. Вып. 99. С. 52–59

3. Инюхин В.С. Принципы построения базы радиолокационных данных. Тезисы докладов на Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы Нальчик, 2001.

4. Базлова Т.А., Бочарников Н.В., Брылев Г.Б. и др. Метеорологические автоматизированные радиолокационные сети. СПб.: Гидрометеиздат, 2002. 332 С.

5. Исследования макро- и микроструктурных характеристик градовых облаков на основе радиолокационных, спутниковых, грозопеленгационных, наземных и аэросиноптических данных [Текст]: отчет о НИР (промежуточ.): 1.6.4.2/ Федеральное государственное бюджетное учреждение Высогогорный геофизический институт; руководитель Инюхин В.С.; исполнители: Лиев К.Б. [и др.] Нальчик, 2015. 169 с –№ ГРАААА-Б16-216021620149-8; Инв. № 01201459542.

6. Березинский И.Н., Инюхин В.С., Куцев С.А. и др. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2017620749 «Радиолокационные характеристики градовых облаков». В реестре баз данных 10 июля 2017 г.

## ПАРАМЕТРЫ МОЛНИЕВЫХ РАЗРЯДОВ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ ЮГА ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ

А.Х. Аджиев, Д.Д. Кулиев

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик  
adessa1@yandex.ru

Приведены результаты инструментальных исследований грозовой деятельности и измерений параметров молниевых разрядов на территории юга европейской части Российской Федерации. Общее количество грозовых дней в году на рассматриваемой территории составляет около 239. Удельная поражаемость молниями поверхности земли в год на исследуемой территории составляет на юге 6 разрядов/км<sup>2</sup>·год, на севере 2 разряда/км<sup>2</sup>·год. Доля наземных разрядов молний (положительных и отрицательных) на данной территории составляет 12% от общего их количества молний, а облачных и межоблачных 88%. Согласно этим данным, на долю положительных разрядов приходится около 23% от общего количества разрядов «облако–земля». Среднее значение токов в отрицательных молниях составляет 13,5 кА, в положительных – 10,6 кА.

Рассмотрены параметры молниевых разрядов отдельно над горной местностью (высота более 1000 м.) и над равнинной местностью (высота менее 1000 м.). Получено, что среднее значение амплитуды тока молниевых разрядов над равнинной территорией Северного Кавказа составляет, без разделения по полярности молниевых разрядов, около 9,29 кА, в горной зоне 11,24 кА, а медианное значение амплитуды тока на равнинной территории составляет около 6,56 кА, в горной части 7,99 кА.

Грозы относятся к числу наиболее опасных явлений погоды. Как правило, очень часто грозы сопровождаются сильным шквалистым ветром, ливневыми осадками и градом. Как показали отечественные и зарубежные исследования [1–4], грозы также рассматриваются как основной генератор энергии в глобальной атмосферной электрической цепи. Оперативное определение местоположения гроз, их интенсивности, направления и скорости перемещения, а также среднестатистических параметров молний имеет большое практическое значение для многих отраслей хозяйственной деятельности человека, в частности, для метеообеспечения авиации, молниезащиты энергетических объектов [5, 6].

До сих пор основным источником информации о грозах в России являются визуально-слуховые наблюдения, которые проводятся на метеорологических станциях, входящих в состав служб штормового оповещения [7]. Сам метод наблюдения не дает возможности корректно оценить местоположение разрядов молнии, ее геометрические размеры грозовых явлений, направление и, главное, скорость ее перемещения. Радиус сбора информации о грозах на таких станциях составляет от 10 до 20 км, в зависимости от их местоположения и интенсивности грозовых процессов. Обобщенные результаты таких многолетних наблюдений позволяют получить количественные климатические характеристики гроз [8–10].

Учитывая недостаточность этих сведений и растущие запросы молниезависимых технологий, авиации, микропроцессорных систем, связи и др., предпринимаются попытки формирования климатических характеристик гроз на основе инструментальных наблюдений [11–13]. В настоящее время за рубежом произошел переход от визуально-слуховых наблюдений за грозами к инструментальному мониторингу.

Основные требования к оперативной информации о грозовых явлениях – это быстрота и оперативность получения данных, а также их полнота и адекватность.

Реализованы различные технические средства и методы получения информации о грозах [14–17].

Можно выделить две основные тенденции в разработке пассивных средств обнаружения и локации гроз, используемые как в научных целях, так и для многочисленных приложений. Одна из них связана с необходимостью решения синоптических задач мезомасштабного и даже глобального характера, например, повышением надежности обнаружения, трассирования, оценки текущего состояния и прогнозирования развития таких опасных явлений как смерчи, торнадо, ураганы, а также определением грозовой активности в областях, где затруднено или невозможно развертывание обычных инструментальных средств (в океанических районах, возвышенных и горных массивах). Эта тенденция реализуется интегрированием многочисленных локальных и региональных систем в единые комплексы с расширенной зоной оперативного обслуживания. Примером может служить североамериканская сеть NLDN [18], включающая более 100 пунктов регистрации на территории США и Канады (в настоящее время эксплуатируется фирмой Vaisala) и использующая в качестве подсистем практически все упомянутые в настоящей публикации системы местоопределения (разностно-дальномерные системы местоопределения молний – LPATS, LDAR; пеленгационную систему местоопределения молний – LLP & IMPACT, SAFIR). Наличие большого числа пунктов регистрации позволяет выбирать в зависимости от текущего развития грозовой активности оптимальную конфигурацию пунктов регистрации (датчиков), обеспечивающую определение координат молний с точностью не хуже 1 км на всей обслуживаемой территории. Такие системы работают в Финляндии, Японии, Китае и др. странах [19].

В последние годы в Росгидромете получили развитие инструментальные методы обнаружения гроз [20, 21]. Разработаны и внедряются в практику отечественные грозопеленгационные системы (ГПС) «ALWES 9.07» [20], установлены 3 комплекта (по 4 датчика) ГПС LS8000 производства компании «Vaisala» в Северо-Кавказском и Московском регионах [21]. Одноканальная ГПС «ALWES 9.07» (СДВ диапазона радиоволн) и двухканальная ГПС LS8000 (СДВ и УКВ диапазонов) предназначены для обнаружения

грозовых разрядов различных типов: «Облако-Земля» (молниевые разряды между облаком и землей) и «Облако-Облако» (молниевые разряды между разными облаками и внутри облаков).

Опыт эксплуатации ГПС 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 внутри облака в единицу времени и др.

Предложена методология оповещения о грозовой опасности, основанная на измерениях напряженности электрического поля атмосферы и данных о молниевой активности. По регистрациям у поверхности земли градиента потенциала электрического поля атмосферы можно судить о подготовленности условий в облаке для развития разрядов молний. В частности, если фиксируемые градиенты не превышают абсолютных значений от  $-0,2$  до  $+0,2$  кВ/м., то в облаке молнии не фиксируются. При значениях градиента от  $-0,2$  кВ/м. и менее и при  $+0,2$  кВ/м. и более следует ожидать облачные молниевые разряды, при их значениях от  $-2$  кВ/м. и менее и при  $+2$  кВ/м. и более – наземные молнии.

Грозопеленгационная сеть LS8000, установленная на Северном Кавказе в 2008 году состоит из восьми грозопеленгаторов и центрального пункта приема и обработки информации (рисунок 1). Каждый грозопеленгатор имеет по два датчика – низкочастотный (LF) и высокочастотный (VHF). Низкочастотный датчик фиксирует, в основном, молниевые разряды типа «Облако-Земля». Высокочастотный датчик фиксирует молниевые разряды только типа «Облако-Облако». Зоны обзора (рисунок 1) для разных типов молниевых разрядов различные.

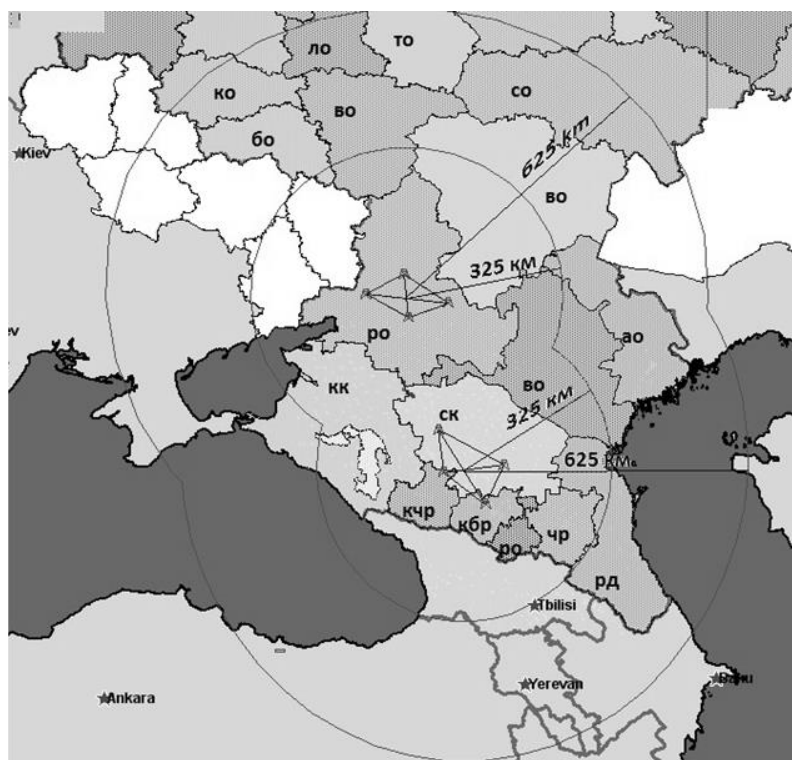


Рисунок 1. Зона обзора грозопеленгационной сети LS8000  
Обозначения: Краснодарский край (КК), Ростовская область (РО) и т.д.

Для молниевых разрядов «Облако-Земля» радиус области обзора составляет 625 км от центров сети, а разрядов «Облако-Облако» – 325 км. Зона обзора системы перекрывает территории юга европейской части России и республик Закавказья. По данным, полученным с LF и VHF датчиков, центральные процессоры (CP8000), расположенные в центре приема и обработки информации, формируют до 25 параметров по каждому молниевому разряду.

В частности для молниевых разрядов «Облако-Земля»: дата и время разряда с точностью до 100 наносекунд; координаты разряда; сила и полярность тока в канале разряда; классификация разрядов на положительные и отрицательные; время роста сигнала до пикового значения; время спада сигнала от пикового значения до нуля и др. Для молниевых разрядов «Облако-Облако»: дата и время разряда с точностью до 100 наносекунд и координаты разряда.

По этим измерениям достаточно точно определяется:

- 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);
- значения амплитуды токов в каналах наземных разрядов молний и временные характеристики нарастания и спада импульсов токов.

Система позволяет проводить автоматическую регистрацию указанной информации, ее архивирование, а также визуализацию информации в различных форматах: табличных данных; точек координат молний, наложенных на карты местности; в виде цветовой индикации на различных картосхемах и др.

1. Грозовая активность. В целом, на рассматриваемой территории площадью около 1 200 000 км<sup>2</sup> наблюдается достаточно стабильная грозовая активность. Всего за время работы с 2008 по 2015 гг. система зарегистрировала около 1800 дней с грозой. Из них 192 дня характеризуются как интенсивные грозы с большим количеством наземных молний в грозовой период (более 10 000 разрядов в день).

Наибольшее число дней с грозой отмечено в 2009 г. – 308 дней, наименьшее в 2014 г. – 219 дней. Средняя грозовая активность на рассматриваемой территории за указанный период составляет 239 дней с грозой в год.

За рассматриваемый период над территорией обзора зафиксировано более 6 600 000 молниевых разрядов «Облако-Земля» и более 48 000 000 молниевых разрядов «Облако-Облако».

Наиболее интенсивным по количеству грозовых разрядов был 2012 год, когда было зафиксировано 1 383 872 молниевых разрядов «Облако-Земля» и 9 677 760 молниевых разрядов «Облако-Облако». Рекордный день по числу молниевых разрядов пришелся на 21 мая 2012 года, когда за сутки произошло более 82 000 наземных и более 330 000 внутриоблачных разрядов.

Сезонный ход интенсивности наземных молниевых разрядов в месяц представлен на рисунке 2. Наибольшая их интенсивность на рассматриваемой территории имело место в июне месяце. На этот период приходится и наибольшее количество облачных разрядов молний. Исследования аэросиноптических условий развития грозовых процессов на рассматриваемой территории позволили выделить четыре типа грозовых очагов, отличающихся по территориальному распределению и интенсивности.

Каждый тип процесса развивается при определенном направлении воздушных масс, которые, с учетом инструментальных наблюдений за грозовыми явлениями, можно разделить на следующие:

- перенос воздушных масс с запада на восток. При циклонах, вторгающихся на Северный Кавказ с запада, развивается около 24% от общего числа гроз. При западном переносе наиболее интенсивные грозовые процессы наблюдаются на территории горных районов. Средняя интенсивность гроз при этом около 5 разрядов в минуту, а максимальная до 12 разрядов в минуту. Средняя продолжительность грозы составляет около 34 часов. Как правило, град при таких процессах выпадает редко;

- перенос воздушных масс с севера, который обусловлен фронтальной зоной, расположенной в меридиональном направлении перпендикулярно Кавказскому хребту. При такой синоптической ситуации на Северном Кавказе происходит около 32% от общего числа гроз. При этом грозовые процессы наблюдаются повсеместно в течение нескольких дней. Средняя интенсивность гроз – 9 разрядов в минуту, а максимальная – 18 разрядов в минуту;

- мало градиентное барическое поле в средней тропосфере. Как правило, при этом над центральной частью Кавказа располагается очаг холода. В этом случае грозы наблюдаются повсеместно отдельными очагами, носят внутримассовый характер и развиваются во второй половине дня. Процессы такого типа составляют 18% от общего числа гроз. Средняя

интенсивность гроз около 3 разрядов в минуту, а максимальная – 10 разрядов в минуту. Продолжительность грозы более 4 часов;

- ведущий поток и фронтальная зона располагаются в широтном направлении.

Воздушные массы у поверхности земли перемещаются с севера. В этом случае доля гроз около 26% от общего их числа. Грозовая активность не превышает 8 разрядов в минуту, средняя продолжительность грозы около 2.6 часа.

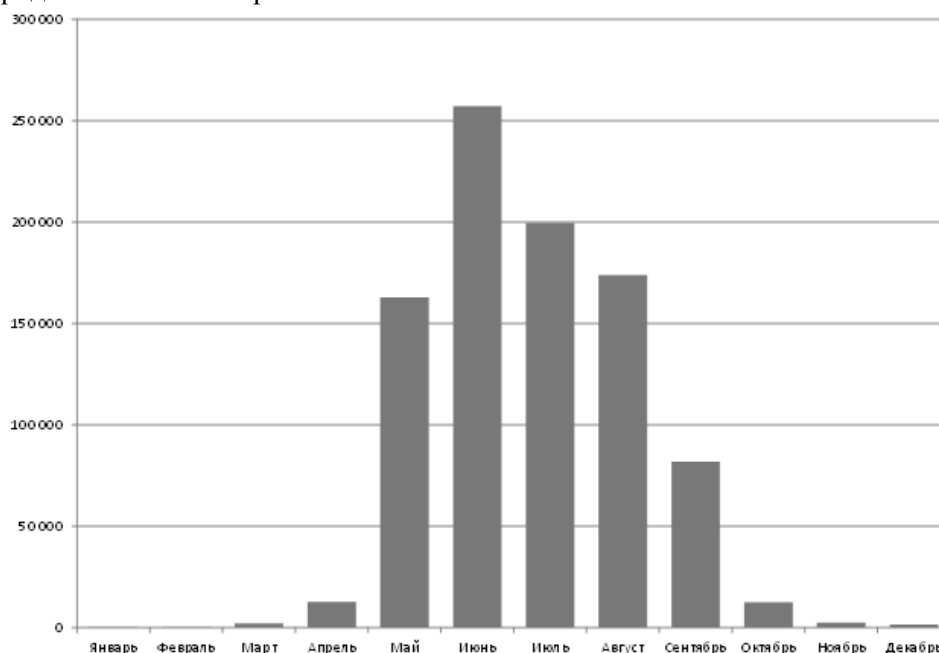


Рисунок 2. Среднее количество наземных молниевых разрядов по месяцам за период 2008 – 2015 года

2. Исследования параметров молниевых разрядов на юге европейской части России. За время эксплуатации (с августа 2008 года до 1 января 2016 года) грозопеленгационная сеть LS8000 зарегистрировала 1 511 461 положительных и 5 140 336 отрицательных молниевых разрядов типа «Облако-Земля» и около 48 000 000 разрядов «Облако-Земля». Согласно этим данным, количество положительных разрядов составляет около 23% от общего количества разрядов «Облако-Земля».

Следует отметить, что соотношение количества грозовых разрядов различных типов для отдельного грозового явления или за период наблюдений значительно варьируется в зависимости от широты местности, высоты над уровнем моря рассматриваемой территории и чувствительности используемой аппаратуры [21, 22].

Так, в работе [23] для континентальной части США (от 25° до 49° N) среднее значение доли разрядов «Облако-Земля» приводится равным 25,4–27,5%, с высокими значениями >50% для горной местности и низкими 20–10% для равнинной.

По результатам обработки данных стационарного грозорегистратора для территории центральной Якутии в [24] получено, что соотношение количества разрядов типа «Облако-Земля» варьируется от года к году от 40 до 60%, что является довольно завышенной величиной по сравнению с вышеуказанными литературными источниками. Усредненные за сезон значения процентной доли разрядов «Облако-Земля» в день составляет 45...59%. Для территории исследования она составляет около 13%, что близко к значениям, полученным аналогичной аппаратурой для равнинной части территории США [23].

Разряды молний «Облако-Земля» принято классифицировать и по знаку переносимого электрического заряда – на положительные и отрицательные. Согласно полученным данным на юге европейской части России в наземных разрядах доминируют молнии отрицательной полярности, средняя доля которых за 7-ми летний период наблюдений составляет около 77%.

Эти результаты хорошо согласуются с исследованиями в различных регионах. Так в исследованиях в Якутии [24] за 4-х летний период с 2009 по 2012 гг. доля отрицательных разрядов молний за один грозовой день составила от 75% (2012 г.) до 92% (2009 г.).



В десятилетних наблюдениях грозовой деятельности на территории Германии [23, 24] доля положительных разрядов составила в среднем в год 17% с наибольшим среднегодовым значением более 21% в 2001 и 2006 гг.

Таким образом, для юга европейской части России характерно значительное преобладание облачных (межоблачных) разрядов молний до 88% от общего числа регистрируемых грозопеленгационной сетью LS8000 молний. При этом доля положительных разрядов от общего числа наземных молний составляет около 23%, что соответствует принятым значениям для средних широт (20%).

На рисунке 3 приводятся статистические распределения значений токов отрицательных и положительных разрядов молний, характерных для всей территории европейской части России.

Для положительных разрядов самый слабый зафиксированный импульс измеренной силы тока составляет +2,1 кА, самый большой импульс +311 кА. Среднее значение силы тока равняется +10,6 кА. Медианное значение равно +7,6 кА.

Для отрицательных разрядов самый слабый импульс измеренной силы тока составляет -2,1 кА, самый сильный -326 кА. Среднее значение силы тока составляет -13,5 кА. Медианное значение равно -9,8 кА.

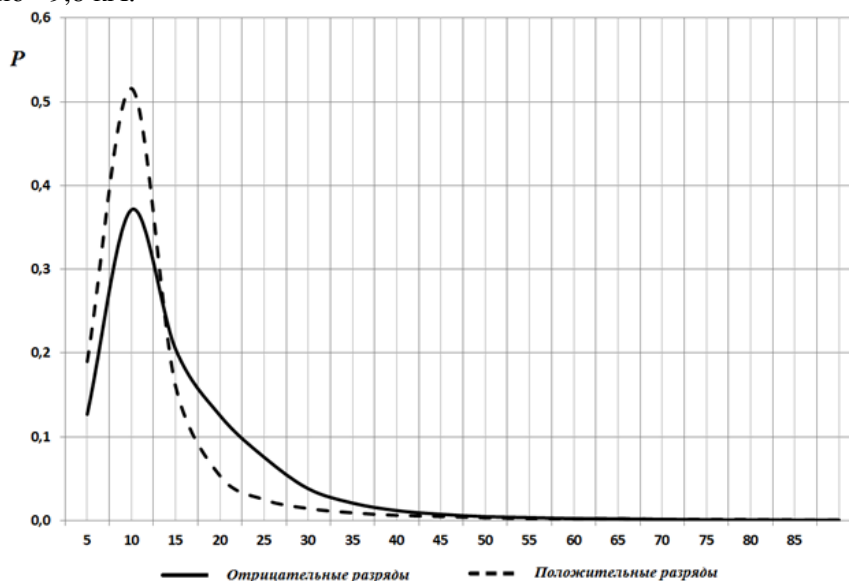


Рисунок 3. Распределение значений токов (в кА) молнии отрицательной и положительной полярностей

Для раздельного рассмотрения параметров молниевых разрядов над горной местностью (высота более 1000 м.) и равнинной местностями (высота менее 1000 м.) были сделаны выборки молниевых разрядов над равнинной и горной местностью. Раздельное рассмотрение этих данных позволило получить следующие результаты.

Среднее значение амплитуды тока молниевых разрядов на равнинной территории Северного Кавказа составляет, без разделения по полярности молниевых разрядов, около 9,29 кА, в горной зоне 11,24 кА, а медианное значение амплитуды тока на равнинной территории составляет около 6,56 кА, в горной части 7,99 кА.

На рисунке 4 представлены статистические распределения для параметров импульса тока молний положительной полярности над равнинной и горной местностью, а на рисунке 5 представлены статистические распределения для параметров импульса тока молний отрицательной полярности над равнинной и горной местностью.

Для параметров распределения силы тока молниевых разрядов различной полярности над равнинной и горной местностью получены следующие значения:

1. Амплитуда тока положительных молний варьируется от +2,79 до +188 кА и от +2,94 до +211 кА для горной и равнинной частей соответственно.
2. Амплитуда тока отрицательных молний варьируется от -2,63 до -173 кА и от -2,79 до -170 кА для горной и равнинной частей соответственно.
3. В горной части более половины отрицательных разрядов имеют токи менее -8,55 кА, а положительные менее 6,88 кА.

4. В равнинной части более половины отрицательных разрядов имеют токи менее  $-6,85$  кА, а положительные менее  $5,96$  кА.

Из этих данных видно, что значения токов в молниевых каналах над горной местностью заметно выше, чем над равнинной местностью. Эта разница может объясняться разницей сопротивлений столба воздуха между землей и зарядом облака в горной и равнинной местности.

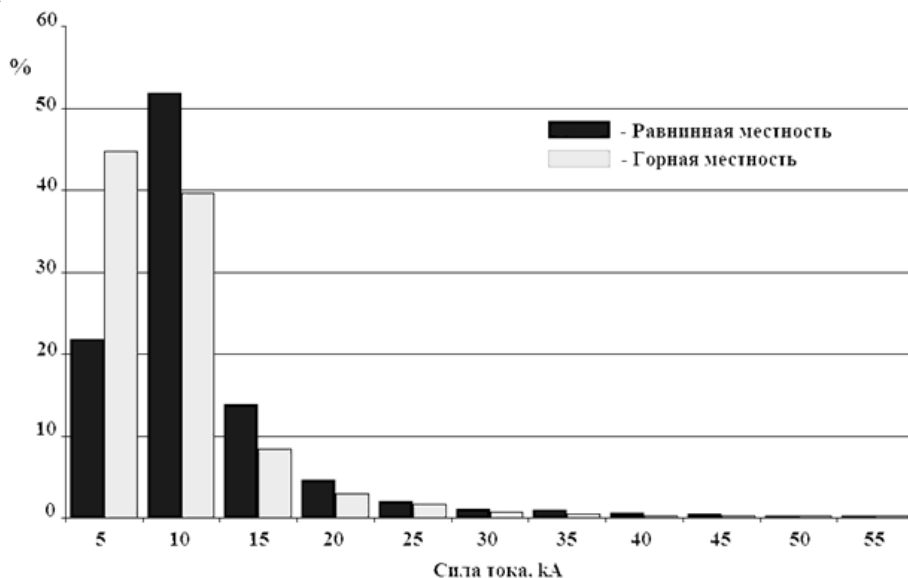


Рисунок 4. Гистограммы распределения значений токов молнии положительной полярности над равнинной и горной местностью

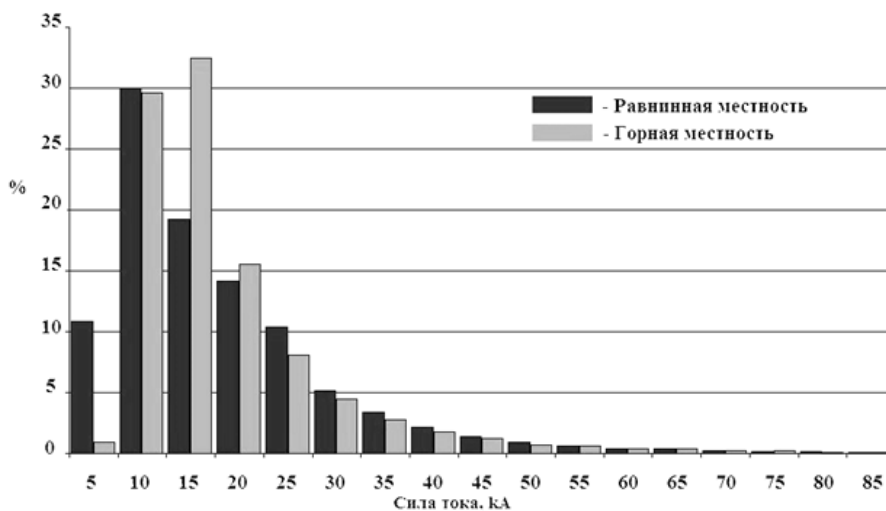


Рисунок 5. Гистограммы распределения значений токов молнии отрицательной полярности над равнинной и горной местностью

Такую особенность необходимо учитывать при разработке рекомендаций по грозозащите конкретных высоковольтных линий, зданий и др. в указанных районах.

Важной климатической характеристикой грозовых явлений является их продолжительность. В климатических характеристиках принято определять продолжительность гроз за год, за месяц и за один грозовой день. Количество часов грозовой активности в целом на территории юга европейской части России составило около 5000. В среднем продолжительность грозы за грозовой день составила около 4 часов. 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), при этом генерируется в среднем около 235 молниевых разрядов на одну ячейку.

Прослеживается взаимосвязь между продолжительностью грозовых явлений в отдельной грозовой ячейке (облака) и интенсивностью молниевых разрядов. Используя полученные данные и известные методы анализа [27] по более 4000 случаев наблюдений за естественно эволюционирующими облачными ячейками, составлено уравнение регрессии:

$$T=0,965F+20,8 \text{ (мин), при } F>0,$$

где  $T$  – продолжительность грозы, мин<sup>-1</sup>,  $F$  – средняя частота разрядов в облаке, мин<sup>-1</sup>.

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 наблюдаются в суперячейках мощных грозо-градовых облаков и, как правило, на Северном Кавказе они варьируют 1–2 раза в год, нанося значительный материальный ущерб сельскому хозяйству.

Отметим, что грозовая активность на юге южного региона европейской части России выше, чем на севере. Так, для площади, принятой на метеостанциях, (круг радиусом 10...15 км), число дней с грозой в году на юге, в районе г. Сочи, достигает 70, а на севере, в районе г. Ростов-на-Дону, 23. Удельная поражаемость поверхности земли молниями за год на юге составляет 5 ... 6 на 1 км<sup>2</sup>, а на севере около 2 на 1 км<sup>2</sup>.

Заключение. Проанализированные характеристики грозовой деятельности на территории юга европейской части России за период с 2008 по 2015 годы показали, что число дней с грозой на указанной территории площадью около 1 200 000 км<sup>2</sup> составляет 1800. При климатической характеристике (число дней с грозой на территории круга радиусом 10...15 км) на юге (побережье Черного моря, г. Сочи) составляет 70 дней с грозой в год, на севере (г. Ростов-на-Дону) – около 23 дней. Динамика сезонной грозовой активности характеризуется максимумом в летний период до 22 дней в июне и минимумом 2–3 дня в декабре. Максимумы грозовой активности обусловлены фронтальными процессами.

По всем рассмотренным годам соотношение между количеством облачных, наземных, наземных положительных и отрицательных молний характеризуются следующими значениями:

- Соотношение долей наземных и облачных в общем количестве всех разрядов составляет 12% к 88%;

- Соотношение долей положительных и отрицательных в общем количестве наземных разрядов составляет 23% к 77%.

Статистические значения токов в канале наземных молний следующие:

Положительные разряды:

Самый слабый зафиксированный импульс измеренной силы тока составляет +2,1 кА, самый большой импульс +311 кА. Среднее значение силы тока равняется +10,6 кА. Медианное значение равно +7,6 кА.

Отрицательные разряды:

Самый слабый импульс измеренной силы тока составляет –2,1 кА, самый сильный –326 кА. Среднее значение силы тока составляет –13,5 кА. Медианное значение равно –9,8 кА.

Удельная поражаемость по территории обзора грозопеленгационной сети находится в диапазоне от 2 (на севере) до 6 (на юге) молниевых разрядов на квадратный километр в год.

Интенсивность молниевых разрядов по всей территории обзора грозопеленгационной сети достигает:

- для наземных молниевых разрядов до 210 разрядов в минуту;

- для облачных молниевых разрядов до 1 650 разрядов в минуту.

При раздельном рассмотрении параметров молниевых разрядов над горной местностью (высота более 1000 м.) и равнинной местностями (высота менее 1000 м.) были получены следующие результаты.

Среднее значение амплитуды тока молниевых разрядов, без разделения по полярности молниевых разрядов, на равнинной территории Северного Кавказа составляет около 9,29 кА, в горной зоне 11,24 кА, а медианное значение амплитуды тока на равнинной территории составляет около 6,56 кА, в горной части 7,99 кА. Такую особенность необходимо учитывать при разработке рекомендаций по грозозащите конкретных высоковольтных линий, зданий и др. в указанных районах.

## Литература

1. Электрическое взаимодействие геосферных оболочек / Сборник статей под редакцией Моргунова В.А., Троицкой В.А., Анисимова С.В. М.: Издательство ОИФЗ РАН. 2000. 209 с.
2. *Volland H.* Atmospherik Electrodynamics // Heidelberg: Springer, 1984. P. 128–136.
3. *Despiau S.* Electric field and ionic concentration variations observed at ground level in storm conditions // Ann. Geophys. 1992. №10. P. 75–81.
4. *Williams E.R., Mareev E.A.* Recent progress on the global electrical circuit // Atm. Res., 2014. v. 135–136/ P. 208–227.
5. Наставление по метеорологическому обеспечению гражданской авиации (НМОГА-73). // Л.: Гидрометеиздат. 1973. 137 с.
6. *Базелян Э.М., Райзер Ю.П.* Физика молнии и молниезащиты // М.: Физматлит. 2001. 320 с.
7. Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 3. Ч.1. Метеорологические наблюдения на станциях. // Л.: Гидрометеиздат. 1985. 300 с.
8. *Буз А.И.* Вероятность обнаружения маломасштабных явлений в зависимости от их размеров и густоты наблюдательной сети. // Метеорология и гидрология. 1970. №2. С. 63–70.
9. Климатический атлас СССР, под ред. Давитая Ф.Ф. // М.: Гидрометеиздат. 1960. С. 153–154.
10. *Пеньков А.П.* Климатические характеристики гроз на территории СССР // Авиационная климатология, 1976. Вып.34. С. 24–33.
11. Справочник по опасным природным явлениям в республиках, краях и областях российской Федерации, под ред. К.Ш. Хайруллина // С.-П.: Гидрометеиздат. 1997. 587 с.
12. *Лободин Т.В., Огуряева Л.В.* Длительность отдельных гроз на территории СССР // Труды ГГО. 1977. Вып.350. С. 74–80.
13. *Архинова Е.П.* Карты географического распределения числа дней с грозой на территории СССР // Труды ГГО, 1957. Вып.74. С. 41–60.
14. *Колоколов В.П.* О характеристиках глобального распределения грозовой деятельности // Метеорология и гидрология, 1969. №11. С. 47–55.
15. *Кононов И.И., Петренко И.А., Снегуров В.С.* Радиотехнические методы местоопределения грозных очагов // Л.: Гидрометеиздат, 1986. 222 с.
16. *Лыдзер П.С.* Полупроводниковые грозорегистраторы // Труды ГГО, 1964. Вып.157. С. 54–58.
17. *Степаненко В.Д., Гальперин С.М.* Радиотехнические методы исследования гроз // Л.: Гидрометеиздат, 1983. 204 с.
18. *Malone M.D., Cummins K.L., Krider E.P.* The U.S. National Lightning Detection Network and Applications of Cloud-to-Ground Lightning Data by Electric Power Utilities // IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 40. №4. November 1998. P. 465–480.
19. *Poelman D. R., Schulz W., Vergeiner C.* Performance characteristics of three distinct lightning detection networks covering Belgium. // 22<sup>nd</sup> International Lightning Detection Conference. 2–3 April 2012, Broomfield, Colorado, USA. (URL [https://www.researchgate.net/publication/264124232\\_Performance\\_Characteristics\\_of\\_Distinct\\_Lightning\\_Detection\\_Networks\\_Covering\\_Belgium](https://www.researchgate.net/publication/264124232_Performance_Characteristics_of_Distinct_Lightning_Detection_Networks_Covering_Belgium)).
20. *Schulz W. and Saba M.M.F.* First results of correlated lightning video images and electric field measurements in Austria. // 10<sup>th</sup> International Symposium on Lightning Protection. 9-13 Nov. 2009. Curitiba. Brazil. P. 503-505.
21. *Аджиев А.Х., Снегуров А.В., Снегуров В.С., Стасенко В.Н., Тапасханов В.О.* Грозопеленгационные системы Росгидромета на Европейской территории России // Тезисы докладов VII Всероссийского метеорологического съезда. С.-Петербург., 7–9 июля 2014 г., г. С. 40–41.
22. *Аджиев А.Х., Тапасханов В.О., Стасенко В.Н.* Система грозопеленгации на Северном Кавказе // Метеорология и гидрология, 2013. №1. С. 5–11.
23. *Аджиев А. Х., Богаченко Е.М.* Грозы Северного Кавказа //Нальчик: ООО «Полиградосервис и Т», 2011. 151 с.
24. *Voccipio D.J., Cummins K.L., Christian H.J., Goodman S.J.* Combined Satellite- and Surface-Based Estimation of the Intracloud-Cloud-to-Ground Lightning Ratio over the Continental United States Mon. Weather Rev. 2001. V. 129. P. 108–122.
25. *Козлов В.И., Муллярлов В.А., Григорьев Ю.М., Тарабукина Л.Д.* Параметры грозовой активности и молниевых разрядов на территории центральной Якутии в 2009–2012 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50. №3. С. 365–372.
26. *Ершова Т.В., Горбатенко В.П.* Параметры молниевой активности по инструментальным измерениям // Вести. ТГПУ. 2011. Вып. 5 (107). С. 151–154.
27. *Большев Л.Н., Смирнов Н.В.* Таблицы математической статистики // М.: Наука, 1983. 416 с.

## СЕКЦИЯ 4. Физика молнии

### AN UPWARD NEGATIVE LIGHTNING FLASH TRIGGERED FROM A TALL TOWER BY A +CG AT A DISTANCE OF 45 KM FROM THE TOWER

Y. Zhu<sup>1,2,a</sup>, Z. Ding<sup>1,b</sup>, V.A. Rakov<sup>1,3,c\*</sup>, and M.D. Tran<sup>1,4,d</sup>

<sup>1</sup> Department of Electrical and Computer Engineering, University of Florida, Gainesville, Florida, USA

<sup>2</sup> Now at Earth System Science Center, University of Alabama in Huntsville, Huntsville, Alabama, USA

<sup>3</sup> Moscow Institute of Electronics and Mathematics, National Research University, Higher School of Economics, Moscow, Russia

<sup>4</sup> Rhombus Power Inc., Moffett Field, California, USA

<sup>a</sup>yz0022@uah.edu, <sup>b</sup>zqingding94@ufl.edu, <sup>c</sup>rakov@ece.ufl.edu, <sup>d</sup>ducmanh.npi@gmail.com

In this study, we examined in detail the morphology and evolution of an upward negative flash terminated on a 257-m tower in Florida. The upward flash was induced (triggered) by a single-stroke 50-kA +CG that occurred about 45 km from the tower.

Using high-speed optical and electric field records obtained at the Lightning Observatory in Gainesville (LOG), Florida, we examine in detail morphology and evolution of an upward negative flash containing 6 downward leader/upward return stroke sequences terminated on a 257-m tall tower in Florida. This flash was unusual in that the upper part of its channel, normally hidden inside the cloud, was visible for each of its 6 strokes up to a height of about 10 km above the tower top. It was induced (triggered) by a single-stroke 50-kA +CG (positive cloud-to-ground flash) that occurred about 45 km from the tower and whose in-cloud part was optically detected to extend (primarily horizontally with a descending trend) toward the tower and appeared to stop at a height of about 3 km above the tower top. The ENTLN (Earth Networks Total Lightning Network) and radar data (see Figure 1)

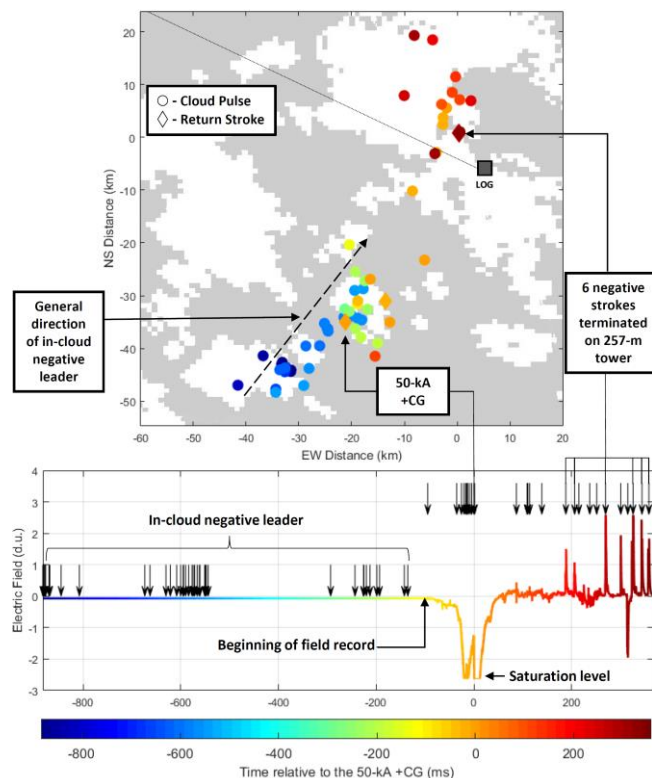


Figure 1. (Top) ENTLN data (circles representing cloud pulses and diamonds representing return strokes) superimposed on a radar map showing only 2 levels of reflectivity  $\geq 35$  dBZ (white areas) and  $< 35$  dBZ (gray areas). (Bottom) Electric field waveform measured at LOG. The time sequence of cloud pulses and return strokes (a total of 66) shown in the top panel is color coded. Downward arrows in the bottom panel indicate the occurrence times of ENTLN-detected events

indicate that the +CG apparently originated from a relatively distant thunderstorm cell separated by a lower-reflectivity gap of about 15 km from the cell located above the tower. The distance from the tower to the LOG was 8,8 km.

The in-cloud part of the +CG in effect transported negative charge to the cloud region above the tower and caused the initiation of an upward positive leader (UPL) from the tower. The UPL extended during about 8 ms to a height of about 2 km above the tower top, as the in-cloud part of the +CG (including its continuing current) faded away, and was followed by an initial continuous current (ICC). The UPL speed decreased from  $5,8 \times 10^5$  m/s to  $1,4 \times 10^5$  m/s with a mean of  $2,2 \times 10^5$  m/s. The ICC was associated with heavy branching in different directions. Most of the branches were faint and were revealed only via detection of moving bright leader tips and/or re-illumination of channels by transient recoil leaders. The branches extending predominantly upward were utilized by attempted downward leaders and leader/return-stroke sequences that occurred later in the flash.

Six negative downward-leader/upward-return-stroke sequences occurred 177 ms after UPL's becoming optically undetectable. Each of them was initiated by what appeared to be a predominantly vertical bidirectional leader. The upper end of the return-stroke channel in all 6 cases exhibited upward branching. The channel length tended to increase with increasing stroke order, up to a maximum height of about 10 km above the tower top. The optical images and corresponding electric field waveforms for Strokes 1 and 4 are shown in Figure 2. Additional information on the flash presented in this paper is found in [1] and [2].

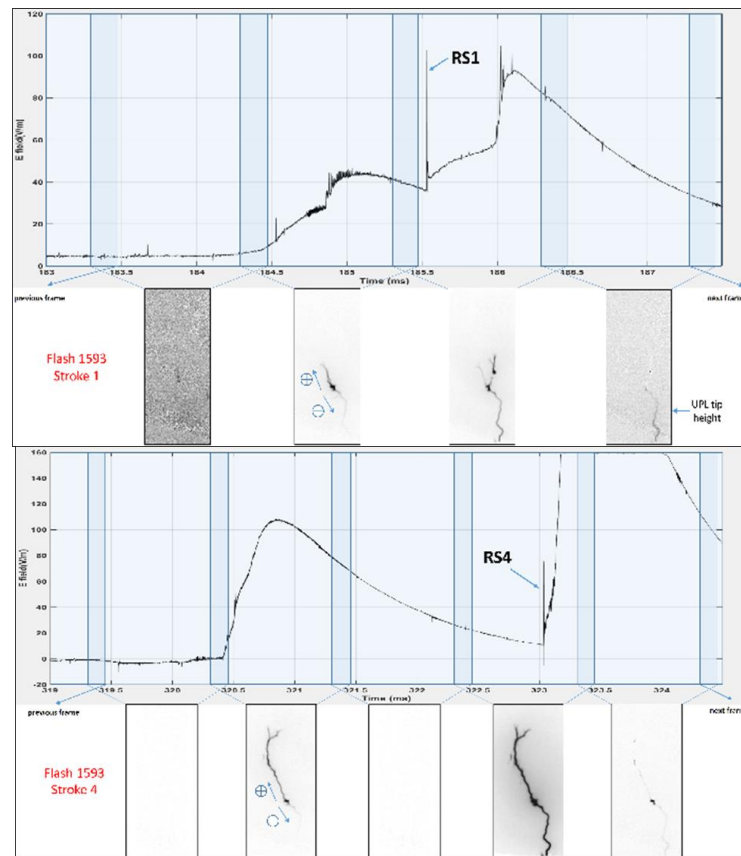


Figure 2. Electric field waveforms of Strokes 1 (7,6 kA) and 4 (6,5 kA) aligned with their optical images (1 ms between frames). Alignment uncertainty is represented by darker areas in electric field panels

## References

- 1 Y. Zhu, Rakov, V. A., & Tran, M. D. (2017). Optical and electric field signatures of lightning interaction with a 257-m tall tower in Florida. *Electric Power Systems Research*, 153, 128–137.
- 2 Y. Zhu, Rakov, V. A., Tran, M. D., Lyu, W., & Micu, D. D. (2018). A Modeling Study of Narrow Electric Field Signatures Produced by Lightning Strikes to Tall Towers. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(18).

## **СЕКЦИЯ 5. Атмосферное электричество, метеорология и климат**

### **ОПЫТЫ ПО ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ ГРАДА ИНИЦИИРОВАНИЕМ ИСКУССТВЕННЫХ МОЛНИЙ С ПОМОЩЬЮ ПРОТИВОГРАДОВЫХ РАКЕТ С ТОКОПРОВОДЯЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ**

*М.Н. Бейтуганов, Х.Х. Чочаев*

ФГБУ «Северо-Кавказская военизированная служба по активным воздействиям на метеорологические и другие геофизические процессы», г. Нальчик  
bmn3112m@rambler.ru

Активное воздействие на облачные образования предполагает внесение в облачное пространство источника кристаллов, способствующих образованию частиц осадков. В большинстве известных опытов по активному воздействию на мощно кучевые облака в качестве источника кристаллов используются частицы кристаллизующего реагента (ЧКР). По литературным данным для образования осадков достаточна концентрация ледяных кристаллов  $100 \text{ м}^{-3}$ , для предотвращения осадков  $-10^7 \text{ м}^{-3}$ , а для предотвращения града  $-10^5 \dots 10^6 \text{ м}^{-3}$ . Изменения грозового состояния облака при активных воздействиях по предотвращению града исследовалось в работах [1, 2], где установлено изменение радиолокационных и электрических характеристик через 3–6 минут после внесения реагента в облако. При этом число внутриоблачных молний возрастало, а наземных уменьшалось. Анализ 36 случаев превентивных воздействий с целью предотвращения градобитий показал, что длительность существования в них грозовых явлений по сравнению с контрольными ячейками уменьшалась на 40% или другими словами около 2-х раз, а общее число разрядов уменьшилась на 46%, при неизменной максимальной частоте молний. Вывод - воздействие льдообразующим реагентом в начальной стадии развития грозы стимулирует кратковременную молниевую деятельность с последующим преждевременным разрушением облачной ячейки и уменьшает почти на половину деятельность грозовой фазы. Грозовая ячейка разрушалась, не переходя в градовую стадию. В работе [3] установлено среднее время реакции облака на массированное внесение реагента с помощью противоградовых ракет Алазань-6: в облака с верхней границей 8–10 км вводились около 30 ракет, а в облака с верхней границей 10–13 км около 109 ракет. Среднее время реакции облака на воздействие составляло 7...10 мин. Если за это время не происходило заметных изменений радиолокационных отражаемостей облаков (РЛО) и их электрической активности, то результат относили к неопределённым. Среднее время жизни при  $H \leq 10 \text{ км}$  на стадии развития с 45 мин без воздействия сокращалось в 2 раза – 26 мин. Непосредственное воздействие на мощно-кучевые облака кристаллизующим реагентом  $\text{AgI}$  проводилось в работе [4]. Через 4–6 минут после воздействия происходила полная кристаллизация вершины облака, температура на уровне которых не ниже  $-12^\circ\text{C}$ , с развитием осадков, усилением электрического поля, а иногда и с грозовыми разрядами. В не засеянных облаках только через 15 мин появлялись осадки и грозовые разряды после достижения вершиной облака уровня изотермы  $-15^\circ\text{C}$ . Время реакции облаков на воздействие изменялось от 4 до 10 минут. В этих работах установлено, что с помощью ЧКР можно сократить время существования грозового облака примерно в два раза.

В многочисленных исследованиях доказано, что град возникает только в грозовых облаках. Соотношение повторяемости гроз и града приводится в [5]: во Флориде 70:1, в Айове 2:1, район Денвера (штат Колорадо) 10:9. Допускается, что во всех грозовых облаках, образующихся в этом районе, на некоторой стадии развития содержится град. Как видно, это соотношение имеет широтный ход. По нашим многолетним данным на защищаемой от града территории Кабардино-Балкарской Республики-около 500 тыс.га соотношение гроза-град составляет 3–2,5 :1. Роль молниевых разрядов в процессе перехода грозовой стадии развития в градовую рассматривал Мур [6] и сделал вывод о том, что молнии являются причиной интенсивного выпадения дождя или града из грозовых облаков, а не наоборот. Было установлено, что интенсивности осадков из грозовых облаков возрастает немедленно после близких грозовых разрядов, а не до них. Наблюдения показали: а) перед разрядом в облаке интенсивность дождя внутри облака часто очень мала; б) непосредственно после разряда в

направлении облака, откуда слышался гром, наблюдается быстро нарастающее радиоэхо; в) сразу же после появления радиоэхо интенсивный град или дождь достигает земли. Отсюда можно предположить, что разряд молнии каким-то образом вызывает внезапное укрупнение облачных частиц, которые образуют дождь.

К явлениям в грозоградовых облаках, обусловливаемым молниевым разрядом, можно отнести [7]:

1. Замерзание переохлажденных капель в стримерной зоне движущегося лидера как положительных, так и отрицательных молний, из-за их деформации под действием волны напряженности поля, достигающей величины 300–500 кВ/м, при этом протяженность стримерной зоны, зависящая от длины ступенчатого лидера, может достигать 100–300 м и более [8];

2. Заряжение частицы микропримесей атмосферы (ЧМА) во внедряемом стримерной зоной лидера молнии (СЗЛМ) избыточном объемном заряде (ИОЗ) с концентрацией ионов порядка  $10^{17} \text{ м}^{-3}$  во всем пространстве, пронизываемом молнией, и их превращение в кристаллизующие ядра при отрицательных температурах и ядра конденсации – при положительных температурах.

3. Заряжение гидрометеоров в ИОЗ, внедренном в облачную среду (СЗЛМ), способствующее значительному усилению коагуляционных процессов в восстановившемся после молниевых разряда электростатическом поле грозового облака;

4. Дробление нейтральных и заряженных капель и «сдириание» водяной пленки с обводненных ледяных частиц в импульсном электрическом поле лидера молнии;

5. Коронный разряд с нейтральных и заряженных гидрометеоров в лавинной и стримерной формах, вследствие чего происходит процесс их заряжения, нейтрализации или перезарядки на противоположный заряд;

6. Дробление капель в ударной волне, возникающей при расширении высокотемпературного канала молнии, на расстояниях от канала до 6–9 м;

7. Замерзание переохлажденных капель в ударной волне под действием процессов кавитации – возникновения воздушных пузырьков в капле;

8. Образование озона, вследствие чего происходит окисление поверхности частицы микропримесей атмосферы, способствующее их превращению в ядра конденсации в теплой части облака или в ядре кристаллизации в переохлажденной части облака;

9. Образование азотистых соединений под действием молнии – мощного искрового разряда в воздухе;

10. Понижение температуры с  $-10^{\circ}\text{C}$  до  $-40^{\circ}\text{C}$  при прохождении ударной волны, замерзание капель из-за мгновенного образования кристалла на капле и дальнейшее её замерзание. При отрицательных температурах такое понижение температуры приведёт к возникновению капельных зародышей града, являясь одним из механизмов их образования;

11. Усиление дождя после молниевых разрядов, которое, по литературным данным, может составить десятки тонн воды на одну молнию.

12. Образование облачных капель на отрицательных и положительных ионах, то же самое на зарядившихся в ИОЗ стримерной зоны мельчайших ЧМА.

Метод предотвращения града иницированием ИМ обоснован физическими эффектами в грозоградовых облаках, обусловливаемыми молнией. Наиболее масштабные физические явления в облачном пространстве происходят в среде, пронизанном СЗЛМ, прежде всего, зарядка ЧМА в ИОЗ.

Знак ИОЗ – одноимённый знаку заряда лидера молнии, т.е. если молния отрицательная, то в пространстве остаётся отрицательный ИОЗ, если же молния положительная, то положительный ИОЗ. В избыточном заряде происходит оседание ионов на частицах, находящихся в ареале объёмного заряда. К этим частицам относятся облачные частицы, частицы осадков и, самое главное, частицы микропримеси атмосферы (ЧМА), концентрация которых достигает  $10^{11}$ – $10^{12} \text{ м}^{-3}$  [9]. Реальная концентрация льдообразующих ядер из этого количества ЧМА, активных при температуре выше  $-20^{\circ}\text{C}$ , составляет обычно  $10^3 \text{ м}^{-3}$ . Экспериментальными измерениями наличия в зародышах града таких частиц с размерами от 2 мкм до 60 мкм и более установлено в работе [10]. При этом капельные зародыши образуются, в основном, на частицах с размерами от 30 мкм до 60 мкм и более при средних температурах около  $-5,3^{\circ}\text{C}$ , а крупяные зародыши образуются на частицах с размерами от 2 мкм до 30 мкм при средних температурах около  $-10,7^{\circ}\text{C}$ . Вообще считается, что зародыши града образуются в



диапазоне температур от  $-2^{\circ}\text{C}$  до  $-15^{\circ}\text{C}$  или между высотами над нулевой изотермой от 300 м до 2400 м при градиенте температуры в облаке  $6,3^{\circ}\text{C}/\text{км}$ . В капельных зародышах частицы названы сверх гигантскими аэрозольными частицами (СГАЧ), а в крупяных зародышах – гигантскими аэрозольными частицами (ГАЧ).

Концентрация ГАЧ в облаке сравнима с концентрацией капель осадков. Концентрация же градин в облаке на несколько порядков меньше, чем концентрации ГАЧ и СГАЧ, что указывает на селективность образования зародышей града на ГАЧ и СГАЧ. Причину превращения ГАЧ и СГАЧ в зародыши града мы связываем с их зарядкой ионами из ИОЗ, внедряемом в облачное пространство СЗЛМ [11]. При положительных молниях, внедряющих положительный ИОЗ, положительно заряженные ГАЧ и СГАЧ способны образовать только игольчатые кристаллики, которые не способны к плоскостному росту, и, которые обламываясь и сталкиваясь с крупными переохлаждёнными каплями, превращают их в капельные зародыши града. При отрицательных молниях, внедряющих в облачное пространство отрицательный ИОЗ, осаждение ионов на ГАЧ и СГАЧ, превращает их в крупяные зародыши града, так как на этих частицах возможно образование плоскостных кристаллических структур, способных к блочному или эпитаксиальному росту. Некоторая часть образующихся по такому механизму крупяных зародышей, сталкиваясь с крупными переохлаждёнными каплями, могут способствовать образованию капельных зародышей. Таким образом, по приводимой выше концепции, зарождение града связывается с возникновением в грозовых облаках длинных искровых разрядов-инципиентных молний, внутриоблачных, межоблачных и наземных молниевых разрядов, внедряющих в облачное пространство ИОЗ с концентрацией  $10^{17} \text{ м}^{-3}$ . Ионы из ИОЗ, осаждаются на ЧМА и, особенно, на ГАЧ и СГАЧ, превращают их в ядра кристаллизации в переохлаждённой части облака и в ядра конденсации в тёплой части облака. Обнаруживаемое радиоизлучение грозовых облаков в диапазоне частот 10–150 МГц, характерные для слаботочных искровых разрядов, свидетельствует о наступлении градовой стадии развития грозового облака [12, 13]. В связи с тем, что на крупных частицах осаждаются большее количество ионов, чем на мелких, ГАЧ и СГАЧ, концентрации которых в штормовые дни достигают порядка  $10^4 \text{ м}^{-3}$  и более, играют основную роль в зарождении града в грозовом облаке. Зарядка частиц происходит диффузно и под действием восстановившегося после молнии электростатического поля с напряжённостями  $10^4 \dots 10^6 \text{ В/м}$ .

Величина осаждающегося на ЧМА при диффузном заряджении даётся формулой (1), а под действием электростатического поля – формулой (2):

$$N_1 = \frac{dkT}{2e^2} \ln \left( 1 + \frac{\pi dcNe^2t}{2kT} \right), \quad (1)$$

$$N_2 = \frac{3c d^2 E}{4(c+2)e}, \quad (2)$$

где  $d$  – диаметр частицы,  $k$  – постоянная Больцмана,  $t$  – время зарядки,  $N$  – средняя концентрация ионов,  $c$  – среднеквадратическая скорость иона,  $T$  – температура в градусах Кельвина,  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость частицы,  $E$  – напряжённость электростатического поля,  $e$  – заряд электрона. По оценочным расчётам на частицу с  $d = 60 \text{ мкм}$  и  $\varepsilon = 4$  из-за диффузии за время  $t=1 \text{ с}$  осадут около  $4,8 \cdot 10^3$  ионов, а на частицу с  $d = 30 \text{ мкм}$  – около  $2 \cdot 10^3$  ионов. Такие заряды на частицах получены при  $T = 273^{\circ} \text{ К}$ ,  $N = 10^{17} \text{ м}^{-3}$ ,  $c = 4,5 \cdot 10^2 \text{ м/с}$ . 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 не повлияют существенно. При зарядке частицы с  $d = 60 \text{ мкм}$  в поле с  $E = 100 \text{ кВ/м}$ , диэлектрической проницаемости  $\varepsilon = 4$  на частицу осадут  $1,25 \cdot 10^5$  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 в тёплой части облака и в ядра сублимации в переохлаждённой части. Селективность образования на ГАЧ и СГАЧ зародышей града можно объяснить знаком и количеством ионов, осаждающихся на них.

Таким образом, более крупные ЧМА, в частности, и ГАЧ и СГАЧ, заряжаясь до больших зарядов, становятся напрямую крупяными зародышами града при осаждении на них отрицательных ионов из ИОЗ. При зарядке ГАЧ и СГАЧ в положительном ИОЗ, образующиеся игольчатые кристаллики, разламываясь и контактируя с переохлаждёнными каплями, образуют капельные зародыши града. Превращением отрицательной молнией ГАЧ и СГАЧ в капельные и крупяные зародыши града можно объяснить отсутствие града при отрицательных молниевых

разрядах на землю. В тоже время, абсолютное большинство выпадения града на землю происходит при положительных молниях на землю. Положительное зарядение аэрозольных частиц, не превращая их в ядра кристаллизации, не приводят к автозасеву облака зародышами града. Как результат имеет место выпадение града. Внедрение ИОЗ в облачное пространство СЗЛМ происходит по всему пути распространения извилистой молнии. Поэтому по всей траектории молнии возникает объём с цилиндрической огибающей, с радиусом порядка трети длины СЗЛМ, в котором заряжаются ЧМА в том числе ГАЧ и СГАЧ. Этот объём можно уподобить расширенной трассе, образующейся при сгорании пиротехнического состава противораковой ракеты. Высокая концентрация льдообразующих частиц в шлейфе, который не продувается воздушными потоками, не позволяет сразу разноситься ЧКР в пространстве. Для заряженных ГАЧ и СГАЧ нет такой проблемы, и они разносятся потоками. Относительно величины объёма, занимаемого избыточным зарядом одной молнии, можно судить исходя из следующего. Из литературы известно, что стримерная зона лидера разряда в лабораторной искре можно уподобить конусу, «сидящему» своей вершиной на конце распространяющегося лидера. Вершина конуса имеет телесный угол около 15 градусов. Выше отмечено, что стримеры лидера молнии могут иметь длину  $h=100-300$  м. Допуская, что и СЗЛМ имеет такую же конусообразную форму с таким же углом, можно вычислить радиус основания такого конуса.

Так как радиус основания – катет воображаемого треугольника, вращением вокруг высоты которого образуется этот конус, то  $R = h \cdot \operatorname{tg} 7,5 = 0,13 h$  и для указанных длин стримерной зоны получим диаметры 26 м и 78 м. Таким образом, объём, занимаемый ИОЗ, остающимся после прохождения молниевых разрядов в пространстве, будет представлять собой тело вращения с длиной в длину извилистой молнии и диаметром от 26 м до 78 м. Отрицательные наземные молнии с многочисленными стримерно-лидерными ветвлениями, внедряя в облачное пространство такое же количество ИОЗ и, создавая капельные и крупные зародыши града, предотвращают град.

Как известно, причиной замерзания капель может служить присутствие на поверхности ЧМА активных центров кристаллизации, в частности, неоднородностей, которые по линейным размерам соизмеримы с зародышем льда, т. е. имеют объём порядка  $10^2 \text{ нм}^3$  [14]. На поверхности ЧМА неоднородности могут иметь правильные очертания: ступень, трёхгранный угол или щель. Если неоднородность имеет форму кубика, то размер граней составят около 4,6 нм. Особенно это касается ГАЧ и СГАЧ. Исходя из того, что на «гладкой» поверхности частиц с размерами 100–1000 нм и более могут находиться «выступы» с размерами до 5–10 нм, следует учесть возможное распределение зарядов на поверхности заряженных ГАЧ и СГАЧ. На «выступах» плотность зарядов будет больше. В зависимости от величины и знака заряда на выступах, они должны способствовать зарождению в этих местах зародышей новой фазы – капелек, которые, замерзая, дают начало образованию кристалликов. Образование капельных и крупных зародышей града происходит между высотами от 300 м до 2400 м над нулевой изотермой и нужно рассматривать электрические и другие физические явления между ними. По литературным данным центр отрицательного N-заряда зрелого грозового облака находится примерно на 1–2 км выше изотермы  $0^{\circ}\text{C}$ , а центр верхнего +P заряда на 5...6 км выше изотермы  $0^{\circ}\text{C}$ . Тогда указанные высоты целиком находятся внутри отрицательного – N заряда. Ниже – N заряда могут находиться один или несколько + p зарядов в области положительных температур. Отметим, что только после нейтрализации разрядом молнии между – N зарядом и + p зарядами возможен наземный разряд, т.е. разряд облако – земля (О-З). В объёмно заряженную «сферу» молния или длинные искровые разряды «проникают» до определённой глубины, т.е. пока напряжённость поля не становится равной 3–5 кВ/см, а распространяющиеся молнии «оглабают» объёмные заряды по поверхности. Поэтому + p заряды могут быть нейтрализованы несколькими разрядами между ними и –N зарядом. Так как в природе наземные молнии следуют за несколькими внутриоблачными разрядами молнии, то можно предположить, что эти разряды происходят между – N и + p зарядами. В последующем, если расстояние H между – N зарядом и землёй меньше расстояния L между центрами верхнего +P заряда и – N заряда, то происходят наземные отрицательные молнии древовидной структуры с кроной внутри – N заряда [15]. Внедряемый в облачное пространство ИОЗ, оседает на частицы ГАЧ и СГАЧ, приводя к образованию избыточного количества зародышей града, и тем самым предотвратят град. Если же  $L < H$ , то происходят внутриоблачные молнии древовидной структуры с разветвлениями, занимающими большие пространства. При увеличении L, уменьшается

степень разветвлённости и пространство с внедряемым СЗЛМ ИОЗ уменьшается, что приводит к относительному уменьшению количества зародышей града, и, в конечном счёте, к выпадению града. Несмотря на то, что общепринятой моделью зрелого грозового облака считается выше приведённая структура, внутри основных зарядов находятся ячейки с противоположными им зарядами. Количество неоднородностей по измерениям на различных высотах облака различны. Например, на высоте 4,5 км на одном километра полёта было зарегистрировано около 10 ячеек с положительными и отрицательными зарядами [16], а в работе [17] отмечается наличие в облаке около 7 ячеек средоточение объёмных зарядов. Необходимые для зарождения лидера молнии макро области с большими напряжённостями поля возникают на перифериях этих ячеек. Микро области с локальным усилением напряжённости поля создаются, в основном, заряженными каплями и обводнёнными градинами.

Возможность искусственного создания макрообластей в грозоградовых облаках и инициирования искусственных молний (ИМ) с их помощью было экспериментально доказано в работах [18, 19]. Так, в работе [18] ИМ инициировались плазменным образованием, получающимся при подрыве в грозоградовом облаке 100 мм артиллерийских снарядов. Было установлено, что после инициированной молнии происходит колоссальное изменение радиолокационной отражаемости (РЛО) облака, выражающееся в снижении высоты с максимальной РЛО: высота отражаемости 35 dBZ снизилась примерно на 1 км, а 45 dBZ – на 2 км. Подрыв снаряда производился на высоте около 7 км между верхним + Р зарядом и нижним – N зарядом. Возникновение ИМ идентифицировалось четырьмя приборами: микрофоном, фиксировавшим запуск снаряда и его подрыв в облаке по звуку; радиоприёмником, регистрировавшим атмосферик от ИМ; флюксометром, регистрировавшим изменения напряжённости поля у поверхности земли; измерителем тока короны с заземлённого острия. По совпадению изменений во времени измеряемых параметров, идентифицировался факт инициирования ИМ (рисунок 1).

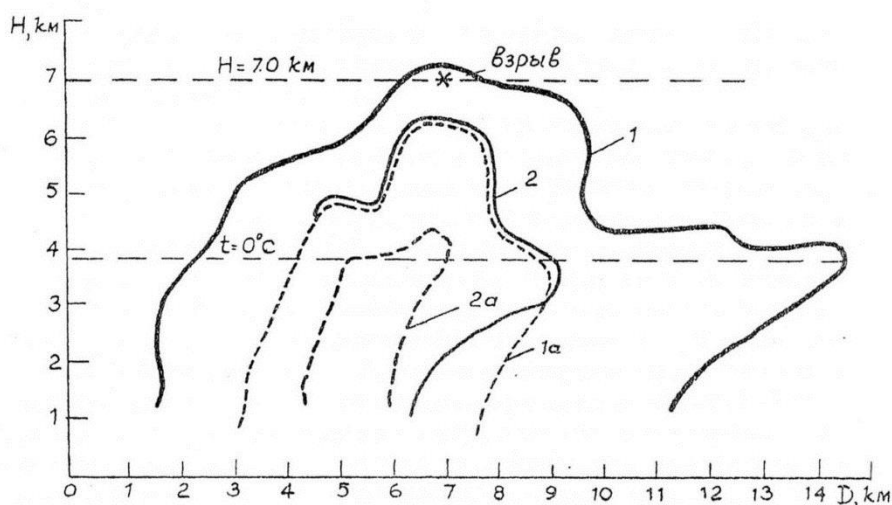


Рисунок 1. Картина изменения РЛО под действием инициированной ИМ: кривые 1 и 2 соответствуют отражаемостям 35 dBZ и 45 dBZ, 1а и 2а через 2-3 мин после инициирования ИМ

Из приводимой картины изменения РЛО видно, что кроме снижения высот РЛО значительно уменьшаются и площади обоих контуров РЛО.

В работе [19] было доказано возможность инициирования ИМ с помощью противогрозовых ракет с токопроводящей поверхностью. В этой работе также было обнаружено изменение радиолокационных параметров объектов воздействия под действием инициированных ИМ.

В предлагаемой работе продолжены исследования по возможности использования ИМ по: предотвращению града; предотвращению наземных молний; перераспределению осадков; сокращению грозового цикла и т.д. Из всех физико-химических явлений, обуславливаемых молнией, физической основой предлагаемого метода является превращение ГАЧ и СГАЧ в

зародыши града при их зарядке в ИОЗ, внедряемом в облачное пространство стримерной зоной лидера искусственной молнии (СЗЛИМ). Ниже приводятся результаты двух экспериментов по предотвращению града с помощью инициируемых противогорадовыми ракетами с токопроводящей поверхностью ИМ. Выбор объектов воздействия проводился по высоте отражаемости 45 dBZ. Изменения РЛЮ в этих экспериментах показаны на рисунках 2 и 3.

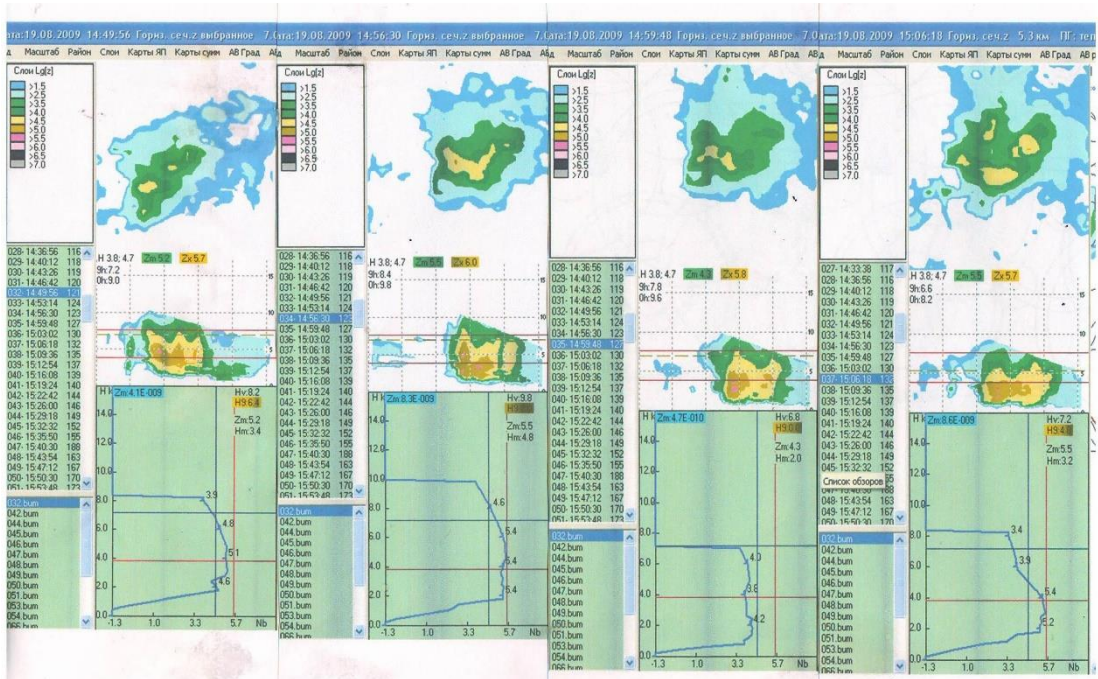


Рисунок 2. Изменения РЛЮ

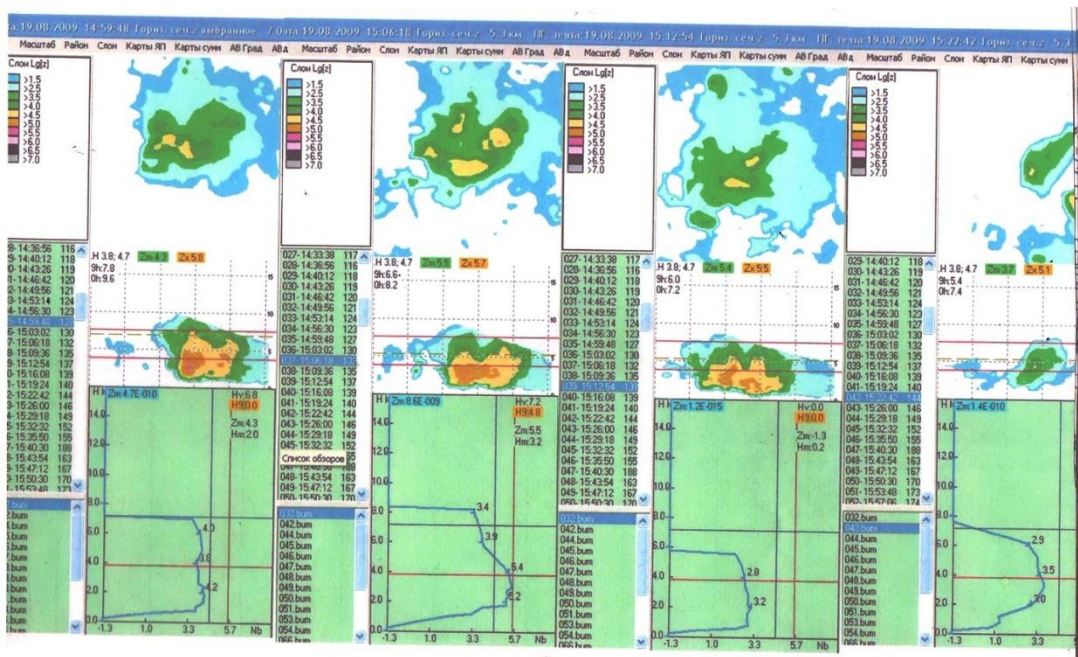


Рисунок 3. Второй опыт по воздействию на градоопасное облако инициированием ИМ

При угле запуска около 60 градусов ракета входит в грозовое облако и находится там около 30–35 с. Тогда по траектории полёта ракеты и при её самоликвидации, она может инициировать ИМ много раз. Трудность их идентификации связана с неизвестностью траекторий инициируемых молний. Отмечаемые грозопеленгатором LG 8000 последовательные по времени молнии могут быть в указанном промежутке времени нахождения ракеты в облаке связаны именно с инициированием ИМ последней. На начальном

участке полёта ракеты до 2,2 км, т.е. когда она не «вошла» в зону, где напряжённости поля от грозового облака велики, не должны появляться ИМ. Запуски крашенных токопроводящей краской ракет производились с ПВ 11 вблизи г. Баксан. Были запущены 3 ракеты с 15:55:00 до 15:57:53. Картины РЛЮ на рисунке 2 по времени запаздывают на 1 час.

Таблица 1

### Характеристики молнии

Ракета 1		Ракета 2		Ракета 3	
время, мин, с	длина молнии, км.	время, мин, с	длина молнии, км	время, мин, с	длина молнии, км
55:00		56:00(2)	2,9	57:00	
55:15(2)	1,41	56:06(2)	1,78	57:02(7)	7,94
55:21(3)	3,96	56:18		57:06	
55:26		56:23		57:09	
55:28(7)	8,5	56:30(4)	4,05	57:27	
55:32		56:32		57:34	
55:35(5)	10,2	56:37(5)	9,5	57:37(2)	3,3
55:51		56:38(3)	7,8	57:44	
		56:44		57:48	
				57:53(2)	2,23

В таблице 1 цифрами в скобках отмечены количество точек, соединением которых получены траектории, инициированных ИМ.

Первая ракета инициирует молнии по всей траектории полёта от объёмных зарядов, существующих по траектории полёта. Вторая ракета, двигаясь в среде с пониженной напряжённостью поля, начинает инициировать молнии на более дальних от ПВ расстояниях, так как электростатическое поле облака не успевает восстановиться ко времени появления ракеты в этой области. Третья ракета также инициирует ИМ на более дальних расстояниях. Последняя молния, скорее всего, инициирована ракетой при её самоликвидации, т.е. от плазменного образования – продуктов детонации.

Таким образом, в объёме грозоградового облака с горизонтальной проекцией около 18 км<sup>2</sup> тремя ракетами инициированы 12 внутриоблачных (ВО) ИМ, с суммарной длиной около 57 км. Первая ракета за 51с инициировала 4 ИМ длиной 21,4 км, вторая ракета за 44 с – 5 ИМ длиной 26 км и третья за 53 с – 3 ИМ длиной 8,2 км. За эти же 3 мин зарегистрированы 15 молний О-3 на этой же площади. Траектории ИМ восстанавливались соединением точек, где одновременно по секундам проявлялись составляющие молний в различных точках на горизонтальной проекции объёма облака. Такой подход к определению траекторий ИМ, по-видимому, правомочен, так как в основе разработки грозопеленгатора лежат исследования конца семидесятых годов, когда разделение молний О-3 и ВО молний проводилось сравнением мощностей электромагнитного излучения молний-атмосфериков, получаемых горизонтальным и вертикальным антеннами. В, частности, мы полагаем, что проявляемые одновременно в различных точках элементы извилистой молнии являются вертикальными участками траектории одной и той же молнии. Некоторым подтверждением такого подхода является время восстановления электростатического поля грозоградового облака для последующей молнии, достигающей несколько секунд. Изменение картины РЛЮ со временем под действием искусственно инициированных 12 молний и 15 молний О-3 приведены на рисунке 2.

Объём облачного пространства, в который происходит внедрение ИОЗ, состоит из объёма, охватываемого стримерными зонами инициированных ИМ и, объёма, занимаемого кроной наземных молний. Принято считать, что 2/3 длины молнии О-3 находится внутри грозового облака. Тогда для средней молнии, длиной около 9 км получим, что крона «проникает» в облако на 6 км. Объём облака, разряжающегося одной наземной молнией, может достигать кубические километры [20]. Считая, что за 3 мин общая длина проникающих в облако частей молний составляет 90 км, получим длину всех молний около 150 км. Для оценки объёма облака, в котором происходит внедрение ИОЗ СЗЛМ можно выбрать средний радиус стримерной зоны, равный около 45 м. Тогда получим приблизительный объём облачного пространства, в котором внедряется ИОЗ, равный  $6,76 \cdot 10^8 \text{ м}^3$ . Выше отмечено, что в штормовые

дни концентрации ГАЧ и СГАЧ в грозовых облаках могут достигать  $10^4 \text{ м}^{-3}$  и более. Допуская, что в процессе осаднения на эти частицы ионов из ИОЗ они становятся источниками капельных и крупяных зародышей града, получим около  $7 \cdot 10^{12}$  шт. и, конкурируя с естественными зародышами града за облачную водность, предотвращают град. Более мелкие частицы ЧМА также осаждают на себя ионы из ИОЗ. В зависимости от знака заряда и окружающей температуры они становятся облачными ядрами конденсации или сублимации. Свободные отрицательные ионы становятся ядрами конденсации, притягивая дипольные молекулы водяного пара, что приведёт к «высушиванию» объёма с ИОЗ и образованию облачных капель.

Фрагмент регистрации ИМ и молний О-З грозопеленгатором приведен на рисунке 4. Масштаб фрагмента 1см:1км. В этом опыте двумя ракетами за 1 мин 43 с инициированы 4 ИМ, протяжённостью 9,8 км. За это же время зафиксировано 11 молний О-З суммарной протяжённостью около 65 км.

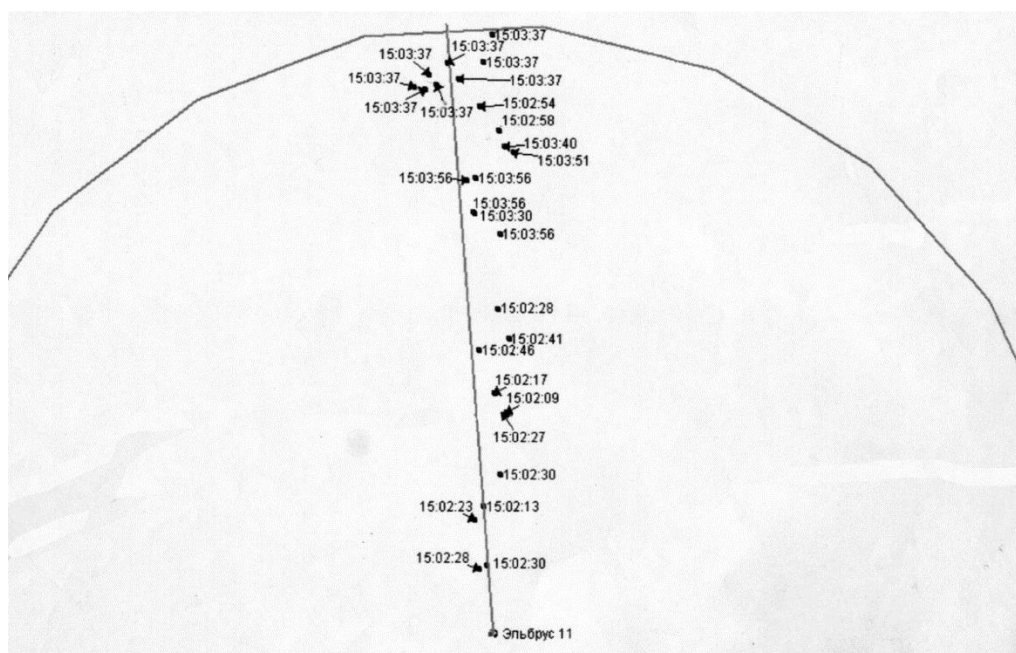


Рисунок 4. Фрагмент регистрации грозопеленгатором LG8000 инициированных двумя ракетами ИМ и молний О-З

Объём пространства, в которое внедряется ИОЗ, так же, как и выше, можно оценить исходя из суммарной протяжённости обеих молний и радиуса СЗЛМ, равной около 45 м, т. е. около  $1,2 \cdot 10^8 \text{ м}^3$ . Зарядка в этом объёме частиц ГАЧ и СГАЧ с концентрацией  $10^4 \text{ м}^{-3}$ , приводя к образованию капельных и крупяных зародышей града, способствует освоению капельной водности, и тем самым, сокращению времени жизни облака. Как видно из изменений картин РЛЮ облака под действием наземных и ИМ, грозоградное облако осаждается приблизительно за 20 мин, не переходя в градовое облако. По сравнению с используемым в противоградовой защите методом получения конкурирующих зародышей града внесением ЧКР с размерами до 1 мкм, зарядившиеся в ИОЗ ГАЧ и СГАЧ с размерами от 30 мкм до 60 мкм и более, становятся источниками двух типов зародышей града, минуя время роста кристалла до 40–50 мкм [20]. Время образования зародышей града на ГАЧ и СГАЧ около 3–4 мин, поэтому реакция облака на процессы осадкообразования может колебаться между 4 и 10 мин. Определение степени градоопасности грозового облака остаётся не решённой проблемой. Если исходить из выше приведённого тезиса о том, что на какой-то стадии развития грозового облака в нём содержится град, то получается, что надо воздействовать на каждое грозовое облако, чтобы оно не перешло в градовую стадию развития. По работе [21] электризация облака начинается, когда вершина растущего облака достигает изотермы  $-10^0 \div -20^0 \text{ С}$ . Организованная электризация, приводящая к возникновению грозового облака, начинается при появлении в облаке крупы с размером 1 мм и концентрации ледяных кристаллов, равной  $10^4 \text{ м}^{-3}$ . Высота облака при этом должна находиться на изотерме  $-22^0 \text{ С}$ . В работе [22] возникновение негативных явлений, порождаемых

грозовыми облаками при высоте нулевой изотермы 2–2,5 км, связывается с достижением РЛО облака 45 dBZ на изотерме  $-22^{\circ}\text{C}$ . Кроме того, в работе [4] отмечается, что при достижении развивающимся облаком высоты изотермы  $-15^{\circ}\text{C}$ , а при воздействии ЧКР AgI при достижении  $-12^{\circ}\text{C}$ , отмечались грозовые разряды.

Наиболее информативным по определению градоопасности грозового облака считаем [12, 13] обнаружение электромагнитного излучения на длинах волн в диапазоне 10–150 МГц, которое будет свидетельствовать об электроразрядных явлениях в грозоградовом облаке в виде стримерно-лидерных и инципиентных молний. Внедряемые этими разрядами ИОЗ, заряжая ГАЧ и СГАЧ, способствуют образованию зародышей града и грозовая стадия развития облака переходит в градовую стадию. Интенсификация с помощью иницируемых ИМ процессов зародышеобразования как результат зарядки ГАЧ и СГАЧ в ИОЗ, внедряемом в облачное пространство СЗЛИМ является физической основой предлагаемого метода предотвращения града.

Таким образом:

1. Иницированием ИМ в грозоградовых облаках с помощью ракет с токопроводящей поверхностью можно предотвратить градобитие, наземные молнии и т.д. Другими источниками локального усиления напряжённости поля могут быть: беспилотники с длинным проводником, высокотемпературные фейерверки и другие плазменные образования, получающиеся при подрыве в облаке взрывчатых и детонирующих составов.

2. Так как переохлаждённые крупные капли с отрицательными зарядами в грозоградовом облаке находятся ниже изотерм  $-25^{\circ}\text{C}$ – $-30^{\circ}\text{C}$ , то ИМ следует иницировать на этих высотах при отражаемостях 35–45 dBZ и наличии не молниевое электромагнитного излучения в диапазоне частот 10–150 МГц.

3. Конкурирующие с естественными искусственные зародыши града образуются как следствие зарядки ГАЧ и СГАЧ в ИОЗ, внедряемом в облачное пространство стримерной зоной лидера ИМ.

4. Метод находит положительный отзыв учёных, например, ФГУП ЦНИИХМ [23].

Выражаем благодарность сотрудникам ФГБУ СКВС Жигатову М.Г. и Байдаевой И.В. за помощь при оформлении работы.

## Литература

1. Богаченко Е.М., Аджиев А.Х. Контроль физической эффективности противоградовых работ по грозовой деятельности облаков // Труды 3-его всесоюзного симпозиума «Атмосферное электричество» 1988. Л.: Гидрометеиздат. С. 147–151.
2. Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Аджиев А.Х. Изменение грозовой активности облаков при активных воздействиях на град // Доклады всероссийской открытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы 7-9 октября 2014г, часть 2, Нальчик, ООО «Печатный двор». 2015. С. 45–51.
3. Воробьёв Б.М., Евтеев Б.Ф., Климин Н.Н. и др. Исследования атмосферного электричества. ГГО им. А.И. Воейкова к 70-летию Советской власти. Л.: Гидрометеиздат. 1988. 236 с.
4. Mac Cready P. V.A review of small cumulus studies and the modification of hail. Nubile. 1961. V.4, No.1. P. 20–29.
5. Мейсон Б. Дж. Физика облаков. 1961. Л.: Гидрометеиздат. 541 с.
6. Мур Ч. Генерация зарядов в грозах. Проблемы атмосферного электричества. //Труды 3 международной конференции по электричеству атмосферы и космического пространства. 1969. Л.: Гидрометеиздат. 361 с.
7. Бейтуганов М.Н., Чочаев Х.Х. Противоградовая защита на Северном Кавказе: состояние, проблемы, перспективы. // Сборник трудов Второй международной научной конференции с элементами научной школы, «Инновационные методы и средства исследований в области физики атмосферы гидрометеорологии, экологии и изменения климата», Ставрополь: Изд-во СКФУ. 2015. С.15–20.
8. Базелян Э. М., Горин Б. Н., Левитов В.И. Физические и инженерные основы млезащиты. М.: Гидрометеиздат. 1978. 202 с.
9. Мазин И.П., Шметтер С.М. Облака строение и физика образования. Л.: Гидрометеиздат. 1983. 278 с.
10. Хоргуани В.Г. Микрофизика зарождения и роста града. М.: Гидрометеиздат. 1984. 187 с.
11. Бейтуганов М.Н. Электрические разряды различных типов и молний как причина превращения частиц микропримеси атмосферы в зародыши града. // Доклады всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. Сборник научных трудов, часть 2. г. Нальчик. 2017. С. 249–256.

12. Кармов М.И., Бейтуганов М.Н. Оценка физической эффективности АВ на конвективные облака по изменению характеристик их электромагнитного излучения. //Труды Всесоюзной конференции по активным воздействиям на гидрометеорологические процессы. г. Нальчик. 1990. С. 32–37.
13. Stenford I.L., Lind M.O., Takle G.S. Elektromagnetiic noise studies of severe convective storms in Iowa, the 1970 storm season. //J. Atm. Sci. 1971. Vol. 28, No3. P. 436–448.
14. Голубев В.Н. Роль аэрозольных частиц в зарождении атмосферного льда. Метеорология и гидрология. 2017. №4. С. 113–123.
15. Петров Н.И., Петрова Г.Н. Физические механизмы формирования внутриоблачных разрядов молнии. ЖТФ. 1993. Т. 63, В. 4. С. 41–49.
16. Мучник В.М. Физика грозы. 1974 Л: Гидрометеиздат. 351 с.
17. Стасенко В.Н. Радиолокационное исследование многоячейстых конвективных (грозовых) облаков. Санкт-Петербург. Гидрометеиздат. 2004. 90.
18. Бейтуганов М.Н., Березуев Ю.А., Чочаев Х.Х. Иницирование искусственных молний как способ превращения частиц микропримеси атмосферы в ядра конденсации, сублимации и кристаллизации «Инновационные методы и средства исследований в области физики атмосферы гидрометеорологии, экологии и изменения климата», Ставрополь 23–26 сентября 2013 г. С. 105–108.
19. Аджиев А.Х., Бейтуганов М.Н., Кумыков Х.К. и др. Развитие разрядных явлений в облаках. Вопросы атмосферного электричества. Сб. Статей. 1990. С.111–119.
20. Сталевич Д.Д., Учеваткина Т.С. Конкурентный рост частиц осадков при воздействии льдообразующими реагентами на градовые облака. Тр. ГГО. 1982. В. 457. С. 43–51.
21. Гальперин С.М. Кашлева Л.В., Михайловский Ю.П., Степаненко В.Д. Электризация конвективных облаков в естественном цикле развития и при воздействиях (самолётные исследования). Вопросы атмосферного электричества. Сб. статей. 1990. С. 76 –102.
22. Сальман Е.М., Гашина С.Б. Кузнецова Л.И. Зависимость радиолокационных критериев опасных явлений от интенсивности конвекции. «Тр. ГГО». 1971. В. 261, С. 29–32.
23. Кузнецов Н.С. Предложения по созданию артиллерийского снаряда – формирователя искусственных молний. Научно-технический сборник ГН Ц РФ ФГУП «ЦНИИХМ» им. Д.И. Менделеева. Боеприпасы №2. 2016.

#### **АПРОБАЦИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВЫДЕЛЕНИЯ ГРОВОВЫХ ОЧАГОВ НА ЮГЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ПО ДАННЫМ WWLLN С ПОМОЩЬЮ АЛГОРИТМА КЛАСТЕРИЗАЦИИ FRIS-TAX**

*С.Ю. Каранина<sup>1</sup>, Н.А. Кочеева<sup>1</sup>, М.Ю. Беликова<sup>1</sup>, А.В. Каранин<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Горно-Алтайский государственный университет», г. Горно-Алтайск  
krechetovas@yandex.ru

Кластерный анализ данных о молниевых разрядах широко используется для выделения групп разрядов, которые являются математической моделью конвективной ячейки в активном грозовом состоянии [1, 2]. В данной работе продемонстрирован пример группировки молниевых разрядов, зарегистрированных сетью WWLLN (World Wide Lighting Location Network) 7-8 августа 2017 года на юге Западной Сибири (68–90° в.д., 48–58° с.ш.). При выборе времени учитывались погодные условия, способствовавшие формированию гроз на территории исследования [3].

Системой WWLLN в указанный промежуток времени в регионе исследования было зарегистрировано более 3000 разрядов. Выявлено, что расположение областей повышенной плотности молниевых разрядов наблюдается на территориях с высотой от 400 до 1700 м над уровнем моря (рисунок 1). Картина пространственного распределения молниевых разрядов хорошо согласуется с направлением движения основных влагонесущих воздушных масс, их продвижением к центральным частям горных районов, где наблюдается увеличение интенсивности молниевых разрядов.

Кластеризация молниевых разрядов выполнена с помощью алгоритма FRiS-Tax [4]. Алгоритм FRiS-Tax позволяет выделять кластеры произвольной формы и автоматически объединять их в классы, где кластеры имеют пересечение по граничным объектам. Класс может состоять и из одного кластера, который удален в пространстве и во времени от других кластеров. Объединенная совокупность кластеров (класс) может быть ассоциирована с грозовым очагом или многоячейковой грозой.



В вычислительном эксперименте приняты два условия параметризации кластера грозовых разрядов: минимальные расстояние между разрядами 50 км и время – 30 мин [1]; а также 15 км и 20 мин [2]. По результатам кластеризации был выполнен анализ продолжительности действия грозовых кластеров, их площади, интенсивности, а также анализ возможного перемещения активных грозовых областей и формирования классов грозовых кластеров.

На рисунке 2 представлен пример выделения грозовых очагов (классов), состоящих из одного или из нескольких кластеров грозовых разрядов. В таблице 1 приведены их характеристики. Важно отметить, что полученные в ходе вычислительного эксперимента оценки числа кластеров и их характеристик дают нижнюю границу этих показателей, в связи с тем, что WWLLN детектирует небольшую часть от общего числа всех молниевых разрядов.

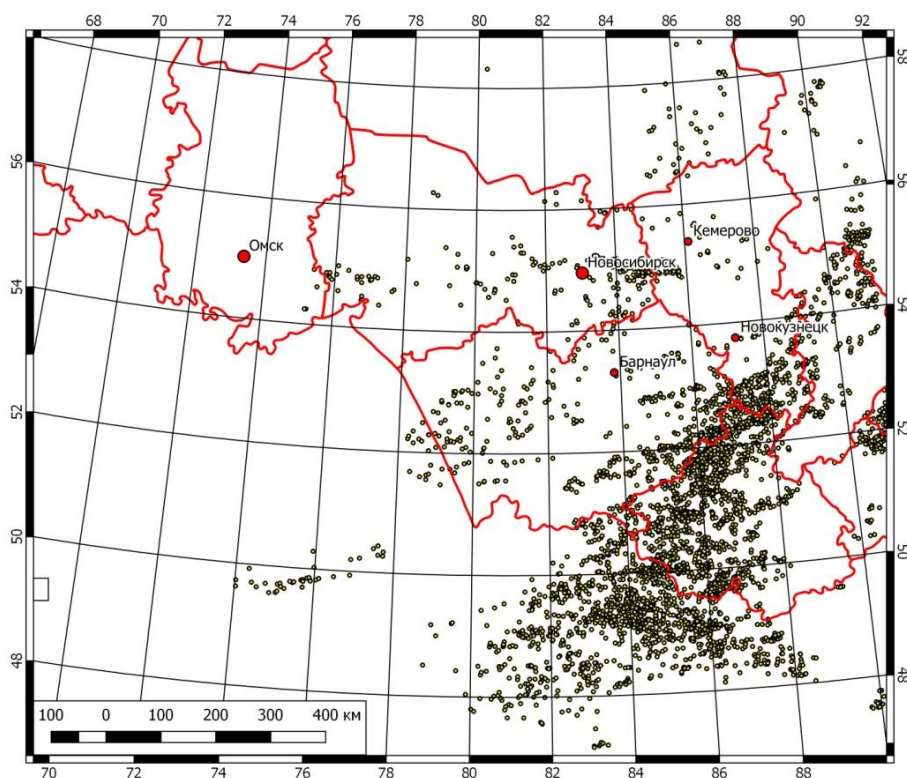


Рисунок 1. Карта распределения молниевых разрядов 7–8 августа 2017 года по данным WWLLN

Таблица 1

**Характеристики грозовых очагов, представленных на рисунке 2**

Номер класса (грозовой очаг)	Количество кластеров (грозовых ячеек)	Время начала (UTC)	Время конца (UTC)	Число разрядов	Продолжительность (час:мин:секунды)
17	5	12:14:09	16:34:35	74	04:20:26
12	10	12:22:13	16:00:01	220	03:37:48
106	2	12:26:25	13:40:05	14	01:13:40
73	2	12:27:57	13:23:25	5	00:55:28
52	3	12:43:49	14:02:11	41	01:18:22
171	1	13:26:10	13:27:24	3	00:01:14
155	1	13:28:05	14:21:01	5	00:52:55
92	1	13:37:48	14:01:32	3	00:23:44
180	1	13:38:16	13:38:16	1	00:00:00
169	1	13:47:37	13:47:37	1	00:00:00
1	15	15:09:06	21:12:15	459	06:03:10

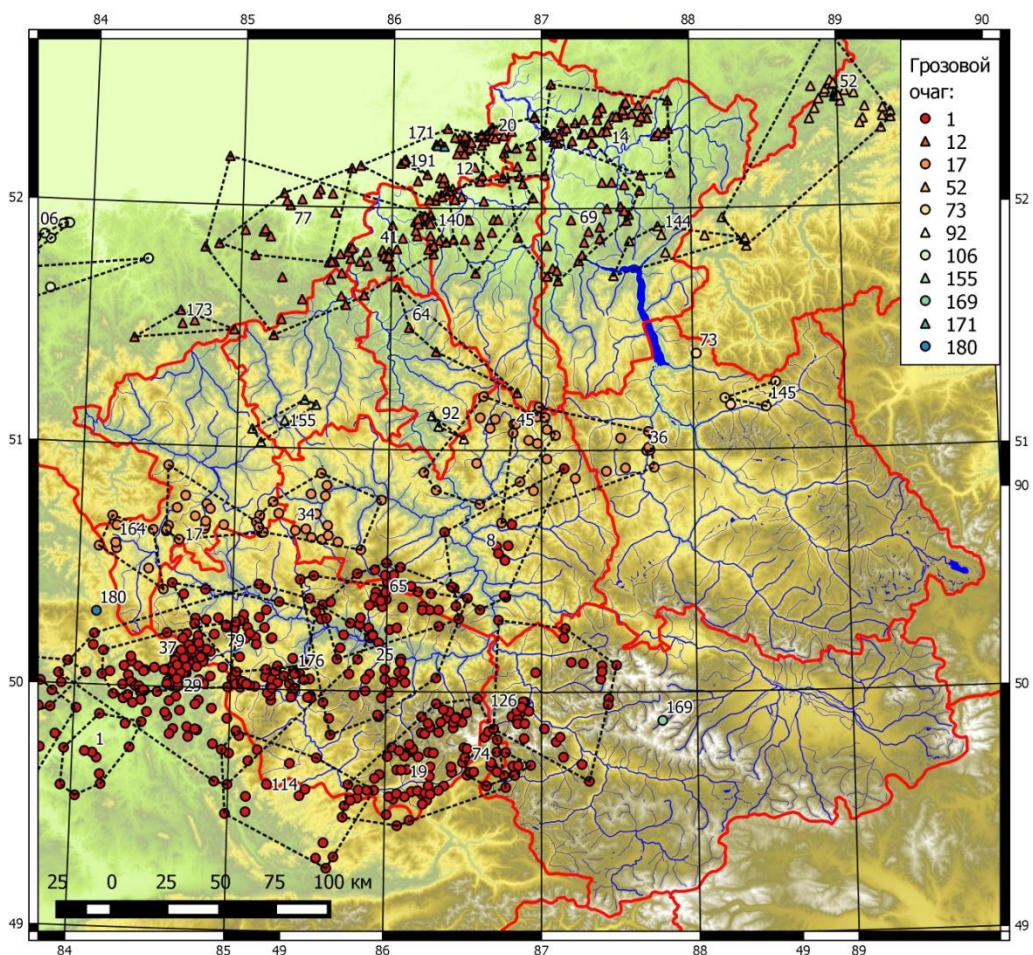


Рисунок 2. Пример некоторых классов молниевых разрядов, зарегистрированных WWLLN 7–8 августа 2017 года на территории Республики Алтай. Условия параметризации грозовых кластеров: минимальные расстояния между разрядами 50 км и время – 30 мин

Авторы благодарят WWLLN, коллаборацию научных организаций и университетов, за возможность использовать для исследований молниевой активности данные этой сети.

### Литература

1. Шабанова С.Н., Каримов Р.Р., Козлов В.И., Муллаяров В.А. Характеристики грозовых ячеек по наблюдениям в Якутии // Метеорология и гидрология. 2012. № 12. С. 35–43.
2. Hutchins M.L., Holzworth R.H., Brundell J.B. Diurnal variation of the global electric circuit from clustered thunderstorms // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2014. Т. 119. №. 1. С. 620–629.
3. Kocheeva N.A., Chankibaeva M.H., Minaev A.I., Sukhova M.G., Modorov A.A. Occurrences on the Border of the Western Siberia Plains and Altai Mountains is accepted for publication // Journal of Environmental Management and Tourism. 2017. Vol. 8. P. 15–25.
4. Борисова И.А. Алгоритм таксономии FRiS-Tax // Научный вестник НГТУ. 2007. № 3. С. 3–12.

### АНАЛИЗ МОЛНИЕВОЙ АКТИВНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ АЛТАЕ-САЯНСКОГО РЕГИОНА ПО ДАННЫМ WWLLN ЗА 2011-2018 ГОДЫ

Н.А. Кочеева<sup>1</sup>, С.Ю. Каранина<sup>1</sup>, А.В. Каранин<sup>1</sup>, М.Ю. Беликова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Горно-Алтайский государственный университет», г. Горно-Алтайск  
krechetovas@yandex.ru

В последние годы для изучения пространственного и временного распределения гроз как в глобальном планетарном масштабе [1], так для решения региональных задач оценки территорий по степени грозоопасности [2], а также для оценки точности грозопеленгационных

систем [3], активно привлекаются данные Всемирной сети локализации гроз (World Wide Lightning Location Network, WWLLN).

На основе данных о молниевых разрядах, зарегистрированных сетью WWLLN (World Wide Lightning Location Network) проведен анализ пространственного и временного распределения молниевых разрядов на территории Алтае-Саянского региона за 2011–2018 гг. Сеть WWLLN расширяет информационную базу о молниевой активности на территориях, не охваченных наблюдениями сети гидрометеостанций в рассматриваемом регионе. Фактически данные WWLLN являются единственным источником постоянных во времени инструментальных измерений молниевой активности на юге Западной Сибири.

Территория исследования характеризуется разнообразием физико-географических условий, которые обусловлены многими причинами, главная из которых – горный рельеф. В горных регионах по сравнению с равнинами создаются условия для формирования дополнительных «местных» грозовых очагов кроме влияния фронтов [2].

Наблюдается увеличение числа молниевых разрядов с 2011 г, которое достигает максимума в 2017 году (рисунок 1). В течение летнего периода максимум молниевой активности отмечается в июле, однако в отдельные годы он может смещаться на июнь. Замечено, что в течение суток имеется два максимума числа грозовых разрядов: первый с 12 до 15 часов, второй с меньшими по средним величинам значениями формируется в 19 часов. Также в отдельные годы вечерний максимум по интенсивности разрядов сравним с первым дневным максимумом. По данным WWLLN в летний период выделяется серия дней с высокой интенсивностью молниевых разрядов, регистрируемых преимущественно в вечерний и ночной период. Молниевая активность таких дней, возможно связанная с прохождением фронтов, вносит основной вклад в формирование максимумов в летние месяцы.

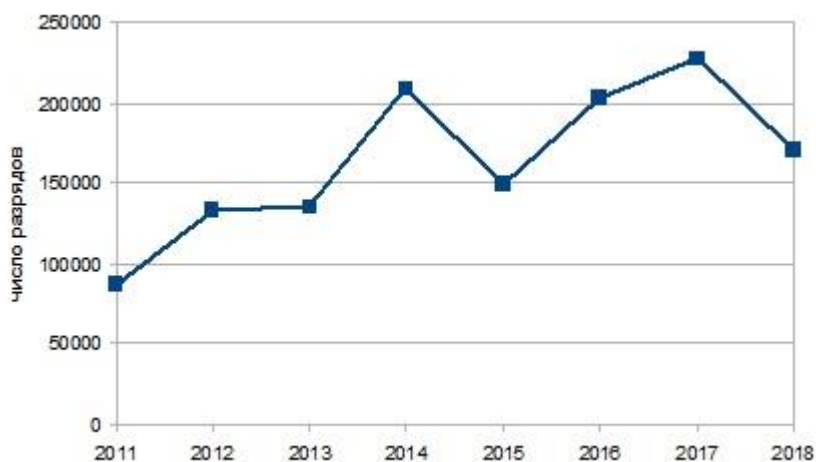


Рисунок 1. Ход молниевой активности в 2011–2018 гг.

Пространственное распределение молниевых разрядов характеризуется неравномерностью. Общий рисунок невысоких передовых хребтов Алтае-Саянской горной страны северного и северо-западного простирания (которые относятся к низкогорью-среднегорью) совместим с максимальной плотностью молниевых разрядов. Характерно то, что смена простирания хребтов с субмеридионального на субширотное совпадает с областями снижения плотности молниевых разрядов (рисунок 2). Наибольшая плотность молниевых разрядов (более 0,35 разрядов/км<sup>2</sup> в год) отмечается на территориях с высотами от 250 до 1500 м над уровнем моря, наименьшая (менее 0,15 разрядов/км<sup>2</sup> в год) – на территориях выше 2000 м над уровнем моря.

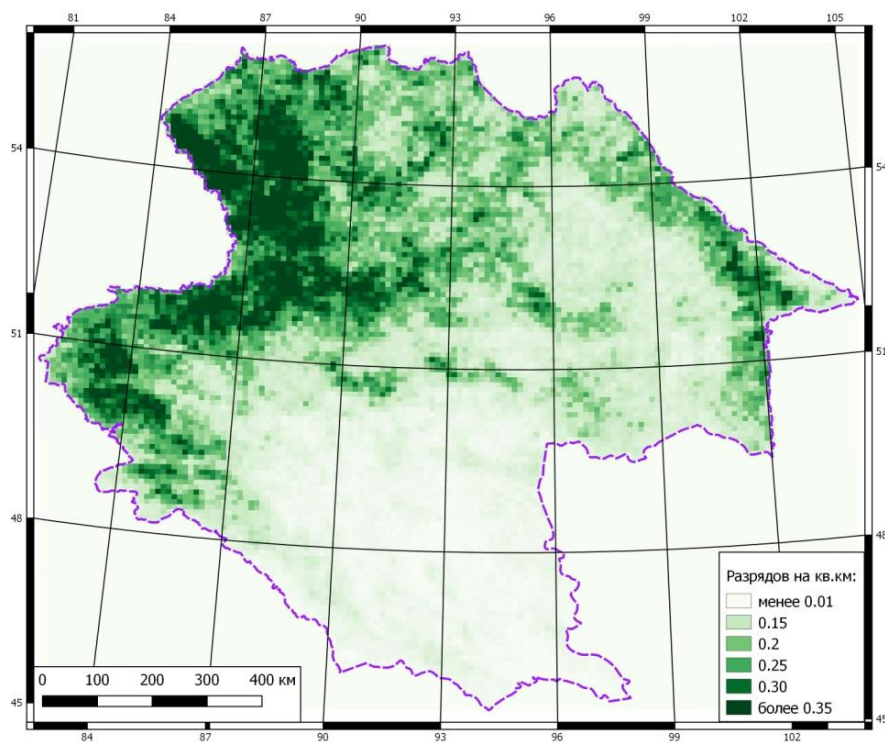


Рисунок 2. Среднегодовая плотность молниевых разрядов за 2011–2018 гг.

Выявленные закономерности пространственного и временного распределения молниевой активности на территории Алтае-Саянского региона уточняют и расширяют результаты аналогичных исследований, выполненных ранее на меньшем временном интервале [4], а также являются обоснованием для детализации распределения молний в границах горных регионов.

Авторы благодарны дирекции WWLLN под руководством профессора Роберта Холзворта за предоставленный архив данных о молниевой активности.

### Литература

- 1 Hutchins M.L., Holzworth R.H., Brundell J.B. Diurnal variation of the global electric circuit from clustered thunderstorms // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2014. Т. 119, № 1. С. 620–629.
- 2 Тарабукина Л.Д., Козлов В.И., Каримов Р.Р., Муллаяров В.А. Пространственное распределение разрядов в Северной Азии // *Метеорология и гидрология*. 2017. № 2. С. 20–29.
- 3 Мареев Е.А., Стасенко В.Н., Булатов А.А., Дементьева С.О., Евтушенко А.А., Ильин Н.В., Кутерин Ф.А., Слюняев Н.Н., Шаталина М.В. Российские исследования атмосферного электричества в 2011–2014 гг // *Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана*. 2016. Т. 52, № 2. С. 175–186.
- 4 Каранина С.Ю., Кочеева Н.А., Каранин А.В. Пространственное и временное распределение молниевых разрядов по территории Алтае-Саянского региона // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки*. 2017. № 4–1. С. 128–138.

## ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ И АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ ЗЕМЛИ

Л.В. Грунская<sup>1</sup>, В.В.Исакевич<sup>1,2</sup>, Д.В.Исакевич<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Владимирский государственный университет им. Н.Г.Столетова и А.Г.Столетова (ВлГУ), г. Владимир

<sup>2</sup>ООО «Собственный вектор»

grunsk@vlsu.ru, eigenoscope@yandex.ru

С использованием айгеноскопии – анализа амплитудных спектров собственных векторов матриц вторых начальных смешанных моментов на конечном интервале анализа (матриц плотности) многолетних временных рядов напряженности электрического поля Земли инфранизкочастотного диапазона (ИНЧ) на обширном экспериментальном материале выявлены

значимые по амплитуде компоненты вертикальной составляющей напряженности электрического поля Земли, спектрально локализованные на частотах, кратных частотам обращения 43-х релятивистских двойных звездных систем. Сформирована доказательная база, подтверждающая аномальное поведение выявленных компонент.

Работа по обнаружению в электрическом поле Земли сигналов на удвоенных частотах обращения РДЗС проводится во Владимирском государственном университете с 1999 года [1]. Удачным совпадением оказался тот факт, что мониторинг электрического и геомагнитного полей осуществляется на экспериментальном физическом полигоне ВлГУ именно в инфранизкочастотном диапазоне, соответствующем диапазону ГВ-частот РДЗС. Это позволило провести цикл экспериментальных исследований по достоверному обнаружению факта аномального поведения компонент вертикальной составляющей электрического поля, спектрально локализованных на частотах, кратных частотам обращения РДЗС, а также оценить амплитуду этих компонент.

Основа теории взаимодействия квазистатических электромагнитных полей с гравитационным излучением была заложена в работах [2–3]. Было показано, что периодическое гравитационное излучение приводит к формированию переменного электромагнитного поля, изменяющегося с частотой гравитационного излучения.

В качестве исходных данных использованы записи многолетних (30 лет) временных рядов вертикальной составляющей напряженности электрического поля приземного слоя атмосферы Земли, по данным трех станций Росгидромета – Воейково, Верхнее Дуброво, Душети, а также физического полигона кафедры общей и прикладной физики Владимирского государственного университета (ВлГУ).

В статье исследуется вертикальная составляющая напряженности электрического поля приземного слоя атмосферы Земли ( $E_z$ ) на частотах, кратных частотам обращения сорока трёх релятивистских двойных звездных систем (РДЗС-43), взятым из списка пульсаров и двойных звездных систем, составленного В. Дж. Джонстоном на основе источников [4]: J1614-2230; J1518+4904; J0621+1002; J1022+1001; J1518+0204B; J2145-0750; J2129-5721; J1603-7202; J0437-4715; J1732-5049; J1745-0952; J1045-4509; J1701-3006A; J1157-5112; J1614-2318; J1911-1114; J1804-0735; J2317+1439; J0024-7204H; J0024-7204E; J0218+4232; J1232-6501; J1834+0010; J0034-0534; J1909-3744; J1342+2822B; J1435-6100; J1740-5340; J1641+3627B; J1518+0204D; J0024-7204S; J0613-0200; J0024-7204Q; J1829+2456; J0024-7204T; J1701-3006D; J1518+0204E; J0700+6418; J1911-5958A; J2140-2310B; J1012+5307; J1641+3627D; J0024-7204Y.

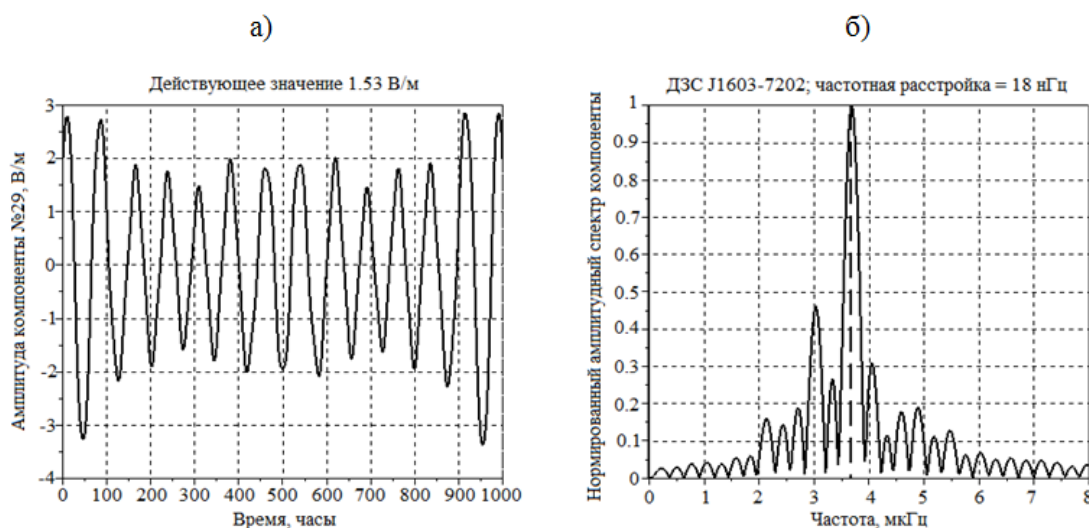


Рисунок. 1: а) некоррелированная компонента временного ряда  $E_z$  станции Воейково на интервале анализа 1000 часов с действующим значением 1,53 В/м, соответствующая собственному вектору №29 матрицы плотности временного ряда;

б) нормированный к своему максимальному значению амплитудный спектр компоненты, представленной на левом графике. Амплитудный спектр компоненты локализован вблизи удвоенной частоты обращения РДЗС J1603-7202 (0.1834642E-5Гц – частота обращения) с расстройкой 18 нГц (вертикальный пунктир – удвоенная частота обращения РДЗС)

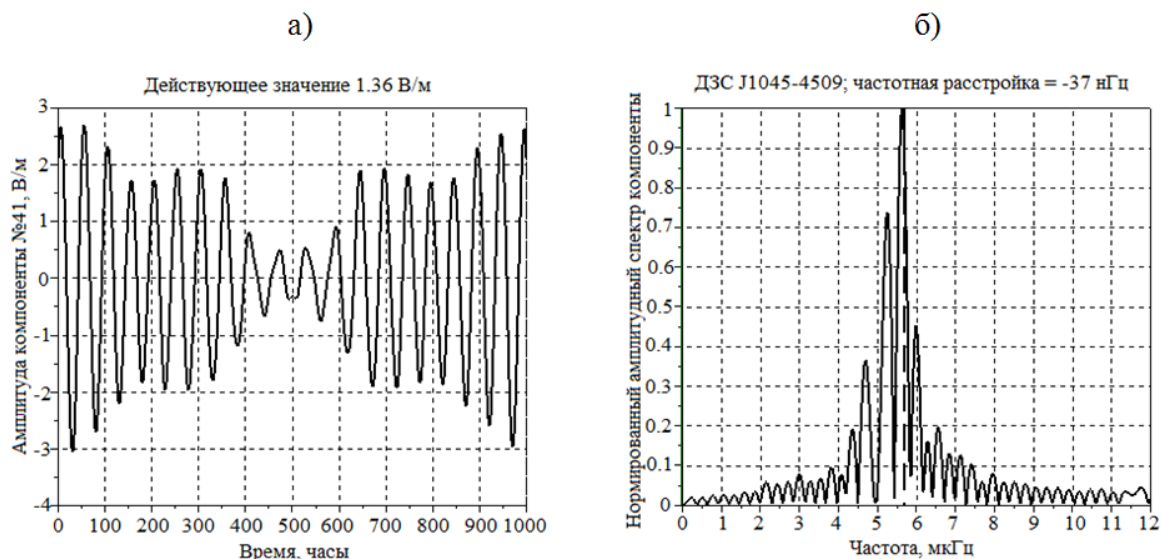


Рисунок. 2: а) некоррелированная компонента временного ряда  $E_z$  станции Воейково на интервале анализа 1000 часов с действующим значением 1,36 В/м, соответствующая собственному вектору №41 матрицы плотности временного ряда;  
 б) нормированный к своему максимальному значению амплитудный спектр компоненты (вертикальный пик), представленной на левом графике.  
 Амплитудный спектр компоненты локализован вблизи удвоенной частоты обращения РДЗС J1045-4509 (частота обращения –  $0.2834331E-5$  Гц) с расстройкой –37 нГц (вертикальный пик – удвоенная частота обращения РДЗС)

В качестве альтернативного анализатора по отношению к классическому спектроанализатору авторы использовали анализатор собственных векторов и компонент сигнала (АСВиКС) [5], получивший краткое наименование «Айгеноскоп». Айгеноскопия – подход к анализу временных рядов с помощью анализатора собственных векторов и компонент сигнала (айгеноскопа) с целью выявления некоррелированных спектрально локализованных составляющих, которые не могут быть выявлены с использованием классических методов спектрального анализа.

Рисунки 1 и 2 иллюстрируют вид некоррелированных компонент, соответствующих собственным векторам, амплитудные спектры которых спектрально локализованы вблизи удвоенных частот обращения ряда РДЗС из списка РДЗС-43.

Экспериментально установлен факт аномального поведения некооррелированных компонент вертикальной составляющей напряженности электрического поля в приземном слое атмосферы Земли, спектрально локализованных на частотах, кратных частотам обращения 43-х РДЗС.

### Литература

1. Грунская Л.В., Исакевич В.В., Виноградов Д.В. Поиск корреляций между электромагнитным полем Земли КНЧ диапазона и периодическими гравитационными полями // Известия ВУЗов, Физика. 2000. №6. С. 36–42.
2. Bocaletti D., De Sabatta V., Fortini P., Gualdi C. // NuovoCim. 1970. V 70, № 2. P. 129–146.
3. Гинзбург В.Л., Цитович В.Н. Переходное излучение и переходное рассеяние. М.: Наука. 1984. 360 с.
4. Australia Telescope National Facility Pulsar Group, 2004, «ATNF Pulsar Catalogue», Australia Telescope National Facility Pulsar Group, on line [<http://www.atnf.csiro.au/research/pulsar/psrcat/>].
5. Исакевич В.В., Исакевич Д.В., Грунская Л.В. Анализатор собственных векторов и компонент сигнала. Полезная модель РФ № 116242RU. Приоритет от 30 сентября 2011 года.

## УНИВЕРСАЛЬНАЯ СИСТЕМА СБОРА ДАННЫХ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ХАРАКТЕРИСТИК ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

*Л.В. Грунская<sup>1</sup>, А.Н. Золотов<sup>1</sup>, А.С. Бушуев<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Владимирский государственный университет им. Н.Г.Столетова и А.Г.Столетова (ВлГУ), г. Владимир  
grunsk@vlsu.ru

На кафедре общей и прикладной физики Владимирского государственного университета разработан компактный, переносной программно-аппаратный комплекс мониторинга характеристик природной среды (электрическое поле приземного слоя атмосферы, геомагнитное поле, метеоданные) [1–3].

Мобильная система мониторинга создана на основе комплекса на физическом полигоне ВлГУ для мониторинга характеристик природной среды, который создавался с 1972 года. Многолетний непрерывный мониторинг электрического и геомагнитного поля приземного слоя атмосферы в инфранизкочастотном диапазоне осуществляется с целью: изучения атмосферного электричества; обнаружения электромагнитных предвестников землетрясений; оценка гравитационного воздействия лунных приливов на электромагнитное поле Земли (ЭМПЗ); оценка гравитационно-волнового воздействия астрофизической природы; биофизическое влияние инфранизкочастотного ЭМПЗ на показатели здоровья человека. За 2010–2018 годы осуществлена модернизация приемно-регистрирующей системы мониторинга на физическом экспериментальном полигоне в связи с необходимостью обеспечения удаленного доступа к информации, получаемой с датчиков полигона, а также в связи с необходимостью обеспечения системы сбора данных отказоустойчивым промышленным компьютером и системой АЦП повышенной надежности. Разработанный и созданный программно-аппаратный комплекс мониторинга позволяет осуществлять сбор экспериментальных данных, их хранение, дистанционный просмотр и обработку. Для контроля работы система имеет возможность удаленного контроля параметров, а также доступ к базам данных по каналу GSM. В системе применяются промышленный компьютер, программируемый логический контроллер (ПЛК), встроенные и внешние АЦП компании Advantech, метеостанция, роутер, термостат, обогреватель, сетевой коммутатор, источник бесперебойного питания. Все элементы монтируются в герметичный шкаф, который имеет термостатирование. Комплекс имеет выход в глобальную сеть Интернет и доступ к удаленному рабочему столу, по которому осуществляется просмотр текущих, архивных данных и настройка системы. В отличие от имеющихся систем мониторинга разработанная система является переносной, мобильной.

Разработанная новая система мониторинга отвечает всем современным требованиям надежности, точности, универсальности. На рисунке 1 представлена компоновка системы мониторинга, на рисунке 2 – структура системы мониторинга характеристик природной среды на физическом экспериментальном полигоне ВлГУ.

Для промышленного контроллера разработано программное обеспечение (ПО) на языке Си под систему ROM-DOS. Основные выполняемые задачи разработанной программы: опрос всех подключенных датчиков системы, первичная обработка, фильтрация и передача данных на персональный компьютер (ПК). Универсальность системы заключается в том, что ПО ПЛК имеет встроенный модуль конфигурации, который с ПК может быть настроен под любые типы датчиков: аналоговые, подключенные через удаленные АЦП серии ADAM40XX и встроенные АЦП серии ADAM50XX и цифровых по интерфейсу RS485.

Новизна разработанного комплекса: удаленный доступ к базам данных и возможность контролировать параметр системы мониторинга, возможность использования системы на передвижных установках-мобильность, компактность. По сравнению с аналогом, реализуемая система может опрашивать датчики в реальном времени, а это необходимо для дальнейшей математической обработки. Другим отличительным признаком является универсальность, можно подключать любые датчики, предварительно настроив параметры через разработанное ПО. В отличие от аналога, разрабатываемая система должна иметь возможность базы данных визуализировать через сеть интернет.

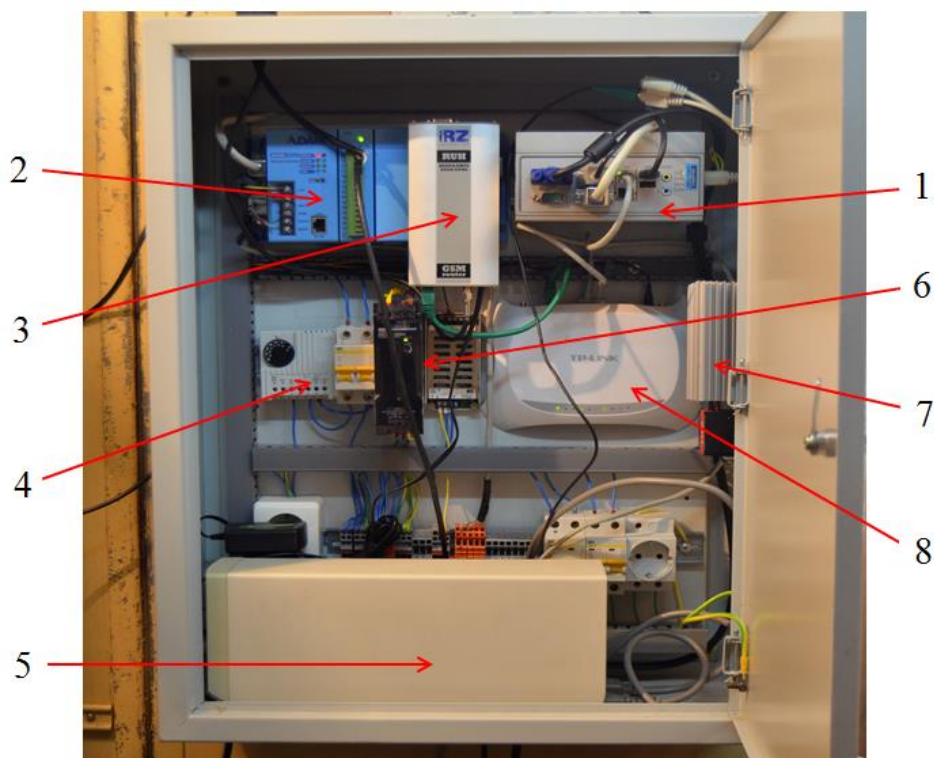


Рисунок 1. Система регистрации экспериментальной информации с датчиков физического полигона:  
 1 – промышленный компьютер; 2 – промышленный контроллер; 3 – GSM роутер; 4 – термостат; 5 – источник бесперебойного питания; 6 – блоки питания; 7 – сетевой коммутатор; 8 – обогреватель

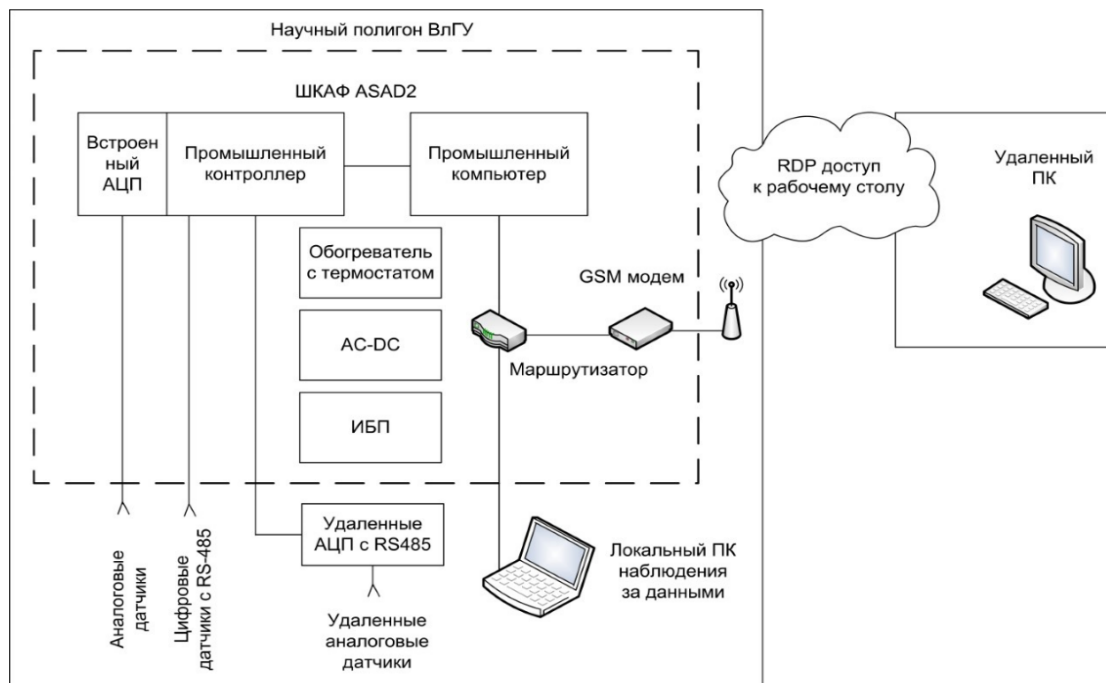


Рисунок 2. Структура системы мониторинга характеристик природной среды

Задачи мониторинга характеристик природной среды с целью исследования геофизических процессов требуют исследований в различных точках исследуемой территории и только мобильный переносной программно-аппаратный комплекс способен решить такие задачи. Удаленный телеметрический доступ необходим для управления, настройки и оперативного доступа к базам данных мониторинга.



## Литература

1. Грунская Л.В., Золотов А.Н., Бушуев А.С., Сныгина И.А., Лукьянов В.Е. Универсальная система удаленного сбора данных для мониторинга характеристик природной среды // Динамика сложных систем - XXI век, Изд.Радиотехника. 2018. №4. С. 4–10.
2. Грунская Л.В., Ефимов В.А. Приемно-регистрирующая аппаратура для исследования взаимосвязи электрического поля приземного слоя атмосферы с геофизическими процессами // Проектирование и технология электронных средств. 2006. № 1. С. 69 – 74.
3. Грунская Л.В., Морозов В. Н., Ефимов В. А., Золотов А.Н., Рубай Д. В., Закиров А. А. Мониторинг электромагнитных полей пограничного слоя атмосферы Земли // Монография, Издатель: Germany, LAP LAMBERT Academic Publishing. 2013. 192 с.

## КЛАССИФИКАЦИЯ ОТКЛИКОВ В ПРИЗЕМНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ НА ПРОХОЖДЕНИЕ ВНУТРИМАССОВЫХ КУЧЕВО-ДОЖДЕВЫХ ОБЛАКОВ

К.Н. Пустовалов<sup>1,2</sup>, В.А. Корольков<sup>1</sup>, П.М. Нагорский<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск  
const.pv@yandex.ru, kor@imces.ru, npm\_sta@mail.ru

Известно, что при прохождении кучево-дождевых облаков (*Cb*) отмечаются интенсивные изменения как величины, так и знака градиента потенциала электрического поля ( $\nabla\varphi$ ) в приземном слое атмосферы [1, 2]. Проведённый ранее анализ медленных вариаций градиента потенциала электрического поля под воздействием *Cb* различного происхождения позволил выявить многообразие форм этих вариаций и их связь с особенностями структуры *Cb* [3–5]. Наиболее простыми проявлениями кучево-дождевых облаков в природе являются внутримассовые *Cb*, как правило, представленные одиночными изолированными конвективными ячейками [6]. В связи с этим, большую важность имеет выявление наиболее встречающихся форм медленных вариаций  $\nabla\varphi$  под воздействием изолированных внутримассовых кучево-дождевых облаков, а также исследование временной структуры этих вариаций и её связи с характеристиками *Cb*.

На основе проведённых экспериментальных и теоретических исследований, детально описанных в [7], а также анализа результатов других авторов была разработана классификация форм медленных вариаций  $\nabla\varphi$  под воздействием изолированных внутримассовых *Cb*, связывающая форму вариаций градиента потенциала как со стадией развития кучево-дождевого облака, так и с наклоном его электрической структуры (главного диполя). При этом допускалось, что нижний положительный заряд *Cb* отсутствует или очень мал, влияние верхнего экранирующего отрицательного заряда на приземное электрическое поле несущественно, пункт измерения находится вблизи траектории движения *Cb*, а за время прохождения в окрестностях пункта в электрической структуре облака не происходит сильных изменений.

Для выделения форм отклика, соотносимых с отдельными стадиями *Cb* и особенностями наклона его электрической структуры, были использованы критерии (таблица 1), определяемые как количеством и порядком смены возмущений электрического поля ( $d_n$ ), так и соотношением средних значений  $\nabla\varphi$  в пределах возмущений ( $V_{dn}$ ) между собой и с граничными значениями  $B_0, B_1, B_2$ , где  $B_0$  – невозмущённое значение  $\nabla\varphi$  ( $B_0 \sim 150$  В/м),  $B_1 = B_0 - s$ ,  $B_2 = B_0 + s$ , а  $s$  – пороговый сдвиг, принимаемый равным 450 В/м.

**Критерии выделения форм отклика для отдельных этапов развития Сб**

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

Схема классификации форм медленных вариаций градиента потенциала электрического поля под воздействием одиночек Сб изображена на рисунке 1.

Группы I–V (рисунок 1) представляют возможные формы отклика  $\nabla\phi$  на основные стадии развития и их отдельные этапы. Так, в группу I вошли формы отклика в  $\nabla\phi$  конвективной ячейки, находящейся в стадии роста; в группу II – на раннем этапе стадии зрелости («ливневая стадия Сб»); в группу III – на промежуточном этапе стадии зрелости («подстадия инверсии электрической структуры Сб»); в группу IV – на позднем этапе стадии зрелости («грозовая стадия Сб»); в группу V – в стадии диссипации (разрушения).

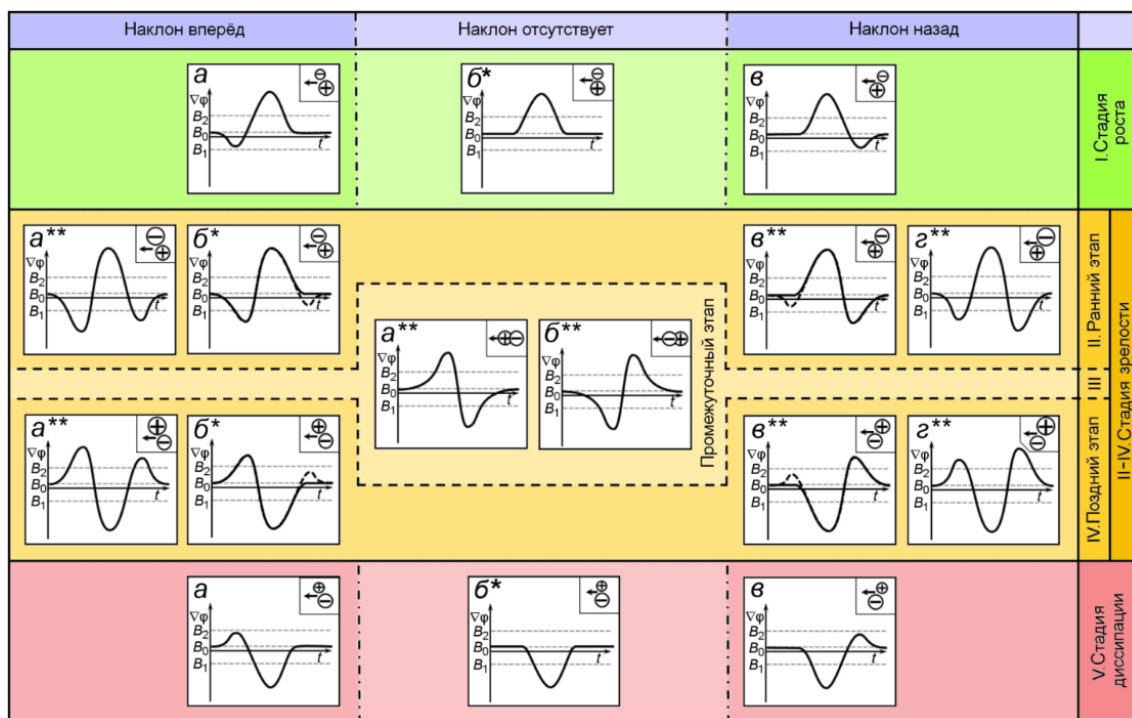


Рисунок 1. Схема форм медленных вариаций градиента потенциала электрического поля в зависимости от стадии развития изолированного внутримассового кучево-дождевого облака и наклона облачного диполя. На схеме: «» – данная форма вариаций  $\nabla\phi$  выделялась другими авторами, а «\*\*» – эта форма динамики  $\nabla\phi$  качественно напоминает форму, выделенную другими авторами, однако имеет специфические особенности, не отмечаемые ранее

Разнесение иконок форм медленных вариаций  $\nabla\phi$  влево и вправо относительно центра связано с наклоном «главного диполя» Сб соответственно вперёд и назад относительно направления движения. Расположения главных положительных и отрицательных объёмных

зарядов и их относительные величины схематически изображены кружками с символами «+» и «-» соответственно, а направление перемещения диполя – стрелкой.

Разграничение стадий развития кучево-дождевого облака является качественным и определяется пороговыми значениями  $\nabla\varphi$  ( $B_1$  и  $B_2$ ), вычисляемыми на основе невозмущённого значения  $\nabla\varphi$  ( $B_0$ ) и величины порогового сдвига ( $s$ ), которые зависят от физико-географического региона и должны быть подобраны эмпирически.

Разработанная классификация может быть использована для диагностирования  $Sb$  в их наиболее опасной стадии на основе отклика в приземном электрическом поле и реализована, в том числе, в современных автоматических системах метеорологического мониторинга.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках ФЦП ИР (соглашение № 14.607.21.0205 уникальный идентификатор ПНИ RFMEFI60718X0205).

### Литература

1. *Bennett A.J., Harrison R.G.* Atmospheric Electricity in Different Weather conditions // *Weather*. 2007. V. 62. P. 277–283.
2. *Попов И.Б.* Статистические оценки влияния различных метеорологических явлений на градиент электрического потенциала атмосферы // *Труды ГГО*. 2008. № 558. С. 152–161.
3. *Филиппов А.Х.* Грозы Восточной Сибири. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 75 с.
4. *Toropov A.A., Kozlov V.I., Mullayarov V.A., Starodubtsev S.A.* Experimental observations of strengthening the neutron flux during negative lightning discharges of thunderclouds with tripolar configuration // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2013. V. 94. P. 13–18.
5. Электрические процессы в приземном слое атмосферы под воздействием факторов конвективного происхождения: автореф. дис. канд. физ.-мат. наук: 25.00.29 / К. Н. Пустовалов. Томск. 2018. 23 с.
6. *Шметер С. М.* Термодинамика и физика конвективных облаков. Л.: Гидрометеиздат. 1987. 287 с.
7. *Pustovalov K.N., Nagorskiy P.M.* Response in the surface atmospheric electric field to the passage of isolated air mass cumulonimbus clouds // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2018. V. 172. P. 33–39.

### ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ПРИЗЕМНОЙ АТМОСФЕРЫ ВО ВРЕМЯ ИНТЕНСИВНЫХ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ НА ТЕРРИТОРИИ СИБИРИ

*К.Н. Пустовалов<sup>1,2</sup>, М.В. Кабанов<sup>1</sup>, П.М. Нагорский<sup>1,2</sup>, С.В. Смирнов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск

<sup>2</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск  
const.pv@yandex.ru, kabanov@imces.ru, npm\_sta@mail.ru, smirnov@imces.ru

Известно, что при прохождении облаков, особенно осадкодающих форм, и различных атмосферных явлений наблюдается искажение электрического поля в приземном слое атмосферы, характерного для условий «хорошей погоды» [1]. Согласно [2, 3], значимое влияние на величину электрического поля и его динамику оказывают также дымы от лесных пожаров. Однако, проведённые исследования основываются на единичных случаях и не дают репрезентативных количественных оценок влияния данного фактора на электрическое состояние приземного слоя. Цель данного исследования: количественная оценка влияния дымовых шлейфов от интенсивных лесных пожаров на территории Сибири на атмосферное электрическое поле на основе большого числа случаев.

Для решения поставленной цели были использованы среднeminутные данные градиента потенциала электрического поля ( $\nabla\varphi$ ) за период 2006–2016 гг., полученные на геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН (г. Томск) с помощью флюксметра «Поле-2», а также данные за соответствующий период спектрорадиометров MODIS (спутники Terra и Aqua), VIIRS (спутник Suomi NPP) [4] и метеорологических наблюдений в стандартные сроки на ГМС «Томск» [5], расположенной ~6 км от ИМКЭС СО РАН.

На основе спутниковых изображений, полученных во время дневных пролётов спутников (12:00–14:30), были выделены случаи прохождения над г. Томском дымовых шлейфов от лесных пожаров в Сибири. При отборе учитывались случаи прохождения дымового шлейфа как в виде плотной струи, так и в виде тонкой пелены (рисунок 1). Всего за период с 2006 по 2016

гг. на основе спутниковых данных выделено 77 случаев прохождения дымового шлейфа над Томском. В подавляющем большинстве выделенных случаев источники лесных пожаров располагались на большом расстоянии от пункта исследования. Далее, на основе данных ГМС «Томск» в ближайшие после пролётов спутников сроки, из выделенных случаев исключались те, во время которых в пункте исследования отмечалось прохождение *Cb*, *Ns*, *St*, *Sc*, *Ci* и *As* облаков, а также связанных с ними атмосферных явлений. В результате фильтрации было отобрано 65 случаев.

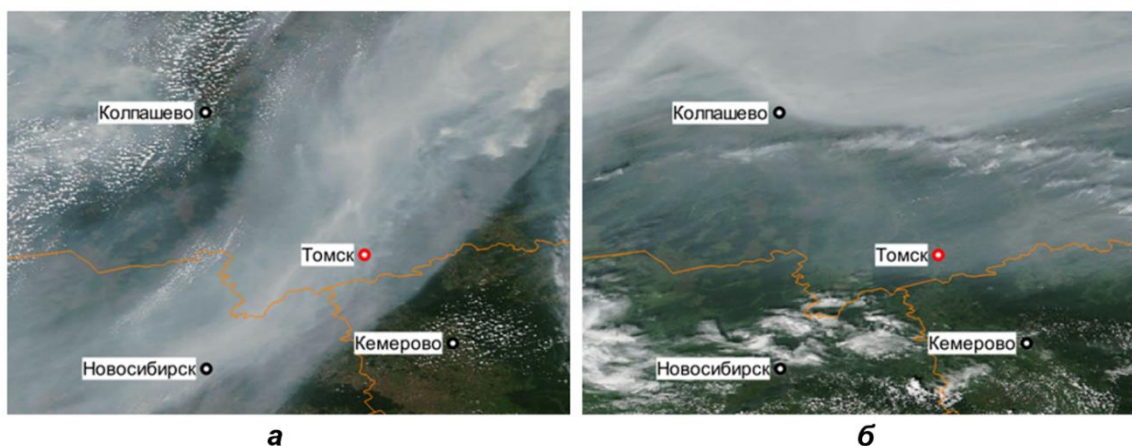


Рисунок 1. RGB-изображения дымовых шлейфов в виде струи и пелены над г. Томском по данным Aqua за 06:55 UTC 25.07.2012 г. (а) и Suomy NPP за 06:35 UTC 23.07.2016 г. (б)

Для отобранных случаев в интервалы времени, соответствующие  $\pm 30$  минут относительно моментов пролётов спутников, были выделены вариации  $\nabla\varphi$  и проведён их статистический анализ. Кроме того, анализировалась динамика метеорологических величин в пункте исследования, в том числе горизонтальная дальность видимости.

Анализ выделенных вариаций  $\nabla\varphi$  показал следующее. Распределение значений  $\nabla\varphi$  при прохождении дымового шлейфа над г. Томск отличается от аналогичного распределения при невозмущённых атмосферных условиях, характеризующихся отсутствием любой облачности и атмосферных явлений: само распределение становится более островершинным, а его мода сдвинута в сторону нулевых значений (рисунок 2).

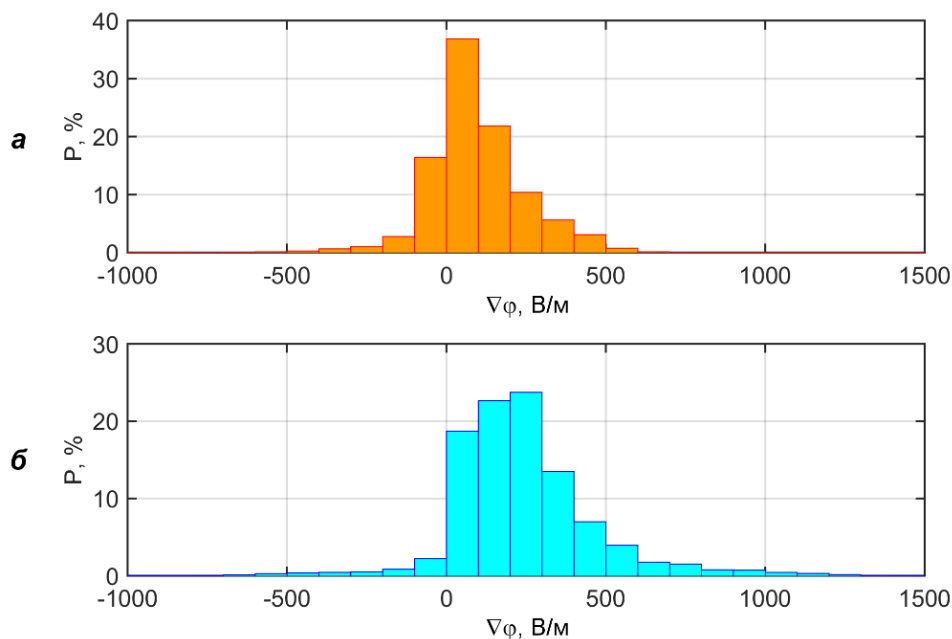


Рисунок 2. Распределение значений  $\nabla\varphi$  при прохождении дымового шлейфа (а) и при невозмущённых атмосферных условиях (б) в Томске за 2006–2016 гг.

Медианная величина  $\nabla\varphi$  при прохождении дымового шлейфа в 3 раза меньше аналогичной величины при отсутствии облачности и атмосферных явлений. При этом полный и интерквартильный размах значений  $\nabla\varphi$  под воздействием дымов от лесных пожаров соответственно в 1,9 и 1,4 раз меньше, чем при невозмущённых условиях.

Таблица 1

**Медиана ( $Me$ ), интерквартильный размах ( $IQR$ ), а также минимальные и максимальные значения  $\nabla\varphi$  при  $\alpha = 0,05$  ( $q_{(0,025)}$  и  $q_{(0,975)}$ ) при прохождении дымовых шлейфов и при невозмущённых атмосферных условиях (в В/м)**

Атмосферные условия	$Me$ , В/м	$IQR$ , В/м	$q_{(0,025)}$ , В/м	$q_{(0,975)}$ , В/м
Прохождение дымового шлейфа	70	170	-100	390
Невозмущённая атмосфера	210	230	-140	800

Противоречие полученных результатов выявленным зависимостям  $\nabla\varphi$  от смогового аэрозоля [2] можно объяснить следующим. Согласно ГМС «Томск», горизонтальная дальность видимости в 89% случаев составляла 10–20 км и лишь в 11% случаев падала до 2–4 км, то есть регистрировалась мгла. Исходя из этого, следует заключить, что дым распространялся преимущественно в средней и верхней тропосфере, создавая приподнятый над землёй аэрозольный слой. Нижняя часть этого слоя, по-видимому, имела отрицательный объёмный заряд, что обусловило понижение  $\nabla\varphi$  в приземном слое.

Таким образом, дымы от удаленных лесных пожаров приводят к троекратному понижению  $\nabla\varphi$  и уменьшению его дисперсии одновременно над большими территориями. Учёт этого фактора в моделях ГЭЦ особенно важен в связи со значительным учащением лесных пожаров в северной Евразии, наблюдаемыми в начале XXI века.

### Литература

1. Bennett A.J., Harrison R.G. Atmospheric Electricity in Different Weather conditions // Weather. 2007. V. 62. P. 277–283.
2. Пхалагов Ю.А., Ужегов В.Н., Панченко М.В., Ипполитов И.И. Электрооптические связи в атмосфере в условиях дымового смога / Оптика атмосферы и океана. 2006. Т. 19, № 10. С. 861–864.
3. Ипполитов И.И., Кабанов М.В., Нагорский П.М., Пхалагов Ю.А., Смирнов С.В. Суточные вариации напряженности электрического поля в дымах от лесных // Доклады Академии наук. 2013. Т. 453, № 2. С. 207–210.
4. EOSDIS Worldview [Электронный ресурс]. – URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov/> (дата обращения: 14.02.2019).
5. ВНИИГМИ-МЦД [Электронный ресурс]. – URL: <http://meteo.ru/> (дата обращения: 18.02.2019).

### ВАРИАЦИЯ ГРОЗОВЫХ РАДИОШУМОВ В 24-ОМ СОЛНЕЧНОМ ЦИКЛЕ

*В.И. Козлов, А.А. Корсаков, Л.Д. Тарабукина*

Институт космофизических исследований и аэронауки им. Ю.Г. Шафера СО РАН, г. Якутск  
vkozlov@ikfia.ysn.ru

В г. Якутск с 2009 года в непрерывном режиме проводится регистрация амплитудно-фазовых вариаций сигналов Радиотехнической системы дальней навигации РСДН-20 («Альфа») на частотах 11,9, 12,6 и 14,9 кГц и интенсивности радиошума на этих частотах в полосе 372 Гц в промежутках между радиоимпульсами посылок навигационных станций. Функцию распространения ОНЧ сигналов в азиатском регионе при приеме на вертикальную электрическую антенну представим в виде среднегеометрических значений амплитуд станций Новосибирск (в основном широтная трасса) и Хабаровск (в основном меридиональная трасса). Протяженность радиотрассы Новосибирск – Якутск составляет 2640 км, а Хабаровск – Якутск – 1400 км. Дневным условиям распространения ОНЧ сигнала на указанных радиотрассах соответствует интервал 3–7 UT, а ночным – 16–17 UT. Вариации амплитуды сигналов

радиостанций на частоте 14,9 кГц, принимаемых в Якутске в летний и зимний периоды 2009–2017 гг. представлены на рисунке 1.

Вариации амплитуды радиостанций между минимумом и максимумом солнечной активности (СА) в летний период:  $1,3 \pm 0,7$  дБ (день),  $1,5 \pm 0,7$  дБ (ночь); в зимний период:  $7 \pm 2$  дБ (день),  $6 \pm 1,5$  дБ (ночь). Максимум СА наблюдался в 2014–2015 гг., а минимум в 2009 и 2018 гг. Это соответствует [1], где указывается, что в максимуме СА уровень сигналов радиостанций, регистрируемых в полдень на низких и средних широтах для протяженных радиотрасс, примерно на  $0,3 \pm 0,1$  дБ/1000 км больше, чем в минимуме. Вариация интенсивности радишума на частоте 14,9 кГц (в полосе 372 Гц), регистрируемого в Якутске в летний и зимний периоды 2009–2017 гг. представлена на рисунке 2.

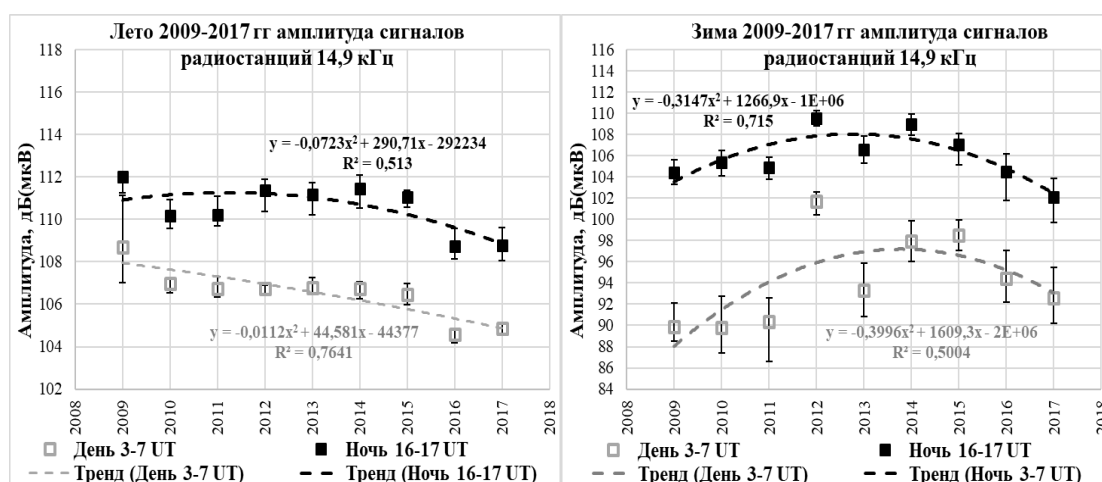


Рисунок 1. Вариации амплитуды сигналов радиостанций на частоте 14,9 кГц, принимаемых в Якутске в летний и зимний периоды 2009–2017 гг.

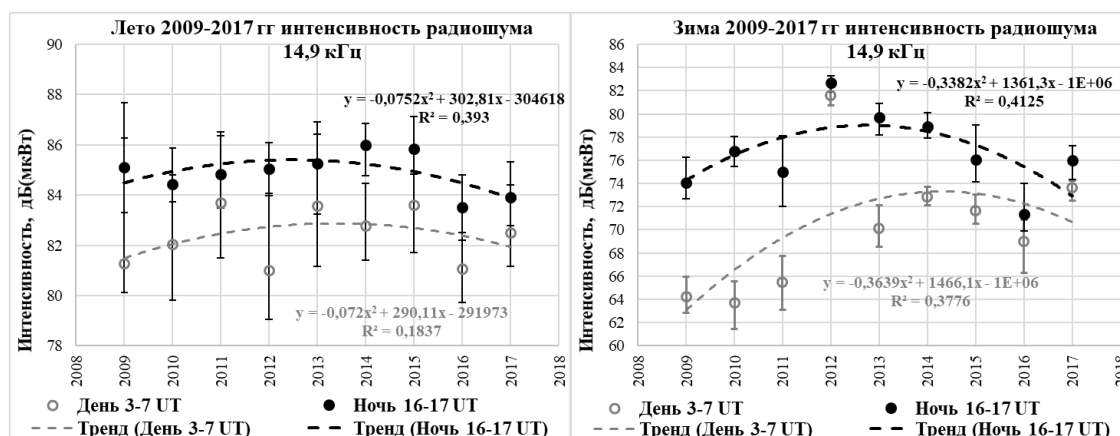


Рисунок 2. Вариация интенсивности радишума в полосе 372 Гц на частоте 14,9 кГц, регистрируемого в Якутске в летний и зимний периоды 2009–2017 гг.

Основным источником ОНЧ радишума в летний период является грозовая активность в Северной Азии (40–80 с.ш., 60–180 в.д.). Основной источник зимой – грозы северной Индии и Китая. 16–17 UT соответствует ночному уменьшению затухания ОНЧ при распространении в волноводе Земля – ионосфера.

Радиотрассу Новосибирск – Якутск можно считать частью трассы распространения грозовых радиосигналов от северной Индии до Якутска. Сигналы радиостанции Хабаровск принимаются в Якутске с близкого направления для радишумов гроз Южного Китая. Поделив значения регистрируемых вариаций интенсивности радишума на значения амплитуды

сигналов радиостанций, получим вариации интенсивности радишума с учетом функции распространения (рисунок 3). Следует отметить нарастание в 2009–2017 гг. интенсивности радишума особенно в летний период (местная грозовая активность – Северная Азия). Нарастание интенсивности составило: 4 дБ (3–7 UT) и 1,6 дБ (16–17 UT). На рисунке 4 представлено суммарное количество грозовых разрядов по территории Северной Азии за три летних месяца. Используются данные многопунктовой мировой сети локализации молний (WWLLN), один из пунктов которой установлен в г. Якутск. Здесь же представлено суммарное количество разрядов (16–17 UT) по территории двух регионов Южной Азии: северная Индия (17–36 с.ш., 68–94 в.д.) и Южный Китай (10–33 с.ш., 94–126 в.д.) за три зимних месяца.

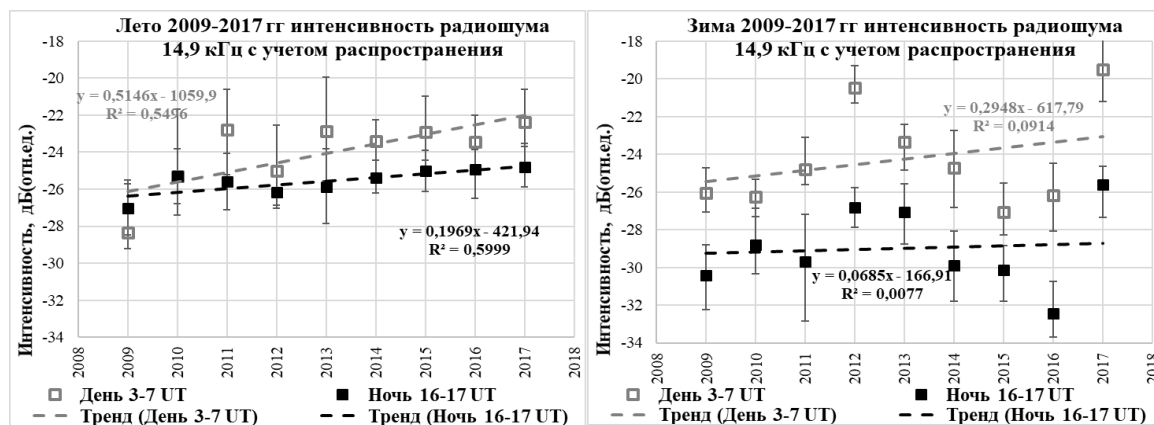


Рисунок 3. Вариация интенсивности радишума на частоте 14,9 кГц (в полосе 372 Гц), регистрируемого в Якутске летом и зимой 2009–2017 гг. с учетом функции распространения

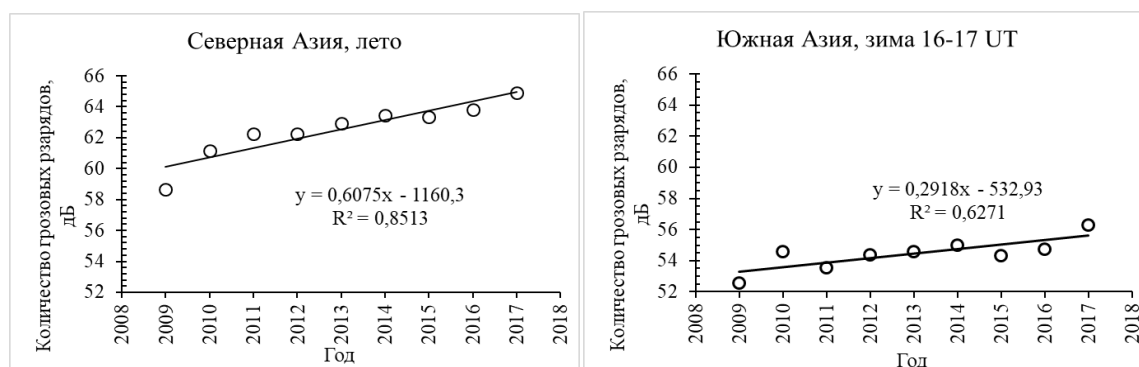


Рисунок 4. Суммарное количество разрядов по территории Северной Азии (40–80 с.ш., 60–180 в.д.) за три летних месяца и двух регионов Южной Азии: северная Индия (17–36 с.ш., 68–94 в.д.) и Южный Китай (10–33 с.ш., 94–126 в.д.) за три зимних месяца

Отметим, что по данным сети WWLLN отмечается рост суммарного количества грозовых разрядов с 2009 по 2017 гг.: в Северной Азии (40–80 с.ш., 60–180 в.д.) – летом на 5 дБ, в Южной Азии – зимой на 2,3 дБ, как и по нашим наблюдения по ОНЧ грозовым радишумам.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ № 18-45-140028 р\_а, № 18-35-00215 мол\_а (исследование грозовой активности) и бюджетной темы П.16.2.1. (номер госрегистрации № АААА-А17-117021450059-3).

### Литература

1. Thomson N.R., Clilverd M.A. Solar cycle changes in daytime VLF subionospheric attenuation // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2000. V. 62. Issue 7. P. 601–608.

## ФОРМИРОВАНИЕ ИНТЕНСИВНЫХ ГРОЗ В ЯКУТИИ В ГОДЫ ЧАСТЫХ АТМОСФЕРНЫХ БЛОКИРУЮЩИХ ПРОЦЕССОВ В ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

*Л.Д. Тарабукина<sup>1</sup>, О.Ю. Антохина<sup>2</sup>, Н.К. Кононова<sup>3</sup>, В.И. Козлов<sup>1</sup>, Д.Е. Иннокентьев<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Институт космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера СО РАН, г. Якутск

<sup>2</sup>Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, г. Томск

<sup>3</sup>Институт географии РАН, г. Москва

tarabukina@ikfia.ysn.ru, ninakononova@yandex.ru

Как было показано в [1], существуют качелеобразные межгодовые колебания пространственного распределения летних осадков в Сибири, когда суммарные за лето осадки в Западной Сибири варьируют в противофазе с осадками в Восточной Сибири. В работе [2] такие колебания объясняются атмосферным блокированием. Схожий эффект «качелей» наблюдается в межгодовых вариациях гроз в регионах Сибири [3].

Вариации суточного количества грозных разрядов оценивались с помощью систем грозолокации, регистрирующих радиоимпульсы очень низкочастотного диапазона (сферики), излучаемые грозными разрядами: многопунктовая система World wide lightning location network (WWLLN) (с 2009 г.), однопунктовый грозопеленгатор-дальномер (до 2016 г.; 200–1200 км), однопунктовый грозопеленгатор StormTracker (Voltek Co.) (с 2009 г.; до 480 км). Дни с интенсивными грозами выделялись по уровню 0,7 от максимального суточного количества молний за летний сезон, а дни с минимальной – 0,3.

Для описания атмосферной циркуляции Северного полушария использована типизация Б.Л. Дзердзеевского. Выделяется четыре группы циркуляции: зональная, нарушение зональности, меридиональная северная, меридиональная южная, включающие 13 типов и 41 элементарный циркуляционный механизм (ЭЦМ) [4]. Каждому ЭЦМ соответствует определенная динамическая схема путей перемещения циклонов и мест стационарирования антициклонов. Данные получены с сайта [5].

Метеорологические условия описывались на основе данных реанализа ERA-interim. Блокирующий процесс представляет собой соединение арктического антициклона с субтропической полосой повышенного давления, в результате чего блокируется перемещение циклонов с запада на восток. В зависимости от конфигурации поля давления выделяют два основных их типа [6, 7]: монополюсный и дипольный. Монополюсный блокинг (Омега,  $\Omega$ ) представляет собой усилившийся гребень высокого давления, у основания которого с обеих сторон расположены атмосферные ложбины. Дипольный блокинг (Рекс, Rex) состоит из блокирующего антициклона в северной части области блокирования и циклона в южной. Идентификация блокингов производилась по методике, основанной на работах [6, 7], по инверсии градиента высот геопотенциала на уровне 500 гПа и полю потенциальной температуры. Рассматривалось влияние блокингов, образующихся в интервале долгот  $70 \pm 5^\circ$  в.д. и  $125 \pm 5^\circ$  в.д. по срезам  $40-60^\circ$  с.ш., на грозы Якутии в июле.

Вариации приращений от года к году количества молний, как суммарно по всей Якутии (рисунок 1а, линия 3), так и в её центральной части, коррелируют (0,56) с вариациями, наблюдаемыми в юго-восточной части Северной Азии (рисунок 1а, линия 1) и отрицательно (-0,84) коррелируют с вариациями в Западной Сибири (рисунок 1а, линия 2).

Отмечено, что интенсивные грозы чаще всего развивались на границе между циклоном и антициклоном и в отсеченных циклонах. Выявлены ЭЦМ по методике Дзердзеевского, соответствующие интенсивным грозам в Якутии: 13л (южная мер. цирк.), 12а, 12бл, 9а, 8а, 10б (сев. мер. цирк.), 3, 6 (зональная циркуляция над территорией Евразии). В основном сильные грозы соответствовали выходу циклонов юго-западного и западного направления (~81% случаев интенсивных гроз), остальные интенсивные грозы – северо-западного направления. Выход южного циклона над Тихим океаном и с монгольской ветви полярного фронта способствует затокам в его тылу арктического воздуха и формированию блокирующего процесса над Западной и Средней Сибирью. Как показано в [8], в июле 2013 г. (который характеризовался частыми блокингами в Сибири, рисунок 1б) траектория движения циклонов в восточной части при длительном блокировании в Западной Сибири имеет в основном меридиональную компоненту, развиваясь над юго-западной Якутией и через центральную Якутию дальше на север. Однако в целом вероятность возникновения интенсивных гроз уменьшается из-за ограничения путей перемещения циклонов, и грозная активность за сезон падает. Так, например, произошло в 20-х числах июля 2013 г., когда



длительный блокирующий антициклон заполнил пространство до северо-запада Якутии. Перемещение циклонов с запада и северо-запада соответствует западному переносу, который преобладает в годы низкой частоты возникновения блокингов. Такая картина соответствует повышению частоты ЭЦМ 13л в 2017 г., при котором на северных широтах формируется циклоническая деятельность, а на территории Сибири преобладает западный перенос.

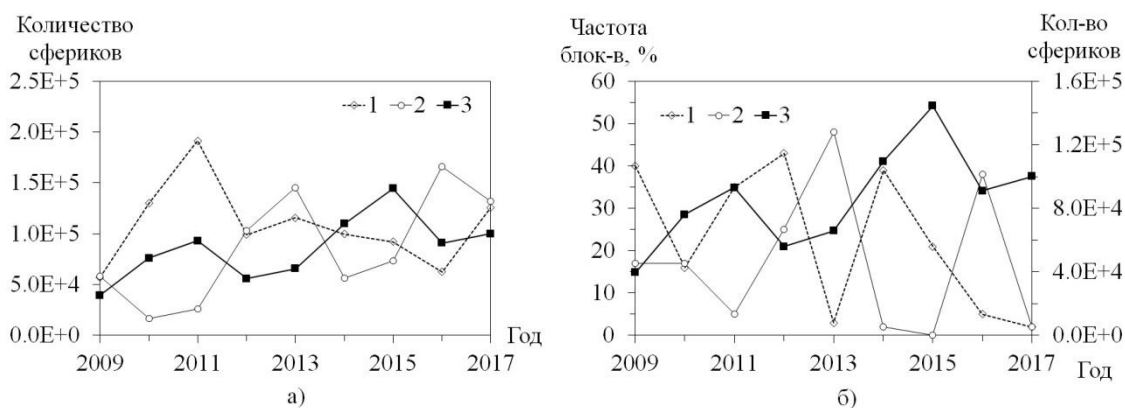


Рисунок 1: а) Суммарное за июль количество грозовых разрядов по WWLLN в трех регионах: 1 – 120–130 в.д., 40–55 с.ш.; 2 – 65–75 в.д., 47–62 с.ш.; 3 – 1200 км вокруг г. Якутска; б) Частота атмосферных блокирований в интервалах долгот: 1 – 120–130 в.д.; 2 – 65–75 в.д. Количество молний в Якутии – линия 3

Работа поддержана РФФИ (проект № 18-35-00215). Поддержка используемого экспериментального оборудования осуществляется в рамках бюджетной темы П.16.2.1. (номер госрегистрации № АААА-А17-117021450059-3). Данные по атмосферной циркуляции – согласно программе фундаментальных исследований ИГ РАН, проект № 0148-2019-0009.

### Литература

1. Fukutomi Y., Masuda K., Yasunari T. The role of storm track activity in the interannual seesaw of summer precipitation over northern Eurasia // Journal of Geophysical Research. 2004. V. 109. D02109.
2. Antokhina O.Yu., Antokhin P.N., Martynova Yu.V., Mordinov V.I. The impact of atmospheric blocking on spatial distributions of summertime precipitation over Eurasia // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2016. V. 48. P. 012035.
3. Tarabukina L., Kozlov Vladi V. Spatial and temporal distribution of lightning strokes over North Asia and its comparison with solar activity variations in 2009-2016 // Solar-Terrestrial Physics. 2017. V. 3, №. 2. P. 65–69.
4. Кононова Н.К. Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б.Л. Дзердзеевскому. М.: Воентехиниздат, 2009. 372 с.
5. Колебания циркуляции атмосферы северного полушария в XX – начале XXI века. Институт географии РАН. – URL: <http://atmospheric-circulation.ru> (дата обращения 07.03.2019).
6. Tibaldi S., Molteni F. On the operational predictability of blocking // Tellus A. 1990. T. 42, №. 3. С. 343–365.
7. Lejenäs H., Oakland H. Characteristics of Northern Hemisphere blocking as determined from long time series of observational data // Tellus A. 1983. V. 35. P. 350–362.
8. Латышева И.В., Лоценко К.А., Шахаева Е.В., Сметанин Г.С. Циркуляционные особенности аномальных погодных явлений на территории России летом 2013 г. // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2013. Т. 6, №. 2. С. 125–137.

### К ВОПРОСУ О ПРИРОДЕ ЗИМНИХ ГРОЗ НА КАМЧАТКЕ

С.Э. Смирнов<sup>1</sup>, Ю.М. Михайлов<sup>2</sup>, Г.А. Михайлова<sup>2</sup>, О.В. Капустина<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ИКИР ДВО РАН, п. Паратунка, Камчатский край

<sup>2</sup> ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк  
sergey@ikir.ru, yumikh@izmiran.ru

Зимние грозы на п/о Камчатка – очень редкое метеорологическое явление, которое наблюдается, по одним данным, один-два раза в течение пяти лет, а по другим – в течение двух лет. Синоптики связывают это явление с влиянием циклонов, приходящих с Тихого океана.

Несмотря на высокую циклоническую активность, согласно данным [1], среднее число дней с грозовой активностью в год на полуострове составляет величину 10,8. Следовательно, для образования грозowych облаков недостаточно циклонической тепловой энергии и требуются дополнительные источники энергии.

Целью настоящей работы является детальное исследование условий появления грозовой активности в приземной атмосфере Камчатки, включая одновременные записи напряженности электрического поля и метеорологических величин, а также данные солнечной, циклонической и сейсмической активностей.

В качестве индикатора грозовой активности рассмотрены суточные вариации напряженности квазистатического электрического поля ( $E_z$ -компоненты) одновременно с вариациями метеорологических величин в обсерватории «Паратунка» ДВО РАН ( $\varphi=52,97^\circ\text{N}$ ;  $\lambda=158,25^\circ\text{E}$ ). На временных записях напряженности электрического поля грозовые процессы проявляются как знакопеременные колебания большой величины, порядка кВ/м, в отличие от регулярных колебаний в условиях «хорошей погоды» ( $\sim 100$  В/м), и от бухтообразных понижений напряженности поля перед землетрясениями. Кроме того, использованы записи X-лучей ( $\text{Вт/м}^2$ ) [2], сейсмической активности [3] и циклонической активности в акватории Тихого океана [4].

В работе рассмотрены особенности вариаций этих величин для событий аномально сильных землетрясений с магнитудой  $M > 8$  (ноябрь 2006 г. и январь 2007 г.) [5] и мощных солнечных вспышек (октябрь 2003 г. и ноябрь 2004 г.) [6, 7]. В силу ограниченного объема публикации ниже в качестве примера приведены результаты для события в ноябре 2006 г.

На рисунке 1 в стандартных обозначениях показаны временные вариации электрического поля, метеорологических величин и потока X-лучей. Характеристики землетрясения приведены в таблице, а хронологическая последовательность их отмечена стрелками на графике  $E_z$ -компоненты.

Таблица 1

Характеристики землетрясений вблизи Камчатки в ноябре 2006 г.

Дата	Время, UT	$\varphi^\circ \text{ N}$	$\lambda^\circ \text{ E}$	$h$ , км	$M$
12.11. 2006	14.42:24	55.164	165.295	37,4	5,0
15.11. 2006	11.14:13.57	46.592	153.266	30,3	8,3

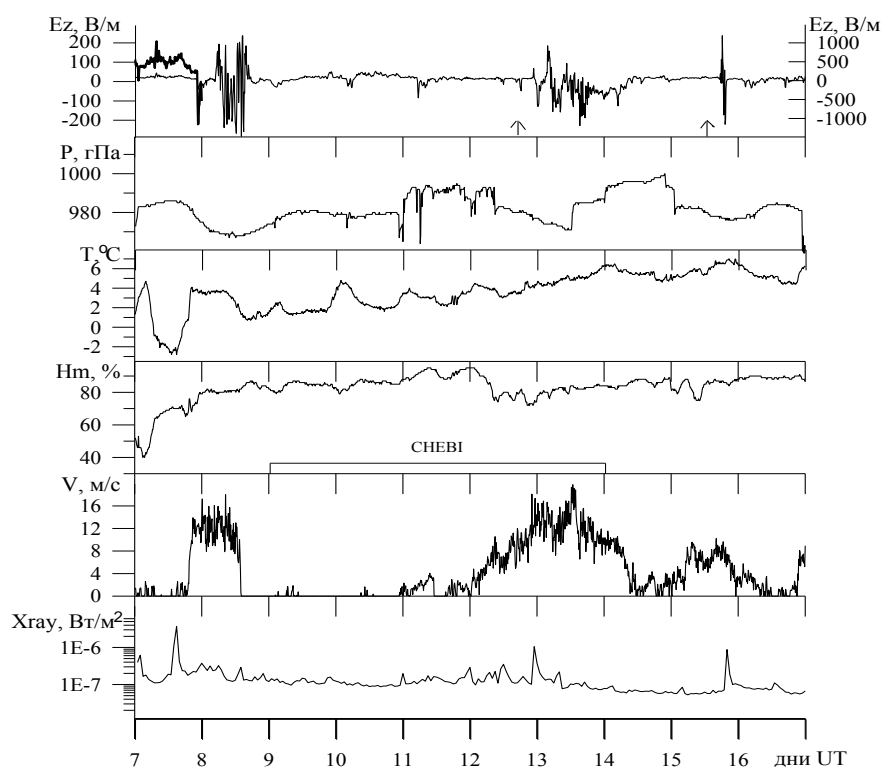


Рисунок 1. Суточные вариации  $E_z$ -компоненты квазистатического электрического поля в приземной атмосфере Камчатки, метеорологических величин и потоков солнечной радиации X-ray (в диапазоне 0.1–0.8 нм) в ноябре 2006 г

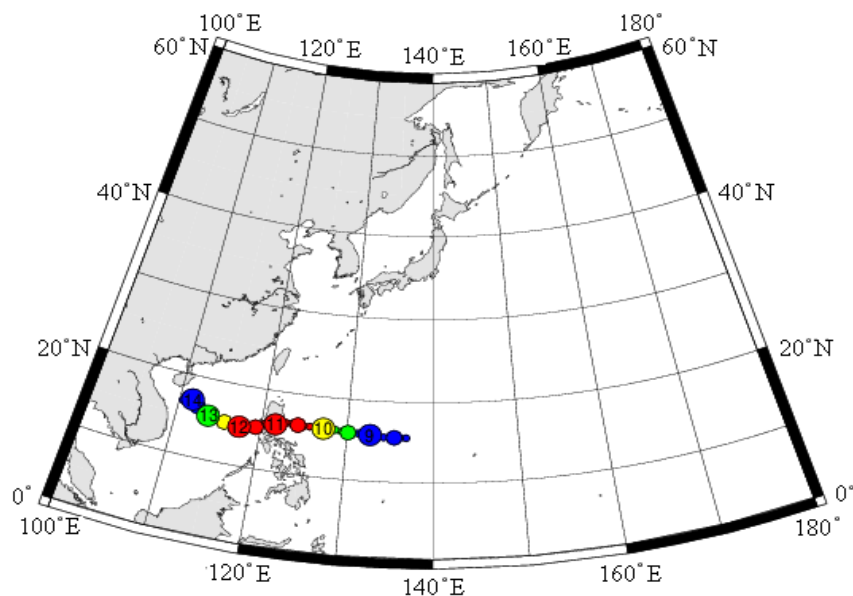


Рисунок 2. Тайфун СЕНЕИ (9–13 ноября)

Как видно из рисунка 1, 7 ноября выполнялись условия «хорошей погоды» с регулярным суточным ходом температуры и относительной влажности  $H$ , %. Начиная с 8 ноября, при наличии высокой влажности (~90%) температура последовательно возрастала в течение нескольких дней, вплоть до момента сильного землетрясения 15 ноября. 8 и 13 ноября повышение температуры сопровождалось усилением ветра ( $V \sim 18\text{--}25$  м/с) и развитием мощной грозовой активности. Эти события развивались на фоне слабой солнечной активности (поток X-лучей был порядка  $10^{-6}$  Вт/м<sup>2</sup>). Циклоническая активность тоже была очень низкой: тайфун СЕНЕИ (рисунок 2) был далек от Камчатки.

Таким образом, обнаруженный аномальный рост температуры, вопреки отрицательному регулярному тренду в это время года [5], вызван, на наш взгляд, появлением дополнительного источника тепла. Состояние солнечной, сейсмической и циклонической активностей позволяет сделать вывод, что этот источник сейсмической природы. Подобный сценарий развития явлений в метеорологических величинах состоялся и в трех других, рассмотренных в работе, случаях. Анализ их показал, что в формировании кучево-дождевых и грозовых облаков преобладает роль аномальных процессов в солнечной и сейсмической активностях, которые случаются крайне редко. Тропические циклоны, происходящие в Тихом океане в зимнее время года значительно чаще, чем зимние грозы, либо совсем не оказывают влияние на появление последних, либо являются своего рода их предвестниками.

### Литература

1. Яндекс.Погода. – URL: <https://yandex.ru/pogoda/paratunka/month> (дата обращения 8.03.2019).
2. STAFF viewer. Solar Timelines viewer for AFFects. – URL: <http://www.staff.oma.be/default.jsp> (дата обращения 8.03.2019).
3. ISC Bulletin: interactive event catalogue search. – URL: <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/catalogue/interactive/> (дата обращения 8.03.2019).
4. Digital Typhoon: Typhoon Images and Information. – URL: <http://agora.ex.nii.ac.jp/digital-typhoon/search.date.html.en> (дата обращения 8.03.2019).
5. Смирнов С.Э., Михайлова Г.А., Михайлов Ю.М., Капустина О.В. Эффекты сильных землетрясений в вариациях электрических и метеорологических величин в приземной атмосфере на Камчатке // Геомагнетизм и аэронавигация. 2017. Т.57, №5. С. 656–663.
6. Смирнов С.Э., Михайлова Г.А., Капустина О.В. Вариации квазистатического электрического поля в приземной атмосфере на Камчатке во время геомагнитных бурь в ноябре 2004 г. // Геомагнетизм и аэронавигация. 2013. Т.53, №4. С. 532–546.
7. Смирнов С.Э., Михайлова Г.А., Капустина О.В. Вариации электрических и метеорологических величин в приземной атмосфере на Камчатке во время солнечных событий в октябре 2003 г. // Геомагнетизм и аэронавигация. 2014. Т.54, №2. С. 257–265.

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА ДЛЯ АКТИВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

*В.И. Акселевич, Г.И. Мазуров*

ГГО им. А.И. Воейкова, г. Санкт-Петербург  
vaksster@gmail.com

Повышенный интерес к проблеме управления погодой во всем мире связан с нарастанием негативных последствий изменений климата. Основные причины его изменения две: первая связана с издержками технического прогресса (это – антропогенный фактор), а вторая является прямым следствием глобальных колебаний климата (ее можно назвать естественным фактором). Количественное соотношение между ними является предметом научных дискуссий.

По мере развития научного и технического прогресса появилась обнадёживающая возможность привлечения к решению проблемы воздействия на погоду научно обоснованных методов и средств. Но при этом сама проблема усугубилась, так как в нарастающем темпе стали наблюдаться негативные погодные явления, связанные с сельскохозяйственной и промышленной деятельностью человечества.

Разработанные ранее методы воздействия на погоду не справляются с возникающими задачами. Например, применение основного в мировой практике самолётного метода вызывания осадков или рассеивания облачности не в состоянии нейтрализовать суммарный антропогенный вред, наносимый мелиорацией, вырубкой леса, выбросами в атмосферу промышленных и транспортных газов и аэрозолей, загрязнением рек и морей химикатами от удобрений, массовым использованием радиотехнических средств, порождающих мощные электромагнитные поля.

Очевидно, что решение проблемы нормализации погодных условий, формирующихся под влиянием антропогенного и естественного факторов, – это разработка и применение эффективных средств, непосредственно участвующих в процессе погодопреобразования.

Сегодня первым из них по праву считается электричество. Электрические процессы и явления (например, грозы) в атмосфере обуславливаются наличием в ней зарядов и переносчиков зарядов [1]. Динамические процессы генерации, стока и накопления зарядов зависят от множества причин и оказывают влияние на состояние различных компонентов окружающей среды и на связанные с ними процессы.

Основными характеристиками электрического поля атмосферы являются: напряженность электрического поля  $E$ , измеряемая в В/м; удельная электрическая проводимость атмосферы  $\lambda$ , измеряемая в 1/Ом·м; удельное электрическое сопротивление  $\rho$ , измеряемое в Ом·м; плотность электрического тока  $i$ , измеряемая в А/м<sup>2</sup>; плотность электрического заряда  $\rho_z$ , измеряемая в Кл/м<sup>3</sup>; электрический потенциал ионосферы примерно равен 240 кВ [2]; общее сопротивление атмосферы; полный заряд атмосферы; полный электрический ток в атмосфере  $i_n$ , равен 1800А [3]; напряженность стационарного электрического поля примерно равна 130 кВ [3]; суммарный электрический заряд Земли  $Q$  примерно равен минус  $3 \cdot 10^5$  Кл.

Электричество может использоваться в целях активного воздействия на внутренние гравитационные волны (ВГВ), осадки любых видов (уменьшение и увеличение количества и интенсивности), туман (рассеяние и создание), облачность (рассеяние и создание), смог (ликвидация, улучшение видимости), пылевые бури и дымовые туманы, струйные течения [1].

Электрическая энергия способна создавать вокруг проводников электрического тока или заряженных тел электромагнитное поле. Для воздействия на погодные условия целесообразно использовать искусственную ионизацию воздуха, которая создается в результате деятельности человека и может быть целенаправленно создаваемой для модификации погодных условий.

Очевидно, что для реализации этой цели требуются соответствующие средства измерений и контроля параметров ионизации. Физическими характеристиками ионов являются их электрическая подвижность и заряд. Подвижность иона – это отношение средней скорости его дрейфа в направлении электрического поля к напряженности последнего. Подвижность обычно выражается в см<sup>2</sup>/(с·В). Основной величиной, характеризующей ионизованность воздуха, является полярная объемная плотность электрического заряда (ПОПЭЗ), равная количеству электрического заряда ионов положительной или отрицательной полярности в единице объема воздуха. ПОПЭЗ в Международной системе единиц (СИ) выражается в единицах Кл/м<sup>3</sup>.

Нормируемыми параметрами ионизированности воздуха являются:  $\rho$  – концентрация легких ионов (количество в  $1 \text{ см}^3$  воздуха);  $\Pi$  – показатель полярности, равный отношению разности концентраций положительных  $\rho^+$  и отрицательных  $\rho^-$  легких ионов к их сумме. Показатель полярности может изменяться в пределах  $\pm 1$ . При равенстве количества положительных и отрицательных ионов показатель полярности системы равен нулю.

В применении электричества в интересах модификации погодных условий ключевую роль играет генератор отрицательных объемных зарядов, от режима работы которого зависит успех воздействия.

В целях усиления эффекта ионизации, выражающегося в увеличении продуктивности генерации ионов коронирующим проводом и в дополнительном образовании ионов за счет ускорения их движения, используется то, что внутри объемного электрического заряда, образованного коронирующим проводом и имеющего первоначальную плотность  $10^3\text{--}10^5 \text{ ед./см}^3$ , создается локальный объемный заряд того же знака, но имеющий меньшие геометрические размеры и большую плотность.

Электрическое поле локального «сильного» заряда воздействует на ионы, находящиеся в области «слабого» заряда, ускоряя их, что приводит к увеличению числа столкновений с нейтральными молекулами воздуха и повышению степени его ионизации.

Кроме того, электрическое поле «сильного» заряда ускоряет отток ионов от коронирующего провода, который быстро компенсируется вновь образовавшимися ионами, чем обеспечивается повышение эффективности генерации ионов этим проводом.

Создание локального объемного заряда можно осуществить с помощью специального электрода, выполненного в виде сетки, образующей поверхность объемного контура, имеющего форму пирамиды. Электрод может использоваться в стационарном и мобильном варианте, смонтированном на автомобиле. В зависимости от способа применения меняются габаритные размеры электрода. В стационарном варианте площадь основания составляет  $1\text{--}1000 \text{ м}^2$ , а в передвижном –  $0,3\text{--}3,0 \text{ м}^2$  [4].

В 1993 году с помощью этой установки получен первый положительный эффект инициирования струйных течений [5], а в 1999 году проведены работы по инициированию и обнаружению внутренних гравитационных волн с использованием мюонного годоскопа, разработанного в МИФИ [6].

Способ ионизации воздуха, кроме воздействия на струйные течения и волны гравитации позволяет инициировать вертикальные и горизонтальные сдвиги ветра, изменять градиенты температуры, атмосферное давление, стимулировать турбулентность.

### Литература

1. *Ивлев Л.С., Уйбо В.Н., Перов С.П., Челибанов В.П.* Электромагнитные методы воздействия на природную среду. СПб.: ВВМ. 2017. 502 с.
2. *Markson R.* The global circuit intensity: its measurement and variation over the last 50 years, Bull. Am. Met. Soc., doi:10.1175/BAMS-88-2-223. 2007. С. 223–241.
3. [http://femto.com.ua/articles/part\\_1/0217.html](http://femto.com.ua/articles/part_1/0217.html) (дата обращения 15.12.2018)
4. *Бендеров В.В., Бондаренко Н.Н., Уйбо В.И., Чеботарев А.Э.* Патент RU № 2144760 «Способ ионизации атмосферного воздуха и электрод». 2000.
5. *Протопопов В.А., Уйбо В.И.* Патент RU № 2215463 «Способ воздействия на процесс атмосферной циркуляции и система для воздействия на процесс циркуляции». 1998.
6. *Борог В.В., Дронов В.В., Уйбо В.И.* Искусственная генерация внутренних гравитационных волн и их регистрация наземным мюонным годоскопом. Научная сессия МИФИ. Сб. научных трудов. Т.7. 2000.

## ГРОВОЯЯ АКТИВНОСТЬ НАД АНТРОПОГЕННЫМИ И ПРИРОДНЫМИ ЛАНДШАФТАМИ

*Т.В. Ершова*

Томский государственный педагогический университет, г. Томск  
Ershova10@mail.ru

Проблеме пространственного распределения грозовой активности посвящены многочисленные исследования. Одним из основных направлений является анализ данных систем местоопределения молний [1–3]. Другое направление связано с построением математических моделей и карт пространственного распределения грозовой активности

косвенными способами [4, 5]. Безусловно, более «привлекательными» для молний являются возвышенные участки территорий, которые лежат на пути следования холодных атмосферных фронтов. Но как показывают предыдущие исследования [4, 5] даже при аналогичных синоптических условиях молния реализуется над одними участками гораздо чаще, чем над другими. Современные спутниковые данные позволяют получать информацию о характере земной поверхности (типах ландшафтов) для ячеек сетки  $10 \div 10 \text{ км}^2$  [6]. Исследования испанских учёных [7, 8] на основе спутниковых данных о типах ландшафтов показали повышенное число разрядов облако-земля над урбанизированными, индустриальными районами, включая месторождения добычи полезных ископаемых.

Цель данного исследования состоит в выявлении типов ландшафтов, которые являются наиболее грозопоражаемыми. Полученные результаты могут быть полезны в качестве рекомендаций для территорий со схожими типами ландшафтов для умеренных широт России.

Материалами для исследования служили ежедневные данные о плотности разрядов молнии в землю, числе дней с молниями, а также силе тока молний для Центральной Европы, полученные с помощью сети местоопределения молний EUCLID (EUropean Cooperation for Lightning Detection). Спутниковые данные о типах ландшафтов предоставлены Европейским агентством по окружающей среде (European Environment Agency). Для территории Центральной Европы анализировались молниевые разряды облако-земля за период с 2001 по 2014 гг., а спутниковые данные о типах ландшафтов – за 2012 г.

В качестве основного метода исследования применялось геокартирование плотности разрядов молнии в землю (рисунок 1) и преобладающих типов ландшафтов (рисунок 2) для ячеек сетки  $10 \div 10 \text{ км}^2$  с помощью пакета прикладных программ «Matlab». Предварительно спутниковые данные о 44 типах ландшафтов были сгруппированы в семь преобладающих типов: урбанизированная территория (включая индустриальную), водная поверхность, кустарники и увлажненная поверхность, травяная поверхность, территория сельскохозяйственного использования, леса, смешанный тип. Дополнительно учитывалась средняя высота расположения ячеек сетки над уровнем моря. По построенным картам проводился сравнительный анализ пространственного распределения плотности разрядов молнии в землю (числа дней с молниями) над различными типами ландшафтов.

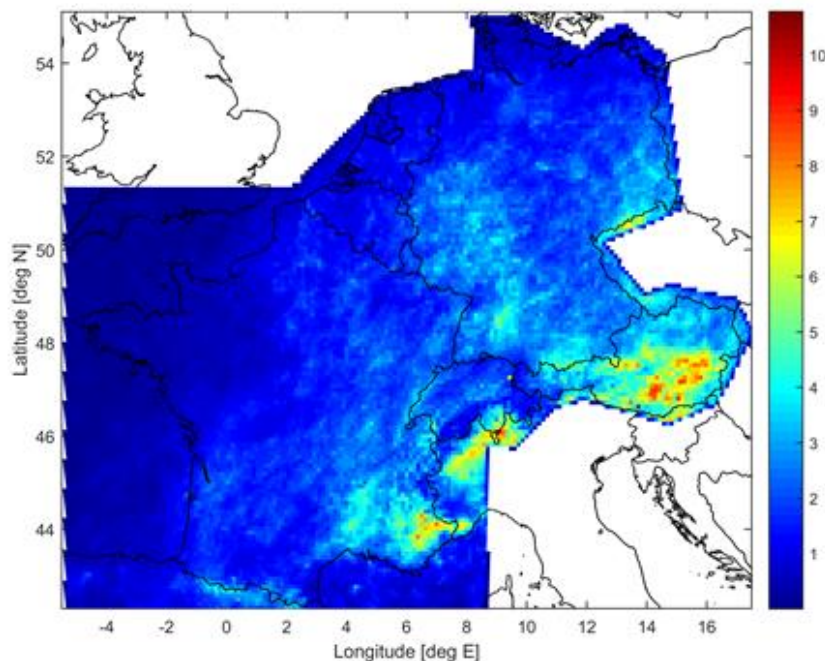


Рисунок 1. Среднегодовая плотность разрядов молнии в землю (разр./км<sup>2</sup> год) над Центральной Европой за период 2001–2014 гг.

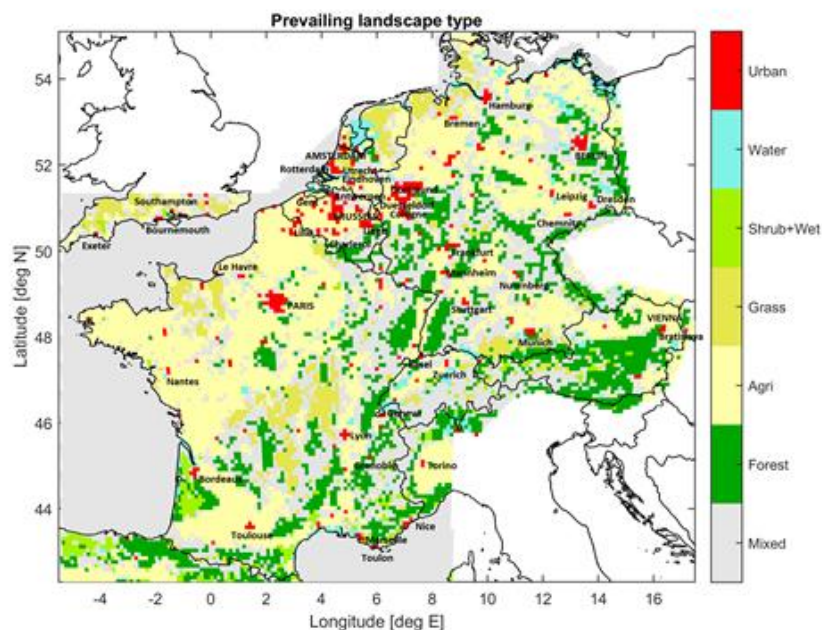


Рисунок 2. Преобладающие типы ландшафтов над Центральной Европой для ячеек сетки  $10 \div 10 \text{ км}^2$  за 2012 г.

Основными очагами грозовой активности (плотности разрядов молнии в землю более  $10 \text{ разр./км}^2 \text{ год}$ ) в Центральной Европе (рисунок 1) являются регионы австрийских и итальянских Альп, а также юго-восточное побережье Средиземного моря во Франции.

Над Центральной Европой выявлены следующие типы ландшафтов с наиболее высокой плотностью молниевых разрядов: индустриальные и урбанизированные территории; водная поверхность и леса. Пиковые значения тока молний над населенными пунктами в 30% случаев составляли менее 10 кА. Максимальное зарегистрированное пиковое значение силы тока молнии составляло 225 кА.

Работа выполнена при поддержке гранта по программе DAAD «Research Stay for University Academics and Scientists», 2017 (57314019), персональный номер 91678074.

### Литература

1. BLIDS der Blitz Informationsdienst von Siemens. URL: <http://www.industry.siemens.com/services/global/de/portfolio/plant-data-services/blids> (дата обращения 04.03.2019).
2. Rakov V.A., Uman M.A. *Lightning: Physics and Effects*. Cambridge University Press 2003. P. 687.
3. Аджиев А.Х., Стасенко В.Н., Топасханов В.О. Система грозопеленгации на Северном Кавказе // Всероссийская конференция по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы: Доклады конференции. Нальчик: ООО «Печатный двор». 2013. С. 140–149.
4. Горбатенко В.П., Ершова Т.В., Константинова Д.А. Пространственное распределение плотности разрядов молнии в землю над территорией Западной Сибири // Вестник Томского государственного университета. 2009. № 329. С. 251–255.
5. Горбатенко В.П., Дульзон А.А., Гиндуллин Ф.А., Ершова Т.В., Ипполитов И.И., Кабанов М.В., Логинов С.В. Анализ структуры грозовых рядов и факторов, влияющих на пространственную неоднородность грозовой активности // Проектирование и технология электронных средств. 2004. Специальный выпуск. С. 61–65.
6. Büttner G. CORINE Land Cover and Land Cover Change Products. In Manakos I., Braun M. (Eds.), *Land Use and Land Cover Mapping in Europe: Practices and trends. Remote Sensing and Digital Image Processing*. – Dordrecht: Springer. 2014. Vol. 18. P. 55–74.
7. Mora M., Riesco. J., Rivas Soriano. L., de Pablo Davila. F. Observed impact of land uses and soil types on cloud-to-ground lightning in Castilla-Leon (Spain) // *Journal Atmospheric Research*. 2015. 166. P. 233–238. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.07.009> (дата обращения 27.02.2019).
8. Prieto D. S., Mora M. G., Fernandez S. M., Rivas S. L., de Pablo Davila. F. Evidence for the influence of land uses and soil types on cloud-to-ground lightning activity in Asturias (Spain) // *Journal Atmospheric Research*. 2018. 203. P. 62–67. – URL: <http://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.11.025> (дата обращения 07.03.2019).

**ПРОГНОЗ ГРОЗОГРАДОВЫХ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ РАСЧЕТНЫХ ПОЛЕЙ  
МЕТЕОЭЛЕМЕНТОВ ГЛОБАЛЬНОЙ ПРОГНОСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ (GFS)  
ДЛЯ РАЙОНОВ ЗАПАДНОГО КАВКАЗА**

*А.Х. Кагермазов*

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» г. Нальчик  
ka5408@mail.ru

В данной работе для прогноза развития грозоградовых процессов применяется метод, основанный на использовании выходных данных Глобальной модели атмосферы, с проведением в последующем дискриминантного анализа. Концепция MOS предполагает неизменность прогностической гидродинамической модели, однако используемая нами выходная продукция действующей модели GFS – стратификация полей температуры, влажности, направления и скорости ветра – аналог аэрологического зондирования атмосферы, уже сейчас обладает достаточно высокой достоверностью. Результаты валидации по фактическим данным аэрологического зондирования продукции глобальной модели показали высокую степень совпадения их значений [1]. Коэффициенты корреляции прогнозных значений по модели и реальных по аэрологическому зонду на уровне 0,9 и выше. Поэтому непрерывно проводимое усовершенствование глобальной модели, несильно скажется на той части выходной продукции, которую мы используем, и дискриминантные функции не потеряют своей актуальности.

В результате проведенных исследований [2–4] было получено, что на формирование явлений конвективной природы (град, гроза, ливень и т.д.) оказывают наибольшее влияние ниже перечисленные параметры атмосферы. Это скорость упорядоченного подъема воздуха на уровне 700 мб (V700); суммарная удельная влажность в слое поверхности земли – 500 гПа (SQZ5); энергетическая характеристика подоблачного слоя (DSS); средний дефицит влажности в слое Нк+5 км (TDSR5); термодинамический индекс Миллера (TTMI).

При прогнозе грозоградовых процессов, для учета климатических особенностей территории, данные 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, пункты Анапа, Геленджик, Туапсе, Сочи).

Дискриминационными (независимыми) переменными являются предикторы, рассчитываемые на основе Глобальной модели:

DTM – максимальная разность температур в облаке и в окружающем воздухе; SQZ5 – суммарная удельная влажность в слое земли – 500 гПа; V700 – скорость упорядоченного подъема воздуха на уровне 700 мб; DSS – энергетическая характеристика подоблачного слоя; DTK – вертикальный градиент температуры.

Исследуемыми группами (явлениями) являются:

- грозоградовый процесс;
- отсутствие грозоградового процесса.

Группирующей переменной является L2, которая имеет два значения: 0 (отсутствие явления), 1 (явление).

Оперативная проверка альтернативного метода прогноза грозоградовых процессов для региона Западного Кавказа проводилась по дискриминантным функциям, полученным ранее для всего региона Северного Кавказа.

По материалам 2015 года (пунктов Анапа, Геленджик, Туапсе, Сочи), использованным в ходе оперативной проверки метода прогноза грозоградовых процессов, была получена новая дискриминантная функция непосредственно для Черноморского побережья Северного Кавказа:

$$L2 = 0,119 \cdot SQZ5 + 0,644 \cdot DTM - 0,004 \cdot DSS + 0,428 (DTK1 + DTK2) - 0,053 \cdot V700 - 10,932.$$

Оценка успешности разделения явления – без явления по материалам этих пунктов за период май-сентябрь 2015 гг. представлена в таблице 1.



Таблица сопряженности

Прогноз	Наблюдалось		Сумма
	град	не град	
град	14 ( $n_{11}$ )	2 ( $n_{12}$ )	16 ( $n_{10}$ )
не град	0 ( $n_{21}$ )	27 ( $n_{22}$ )	27 ( $n_{20}$ )
сумма	14 ( $n_{01}$ )	29 ( $n_{02}$ )	43 ( $n_{00}$ )

Примечание:

$n_{11}$  – число оправдавшихся прогнозов с формулировкой «град»,  $n_{12}$  – число неоправдавшихся прогнозов с формулировкой «град»,  $n_{21}$  – число неоправдавшихся прогнозов с формулировкой «не град»,  $n_{22}$  – число оправдавшихся прогнозов с формулировкой «не град»,  $n_{10} = n_{11} + n_{12}$  – число всех оцениваемых прогнозов с формулировкой «град»,  $n_{20} = n_{21} + n_{22}$  – число всех оцениваемых прогнозов с формулировкой «не град»,  $n_{01} = n_{11} + n_{21}$  – число всех оцениваемых случаев с градом,  $n_{02} = n_{12} + n_{22}$  – число всех оцениваемых случаев без града,  $n_{00} = n_{10} + n_{20} = n_{01} + n_{02}$  – число всех оцениваемых случаев.

Общая оправдываемость прогноза – 95%.

Предупрежденность наличия явления – 100%.

По результатам расчетов критериев, качество полученной функции на зависимом материале достаточно высокое, что позволяет надеяться на такое же качество при проверке на независимом материале в будущем.

Итоговые результаты оценки метода представлены в таблице 2.

Таблица 2

Прогнозы и их оправдываемость

Дискр. функции	Всего прогнозов			Прогнозы с явлениями			Прогноз без явлений				
	Дано	Оправдываемость		Дано	Оправдываемость		Предупрежд.	Дано	Оправдываемо-сть		Предупрежд.
		Кол-во	%		Кол-во	%			Кол-во	%	
L1	43	38	88	13	11	84,	78,6	30	27	90	93
L2	43	41	95	16	14	87	100	27	27	100	93

Для отмеченных климатических зон Северного Кавказа построены дискриминантные функции, которые можно использовать для прогнозирования грозоградовых процессов:

Центральная часть:

$$L1 = -0,146 \cdot SQZ5 + 0,53 \cdot DTM + 0,023 \cdot DSS + 0,717 \cdot (DTK1 + DTK2) - 0,114 \cdot V700 - 7,61 \quad (1)$$

Западная часть:

$$L2 = 0,119 \cdot SQZ5 + 0,64 \cdot DTM - 0,004 \cdot DSS + 0,428 \cdot (DTK1 + DTK2) - 0,053 \cdot V700 - 10,9 \quad (2)$$

Из уравнений (1)–(2) 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 грозоградовых процессов. Процессы на Черноморском побережье меньше зависят от крупномасштабной циркуляции атмосферы (отсутствует параметр V700) и больше связаны с локальными условиями.

Таким образом, разработаны многомерные физико-статистические схемы, обучение которых произведено как исходя из концепции «идеального» РР-прогноза (фактические данные), так и согласно концепции выходных данных глобальной модели атмосферы (концепции MOS). По результатам расчетов статистических критериев, качество полученных моделей достаточно хорошее.

## Литература

1. Кагермазов А.Х. Валидация выходных данных Глобальной Системы Прогнозов GFS (Global Forecasts System) с результатами аэрологического зондирования. Известия КБНЦ РАН, г. Нальчик, 2014. №3(59). С. 32–36.
2. Кагермазов А.Х., Прогноз града по выходным данным глобальной модели атмосферы (T254 NCEP) // Метеорология и гидрология. 2012. №3. С. 28–34.
3. Кагермазов А.Х., Федченко Л.М., Использование концепции «идеального» метода статистического анализа (PERFECT PROGNOS METHODS-PP) для прогноза града. // Известия КБНЦ РАН, г. Нальчик. 2012. С.75–80.
4. 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. 2010. С. 49–53.
5. Архив прогнозов. <http://meteoinfo.ru/archive-forecast-main>.

## ДОЛГОВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЧИСЛА ДНЕЙ С ГРОЗОЙ НАД ТЕРРИТОРИЕЙ СИБИРИ

*О.Е. Нечепуренко, Д.А. Константинова*

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
o.e.nechepurenko@gmail.com

Целью работы является исследование грозовой активности для территории Западной Сибири, в качестве которой выступает число дней с грозой. Были обработаны наблюдения за грозами на 10 станциях Томской области за период 1965–2017 гг. для получения описательной статистики годового хода явления (ВНИИГМИ-МЦД). Для выявления периодических составляющих в многолетних временных рядах грозовой активности использовалась информация в штормовых журналах Томского ЦГМС за период 1936–2017 гг. Несмотря на большое количество приборов и систем регистрации электромагнитных возмущений, информация с сети оперативных наблюдений представляет особый интерес, так как имеет непрерывный продолжительный ряд наблюдений за грозами. Для анализа данных и интерпретации полученных результатов использовались стандартные методы математической статистики, для определения наличия периодической составляющей в рядах грозовой активности применялись методы автокорреляции и спектрального анализа Фурье.

Как правило, грозы отмечаются в разное время года, однако большинство гроз исследуемой территории регистрируются с мая по сентябрь. В отдельные годы при благоприятных конвективных условиях грозы возможны и в холодный период года. Так, 9 декабря 2015 года метеостанция Учебная (Новосибирская область) и МРЛ Новосибирск зарегистрировали случай зимней грозы, которая образовалась на фоне прохождения фронта окклюзии [1].

На фоне наличия значительной межгодовой изменчивости отмечается слабая тенденция на увеличение грозовой активности в последние десятилетия во многих регионах, что связано с ростом температуры поверхности на  $1,5^{\circ}\text{C}$  за период с 1901 по 2012. А поскольку над территорией Сибири отмечаются локальные очаги потепления с температурой до  $2,5^{\circ}\text{C}$  [2], можно ожидать рост грозовой активности, т.к. она тесно связана с характеристикой конвективного потенциала региона, зависящего в большой степени от температуры подстилающей поверхности. Кроме того, значительный вклад в развитие грозовой деятельности вносят территории Большого Васюганского болота и болот Омского Прииртышья, которые выступают дополнительным источником влаги, и приводят к усилению конвекции [3] и развитию мезомасштабных конвективных явлений, а также способствуют активному местному циклогенезу и обострению фронтальных зон [4]. Присутствие циклонической кривизны обеспечивает конвергенцию горизонтальных приземных потоков, необходимых для обеспечения подъема массы достаточно влажного и теплого воздуха восходящими потоками. Этот процесс обеспечивает достаточно быстрое образование облачности с выделением скрытого тепла и приводит к развитию глубокой конвекции.

Проанализированный годовой ход грозовой деятельности не противоречит [5, 6], и пик грозовой активности отмечается в июле. В течение теплого периода года в регионе от 56 до 60 °с.ш. среднее число дней с грозой составляет 21 день (рисунок 1).

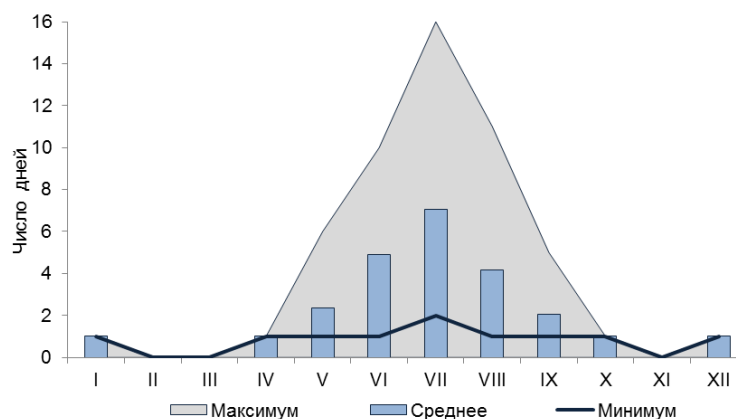


Рисунок 1. Повторяемость числа дней с грозой на примере станции Томск

Особую ценность для изучения динамики грозовой активности представляют многолетние наблюдения; на территории Томской области этим условиям отвечают станции Колпашево (58,3°с.ш., 82,9°в.д.) и Кожевниково (56,1°с.ш., 83,6°в.д.), на которых наблюдения ведутся с 1925 и 1926 года соответственно. Для изучения разности проявления грозовой активности в широтной зависимости была добавлена самая северная станция Томской области Александровское (60,4 с.ш., 77,9 в.д.). Грозовой деятельности присущи синхронные изменения числа дней с грозой в различных частях исследуемой территории (рисунок 2): северной, центральной и южной частях Западной Сибири, что соотносится с полученными ранее результатами [7].

Грозовой активности свойственна цикличность, которая может быть объяснена различными причинами. Исследование периодической составляющей во временных колебаниях грозовой активности на метеостанциях (период наблюдения 80 лет) позволило выявить следующие квазипериоды: 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8–10, 11–14, 16, 20, 22 и 25–27 лет. Квазидвухлетние и квазичетырехлетние циклы грозовой активности хорошо согласуются и объясняются циркуляционной цикличностью соответствующих периодов исследуемого региона. При этом некоторые выделенные периоды объясняются удвоением этих циклов. С периодичностью изменения числа солнечных пятен связаны циклы грозовой активности исследуемой территории в 11 и 22 года. Циклы, которые получены с помощью указанных в работе методов анализа и составляют более 25 лет, пока не могут быть объяснены по причине короткого временного ряда наблюдений.

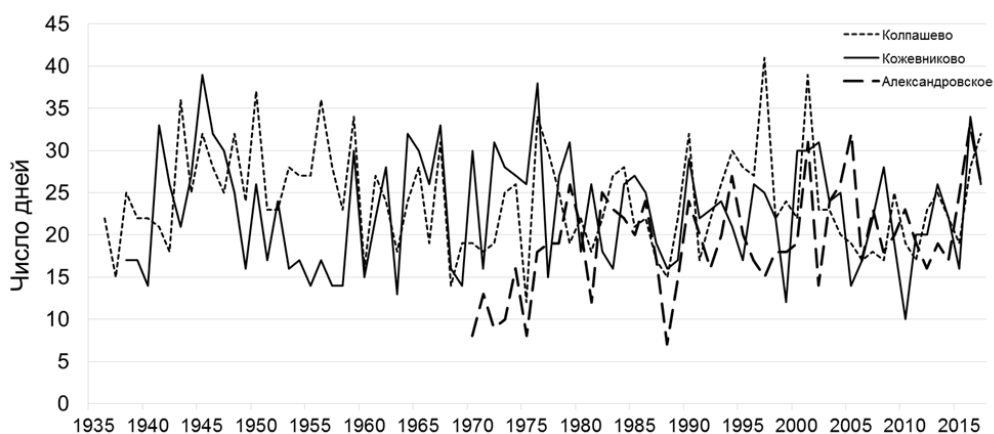


Рисунок 2. Число дней с грозой по территории Томской области

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-45-700010 p\_a).

## Литература

1. *Жохова Д.А., Кужевская И.В., Пустовалов К.Н., Чурсин В.В.* Случай зимней конвекции по данным ATOVS // Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды: Материалы V Всероссийской научной конференции, Санкт-Петербург, 23–25 мая 2018 г. СПб.: ВКА им. А.Ф.Можайского, 2018. С. 657–660.
2. *Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* // Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2013. 1535 pp. <http://ipcc.ch/report/ar5/wg1/>.
3. *Нечепуренко О.Е., Горбатенко В.П., Константинова Д.А., Севастьянов В.В.* Индексы неустойчивости атмосферы и их пороговые значения, оптимальные для прогноза гроз над Сибирью // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 2 (368). С. 44–59.
4. *Тунаев Е.Л., Горбатенко В.П.* Энергетические характеристики атмосферы при циклогенезе над районами Васюганского болота // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2019. № 4 (370). С. 48–62.
5. *Вознесенская К.В., Колесник А.Г., Соловьев А.В.* Инфразвуковые сигналы от молниевых разрядов // Известия высших учебных заведений. Физика. 2012. Т. 55, № 7. С. 105–108.
6. *Ткачук Т.Е.* Разногодичная динамика степных пожаров в Даурии // Фундаментальные исследования. Биологические науки. 2015. № 2. С. 2185–2189.
7. *Горбатенко В.П., Ипполитов И.И., Кабанов М.В., Логинов С.В., Решетько М.В., Таранюк М.И.* Анализ структуры временных рядов повторяемости форм атмосферной циркуляции и грозовой активности // Оптика атмосферы и океана. 2002. 15. № 8. С. 693–697.

## ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНВЕКЦИИ НАД ЮГО-ВОСТОКОМ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ В ДНИ С СИЛЬНЫМИ ГРОЗАМИ

*В.П. Горбатенко<sup>1</sup>, Т.В. Ершова<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Томский государственный университет, г.Томск

<sup>2</sup>Томский государственный педагогический университет г. Томск  
vpgpr@ggf.tsu.ru

При разработке региональных численных методов прогноза грозы и града до внедрения в оперативную практику необходимы уточнения основных характеристик, используемых в прогнозах, поскольку облачность в большинстве моделей является подсчетным процессом, существенно отличающимся в разных регионах [1, 2].

Целью настоящих исследований является изучение характеристик кучево-дождевых облаков над юго-востоком Западной Сибири, в дни, когда над исследуемой территорией были зарегистрированы грозы. Причем для исследования были выбраны дни, когда в районах, расположенных вблизи аэрологических станций Новосибирск и Колпашево, грозы регистрировались наблюдателями не менее трех метеостанций. Задачи исследований: оценка энергетических параметров конвективных кластеров: скорости вертикальных движений в кучево-дождевых облаках, их вертикальной протяженности, высот нижней и верхней границ конвективно неустойчивого слоя, влагосодержания в приземном слое, интенсивности вертикальных движений.

Материалом для исследований послужили результаты аэрологического зондирования атмосферы в летние месяцы, взятые за сроки 00 и 12 часов всемирного скоординированного времени для аэрологических станций Колпашево и Новосибирск.

Вертикальная протяженность конвективных облаков в сочетании с водностью и степенью оледенения вершин имеет высокую корреляцию с концентрацией заряженных частиц. Считается, что грозы развиваются в тех случаях, когда вертикальная протяженность облака составляет более 7 км. Объясняется этот факт тем, что области, в которых создаются и разделяются электрические заряды, занимают в кучево-дождевых облаках объем, ограниченный снизу изотермой  $-5^{\circ}\text{C}$  и сверху изотермой  $-40^{\circ}\text{C}$ . Влагосодержание в приземном слое – важнейшая характеристика в процессе формирования конвективной облачности. Приток влаги может происходить либо благодаря адвекции влажного воздуха в регион, либо локально, в результате испарения влаги от местного источника. Таким источником в Западной Сибири является Большое Васюганское Болото, которое и обеспечивает повышенную неустойчивость атмосферы в исследуемом регионе [3]. Наличие дополнительного источника влаги может внести существенные различия с характеристиками облаков, формирующихся в аналогичных

широтах. В рамках настоящего исследования влажности приземного слоя такой характеристикой выбрано отношение смеси ( $r$ ): отношение массы водяного пара к массе сухого воздуха в том же объеме, выраженное в граммах водяного пара на килограмм сухого воздуха. Поскольку решающую роль в развитии конвективной неустойчивости играет стратификация температуры в нижней тропосфере, в рамках настоящей работы приводятся значения и температуры воздуха на уровне конденсации.

Для оценки скорости восходящего потока ( $U_{\max}$ ) было использовано значение доступной конвективной потенциальной энергии атмосферы CAPE. Согласно [4] скорость восходящих потоков ( $U$  м/с), можно приближенно оценить по формуле:

$$U_{\max} = \sqrt{2\text{CAPE}}$$

Выпадающие осадки заметно утяжеляют поднимающиеся воздушные частицы. Величина давления осадков зависит как от количества поднимающейся влаги, так и от мощности восходящего потока, который первоначально сдерживает осадки. Поэтому в рамках настоящих исследований анализировалась и такая характеристика, как запас воды в атмосфере: общее содержание водяного пара  $W_{\text{мм}}$  в вертикальном столбе атмосферы, выраженное толщиной слоя воды, который образовался бы при конденсации и осаднении всего количества водяного пара в этом столбе. Результаты оценки перечисленных выше характеристик представлены в таблице 1.

Таблица 1

### Физические характеристики атмосферы при наличии грозовых облаков

Характеристика	Колпашево			Новосибирск		
	июнь	июль	август	июнь	июль	август
Температура на уровне конденсации (°C)	7,0	11,0	8,0	8,0	12,5	7,0
Вертикальная мощность облаков, м	4100	5800	4700	5500	7200	5700
Давление на уровне конденсации, гПа	870	870	870	850	850	850
Скорость вертикальных движений в конвективно-неустойчивом слое, U м/с средняя/максимальная	10/13	10/14	10/12	10/14	09/12	10/14
Отношения смеси в приземном слое ( $r$ ), г/кг; среднее/ $\sigma$	10/2,3	10/2	10/1,7	9,3/2,4	10/1,6	9,2/2,2
Содержание водяного пара в вертикальном столбе, $W_{\text{мм}}$ , среднее/ $\sigma$	31/7,2	29/6,7	31/6,6	28/8	30/5,9	26/7

Таким образом:

- В летний сезон над территорией Западной Сибири мощность кучево-дождевого облака с грозой достигает поверхности 270–280 гПа. В 50% всех случаев наличия обширных очагов грозовых облаков верхняя граница располагалась в слое 9–11 км. По данным ранних исследований для ЕТР мощность кучево-дождевого облака чаще всего достигает изобарической поверхности приблизительно 300 гПа [5].

- При наличии грозовых облаков значения температуры подоблачного слоя изменяются в пределах 8–11°C в разные месяцы летнего сезона. Среднее значение в летние месяцы составляет 9,5°C. Заметим, что для грозовой деятельности над ЕТР характерная температура температуры воздуха подоблачного слоя равна 7°C [5].

- Значение отношения смеси в приземном слое атмосферы величина достаточно устойчиво и составляет 10 г/кг.

- Скорости вертикальных движений, оцененные по уровню конвективной потенциальной энергии атмосферы, достаточно устойчивы и, как правило, достигают уровня 10 м/с, что согласуется с результатами других исследований.

- Запас воды в вертикальном столбе атмосферы, выраженный толщиной слоя, который образовался бы при конденсации и осаднении всего количества водяного пара в этом столбе является достаточно устойчивой характеристикой и составляет около 30 мм, причем в пределах исследуемой территории меняется незначительно.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 18-45-700010 р\_а.

## Литература

1. Губенко И.М., Рубинштейн К.Г. Анализ результатов расчета грозовой активности с помощью индексов неустойчивости атмосферы по данным численной модели WRF – ARW // Метеорология и гидрология. 2015. № 1. С. 27– 37.
2. Калинин Н.А., Шихов А.Н., Быков А.В. Прогноз мезомасштабных конвективных систем на Урале с помощью модели WRF и данных дистанционного зондирования // Метеорология и гидрология. 2017. № 1. С. 16 – 28.
3. Нечепуренко О.Е., Горбатенко В.П., Константинова Д.А., Севастьянов В.В. Индексы неустойчивости атмосферы и их пороговые значения, оптимальные для прогноза гроз над Сибирью // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 2 (368). С. 44–59.
4. Doswell C.A. and Shultz D.M. On the use of indices and parameters in forecasting severe storms // Electronic J. Severe Storms Meteorology. 2006. Vol. 1, No. 3. P. 122.
5. Синькевич А.А. Конвективные облака северо-запада России. Л.: Гидрометеоздат. 2001. 106 с.

## КЛИМАТОЛОГИЯ ГРАДОВЫХ ПРОЦЕССОВ ЮГА ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

*И.В. Кужевская, М.А. Волкова, О.Е. Нечепуренко, В.В. Чурсин*

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г.Томск  
ivk@ggf.tsu.ru

Опасные конвективные явления погоды, среди которых ливни, грозы, град и шквалы, наносят ощутимый ущерб экономике. Изучение параметров конвективной облачности, продуцирующей опасные явления в разных географических районах, способствует не только улучшению региональных прогнозов погоды, но и пониманию физических процессов, происходящих в таких облаках при формировании грозы и града.

Целью настоящего исследования является оценка пространственной и временной структуры, а также характеристик конвективно-неустойчивого слоя, включая его температурно-влажностного строения над территорией юго-востока Западной Сибири в дни с зарегистрированными случаями града.

Повторяемость опасных конвективных явлений на исследуемой территории изучалась по данным штормовых сообщений кода WAREP. Материалом для аэрологических исследований послужили данные о состоянии атмосферы в летние месяцы следующих периодов: 1995–2018 гг., взятые за сроки 00 и 12 часов всемирного скоординированного времени (BCV) по результатам зондирования атмосферы с аэрологических станций, анализировалось состояние атмосферы в дни, когда в районе станций были зарегистрированы грозы и град, доступ к данным (<http://www.weather.uwyo.edu>).

Исследуемый район (50–62°с.ш., 74–94°в.д.) не является территорией, подверженной частому градобитию. Град, регистрируемый наблюдателями на отдельных метеорологических станциях, выпадает на исследуемой территории довольно редко 1–4 дней за сезон. В целом, по территории юго-востока Западной Сибири град может наблюдаться 5–10 дней в году. При этом, ущерб, причиняемый хозяйственным субъектам достаточно велик, и наличие заблаговременного прогноза опасного конвективного явления – актуальнейшая задача. Например, за июнь 2018 года град, выпавший на исследуемой территории, причинил ущерб около 95 млн рублей. Основной ущерб пришелся на агросектор и носил характер повреждения посевов.

Известно, что на территории юга Западной Сибири синоптические условия формирования гроз и гроз с градом чаще всего связаны с прохождением холодных катафронтов и фронтов окклюзии. Наряду с фронтальными грозами (включая случаи сопутствующего града), которые в исследуемом регионе составляют более 80%, в летние месяцы увеличивается доля внутримассовой облачности, продуцирующей опасные конвективные явления. Этому способствуют, в первую очередь, участвовавшие продолжительные волны тепла [1, 2], при которых происходит прогрев подстилающей поверхности до температур выше 30–35 С. Замечено, в конвективных кластерах, сформированных во фронте окклюзии, может одновременно существовать несколько конвективных ячеек, способных продуцировать град. Поэтому участились случаи практически одновременного выпадения града в 2–4 пунктах на территориях площадью 500–600 км<sup>2</sup>.

Отметим, что повторяемость числа дней с градом за сезон сравнима или превышает наибольшее число дней с градом, зарегистрированное в период с 1936 по 1965 годы. По данным климатических справочников, град в те годы не отмечался в ночные и утренние часы, тогда как в период с 2015 по 2018 ночной и утренний град наблюдался в 5% случаев (9 раз).

На рисунке 1 приведено распределение частоты повторения случаев града и максимально зафиксированного в районе станции диаметра градин за период 2015–2018 гг. За этот период на исследуемой территории в районе метеорологических станций было зафиксировано 306 случаев выпадения града.

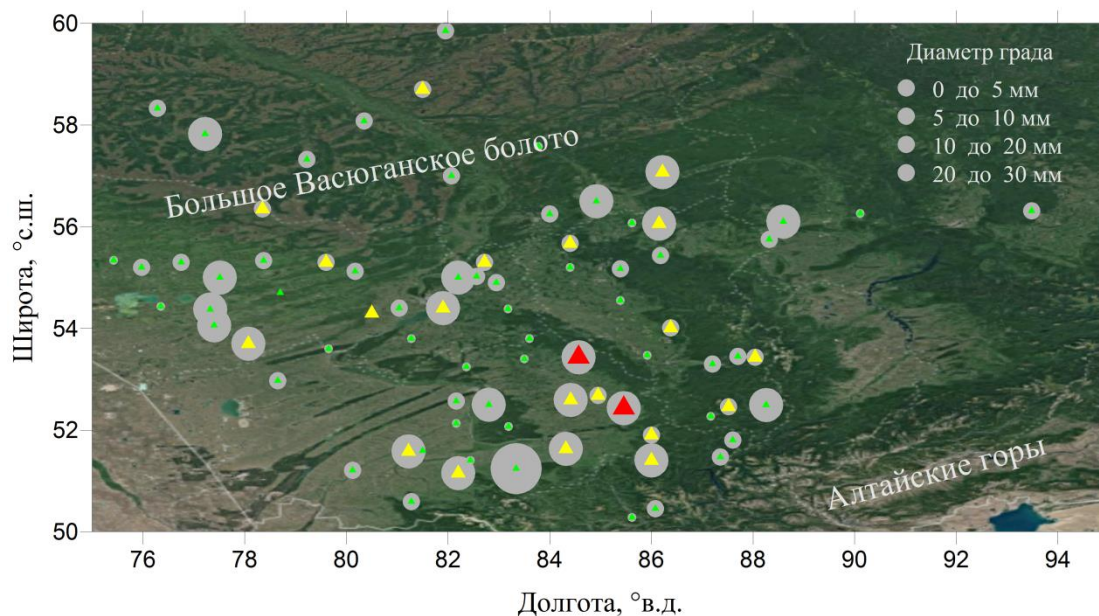


Рисунок 1. Частота повторения случаев града и максимально зафиксированного диаметра градин за период 2015–2018 гг.

Повторяемость (красным 7–20 случаев, желтым 4–7 случая, зеленым 1–3 случая)

Диаметр града в 55% случаев не превышал 5 мм, в 35% около 6–10 мм и в 10% случаев диаметр града превышал 10 мм. Град диаметром более 16 мм зафиксирован в 13 случаях, из них в 2018 – 8, в 2016 – 2, в 2015 – 3. При этом, продолжительность выпадения града менее 10 минут отмечалась в 83% случаев, при этом в 55% случаев град продолжался до 5 минут. Наиболее продолжительный град (от 30 минут до часа) отмечалась в 2% случаев. Замечено, что град диаметром менее 10 мм имел, как правило, небольшую продолжительность, лишь в 20% случаев град продолжался более 10 минут. Тогда как град с диаметром более 10 мм уже в 25% случаев продолжался более 10 минут, что часто приводило к формированию на подстилающей поверхности слоя града до 10–15 см.

Исследование характеристик конвективной облачности в дни с градом показало, что в летний конвективный сезон над территорией Западной Сибири мощность кучево-дождевого облака, продуцирующего град, достигает изобарической поверхности 200 гПа. Уровень конденсации в дни с градом во все месяцы на севере исследуемого региона (58 °с.ш.) находится ниже на 200 метров по сравнению с южной территорией (55 °с.ш.), максимальная разность между северной и южной частью достигает 500 метров в августе. Толщина конвективно-неустойчивого слоя (КНС) в дни с градом превышает 4 км, увеличиваясь к югу, и в июле может превышать 7 км. Необходимо отметить, что высота верхней границы КНС может превышать вышеуказанные значения, поскольку в сроки максимального развития конвекции аэрологическое зондирование атмосферы в исследуемом регионе не производится. Пороговые значения температуры воздуха подоблачного слоя, характерные для градовых облаков, изменяются от месяца к месяцу в диапазоне 7–11°C на севере, 8–12°C на юге территории исследования. Замечено, в периоды аномально жаркой погоды чаще формируются крупные градины размером, превышающим 20 мм. Общая площадь конвективных кластеров, формирующих градовые очаги в последние годы стала заметно больше, к тому же, появились случаи одновременного выпадения града на линиях вовлечения *Sb* в окклюзию.

Исследование выполнено в рамках гранта РФФИ № 18-45-700010 p\_a.

## Литература

1. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 1535 p. <http://ipcc.ch/report/ar5/wg1/>.
2. Кужевская И.В., Поляков Д.В., Волкова М.А., Барашкова М.А. Температурные волны тепла как отражение изменчивости современных климатических условий жизнедеятельности на территории Томской области // Экология человека. 2015. №2. С. 3–9.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ДАТЧИКА НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛА С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ ДЛЯ МОНИТОРИНГА АТМОСФЕРНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

*В.Я. Ерофеев, М.В. Кабанов*

Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск  
kabanov@imces.ru

Разработан датчик, основой которого является парамагнитное вещество – никелид титана. Элемент, изготовленный из этого материала способен в присутствии постоянной механической нагрузки совершать колебательные движения при циклическом изменении температуры относительно некоторой критической точки фазового перехода вещества из одной модификации в другую. Вблизи этой критической точки система является существенно нелинейной [1], потенциально способной реагировать на воздействие внешних факторов, определяющих состояние окружающей среды в целом.

Работа датчика осуществляется в режиме непрерывного мониторинга. Типичные графики сигналов, выдаваемых аппаратурой со встроенным датчиком, показаны на рисунке 1.

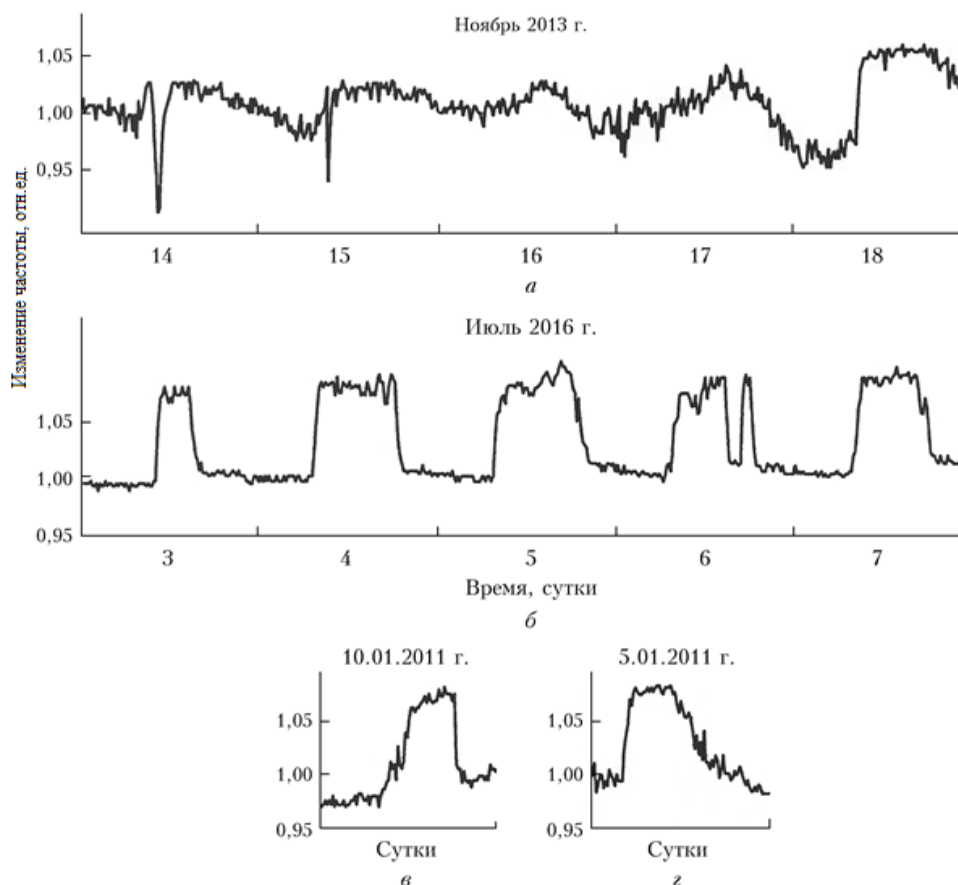


Рисунок 1. Временная зависимость частоты колебаний TiNi элемента



Иррегулярное поведение сигналов (а) перемежается с квазипериодической зависимостью (б). Присутствуют отдельные виды вариаций сигналов, такие как пикообразные (а, 14 ноября 2013); П-образные (б, 4 июля 2016); медленный подъем до максимума и быстрый спад (в); быстрый подъем и медленный спад (г). Анализ полученных данных показал, что датчик может служить достаточно чувствительным инструментом для мониторинга метеорологических процессов [2]. Его использование дает также предпосылки для определения ведущих факторов в формировании состояния окружающей среды, включая электрические поля в атмосфере. Так, при сравнении одновременных ходов показаний датчика и значений какого-либо параметра, характеризующего состояние окружающей среды, были получены синхронные вариации, свидетельствующие об общем внешнем факторе, воздействующим на атмосферные процессы [3].

На рисунке 2 представлен ход кривых показаний датчика и значений абсолютной влажности приземной атмосферы за один и тот же период времени. Известно, что малоамплитудные вариации влажности связаны с вариациями концентрации капельных квазикристаллических кластеров, образованных за счет электрического межкапельного взаимодействия. Совпадение графиков близко к 100% с учетом того, что в отдельные моменты совпадение идет по осредненным показаниям датчика (участки, обозначенные пунктирными линиями), что связано с механизмом формирования влаги в атмосфере, в том числе с инерционностью этого процесса.

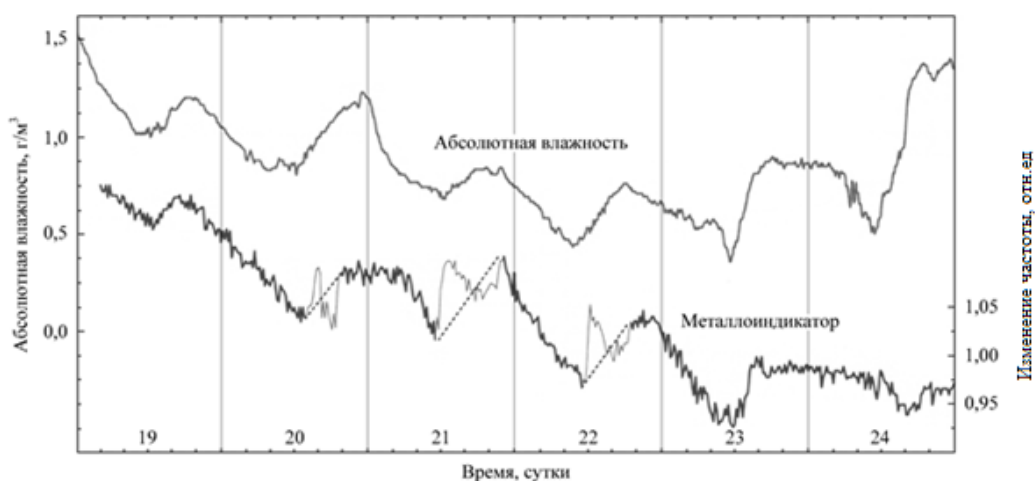


Рисунок 2. Сравнение временной зависимости частоты колебаний TiNi элемента и абсолютной влажности в приземной атмосфере (по данным 19–24 февраля 2011 г.)

На рисунке 3 представлена аналогичная взаимосвязь показаний датчика и величины напряженности электрического поля приземной атмосферы. Здесь также наблюдается совпадение (в данном случае, зеркальное) графиков, близкое к 100%.

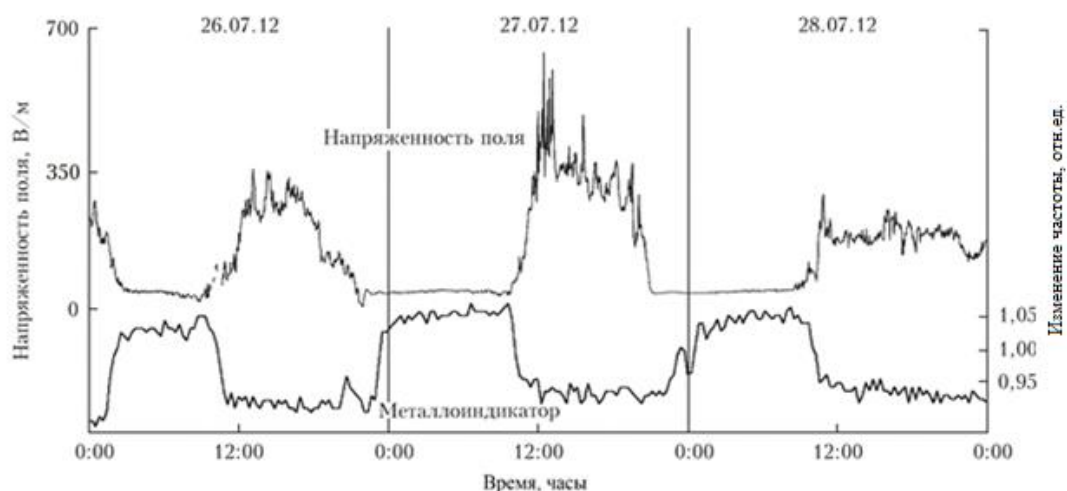


Рисунок 3. Сравнение временной зависимости частоты колебаний TiNi элемента и напряженности электрического поля в приземной атмосфере

Синхронный ход вариаций свидетельствует о том, что в попарных системах (металл – влажная среда и металл – электрическое поле) происходят одновременные процессы в каждой из систем. В обоих случаях присутствует модуляция электрического потенциала, которая непосредственно участвует в формировании вариаций влажности и напряженности электрического поля. Однако, непосредственное влияние наблюдаемых вариаций атмосферного электрического поля представляется невозможным для структурных превращений в парамагнитном веществе датчика. Поэтому можно говорить о наличии синхронизма колебаний параметров в рассматриваемых случаях под воздействием общего внешнего фактора. Таким внешним фактором, как показывает анализ литературных данных, с наибольшей вероятностью может быть фактор внеземного происхождения (например, [4]).

### Литература

1. Snanbra K., Purdy G.R. / J.Appl. Phys. 1968. Vol. 39. № 5. P. 2176–2181.
2. Ерофеев В.Я., Кабанов М.В., Выборнов П.В., Комаров А.И. Эффект синхронизма импульсов атмосферного давления и изменения состояния разнородных сред // ДАН. 2015. Т.465, № 6. С. 727–731.
3. Ерофеев В.Я., Кабанов М.В. Вариации деформационных параметров никелида титана при циклировании в интервале мартенситного превращения // ДАН. 2019. Т. 484, № 6. С. 670–673.
4. A.V.Gurevich, A.N.Karashtin // Phys. Rev. Letters. 110, 185005. Publ. May 2013.

## АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ АТМОСФЕРЫ ПРИ СНЕГОПАДЕ И МЕТЕЛЯХ

*Л.М. Малкандуева*

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» г. Нальчик  
lmalkandu@mail.ru

В атмосфере всегда присутствует вертикальное электрическое поле. При ясной погоде это поле слабое и составляет примерно от 0 до +200 вольт на метр (В/м). Такое поле принято считать положительным. И оно всегда направлено к земле. Вариации ее значений в течение суток обусловлены как локальными, так и глобальными факторами. Наиболее интересным свойством атмосферного электричества признано ее, так называемая унитарная вариация, которая в настоящее время интенсивно исследуются как российскими учеными, например научной школой ОИФЗ РАН, [1] так и зарубежными учеными [2, 3]. При этом грозы также рассматриваются основным генератором энергии в глобальной атмосферной электрической цепи.

Явление унитарной (UT) вариации заключается в том, что значение электрического поля атмосферы по всей Земле одновременно возрастает на 20% к моменту времени, когда в Лондоне 19 часов [4]. Данное время UT- принято как мировое. Унитарную вариацию (кривая Карнеги) обнаружили в 20-х годах прошлого столетия Симпсон, Маучли и Свердруп в результате наблюдений атмосферного электричества над океанами и полярными широтами [5].

Исследования вариаций потенциала электростатического поля атмосферы во время снегопада нами выполнены на станциях «Пик Чегет», высота 310 м и «Нальчик», высота 540 м. Характерными свойствами суточных вариаций квазистатического электрического поля на станции «Пик Чегет» в условиях «хорошей погоды» являются наличие волнообразного понижения значений  $E$  в освещенное время суток. Также прослеживается явная сезонная зависимость значения  $E$ . В зимний период значение  $E$  выше, чем в летний период на 50–100В/м. На рисунке 1 приведены суточный ход напряженности электрического поля атмосферы характерный для условий «хорошей» погоды на высокогорной станции «Пик Чегет» в разные периоды года.

В данном случае «хорошая» погода подразумевает отсутствие в месте регистрации поля облачных образований, осадков, туманов и других погодных явлений.

Независимо от периода наблюдений в условиях «хорошей» погоды значение напряженности поля не превышает +300 в/м и оно всегда положительное.



Рисунок 1. Суточные изменения электрического поля атмосферы (относительные значения) на станции «Пик Чегет», высота 3040 м. н.у.м. при «хорошей» погоде, для двух сезонов

На рисунок 2–4 приведены записи значений напряженности электрического поля (В/м) и количества осадков (мм) при снегопаде и при метелях. Как видно из этих данных выпадение снега и метели приводят к значительному отклонению динамики электрического поля от естественного хода (рисунок 1). При снегопаде напряженность поля может резко меняться, доходя до 10000 В/м. При этом метели (порывы ветра) вызывают нерегулярные резкие изменения поля. На рисунке 2 приведены значения напряженности электрического поля атмосферы с 5 по 6 декабря 2012 г. и количество выпавших осадков на станции «Пик Чегет» при снегопаде. На станции в период с 5 по 6 декабря 2012 г. наблюдалось наличие сплошной облачности нижнего яруса. Преобладали облака слоисто-кучевые переходящие в кучево-дождевые. Осадки в виде обложного снега, переходящего в ливневые осадки. Ветер западного направления 5–9 м/с, порывы до 21 м/с. Наблюдалась метель с ухудшением видимости до 500 м.

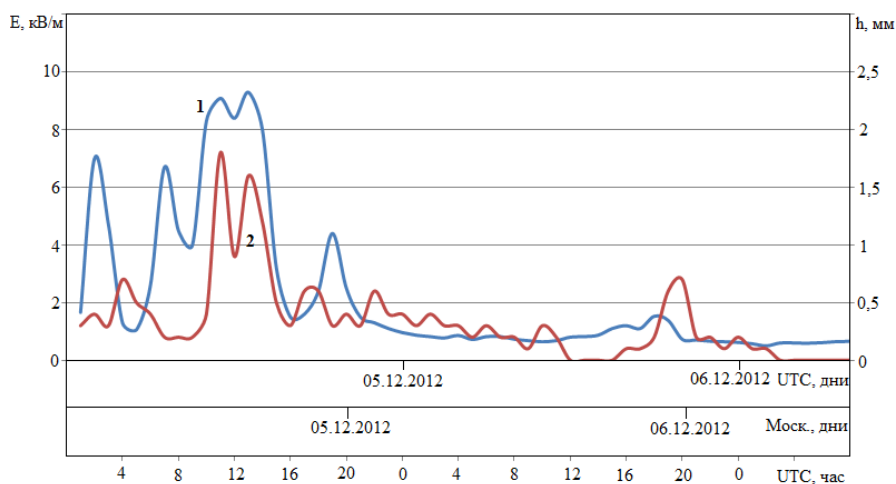


Рисунок 2. Ход напряженности электрического поля атмосферы с 5 по 6 декабря 2012 г. (кривая 1) и количество выпавших осадков (кривая 2) на станции «Пик Чегет» при снегопаде  
Скорость ветра около 9 м/с

Снег с небольшими перерывами наблюдался в течение всего периода. Осадков выпало 18,3 мм. Прирост снега составил 9 см. Давление имело тенденцию к понижению – около 703,6 при отсутствии осадков и около 699,5 мм ртутного столба при выпадении снега. Температура воздуха в течении суток менялась от  $-2,6^{\circ}\text{C}$  до  $-7,6^{\circ}\text{C}$ . Основными свойствами погоды в указанный период являлись выпадение снега с различной интенсивностью в течении суток 5 февраля до 0,3 мм/час и 0,2 мм/час 6 февраля.

Как видно из рисунка 2, при такой динамике погодных явлений, временной ход градиента потенциала электрического поля атмосферы в указанные два дня можно разбить на два периода – с 0 до 22 часа 5 декабря при снегопаде интенсивностью более 0,5 мм/час и остальной период с ясной «хорошей» погодой с 22 часов 5 декабря по 24 часов 6 декабря. Периоду без осадков в рассматриваемые на рисунке 2 дни соответствуют значения градиента потенциала электрического поля атмосферы, характерные значения градиента поля «хорошей» погоды. Они варьируются от 100 В/м до 200 В/м. В период снегопада значения градиента потенциала электрического поля атмосферы могут меняться от +200 В/м до +10 кВ/м.

Реакцией хода напряженности поля на снегопад являются резкие скачки от нормального значения +200 В/м до значений +8 кВ/м при интенсивности снегопада более 0,7 мм/час.

Амплитуда изменений регистрируемых на земле значений градиента потенциала при снегопаде не зависит от его интенсивности происходит в положительной полярности поля и составляет около +2 кВ/м...+6 кВ/м.

Указанные изменения при снегопаде без ветра происходят сравнительно медленно и, как правило, они связаны с началом или прекращением снегопада. Скорость изменения градиента потенциала электрического поля атмосферы может достигать  $\pm 0,03$  кВ/мин ...  $\pm 0,05$  кВ/мин. Следует отметить, что при снегопаде градиент потенциала электрического поля атмосферы всегда положительный. При этом, чем интенсивнее снегопад, тем больше амплитуда и частота изменений градиента потенциала электрического поля атмосферы. Таким образом, частицы снега заряжены электрическим зарядом положительной полярности.

Примерно, аналогичная погода имела место и в период с 18 января по 19 января 2013 г. в пункте измерений на станции «Пик Чегет» (рисунок 3). Наблюдалась облачная ветреная погода с выпадением осадков в виде снега. Преобладали облака слоисто-кучевых форм. Видимость 2–4 км. Температура воздуха в течение суток менялась от  $-12,7^{\circ}\text{C}$  до  $-14,9^{\circ}\text{C}$ . Ветер западных направлений 7–10 м/с, порывы до 14 м/с, метель с выпадением снега. Осадков выпало 11,1 мм. Из-за сильного ветра прирост снега не наблюдалось. Высота нижней границы облачности – ниже уровня станции. Облачность до 8 баллов, видимость до 2000 м при выпадении снега. Атмосферное давление составляла около 692,5 мм ртутного столба при выпадении снега. Основными свойствами погоды в указанный период являлись выпадение снега с различной интенсивностью в течение всего срока с 18 февраля по 19 февраля 2013 г. Во все сроки наблюдений выпадал снег различной интенсивности от 2 до 15 мм за 3 часа (сроки наблюдений).

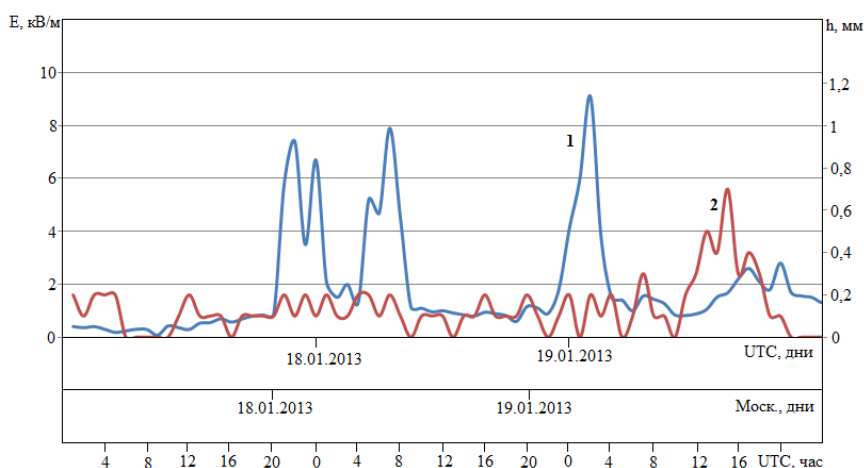


Рисунок 3. Значения напряженности электрического поля атмосферы с 18 февраля по 19 февраля 2013 г. (кривая 1) и количество осадков (кривая 2) на станции «Пик Чегет» при снегопаде с метелями. Скорость ветра 7–10 м/с

На рисунке 4 приведены значения напряженности электрического поля атмосферы и количество осадков на станции «Пик Чегет» при снегопаде с метелями в период с 5 февраля по 6 февраля 2013 г.

Погода в районе станции «Пик Чегет» с 5 февраля по 6 февраля 2013 г. имела следующие характеристики. В начале срока наблюдалось малооблачная погода – облака верхнего яруса,

ветер западных направлений 5–8 м/с, порывы до 21 м/с, поземок. Температура воздуха в течении суток менялась от  $-2,6^{\circ}\text{C}$  до  $-9^{\circ}\text{C}$ . Атмосферное давление составляла от 699,5 до 703,6 мм ртутного столба при выпадении снега. К середине срока облачность уплотняется, начинается осадки в виде обложного снега, переходящего в ливневой, горизонтальная видимость уменьшилась с 20 км до 200 м. Усиление ветра до 30 м/с, метель. Количество осадков, выпавших за это время – 8,7 мм, прироста снега не наблюдалось. Из-за сильного ветра имело место перераспределение снежного покрова с 80 см до 70 см. За весь период наблюдений имело место выпадение снега различной интенсивности от 6 до 22 мм в течение 14 часов. 5 февраля с 10 до 24 часов по UTC имело место рост значений напряженности поля от 300 В/м до 10 кВ/м.

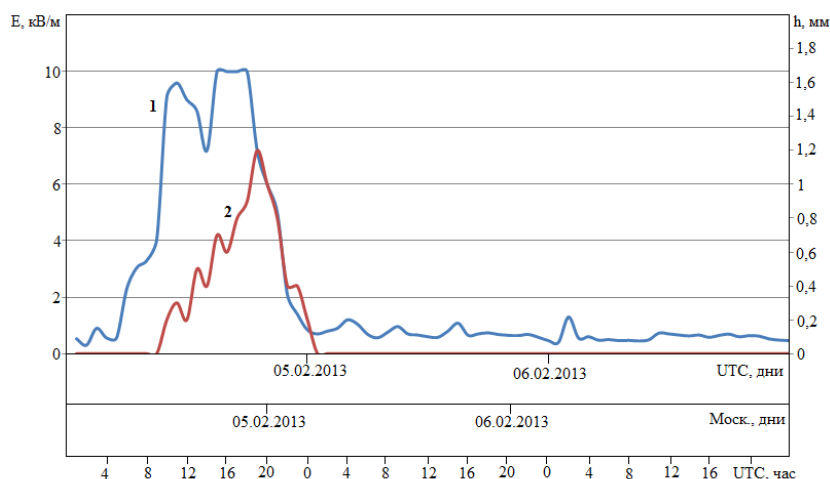


Рисунок 4. Суточный ход напряженности электрического поля атмосферы с 5 февраля по 6 февраля 2013 г. (кривая 1) и количество осадков (кривая 2) на станции «Пик Чегет» при снегопаде с метелями. Скорость ветра до 21 м/с

Всего были проведены измерения вариаций напряженности электрического поля атмосферы при 20 снегопадах. Во все эти дни наблюдались значительные отклонения от ее естественной динамики – электрического поля «хорошей» погоды. При метелях при снегопаде имеет место интенсивный перенос снега ветром в приземном слое атмосферы, достаточно развитый по вертикали, так что невозможно определить состояние неба (количество и форму облаков) и невозможно установить, выпадает ли снег из облаков или переносится только снег, поднятый с поверхности снежного покрова. Горизонтальная видимость на уровне 2 м обычно составляет от 1 – 2 км до нескольких сотен и даже до нескольких десятков метров. Возникает обычно при сухом не смёрзшемся снежном покрове и скорости ветра 10 м/с и более. При таких условиях и резких порывах ветра имеет место значительные скачки поля, характеризующиеся:

- изменениями поля от + 200 В/м (электрическое поле «хорошей» погоды) до 10кВ/м при снегопаде;
- продолжительностью пульсаций поля от 10 с до 30 мин;
- знак изменения поля при снегопаде всегда положительный.

Анализ результатов экспериментов, представленных на рисунках 2–4, показывают, что изменения электрического поля практически всегда совпадают по времени с временными вариациями интенсивности осадков, что служит подтверждением нашей модели, основанной на идее Френкеля при использовании её в свободной атмосфере. При других погодных явлениях, выпадение жидких осадков, грозах и др., частицы осадков могут приобретать и заряды отрицательной полярности [6]. Снежинки представляют собой пористую среду, состоящую из твердого каркаса, образованного плотно прижатыми друг к другу кристаллами льда и воздуха, наполняющего свободные пространства между этими кристаллами. Кристаллы льда покрываются водяной пленкой, сохраняющейся до температур  $-40^{\circ}\text{C}$  [7]. При понижении температуры в местах контакта происходит спекание кристаллических зерен, твердый каркас становится жестким, он приобретает способность

оказывать сопротивление под действием ветровых нагрузок. В целом снежинки представляют собой трехфазную среду – вода, воздух, лед, на границах межфазной поверхности которых существуют контактные разности потенциалов [8]. Разрушение контактов приводит к разделению объемных электрических зарядов, искажающих естественные электрические поля в атмосфере. Арабаджи В.С. [9] объясняет возникновение заряда в переносимой ветром снежной массе обменом зарядами при контакте отдельных частиц между собой: плоской грани одного кристалла льда с острым выступом другого. Он допускает, что выступ на плоской грани кристалла имеет форму цилиндра и считает, что электрическое поле, создаваемое периферическими электронами поверхности твердого тела в верхней части выступа, будет в 2 раза больше, чем над плоской поверхностью. В этом случае при контакте выступа одного кристалла льда с плоской поверхностью другого кристалла поверхностным электрическим полем электроны будут перегоняться с выступа на плоскость. У мелких кристаллов относительное количество выступов больше, чем у крупных кристаллов, и при контакте мелкие кристаллы будут заряжаться положительно, а крупные отрицательно. Последующее разделение зарядов происходит в поле силы тяжести земли. Более тяжелые кристаллы с отрицательным зарядом опускаются вниз, а более легкая снежная пыль с положительным зарядом остается взвешенной в потоке воздуха. Благодаря этим процессам во время снежных метелей у земной поверхности возникают сильные электрические поля.

### Литература

1. Электрическое взаимодействие геосферных оболочек. Сборник статей под редакцией Моргунова В.А., Троицкая В.А., Анисимова С.В. Издательство ОИФЗ РАН. 2000. С.209.
2. *Volland H.* Atmospheric Electrodynamics. Heidelberg: Springer, 1984. P. 128–136.
3. *Despiau S.* Electric field and ionic concentration variations observed at ground level in storm conditions, *Ann.Geophys.*10 (1992) 75–81.
4. *Аджиев А.Х., Куповых Г.В.* Измерение электрического поля атмосферы в высокогорных условиях Приэльбрусья Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т 51, №6, С. 710–715.
5. *Имянитов И.М.* Современное состояние исследований атмосферного электричества/ И.М. Имянитов, К.С. Шифрин // Успехи физических наук. 1962. Т. LXXVI, В. 4. С. 593 – 642.
6. *Аджиев А.Х., Даурова З.А.* Суточные вариации электрического поля атмосферы при погоднo - климатических изменениях. Глобальная электрическая цепь: материалы Второй Всероссийской конференции / Геофизическая обсерватория «Борок» - филиал Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН - Ярославль: Филигрань, 5–9 октября 2015.
7. *Флетчер К.* Вычислительные методы в динамике жидкости. М.: Мир. 1991. Т. 1, 2.
8. *Френкель Я.И.* Кинетическая теория жидкостей. Изд. АН СССР. Наука. 1975. 592 с.
9. *Арабаджи В.И.* Загадки простой воды // М.: Знание. 1973. 96 с.

### СВЯЗЬ ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТИ ГРАДОВЫХ ОБЛАКОВ С ИХ РАДИОЛОКАЦИОННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

М.Т. Абшаев<sup>1</sup>, А.М. Абшаев<sup>1</sup>, Ж.М. Геккиева<sup>2</sup>, А.Х. Аджиев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НПЦ «Антиград», г.Нальчик

<sup>2</sup>ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г.Нальчик  
abshaev@mail.ru, julduz\_gekkieva@mail.ru

Во многих регионах проблема обеспечения безопасности жизнедеятельности в условиях нарастающей грозоградской активности обуславливает высокую актуальность развития методов прогноза, мониторинга, и предотвращения мощных градовых процессов, сопровождающихся интенсивной грозовой деятельностью, ливневыми дождями, паводками и селями, которые наносят серьезные материальные потери и приводят к человеческим жертвам.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование взаимосвязи грозовой активности градовых облаков с их радиолокационной отражаемостью и водосодержанием, зависимости грозовой активности от стадии развития и изучение особенностей пространственного положения разрядов разных типов.

В последние 30 лет на Северном Кавказе отмечается тенденция повышения частоты и интенсивности гроз и града в предгорных и равнинных районах и некоторое снижение в горных районах [1], связанная с отмеченными в [6] изменениями климата и глобальной циркуляции атмосферы (повышение температуры на 0,9 – 1,0°C и влажности воздуха на 5–6%, изменение направления ведущих потоков с запад и юго-западных на юго-западные и южные).

Исследования проведены в 2016–2018 гг. по данным наблюдений Ставропольского программно-технического комплекса «АСУ-МРЛ», который обеспечивал синхронное получение и обработку данных 10 см канала радиолокатора МРЛ-5 и 4-пунктной сети грозопеленгаторов [3], на которой в городах Черкесск, Ставрополь, Зеленокумск и Кызбурун установлены датчики фирмы «Vaisala» LS8000.

В период с 01.04.2016 г. по 30.09.2018 г. получен обширный экспериментальный материал, включающий данные наблюдений в течение около 300 дней с облачностью, в том числе 183 дня с грозой и 132 дня с градом, когда были получены совмещенные в реальном масштабе времени радиолокационные и грозопеленгационные данные. Число файлов обзора в рассмотренные дни с градом варьировало от 90 до 310. В периоды, когда эти облака находились в зоне действия ракетных пунктов Краснодарской и Ставропольской Военизированных противорадиолокационных служб Росгидромета, на них проводилось воздействие с целью предотвращения града.

Из обширного материала наблюдений для анализа в данной работе выбраны материалы по эволюции 10 мощных градовых облаков. В качестве примера рассмотрим характеристики одного из 6 градовых облаков, наблюдавшихся 1 июля 2018г.

Это облако зародилось в 12<sup>48</sup> юго-западнее позиции радиолокатора на удалении 130 км и перемещалось на северо-восток со средней скоростью около 60 км/час и с 13<sup>13</sup> до 16<sup>08</sup> прошло по территории Краснодарского и Ставропольского краев, оставив за собой полосу интенсивных градовых и ливневых осадков длиной 180 км. По пространственному строению и структуре радиоэха облако представляло собой суперячейку, с обширным навесом радиоэха и областью слабого радиоэха, указывающим на наличие обширной струи восходящего потока. По радиолокационным данным суперячейка достигла максимума своего развития в 14<sup>08</sup>. По данным наземных наблюдений с 13<sup>30</sup> до 16<sup>00</sup> из этого облака выпадал град и интенсивные ливневые осадки, сопровождавшиеся ураганным ветром. Размер града достигал 3 см, а местами 4 см и более. Ширина полосы града варьировала от 4 до 9 км. Несмотря на большую скорость перемещения облака, на поверхности земли оставался слой града, который нанес серьезные повреждения посевам, садам, автомашинам, крышам и стеклам строений. Количество выпавших осадков достигало 30 мм, а местами 50 мм, что привело к паводкам и подтоплению улиц некоторых городов и сел.

На рисунке 1 показан временной ход параметров облака: максимальной радиолокационной отражаемости ( $Z_{max}$ , dBZ), высот изолиний отражаемости  $Z = 25, 35, 45 \dots 65$  dBZ ( $H_{Zi}$ , km); объемов радиоэха ( $V_{Zi}$ , km) и интегрального водосодержания облака ( $M_{Zi}$ , kton) внутри изолиний  $Z = 15, 25, 35 \dots 65$  dBZ в суперячейковом градовом облаке №4, наблюдавшемся 01.07.2018.

На рисунке 2 представлен временной ход размера града ( $d_{max}$ , cm), площади радиоэха ( $S_{radarecho}$ ), площадей осадков в виде дождя ( $S_{rain}$ ) и града ( $S_{hail}$ ), значений тока LF разрядов и частоты молниевых разрядов всех типов (VHF, LF<sub>total</sub>, LF+, LF-).

Из рисунков 1 и 2 следует, что грозовая деятельность в этом облаке началась в 12<sup>54</sup>, когда отражаемость достигла значения  $Z_{max} = 50$  dBZ, и усиливалась по мере усиления процесса осадкообразования. Примечательно, что сначала были только разряды облако-земля LF+ и LF-, а разряды VHF начались только в 13<sup>33</sup> перед началом образования града в облаке. Пиковые значения тока разрядов варьировали от 10 до 80 А.

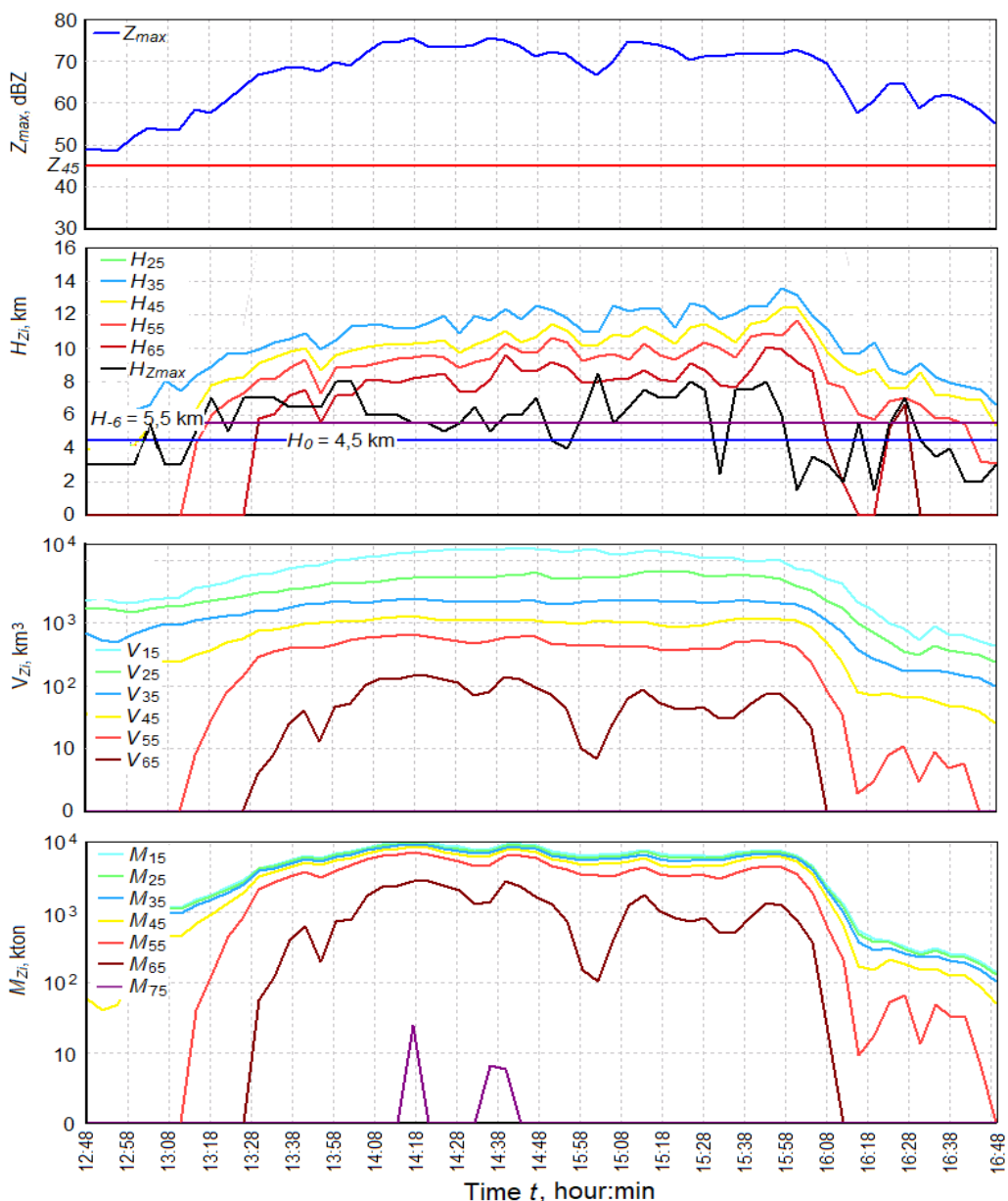


Рисунок 1. Временной ход  $Z_{max}$ ,  $H_{Zi}$ ,  $V_{Zi}$  и  $M_{Zi}$  суперячейкового градового облака №4, наблюдавшегося 01.07.2018 г

С 12<sup>58</sup> до 13<sup>38</sup> частота электрических разрядов увеличивалась по мере увеличения  $Z_{max}$ , высот  $H_{Zi}$ , объемов  $V_{Zi}$  и интегрального водосодержания  $M_{Zi}$ . В период квазистационарного состояния облака с 12<sup>38</sup> до 14<sup>34</sup>, когда значения  $H_{Zi}$ ,  $V_{Zi}$  и  $M_{Zi}$  мало менялись, частоты молниевых разрядов LF+ и LF- были примерно одинаковые и варьировали в пределах от 10 до 20 разрядов в минуту. Частота VHF разрядов была меньше, но постепенно нарастала.

В период с 14<sup>34</sup> до 15<sup>41</sup> фронтальная часть навеса радиоэха засеивалась с помощью противоградовых ракет «Алазань-6». В течение 67 минут в область слабых восходящих потоков было внесено 200 ракет, способных создать около  $10^{18}$  кристаллизующих частиц.

В период засева и в последующем отмечается постепенное растекание облака, увеличение площади радиоэха и площади дождя, а также постепенное увеличение частоты электрических разрядов всех типов. Особенно заметно увеличивается частота внутриоблачных разрядов VHF, достигнув к 15<sup>58</sup> до 350 разрядов/мин. При этом визуально отмечалось почти постоянное мерцающее свечение облака.



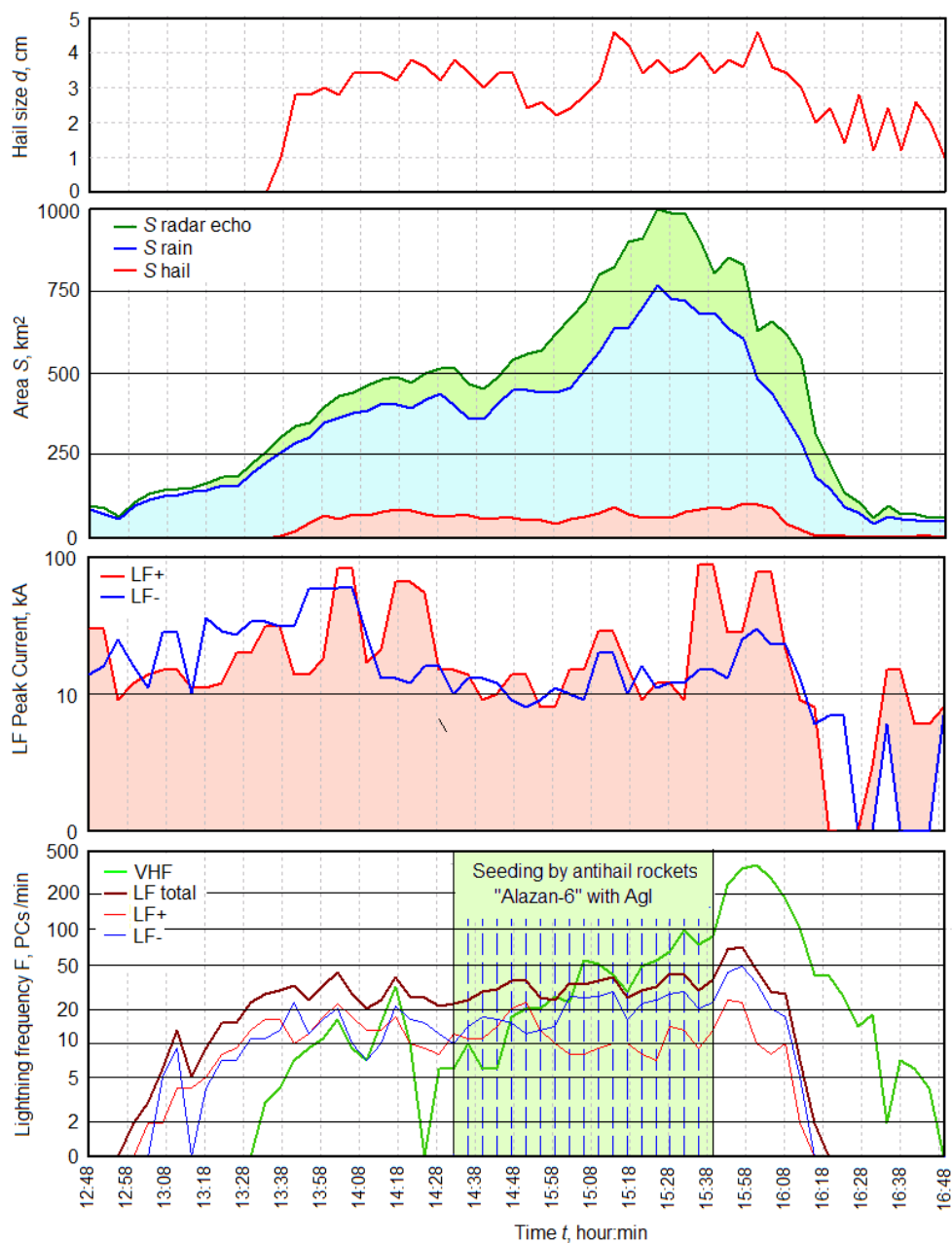


Рисунок 2. Временной ход размера града ( $d_{max}$ , см), площади радиозэха ( $S_{radarecho}$ ) и площадей осадков в виде дождя ( $S_{rain}$ ) и града ( $S_{hail}$ ), значений тока LF разрядов и частоты молниевых разрядов всех типов ( $VHF$ ,  $LF_{total}$ ,  $LF+$ ,  $LF-$ ) в суперячейковом градовом облаке № 4, наблюдавшемся 01.07.2018 г.

Особо следует отметить, что разряды  $LF+$  и  $LF-$  в основном сосредоточены на наветренном фланге облака в области повышенной отражаемости и водосодержания, где происходит образование и рост града, а разряды  $VHF$  преимущественно сосредоточены на подветренной стороне в области более слабых осадков и наковальни (рисунок 3).

Из рисунка 2 следует также, что через 10 минут после начала засева помимо увеличения частоты разрядов отмечается уменьшение размера града, объема ( $V_{65}$ ) и интегрального водосодержания градового очага, исчезает изоконтур  $Z = 75$  dBZ, объем  $V_{75}$  и  $M_{75}$ , а также уменьшение токов разрядов  $LF+$  и  $LF-$ . Уменьшаются также до 10 А токи разрядов, достигавшие до засева 50–60 А. После прекращения засева отмечается многократное увеличение частоты разрядов всех типов, и увеличение токов разрядов, особенно токов разрядов  $LF+$ , достигших 70–80 А.

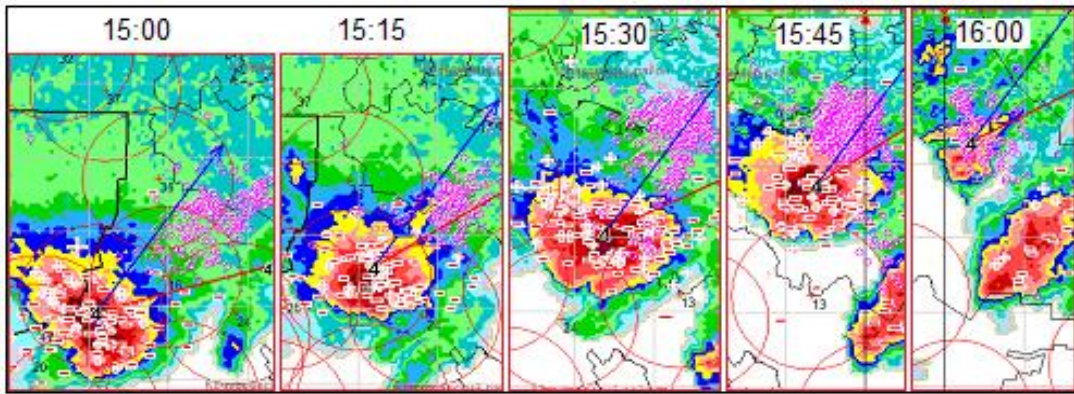


Рисунок 3. Карта максимума отражаемости с пеленгами грозных разрядов в стадии квазистационарного состояния суперячейки ( $15^{00}$ ,  $15^{15}$ ,  $15^{30}$ ,  $15^{45}$ ) и в момент начала диссипации  $16^{00}$ . Хорошо видно, что разряды LF+ и LF- наблюдаются в области повышенной отражаемости, а разряды VHF на подветренном фланге. Синий вектор указывает направление среднего ветра в слое атмосферы от 700 до 500 мБ

На рассмотренном примере эволюции одного градового облака видно, что его грозовая активность повышается по мере развития, усиления процесса осадкообразования и увеличения отражаемости (рисунок 4).

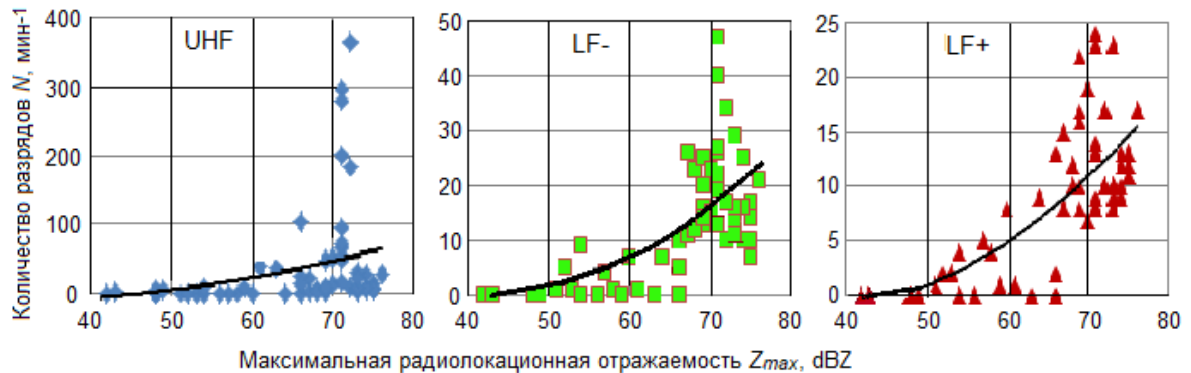


Рисунок 4. Зависимость частоты разрядов VHF, LF+ и LF- от максимальной радиолокационной отражаемости  $Z_{max}$

Обобщение этих данных по многим градовым облакам подтверждает этот вывод. На рисунке 5 представлена общая для 10 градовых облаков зависимость частоты VHF и LF- разрядов от максимальной радиолокационной отражаемости, высоты повышенного радиосэха  $H_{45}$  и интегрированного по вертикали водосодержания (VIL). На этом рисунке можно видеть, что разряды всех типов начинаются при значении  $Z_{max} > 40$  dBZ и увеличивается по мере увеличения значений  $Z_{max}$ ,  $H_{45}$  и VIL.

Анализ экспериментального материала показал, что электрические разряды в развивающихся градовых облаках Северного Кавказа начинаются после достижения радиолокационной отражаемости около 40 dBZ. По мере дальнейшего развития облака и усиления процесса осадко-градобразования частота внутриоблачных разрядов VHF и разрядов облако-земля положительной (LF+) и отрицательной (LF-) полярности увеличиваются. Это объясняется тем, что процессы роста дождевых капель, их разбрызгивание, образование и деление кристаллов, зарождение и рост града приводят к электризации облачных частиц [5], пространственному разному вертикальными потоками мелких и крупных частиц, имеющих разноименные заряды, и росту зарядов напряженности электрического поля до пробойных значений.

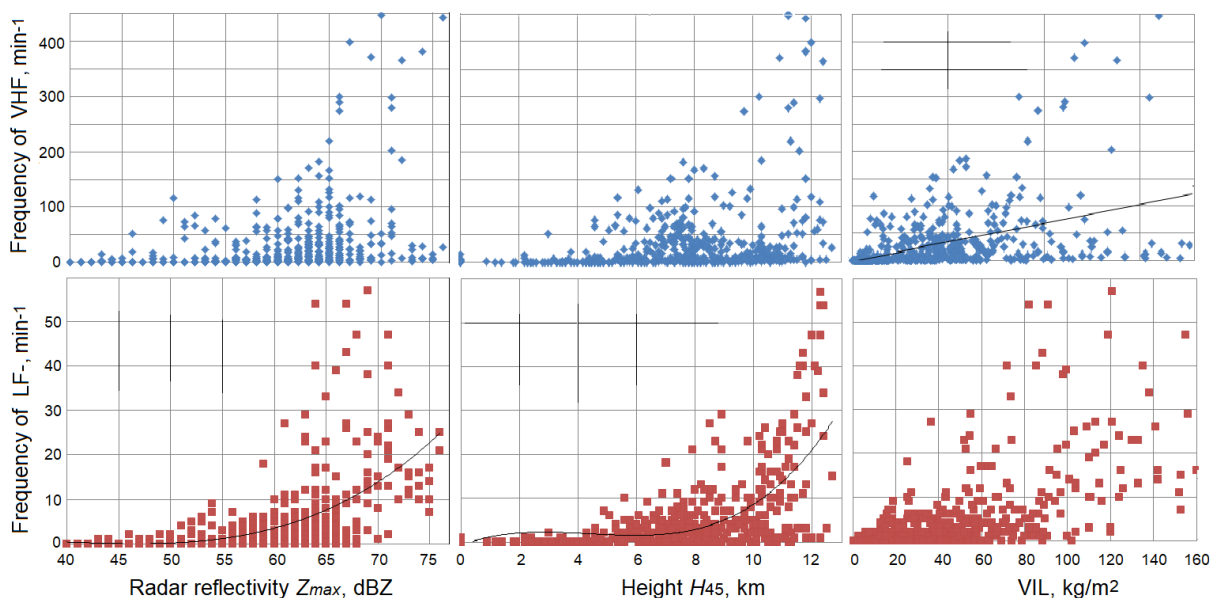


Рисунок 5. Частота разрядов VHF и LF- в зависимости от отражаемости  $Z_{max}$ , высоты вершины повышенного радиоэха  $H_{45}$  и VIL в 10 градových процессах

Частота всех типов разрядов растет с увеличением радиолокационной отражаемости  $Z_{max}$ , высот верхней границы ( $H_{Zi}$ ) и объемов ( $V_{Zi}$ ) изолиний  $Z_i = 45, 55, 65, 75$  dBZ, а также с увеличением вертикально интегрированного (VIL) и объемно интегрального ( $M_{Zi}$ ) водосодержания облаков. Наибольшая грозовая активность градовых облаков отмечается в стадии их зрелости, когда  $Z_{max} \geq 70$  dBZ. Можно полагать, что чем интенсивнее процесс осадкообразования, тем больше частота молниевых разрядов.

Частота разрядов облако-земля LF+ обычно меньше 15 в минуту, но в мощных градовых облаках может достигать 25–30 в мин. Частота разрядов LF- примерно в 2 раза выше частоты разрядов LF+. Еще выше частота внутриоблачных VHF-разрядов. Их число обычно меньше 50 шт./мин, но в наиболее мощных градовых облаках может достигать 350 шт./мин.

В развивающихся градовых облаках местоположение первых разрядов всех типов отмечается в области повышенной отражаемости и водности облаков. В зрелых градовых облаках разряды LF+ и LF- продолжают также наблюдаться в области повышенной отражаемости на наветренном фланге облака, а местоположение большинство VHF разрядов смещается на подветренный фланг. Особенно хорошо эта тенденция заметна в дни с большой скоростью ведущего потока и быстрого переноса облака, как 01.07.2018 г. (рисунок 3). Можно полагать, что это обусловлено подъемом легких кристаллов и мелких частиц в верхнюю часть облака, где они попадают в сильный горизонтальный поток и выносятся на подветренный фланг, где отмечаются высокие микрофизические и динамические неоднородности и повышенная турбулентность.

Засев градовых облаков кристаллизующими реагентами приводит к повышению частоты молниевых разрядов всех типов (особенно внутриоблачных), что, по-видимому, связано с интенсификацией процесса кристаллизации облачных капель и формирования кристаллов.

## Литература

1. Абшаев А.М., Абшаев М.Т., Бареева М.В., Малкарова А.М. Руководство по организации и проведению противоградовых работ. Нальчик, Печатный двор. 2014. 506 с.
2. Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Котелевич А.Ф., Сирота Н.В. Автоматизированная система управления противоградовыми операциями «АСУ-МРЛ» // Труды научно-практической конференции, посвященной 40-летию производственных работ по защите сельхозкультур от градобитий. Нальчик, 2011. С. 211–225.
3. Аджиев А.Х., Стасенко В.Н., Тапасханов В.О. Система грозопеленгации на Северном Кавказе. «Метеорология и гидрология». 2013. №1. С. 5–11.
4. Аджиев А.Х., Абшаев А.М., Геккиева Ж.М., Тумгоева Х.А. Исследования быстроразвивающихся опасных атмосферных процессов и разработка системы их мониторинга в

интересах обеспечения безопасности жизнедеятельности. Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. №12. С. 33–37.

5. Мазин И.П., Хргиан А.Х. Облака и облачная атмосфера. Л.: Гидрометеиздат. 1983. 279 с.

6. Abshaev M.T., Malkarova A.M., Borisova N.A. Tendency of climate change on Northern Caucasus. - World Climate Change Conference. Abstracts.Moscow. 2003. P. 323–324.

## ПРОЯВЛЕНИЕ ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПОГОДЫ НА ТЕРРИТОРИИ АБХАЗИИ

*Я.А. Экба<sup>1,2</sup>, А.К. Ахсалба<sup>1,2</sup>, С.И. Марандиди<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Абхазский государственный университет, г. Сухум, Республика Абхазия

<sup>2</sup>Институт экологии Академии наук Абхазии, г. Сухум, Республика Абхазия  
asida\_cen@mail.ru

Глобальное потепление климата ведет к изменениям частоты, интенсивности, пространственных масштабов, продолжительности и сроках экстремальных метеорологических явлений. Состояние прибрежных экосистем Черноморского региона вызывает серьезную тревогу, порожденную не только антропогенными, но и природными причинами (экстремальными метеорологическими явлениями, опасными стихийными бедствиями и т.д.), а также частотой их повторения [1, 4].

Температура ПСВ. На фоне ускоряющегося роста температуры наблюдается усиление межгодовой изменчивости, которое сопровождается увеличением амплитуды, количества и продолжительности экстремальных явлений погоды с аномалиями положительного знака [2, 4].

По ре-анализу NCEP/NCAR исследованы климатические изменения амплитуды, количества и продолжительности экстремальных температурных явлений в регионах побережий Краснодарского края и Абхазии за период 1950–2016 гг.

Межгодовая изменчивость аномалий температуры в холодное полугодие превосходит изменчивость в теплое. Полугодия с наиболее сильными отрицательными аномалиями температуры наблюдались в 1953/1954 г., а положительные в 2007, 2010 и 2012 годах.

Количество экстремальных явлений с положительными аномалиями, превышающими 1 стандартное отклонение, увеличилось за рассматриваемый период с 10–14 до 28–32 событий в год, а превышающих 2 стандартных отклонения с 1–2 до 12–14 событий в год. При этом число экстремальных событий с отрицательными аномалиями снизилось с 22–24 до 8–10 событий в год превышающих 1 стандартное отклонение, и с 5–6 до 2–3 событий в год превышающих 2 стандартных отклонения.

Ветровой режим. За период 1991 г. по настоящее время в Абхазии наблюдается увеличение числа опасных гидрометеорологических явлений (ОЯ). Наибольшие значения средних месячных скоростей ветра наблюдаются зимой с декабря по март (3,7–3,8 м/с), наименьшие значения приходятся на период с мая по октябрь (2,9–3,1 м/с) [1]. В течение всего года наиболее часто повторяются скорости ветра 1–3 м/с, которые составляют более половины общего числа случаев за год. Сильные ветры (более 12 м/с) отмечаются, главным образом, в холодную часть года (декабрь–апрель) и преимущественно имеют юго-восточное и северо-западное направление.

Атмосферные осадки. Проведен анализ суточных, месячных и годовых сумм осадков за период с 1987–2016 гг. с использованием инструментальных данных и данных автоматизированной станции VENTAGE PRO-2 на метеорологической станции «Сухумский Маяк».

Распределение многолетних среднегодовых сумм осадков имеет положительный тренд. Максимальные годовые суммы осадков наблюдалось в 2016 г., превышающие 3400 мм. Относительно базовой климатической нормы равной 1500 мм (за период 1961–1990 гг.) годовые суммы осадков в последние десятилетия увеличились в два раза [2, 4]. При этом наблюдается существенная трансформация месячных сумм осадков. Наибольшее количество осадков выпадает в октябре, наименьшее в мае месяце. Значительно увеличились суточные суммы осадков, их количество достигает 260–300 мм. Вследствие чего широкомасштабные и продолжительные наводнения наблюдаются практически ежегодно и не только в осенне-зимнее время, но и в летний период.

Грозовые явления. Грозы относятся в условиях Абхазии к опасным явлениям погоды, наносящим существенный ущерб особенно транспортным коммуникациям, в первую очередь воздушному транспорту. Территориально чаще всего они проявляются на побережье на границе морской акватории и суши, где всегда существует контраст температур, усиливающий активность конвективных движений. Распределение количества дней с интенсивными грозами носит сезонный характер (рисунок 1). По сезонам года наибольшая грозовая активность наблюдается в летний сезон (июнь-июль), количество дней с грозами может достигать 13 в июле, 11 в июне. При этом однозначной связи с количеством и интенсивностью атмосферных осадков не наблюдается. Грозовые явления в Абхазии наблюдаются и в зимнее время и связано с выпадением жидких осадков.

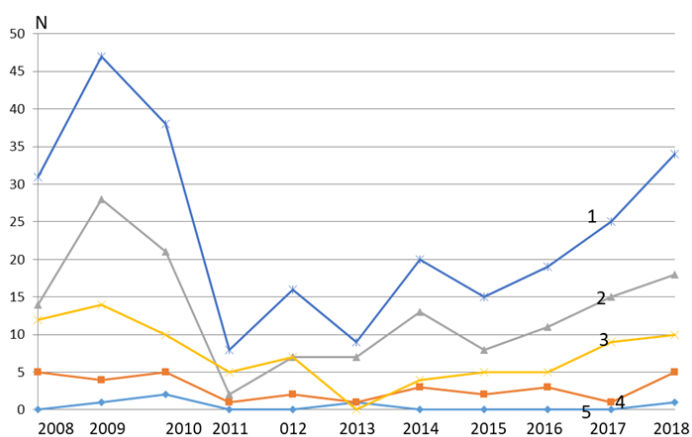


Рисунок 1. Сезонное распределение дней с грозовой активностью по данным метеостанции «Сухумский маяк» за последнее десятилетие: 1–годовое, 2–лето, 3–осень, 4–весна, 5–зима

Следует отметить, что последние две зимы на побережье Абхазии не наблюдалось выпадение снега и температуры не опускалась ниже нуля.

### Литература

1. Ахсалба А.К., Эмба Я.А. Влияние изменений климата на сельскохозяйственное производство Абхазии. Геосистемы: факторы развития, рациональное использование, методы управления. Туапсе. 2008. С.53–54.
2. Ахсалба А.К. Основные особенности климата последних десятилетий территории Абхазии // Материалы XII Международного симпозиума «Проблемы экоинформатики» М.: МНТОРЭС. 2016. С. 120–124.
3. Эмба Я.А., Ахсалба А.К. Вековая динамика климата и его воздействие на наземные экосистемы Абхазии. Материалы Международной научной конференции с элементами научной школы «Инновационные методы и средства исследований в области физики атмосферы, гидрометеорологии, экологии и изменения климата»/ под ред. М.Т. Абшаева, А.А. Лиховида, А.Г. Погорельцева. Ставрополь: Изд-во СКФУ. 2013. С. 289–294.
4. Эмба Я.А., Дбар Р.С. Экологическая климатология и природные ландшафты Абхазии. Сочи. 2007. 324 с.

## КВАНТОВЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ АТМОСФЕРЫ

А.А. Ганжа

ФГАНУ Институт сверхвысокочастотной полупроводниковой электроники им. В.Г. Мокерова РАН,  
г. Москва  
www.isvch.ru

Спектр излучений земной атмосферы определяется внешней (в первую очередь – солнечной) радиацией, а также атмосферными ионизационными процессами, механизмы которых до сих пор изучены недостаточно. Долгое время считалось, что источником потоков

высокоэнергетических частиц с уровнями энергий более 1 кэВ могут быть только космические частицы и радиоактивные элементы.

В 1994 г. появились первые публикации о Земных всплесках гамма-излучений (Terrestrial Gamma-ray Flashes – TGF) [1]. В 2006 г. НАСА сообщило [2] об обнаружении орбитальной обсерваторией Fermi исходящих из земной атмосферы пучков позитронов, электронов и фотонов высокой энергии (до 20 МэВ, длительностью 0,3–3,5 мс), им присвоили название Темные молнии (Dark Lightning).

Таким образом, факт формирования в атмосфере потоков высокоэнергетических частиц и электромагнитных волн рентгеновского и гамма диапазонов (ПВЧ) установлен. К сожалению, физика данного явления не описана и не объяснена. Опасность ПВЧ усиливает их проникающая способность. Проникая за корпуса и защитные экраны, они вызывают сбои функционирования электронных и электрических устройств, что в свою очередь может вызвать аварии с катастрофическими последствиями [3, 4].

Непредсказуемость района и момента формирования ПВЧ, а также каналов их распространения, определяет целесообразность рассмотрения результатов успешных экспериментов по формированию ПВЧ методом триггерных молний, проведенных International Center for Lightning Research and Testing в 2009 г. [5]. Для инициирования триггерных молний продолжительностью 2 с в описанном эксперименте не могли быть использованы традиционные медные провода, которые взрываются при первом же разряде молнии. Для этого необходимо использовать нити с гетероструктурным покрытием (НГП), обладающие надповерхностной проводимостью. Их аналоги используются в так называемых «графитовых бомбах». НГП не перегорают, так как токи разрядов протекают над поверхностью нитей.

Характер взаимодействия квантовых гетероструктур был подробно рассмотрен [6, 7] Биннигом Г. и Рорером Х. при разработке основ атомно-силовой микроскопии (Нобелевская премия по физике, 1986 г.). Ими было показано, что в локальных квантовых полях на очень малых расстояниях (меньше 2 нм) силы отталкивания, соответствующие запрету Паули для связанных фермионов, преобладают над вандерваальсовыми силами притяжения (рисунок 1). Общая энергия взаимодействия атомов приближенно описывается формулой Леннарда-Джонса – потенциал типа 6–12:

$$U(r)=E_0((r_{\min}/r)^{12}-(r_{\min}/r)^6),$$

где  $r_{\min}$  – расстояние, при котором энергия взаимодействия обращается в нуль;

$r$  – расстояние между взаимодействующими частицами;

$E_0$  – минимальная энергия системы, то есть наиболее выгодная.

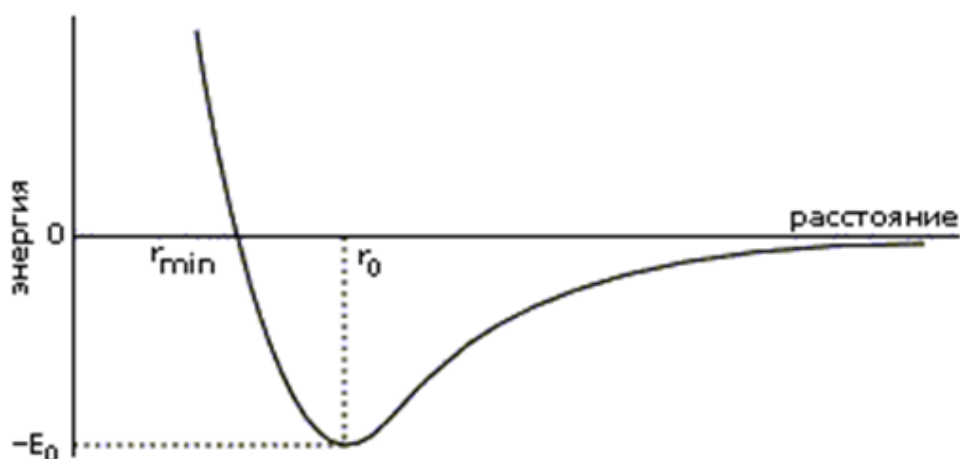


Рисунок 1. Потенциал Леннарда-Джонса (взаимодействие двух атомов)

Наши исследования показали, что НГП можно рассматривать как совокупность квантовых полей, сечения взаимодействий которых зависят от внешнего электромагнитного поля. Соответственно, с увеличением напряженности поля квантовые преобразования смещаются в сторону высокоэнергетических реакций (рисунок 2).

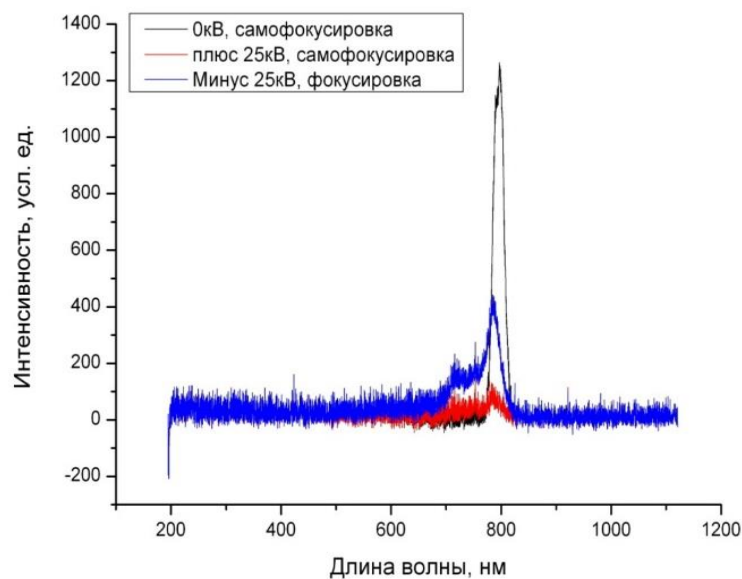


Рисунок 2. Уширение спектра отраженного от НГП лазерного излучения с длиной волны 800 нм в область коротких волн при приложении к НГП напряжения +25 кВ и –25 кВ

Таким образом, вокруг НГП формируется устойчивая ионно-атомная оболочка диаметром в несколько нанометров. Электроны и другие фермионы, расположенные внутри оболочки находятся в связанном состоянии. Следовательно, подчиняясь запрету Паули, они должны переходить в состояния с большей энергией. Когда их энергия превысит барьер оболочки, они будут излучаться в атмосферу. Что и наблюдалось в описанном эксперименте.

Сравнительный анализ структуры природных аэроэлектрических образований и НГП позволяет выделить существенные общие элементы:

- устойчивые оболочки облаков;
- гетероструктуры в виде ядро конденсации – капля или кристалл воды;
- высокие напряженности электрических полей.

Почему же тогда, темные молнии наблюдаются так редко?

В первую очередь из-за больших ионизационных потерь излучений внутри облаков. Это частично объясняет, почему молнии возникают при напряженностях электрических полей значительно меньших, чем это необходимо при самостоятельном разряде, и соответствующих ионизационному пробую.

### Литература

1. Fishman, GJ; Bhat, PN; Malozzi, R.; Horack, JM; Koshut, T.; Kouvelioton, C.; Pendleton, GN; Meegan, CA; et al. «Discovery of intense gamma-ray flashes of atmospheric origin». Science. 1994. 264 (5163): 1313–1316.
2. Thunderstorms Shoot Antimatter Beams Into Space. News. National geographic. com (2011-01-11). Retrieved on 2012-06-23.
3. Таперо К. И., Улимов В. Н., Членов А. М. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. 2014. 304 с.
4. Черняев А. П. Ионизирующие излучения. М.: ИД КДУ. 2014. 314 с.
5. «Properties of the x-ray emission from rocket-triggered lightning as measured by the Thunderstorm Energetic Radiation Array (TERA)», J. Geophys. Res. Vol. 114.
6. Binnig G., Quate and Gerber Ch. Atomic Force Microscope // Phys. Rev. Lett. 56. 1986. P. 930–933.
7. Кузнецов Н. Т., Новоторцев В. М., Жабров В. А., Марголин В. И. Основы нанотехнологии: учебник. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний. 2018. 397 с.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ГРОЗОВЫХ РАЗРЯДОВ В МОЩНЫХ ГРАДОВЫХ ОБЛАКАХ

*А.Х. Гергоков*

Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик  
ahmat-0007@mail.ru

Грозовые разряды наносят ущерб различным отраслям хозяйства, особенно разряды облако-земля. В работе изучается динамика изменения характеристик мощных конвективных облаков, исследуется взаимосвязь максимальной отражаемости градового облака с количеством электрических разрядов как внутри облачных, так и разрядов облако-земля. Были использованы данные модернизированного радиолокатора МРЛ-5, расположенного в г. Ардон, и данные грозопеленгатора LS800.

Грозорегистратор LS-8000 предназначен для автоматического обнаружения и регистрации координат грозовых разрядов как в автономном режиме, так и в составе региональной системы из нескольких аналогичных комплексов, объединяемых специальной системой связи, или через Интернет. Грозорегистратор состоит из четырех пеленгаторов и центрального пункта приема и обработки информации [1]. Пеленгаторы расположены у населенных пунктов: Черкесск (Карачаево-Черкесская Республика), Кызбурун (Кабардино-Балкарская Республика), Ставрополь и Зеленокумск (Ставропольский Край). Данные этих сенсоров посредством спутниковой связи передаются на центральный процессор (СР), расположенный в Нальчике в ФГБУ «ВГИ» и состоящий из 6 компьютеров, программного обеспечения и оборудования для связи с пеленгаторами [2]. Согласно паспортным данным система обеспечивает точность определения: местоположения молниевых разрядов  $\pm 300$  м, полярности разряда – 100%; значения тока молнии –10%, времени разряда, – не хуже 12%, распознавание разрядов облако-облако и облако-земля – ~100%.

Автоматизированный радиолокационный комплекс «АСУ-МРЛ» [3], предназначенный для целей штормооповещения и управления противоградовыми операциями. Программно-технический комплекс «АСУ-МРЛ» построен на базе 10 см канала радиолокатора «МРЛ-5М», имеющего импульсную мощность передатчика 500 кВт, ширину диаграммы излучения 1,5 градуса и чувствительность приемника 141 дБ/Вт. «АСУ-МРЛ» обеспечивает панорамный обзор пространства каждые 3,5 мин, получение трехмерных полей отражаемости облачных систем, расчет карт метеоявлений, размера и кинетической энергии града, интенсивности и количества осадков и др., измерение одномерных (высота верхней границы, отражаемость на заданной высоте и др.), двумерных (максимальная отражаемость в столбе, вертикально интегрированная водность VII и др.) и трехмерных (объем облака и интегрированная по всему облаку водность на заданном уровне отражаемости и др.) параметров облаков, построение 97 графиков временного хода параметров КЯ, отображение координат внесения противоградовых ракет и пеленгов грозовых разрядов на фоне радиолокационной структуры облаков, расчет характеристик грозовых разрядов и т.д

В 2018 году на территории защищаемой Северо-Кавказской Военизированной Службой был зафиксирован 21 случай развития грозоградовых облаков. В данной работе рассматривается градовый процесс за 16 сентября 2018 года на территории КБР. По прогнозу Гидрометцентра в этот день ожидалось развитие конвективной облачности с градом. По данным радиозонда Минеральных вод высота нулевой изотермы составила 3500 м, высота изотермы – 64500 м, влажность в активном слое 65%.

В этот день наблюдался мощный объект воздействия IV категории [4]. По радиолокационным и грозопеленгационным данным был построен график (рисунок 1).



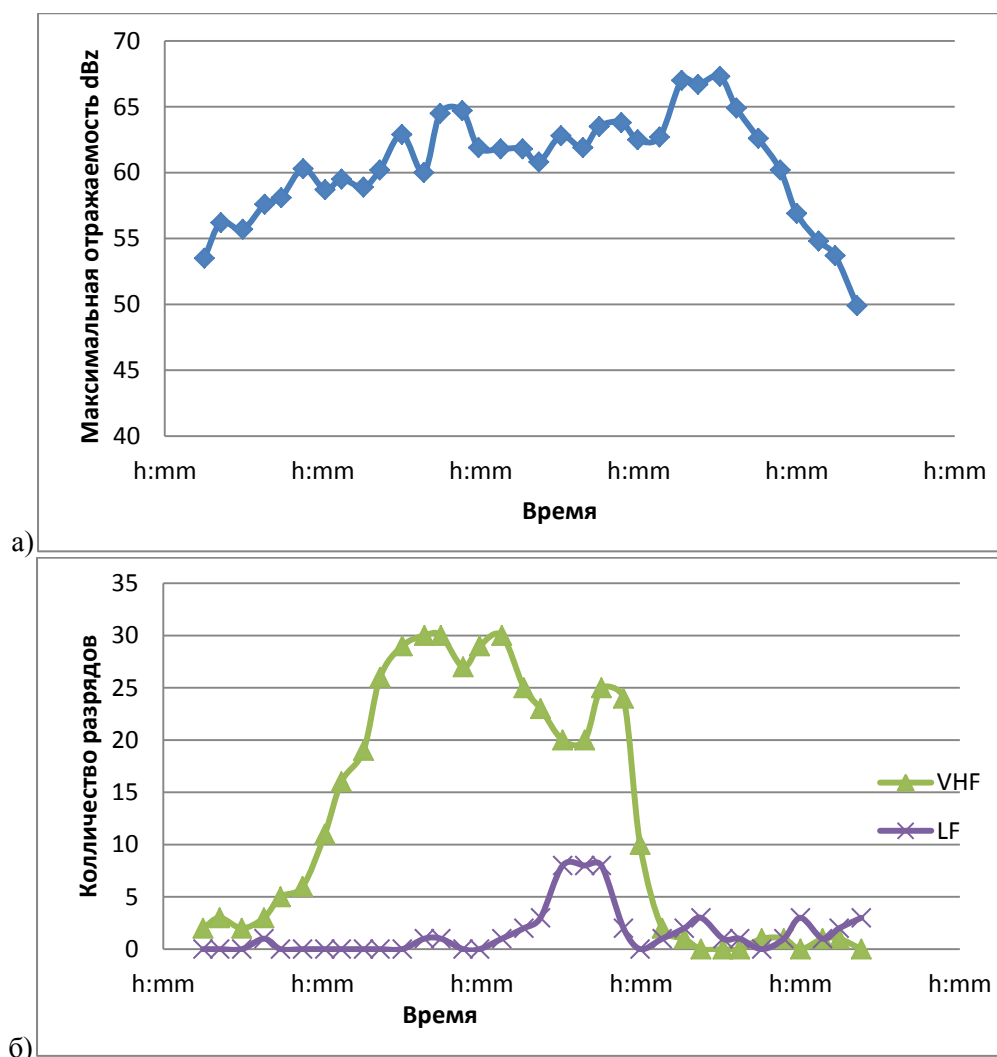


Рисунок. 1: а) Временной ход изменения максимальной отражаемости, б) интенсивность грозовых разрядов типа LF облако-земля (разряд/мин) и типа VHF облако-облако (разряд/мин)

Анализ результатов показал, что разряды облако-земля в среднем на 20 мин раньше показывают начало диссипации грозоградового облака, чем данные радиолокатора. Отображение данных о грозовых разрядах в автоматизированных радиолокационных комплексах позволяет оператору по воздействию своевременно принимать решение о приостановке или полном прекращении воздействия.

### Литература

1. Аджиев А.Х., Аджиева А.А., Дорина А.Н. Определение параметров молниевых разрядов с использованием грозорегистратора LS 8000 // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. Физика атмосферы. Спец. выпуск. 2010. С. 10–12.
2. Аджиев А.Х., Абшаев А.М., Геккиева Ж.М., Тумгоева Х.А. Исследования быстроразвивающихся опасных атмосферных процессов и разработка систем их мониторинга в интересах обеспечения безопасности жизнедеятельности. 1. Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. №12(173). С. 182–193.
3. Абшаев М. Т., Абшаев А. М., Котелевич А. Ф., Сирота Н. В. Автоматизированная система управления противоградовыми операциями «АСУ-МРЛ» / В сб.: Труды научно-практической конференции, посвященной 40-летию производственных работ по защите сельхозкультур от градобитий. Нальчик: ВГИ. 2011. С. 211–225.
4. 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.

## ПРИМЕНЕНИЕ НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ СПУТНИКОВ В РАЗВИТИИ АЛЬТЕРНАТИВНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ НА ТЕРРИТОРИИ АЗЕРБАЙДЖАНА

*И. Зейналов*

Институт географии им. Г.А. Алиева  
ismayil\_zeynalov@outlook.com

В последнее время все более настойчиво подчеркивается мысль о необходимости использования солнечной радиации в качестве основного источника энергии на Земле, что позволило бы увеличить энергетические ресурсы Земли примерно в 60 раз [1].

В статье рассматриваются возможности использования атмосферного электричества с учетом климатических характеристик территории Азербайджана как регулятора радиационного режима атмосферы.

Радиационный баланс подстилающей поверхности рассчитывается по нижеследующей формуле:

$$R = (Q + q)_n(1 - \alpha) - I_n, \quad (1)$$

где  $R$  – радиационный баланс;  $(Q + q)_n(1 - \alpha)$  – поглощенная коротковолновая радиация;  $I_n$  – длинноволновое эффективное излучение на основе формулы [2]:

$$I_n = I_0(1 - cn^{1.5}) + 4S\sigma T^3(\theta_w - \theta), \quad (2)$$

где  $I_0$  – эффективное излучение при безоблачном небе (определяется по средней месячной температуре воздуха в градусах  $^{\circ}\text{C}$  и средней месячной абсолютной влажности в  $\text{г}/\text{м}^3$  по специальной таблице или графику);  $n$  – средняя месячная общая облачность в долях единицы из четырех сроков наблюдений;  $c$  – коэффициент, зависящий от широты места (определяется по специальному графику)  $(\theta_w - \theta)$  – среднемесячная разность между температурой деятельной поверхности (определяемой по доброкачественным наблюдениям на сети гидрометеостанций по температуре поверхности почвы или воды) и температурой воздуха за пяти-шестилетний общий период;  $S$  – коэффициент, характеризующий отличие излучения естественных поверхностей от излучения черного тела, принимаемый нами равным 0,95;  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана,  $8,26 \cdot 10^{-11}$ ;  $T$  – абсолютная температура воздуха; в конечном счете, величина  $4S\sigma T^3$  принята равной 0,30 ккал/мес. [3].

Облачный покров, как самый мощный и изменчивый регулятор радиационного режима атмосферы и подстилающей поверхности, принадлежит к числу ведущих факторов формирования климата.

Если учесть тенденцию уменьшения количества облаков в ночное время, то следует считать, что среднее глобальное количество облаков находится в интервале 5–6 баллов.

Для выбранного региона исследований на рисунках 1 и 2 приведены среднемесячные значения облачности на уровне верхней границы атмосферы в дневное (рисунок 1) и ночное (рисунок 2) время суток, а также их среднеквадратические отклонения за выбранные 19 лет непрерывных наблюдений (с января 1982 г. по декабрь 2000 г.).

Поскольку основные особенности полученных здесь результатов неизбежно связаны с распределением облачности в каждой конкретной обрабатываемой сцене спутниковых измерений, на рисунке 1 приведены среднемесячные и среднегодовые характеристики балла облачности (процентного покрытия выбранной территории облаками) вместе со среднеквадратическими отклонениями соответствующих величин. Данные рисунка 1 также взяты из описанных выше архивов и характеризуют степень покрытия облаками двух выбранных регионов в дневное время суток. Из данных рисунка 1 (верхняя кривая) можно сделать выводы относительно достаточно монотонного хода среднемесячных значений балла облачности для обоих регионов с минимумами в июле-августе (около 38%) и возрастанием почти в два раза этих значений в зимние месяцы. Изменчивость этих величин в течение года для обоих регионов носит более сложный характер с минимальными среднеквадратическими отклонениями в летние месяцы (на уровне 25–50%) и максимальными их значениями в ноябре (на уровне 60–65%).

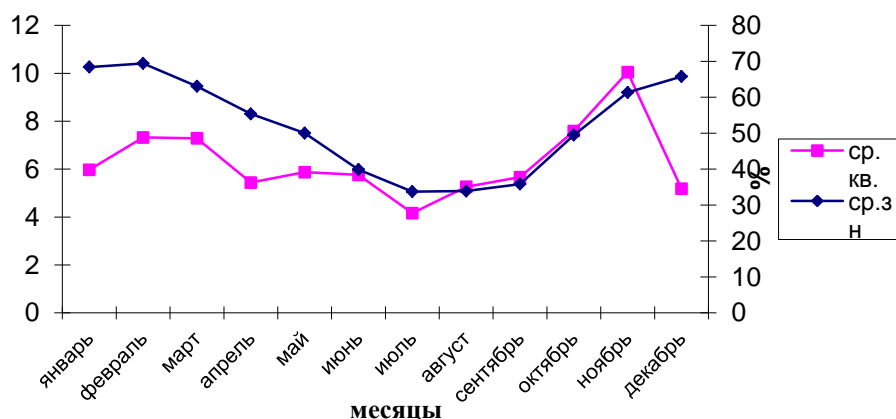


Рисунок 1. Среднеквадратичное отклонение и среднее значение облачного покрова в дневное время по территории Азербайджана

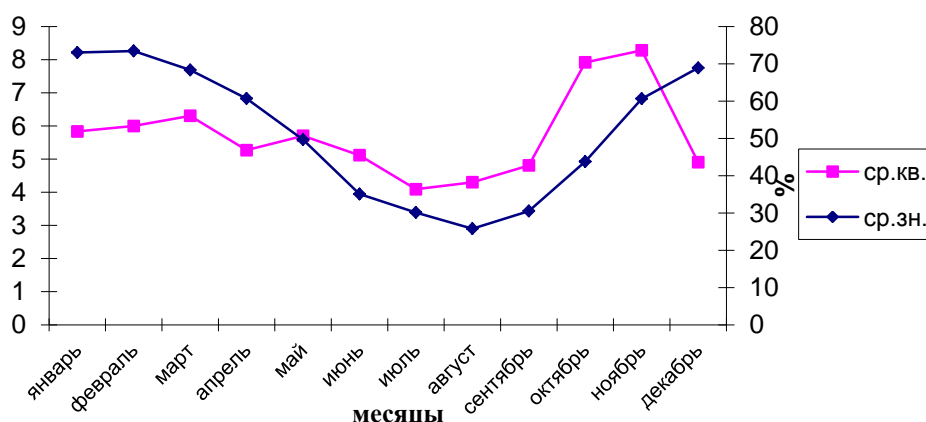


Рисунок 2. Среднеквадратичное отклонение и среднее значение облачного покрова в ночное время по территории Азербайджана

В межгодовом ходе соответствующих осредненных величин (нижние кривые рисунка 1) можно отметить их сравнительно небольшие колебания на уровне 50%. В то же время необычным является резкое отличие среднеквадратических отклонений балла облачности на уровне около 45% для выбранных 19 лет наблюдений для территории, охватывающей Азербайджан, от более широкого «квадрата», который включает эту территорию и прилегающие к ней территории других соседних государств. В последнем случае балл облачности по какой-то причине практически не изменяется, находясь на уровне около 25%. Здесь можно говорить, скорее всего, о каком-то артефакте.

Таким образом, облачность (в баллах) является основным фактором радиационного баланса в получении альтернативных источников энергии.

В настоящее время для получения параметров радиационного баланса и решения задач исследований атмосферного электричества необходимо внедрение современных технологий в виде спутников серии NOAA.

## Литература

1. Матвеев Л.Т. Курс Общей Метеорологии Физика Атмосферы. Гидрометеиздат. Ленинград. 1984.
2. Исаев А. А. Экологическая климатология. Учебное пособие для географ. гидромет. экол. спец. вузов и колледжей. М.: Научный мир. 2001. 458 с.
3. Шихлинский Э.М. Тепловой баланс Азербайджанской ССР, Баку. 1969. 200 с.

## **СЕКЦИЯ 6. Электричество средней и верхней атмосферы; высокоэнергичные процессы в атмосфере**

### **МОНИТОРИНГ ПАРАМЕТРОВ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ НА ОСНОВЕ НАЦИОНАЛЬНЫХ ДАННЫХ НАЗЕМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ**

*А.Г. Тлатов<sup>1,2</sup>, А.В. Тertyшников<sup>3,4</sup>*

<sup>1</sup>Кисловодская Горная астрономическая станция ГАО РАН

<sup>2</sup>Калм ГУ, г. Элиста

<sup>3</sup>ФГБУ ИПГ им. Академика Е.К. Федорова, г. Москва

<sup>4</sup>Институт радиотехники и электроники им. В. А.Котельникова РАН, г. Фрязино  
tlatov@mail.ru

Наиболее актуальной задачей в исследовании проблемы солнечно-земных связей является изучение и прогноз космической погоды (КП), обусловленной солнечной активностью. КП формируется непрерывно истекающим из солнечной короны корпускулярным потоком в виде солнечного ветра (СВ), солнечным излучением в видимом, рентгеновском, ультрафиолетовом и радио диапазонах. Эти процессы с корональными выбросами массы могут приводить к геомагнитным бурям. Мониторинг этих событий является предметом службы КП.

Прогноз космической погоды включает:

1) прогноз рекуррентных событий;

2) оценку потоков излучения Солнца;

3) наблюдения быстропротекающих явлений, таких как солнечные вспышки, эруптивных процессов, приводящих к корональным выбросам массы (КВМ), и прогноз их последствий на орбите Земли, особенно в виде магнитных бурь.

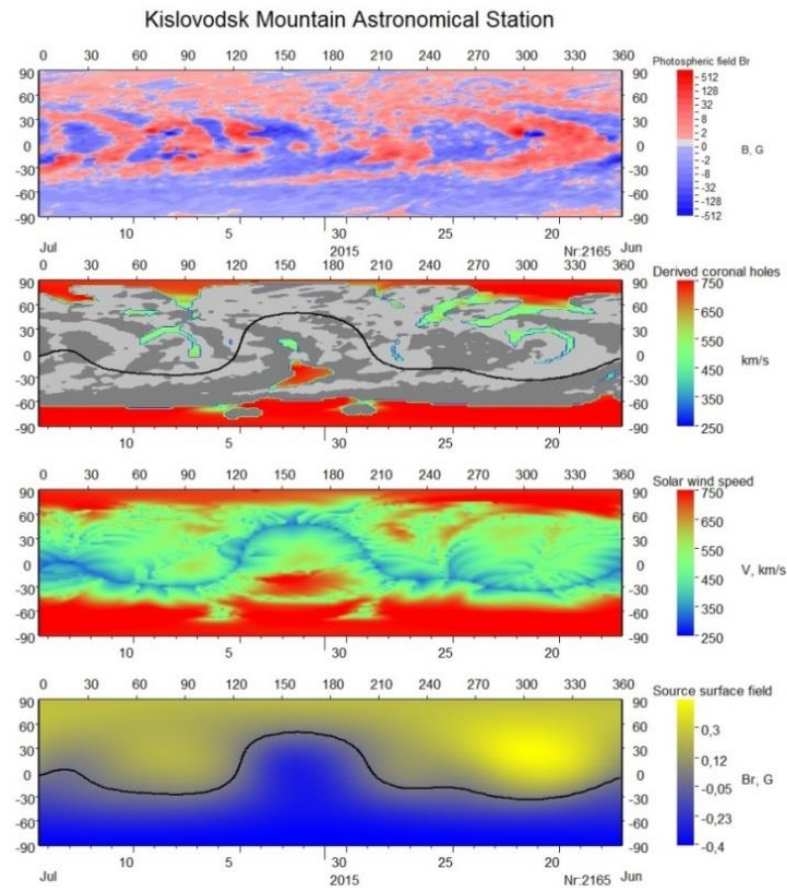
Основным фактором космической погоды являются высокоскоростные потоки солнечного ветра (СВ) от, как правило, долгоживущих структур, называемых корональными дырами. Они могут существовать несколько оборотов Солнца. Для реализации прогноза рекуррентных событий эффективно применяются данные регулярных наблюдений крупномасштабного магнитного поля Солнца на солнечных телескопах-магнитографах оперативного прогноза СТОП (рисунок 1).

Данные наблюдений используются для реконструкции параметров СВ ветра на основе модели Wang-Sheley-Argе и баллистической модели распространения потоков СВ от источников [1]. На расстояниях до поверхности источника ( $R_s \sim 2.5R_o$ ) скорость СВ определяется фактором расширения магнитного поля. Выше, СВ распространяется радиально. Быстрые и медленные потоки могут взаимодействовать между собой [2].

Для оценки потоков жесткого излучения, а также для регистрации эруптивных событий и оценки их геоэффективности используются данные патрульных оптических телескопов-спектрографов [3]. Для детектирования эруптивных процессов и КВМ предложен метод, основанный на разности интенсивности в крыльях хромосферных спектральных линиях.

Наблюдения КВМ на начальном этапе движения используются как граничные условия в модели распространения КВМ в гелиосфере от Солнца к Земле, в частности, модель распространения КВМ на основе взаимодействия с солнечным ветром через аэродинамическое сопротивление. Расчет параметров солнечного ветра осуществляется по данным наблюдения магнитографа СТОП. Параметры КВМ, а именно вектор скорости и оценка плотности на начальном этапе распространения могут определяются по данным патрульных телескопов.

Примером совершенствования технической базы и разработки современных технических решений являются разработки для наземной регистрации сильных солнечных вспышек, которые в ГАС ГАО РАН проводятся на основе наблюдений потока радиоизлучения Солнца на радиотелескопах с диаметром антенн 2 и 3 м. Оказалось возможным адаптировать стандартное оборудование для приема телевизионных сигналов для регистратора сильных солнечных вспышек – минирадиотелескопа. Предложена технология регистрации сильных вспышек по критериям интенсивности потока и энергии всплесков радиоизлучения возможна и на основе радиоинтерферометра из не менее двух минирадиотелескопов.



Created 2015.09.19

Рисунок 1. Пример оперативных расчетов фотосферного магнитного поля (верхняя панель), положения структур открытого магнитного поля, скорости солнечного ветра на поверхности источника и полярности магнитного поля на поверхности источника (нижняя панель) по данным ГАС ГАО РАН

Таким образом, для успешной реализации основных функций мониторинга (наблюдение, оценивание, прогноз и др.) необходимы специалисты, архивы непрерывных наблюдений солнечной активности, технические решения и информационные технологии, позволяющие осуществлять оперативный анализ данных и разрабатывать обоснованные рекомендации для потенциальных потребителей.

В России есть база для создания национальной системы прогноза космической погоды, основанная на патрульных наблюдениях и комплексе моделей эффектов и процессов солнечной активности. Основные элементы этой системы реализованы усилиями сотрудников Горной станции ГАО РАН.

Работа выполнена при частичной поддержке проекта РФФИ № 18-52-34004 и проекта РНФ №15-12-20001.

### Литература

1. Arge C.N., Pizzo V.J. Improvement in the prediction of solar wind conditions using near-real time solar magnetic field updates // J. Geoph. Res. 2000. V. 105, № A5. P. 10465-10480.
2. Tlatov A.G., Pashchenko M.P., Ponyavin D.I., et al. Forecast of solar wind parameters according to STOP magnetograph observations. // Geomagn. and Aer., – 2016 – V. 56 – 1095.
3. Tlatov A.G., Shramko A.D., Chernov Ya.O., et al. Space Weather Parameters: Modeling and Prediction from the Data of Groundbased Observations of Solar Activity // Geomag. and Aer. 2017. V. 57. 854.

## ТРАНЗИЕНТНЫЕ ВЫСОКОЭНЕРГИЧНЫЕ ПРОЦЕССЫ В АТМОСФЕРЕ ПО ДАННЫМ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА СПУТНИКАХ «ВЕРНОВ» И «ЛОМОНОСОВ»

*М.И. Панасюк<sup>1,2</sup>, П.А. Климов<sup>1</sup>, Г.К. Гаритов<sup>1</sup>, С.И. Свертилов<sup>1,2</sup>, В.В. Богомолов<sup>1,2</sup>, М.А. Казначеева<sup>1</sup>, В.Л. Петров<sup>1</sup>, Б.А. Хренов<sup>1</sup>, И.В. Яшин<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, г. Москва

<sup>2</sup>Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет, г. Москва  
panasyuk@sinp.msu.ru

Электромагнитные транзиенты в верхней атмосфере наблюдаются в разных диапазонах длин волн – от радио до гамма. Среди этих явлений, достаточно достоверно экспериментально идентифицированы, так называемые, TLE (Transient Luminous Events), к которым относятся наблюдающиеся в различных диапазонах видимого света «спрайты», «эльфы», «голубые струи», а также обнаруженные в экспериментах на спутниках «Татьяна-Университетский» и «Татьяна-2» вспышки ультрафиолетового (УФ) излучения [1] и TGF (Terrestrial Gamma Flashes) – гамма-всплески земного происхождения. Эти явления имеют глобальный характер и могут быть связаны с высотными электрическими разрядами, возникающими при воздействии на мезосферу лавин убегающих электронов, высыпающимися из радиационных поясов энергичными электронами и электромагнитными волнами, происходящими на высотах в десятки км в верхней атмосфере. Исследование обусловленных высотными электромагнитными разрядами быстропротекающих (транзиентных) явлений в атмосфере Земли было одной из главных задач космических экспериментов на спутниках «Вернов» и «Ломоносов».

Космический аппарат «Вернов» был запущен 8 июля 2014 г. на полярную (640÷830 км) солнечно-синхронную орбиту с наклоном  $98,4^\circ$  и периодом обращения 100 мин. Научная аппаратура включала детекторы гамма-квантов (0.01–3.0 МэВ) и электронов (0,2–15,0 МэВ), предназначенные для изучения гамма-всплесков земного и астрофизического происхождения, вариаций потоков магнитосферных электронов релятивистских и субрелятивистских энергий, фотометр УФ (240–400 нм) и красного (610–800 нм) излучения, а также УФ телескоп для наблюдений транзиентных световых явлений в атмосфере Земли. Кроме того, в состав комплекса научной аппаратуры входили низкочастотный и радиочастотный анализаторы, обеспечивавшие измерение магнитного поля и регистрацию электромагнитных волн в диапазонах от 0,1 Гц до 40 кГц и 0,05–15,0 МГц [2]. Особенности орбиты спутника позволяли проводить наблюдения, как низкоширотных, так и высокоширотных областей атмосферы.

В результате наблюдений на спутнике «Вернов» было отобрано несколько событий, более или менее надежно идентифицированные, как гамма-всплески земного происхождения [3]. Кроме того, зарегистрировано несколько десятков событий, которые могут рассматриваться как кандидаты в гамма-всплески земного происхождения. Большинство из них наблюдалась в приэкваториальных областях в районах с высокой грозовой активностью, однако несколько событий были зарегистрированы на высоких широтах вне зон активного грозообразования.

С помощью прибора ДУФ на спутнике «Вернов» было зарегистрировано более восьми тысяч атмосферных всплесков ультрафиолетового и красного излучения. Временные профили зарегистрированных всплесков отличаются большим разнообразием. Среди них есть как одиночные всплески, так и очень сложные структуры, возможно обусловленные высвечиванием обширных областей. Было также подтверждено обнаруженное ранее на спутнике «Университетский-Татьяна-2» новое явление – серии всплесков ультрафиолетового излучения [1]. Помимо отдельных событий и серий всплесков, наблюдающихся в основном над материками в областях активного грозообразования, много всплесков было зарегистрировано над Мировым океаном и на высоких широтах (вплоть до Антарктиды). Всплески, наблюдавшиеся в полярных областях, по своей временной структуре отличаются морфологически от событий, ассоциированных с грозowymi разрядами: их временные профили представляют собой одиночные пики, которые видны и в ультрафиолетовом, и в красном каналах. При совместном анализе данных спутника «Вернов» и наземных сетей регистрации молний был выделен класс внегрозовых транзиентов [4].

Космический аппарат «Ломоносов» был запущен 28 апреля 2016 г. с космодрома «Восточный» на круговую солнечно-синхронную орбиту высотой ~500 км, наклоном  $98^\circ$  и

периодом обращения ~90 мин. Для наблюдений атмосферных электромагнитных транзиентов в ближнем ультрафиолетовом диапазоне использовался орбитальный телескоп ТУС (Трековая Установка). Прибор ТУС представляет собой телескоп-рефлектор, состоящий из зеркала френелевского типа большой площади (~2 м<sup>2</sup>) и фотоприемника: матрицы из 16÷16 =256 фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) типа Hamamatsu R1463. Перед каждым ФЭУ стоит фильтр, пропускающий только УФ излучение в диапазоне 240–400 нм. Телесный угол обзора ячейки составляет 10<sup>-4</sup> ср, что в атмосфере соответствует наблюдению квадрата 5÷5 км. Временное разрешение прибора зависит от режима работы и составляет от 0,8 мкс до 6,6 мс [5].

Грозы являются главным источником кратковременного ультрафиолетового излучения в атмосфере, которое регистрируется детектором во всех режимах работы.

Таким образом, с помощью детектора ТУС оказалось возможным наблюдать молниевый разряд с различным временным разрешением.

Поскольку телескоп ТУС обладает пространственным разрешением, это позволило надежно идентифицировать некоторые типы ТАЯ по характерной пространственно-временной динамике. В частности, события типа «эльф». За время работы детектора ТУС на борту спутника «Ломоносов» было зарегистрировано более 20-ти высоко атмосферных транзиентных событий типа «эльф». Эти события имеют форму расширяющегося кольца диаметром 100–400 км и создают характерный сигнал в каналах детектора в виде в дуги, бегущую по матрице фотоприемника. Длительность эльфы – меньше миллисекунды, поэтому их динамика хорошо видна в режиме работы детектора с временным разрешением 0.8 мкс. Наблюдается интересный тип событий – двойные «эльфы».

Кроме того, с помощью прибора ТУС удалось наблюдать транзиентные явления, по своим морфологическим характеристикам отличающиеся от событий типа «эльфы» и других известных типов атмосферных вспышек. События наблюдаются вне зон грозовой активности и представляют собой мощную короткую вспышку (менее 1 мкс) с последующим послесвечением, перемещающимся в поле зрения прибора.

### Литература

1. Садовничий В.А., Панасюк М.И., Яшин И.В. и др. Исследование космической среды на микроспутниках «Университетский-Татьяна» и «Университетский-Татьяна-2» // *Астрономический вестник*. 2011. Т. 45. №1. С. 5–31.
2. Панасюк М.И., Свертилов С.И., Богомолов В.В. и др. Эксперимент на спутнике «Вернов»: транзиентные энергичные процессы в атмосфере и магнитосфере Земли. Ч.1. Описание эксперимента // *Космические исследования*. 2016. Т. 54. №4. С. 277–285.
3. Богомолов В.В., Панасюк М.И., Свертилов С.И. и др. Наблюдение гамма-всплесков земного происхождения в космическом эксперименте РЭЛЕК на спутнике Вернов // *Космические исследования*. 2017. Т. 55. №3. С. 169–178.
4. Klimov P. A., Kaznacheeva M. A., Khrenov B. A., et. al. UV transient atmospheric events observed far from thunderstorms by the Vernov satellite // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2018. V. 15(8). P. 1139–1143.
5. Садовничий В.А., Амелюшкин А.М., Ангелопулос В. и др. Космические эксперименты на борту спутника МГУ «Ломоносов» // *Космические исследования*. 2013. Т. 51. №6. С. 470–477.

### ОСОБЕННОСТИ НОЧНЫХ ГРОЗ НА СРЕДНИХ ШИРОТАХ ВО ВРЕМЯ МАГНИТОСФЕРНЫХ СУББУРЬ

Н.С. Хаердинов

Институт ядерных исследований, г. Москва  
khaerdinovns@yandex.ru

Глобальная атмосферная электрическая цепь замыкается через ионосферу, следовательно, на состояние и вариации атмосферного электрического поля большое влияние могут оказывать магнитосферные и ионосферные возмущения. В полярных и авроральных широтах это хорошо заметно. Эффекты геомагнитных возмущений в вариациях  $E_z$  были обнаружены во время магнитных бурь и на средних широтах [1]. В работе [2] на основании данных наблюдений выполненных в полярной обсерватории Хорзунд (77° N 15° E) и низкоширотной обсерватории Какиока (36° N 140° E), делается вывод о формировании вариаций приземного поля  $\Delta E_z$

электроджетом, проходящим в ионосфере вблизи обсерваторий. По наблюдениям вариаций мюонов в период гроз, выполненным на установке «Ковёр» БНО ИЯИ РАН (43°N 43°N), отмечены факты стабилизации разности потенциалов в стратосфере [3]. В работе [4] даётся описание установки «Ковёр» регистрирующей частицы космических лучей, на базе которой проводится эксперимент комплексного исследования грозовых процессов. В ней же приводятся статистические данные фактов ограничения разности потенциалов грозового поля. По вариациям мюонов, расчётным путём, определялась напряжённость в стратосфере, соответствующая регистрируемой стабилизации поля. Она соответствует при – пороговому значению для пробоя на убегающих электронах. В предположении реализации медленного пробоя на убегающих электронах в при – пороговом режиме, проведены оценки на основании измерений приземных возмущений интенсивности гамма – квантов, высотного уровня их генерации. В половине случаев генерация должна проходить на стратосферных высотах. Соответствующая интенсивность убегающих электронов превышает на 3 порядка окружающий фон космических лучей. То есть, и эксперимент, и оценки указывают на наличие устойчивого процесса стабилизации зрелыми грозовыми образованиями поля в стратосфере. Небольшие превышения напряжённости над пороговым значением компенсируются токами релятивистских частиц за счёт энергии электрического поля между грозовым облаком и землёй. Описанный механизм, в условиях грозовой активности, является чувствительным индикатором электрического состояния ионосферы.

В работе [5] была предложена двухконтурная модель токового клина, описывающая наиболее реалистично процесс диполизации магнитного поля Земли в период активизации суббури. В [6] приводится результат моделирования транспорта плазменных струй, в совокупности составляющих пламенное облако, направленное в ходе взрывной фазы суббури из области магнитосферного хвоста к ионосфере. В отдельности, эти плазменные струи, в их ионосферной проекции, могут быть авроральными стримерами. Интересным моментом модели, является требование наличия двух параллельных разнонаправленных, невзаимодействующих между собой электроструи в ионосфере: западная – вдоль границы полярной шапки (70° ) и восточная, ближе к экватору (60–65°). Авторы обнаружили сильное искажение проекций плазменных струй на ионосферу, связанное со скручивающим силовую линию магнитным полем продольных токов, что создаёт спиралевидную структуру в области западного и восточного края токового клина. В ходе моделирования взрывной фазы суббури, обнаружено наряду с полярным выступом (брейкап) наличие аналогичного выступа, меньшего размаха, в сторону экватора. В свете выше описанного явления стабилизации грозового поля, не учитывать взаимного влияния гроз и суббурь может быть ошибочным. Грозовая активность в ночной период может управлять активизацией суббури, перезаменяя на себя магнитосферные токи на подготовительной стадии, насколько хватает запаса заряда сдерживая взрывную фазу. Может вносить дополнительный элемент межполушарной асимметрии, вызванный сезонной зависимостью активности гроз. Являться активным поставщиком электронов в кольцевой ток. Всё это регистрируется в текущем эксперименте комплексного изучения грозовой активности. В качестве неожиданного результата можно продемонстрировать регистрацию внезапных скачков разности потенциалов в тропосфере положительной и отрицательной амплитуды порядка 100 МВ. Расстояние между ними ~ 10–30 км. Длительность фронта нарастания 20–30 с. Как правило, события регистрируются одновременно разной полярности. Для примера, на рисунке. 1 приведены графики вариаций интенсивности регистрируемых вертикальных мюонов.

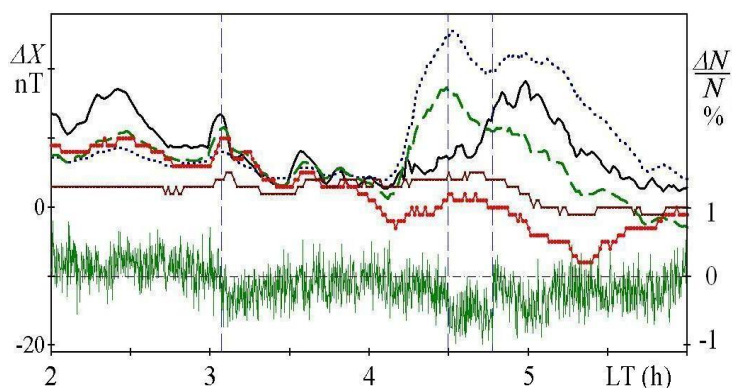


Рисунок 1. Грозное событие 25072014. Время местное, опережает мировое на 3 часа



Перепады интенсивности (~1% правая шкала), согласно расчёту, соответствуют внезапному появлению отрицательной разности потенциалов в тропосфере порядка 100 МВ. Эти события не связаны с электромагнитными шумами, и не вызваны близкой сейсмической активностью. На рисунке так же приведены совмещённые графики вариаций X компоненты магнитного поля (левая шкала), измеренные в разных обсерваториях средних широт (ресурс <http://www.intermagnet.org>). Чёрная сплошная линия 58.07°N, 38.23°E (Box) Borok, зелёная пунктирная 40.957°N, 0.333°E (EBR) Ebro, Синие точки 46.43S 51.87E (CZT) Port Alfred. Красная линия – график SIM-H индекса (ресурс [http://isgi.unistra.fr/indices\\_asy.php](http://isgi.unistra.fr/indices_asy.php)), характеризующий вариации кольцевого тока. Коричневая линия – SIM-D индекс характеризует колебания глобального межполушарного тока. Вертикальными пунктирными линиями отмечены начальные моменты скачков разности потенциалов. Природа скачков поля пока не определена, но видна связь с периодами диполизации магнитосферы.

### Литература

1. Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Михновски С., Кубицки М. Эффект магнитной бури в вариациях атмосферного электрического поля в средних широтах // Геомагнетизм и аэрономия. 2008. Т. 48, №5, С. 650–659.
2. Клейменова Н.Г., Козырева О.В., Кубицки М., Оджимек А, Малышева Л.М. Влияние суббурь в ночном секторе Земли на вариации приземного атмосферного электрического поля в полярных и экваториальных широтах // Геомагнетизм и аэрономия. 2012. Т. 52, № 4, С. 494–500.
3. Лидванский А.С., Хаердинов Н.С. // Сильные вариации мюонов космических лучей во время гроз. Изв. РАН. 2009. Т. 73, № 3. С. 416–418.
4. Лидванский А.С., Хаердинов Н.С. // Статистика вариаций мюонов космических лучей во время гроз. Изв. РАН, сер. физ. 2011. Т. 75, № 6. С. 888–890.
5. Sergeev V. A., Tsyganenko N. A., Smirnov M. V., Nikolaev A. V., Singer H. J., and Baumjohann W. // Magnetic effects of the substorm current wedge in a spread-out wire model and their comparison with ground, geosynchronous, and tail lobe data. J. Geophys. Res. 116. A07218. doi:10.1029/2011JA016471.
6. Nikolaev A.V., Sergeev V.A., Tsyganenko N.A., Angelopoulos V., Singer H. // The magnetospheric magnetic field deformation: effects of double-loop substorm current wedge. Physics of Auroral Phenomena. Proc. XXXVI Annual Seminar. Apatity. 2013. P. 51–54.

### ГАММА ИЗЛУЧЕНИЕ ВО ВРЕМЯ ГРОЗ ПО ДАННЫМ НАЗЕМНЫХ И КОСМИЧЕСКИХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

М.И. Панасюк<sup>1,2</sup>, В.В. Богомолов<sup>1,2</sup>, А.Ф. Июдин<sup>1</sup>, И.А. Максимов<sup>1</sup>, А.А. Новиков<sup>1,2</sup>,  
С.И. Свртилов<sup>1,2</sup>, И.В. Яшин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, г. Москва

<sup>2</sup>Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет, г. Москва  
sis@coronas.ru

Изучение грозовых разрядов является на сегодня актуальной, активно развивающейся областью исследований, что особенно заметно по работам в области атмосферной физики высоких энергий. Основные направления таких исследований базируются на хорошо установленном факте, что грозовые облака, и собственно молниевые разряды, часто сопровождаются мощными потоками энергичных частиц, и особенно рентгеновского и гамма-излучения. Это излучение проявляется в виде быстро переменных событий длительностью от менее микросекунды для рентгеновских всплесков, сопровождающих лидеры молнии, или всплесков гамма-излучения длительностью в доли миллисекунды в случае атмосферных гамма-всплесков, и до десятков минут повышений интенсивности рентгеновского и гамма-излучения, регистрируемого от грозового облака (Thunderstorm Ground Enhancement, TGE).

Особый интерес представляют, так называемые, вспышки гамма-излучения земного происхождения (Terrestrial Gamma-Ray Flashes, TGF), которые, по-видимому, генерируются внутри или около грозовых облаков и характеризуются очень высокой интенсивностью и энергией наблюдаемых фотонов. В условиях TGF электроны ускоряются сильным электрическим полем, иногда до энергий ~100 МэВ. Вопрос о том где конкретно ускоряются эти электроны до релятивистских энергий – на лидерах грозового разряда, в грозовых облаках,

или между облаками, или над грозовыми облаками до сих пор не нашел своего уверенного ответа, подтвержденного двумя или большим числом экспериментов. Возможно, что ускорение происходит во всех трех предложенных механизмах, но остается неясной величина предельно достигаемой энергии ускорения, и форма спектров ускоренных в грозовых комплексах частиц. В дополнение к обычным молниям обнаружены новые типы разрядов между атмосферой и ионосферой, такие, как спрайты, эльфы, голубые струи, вспышки УФ излучения, наблюдавшиеся, в том числе и группой ученых НИИЯФ МГУ [1].

Наблюдение всплесков гамма излучения из атмосферы Земли было одной из основных задач космического эксперимента на спутнике «Вернов», запущенном 8 июля 2014 г. на полярную (640÷830 км) солнечно-синхронную орбиту с наклоном  $98,4^\circ$  и периодом обращения 100 мин. Научная аппаратура включала детекторы гамма-квантов (0,01–3,0 МэВ) и электронов (0,2–15,0 МэВ), фотометр УФ (240–400 нм) и красного (610–800 нм) излучения, а также УФ телескоп для наблюдений транзиентных световых явлений в атмосфере Земли. Также в состав комплекса научной аппаратуры входили низкочастотный и радиочастотный анализаторы, обеспечивавшие измерение магнитного поля и регистрацию электромагнитных волн в диапазонах от 0,1 Гц до 40 кГц и 0,05–15,0 МГц [2]. Особенности орбиты спутника позволяли проводить наблюдения как низкоширотных, так и высокоширотных областей атмосферы. В ходе наблюдений на спутнике «Вернов» было зарегистрировано несколько достоверных гамма всплесков из атмосферы Земли и несколько десятков кандидатов. При этом, не было обнаружено связи этих всплесков с молниевой активностью.

Другим каналом получения информации о высокоэнергичных процессах во время гроз являются наземные наблюдения. Во время измерений в Московской области летом 2016 года было несколько гроз в период с 13.06.2016 по 17.06.2016. На спектрограммах видно, что во время грозы появилось интенсивное дополнительное излучение в линии 609 кэВ, соответствующей Bi-214. Это указывает на то, что в данном случае за наблюдаемое возрастание в низкоэнергетическом диапазоне наблюдаемого гамма-излучения ответственны изменения концентрации Rn-222, вызванные дождевым ливнем. Еще одно возрастание наблюдалась во время грозы 18.07.2016. В этом случае увеличение потока гамма-излучения наблюдалось более 3 часов, причем в большинстве низкоэнергетических каналов амплитуда достигала 100%. Разность энергетических спектров, полученных за ~10000 с в течение максимума потока и в течение достаточно длительного предшествующего периода показала наличие ряда гамма-линий, характерных для Bi-214, из чего следует, что большая часть низкоэнергетического излучения в этом случае также связана с цепью распада Rn-222. Измерения, проведенные в дождливые дни без грозы, демонстрируют аналогичные вариации концентрации Rn-222. Наличие радона или продуктов его распада в дождевой воде было подтверждено в 2017 году прямыми измерениями гамма-излучения от воды, собранной во время ливня.

Особый интерес представляет поведение жесткого гамма-излучения с энергией  $E > 3$  мэВ, поскольку при этих энергиях не приходится ожидать гамма-квантов от дочерних изотопов радона, ответственных за значительную часть вариаций фона гамма-излучения. В высокоэнергетическом канале 3200–6000 кэВ значимых изменений гамма-потока в подмосковных измерениях ни в одном случае не наблюдалось. Избыточное излучение для периодов времени с обнаруженным TGE по сравнению с чистыми фоновыми периодами в самом жестком энергетическом канале составляет <1,4%, что соответствует значению  $1.8\sigma$ . Верхний предел (уровень  $3\sigma$ ) роста потока гамма-излучения в диапазоне энергий 3200–6000 кэВ составляет  $2,4 \cdot 10^{-4} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ . Следует отметить, что это значение, полученное в ходе измерений в Московской области, имеет тот же порядок величины, что и поток, измеренный на станции Арагац [3]. Однако эти результаты не противоречат друг другу, поскольку расстояния до грозовых облаков, наблюдавшиеся в ходе измерений в Московской области, были в несколько раз больше, чем в районе станции Арагац.

В ходе измерений, проведенных в 2017–2018 г на г. Арагац с помощью небольшого сцинтилляционного гамма-спектрометра НИИЯФ МГУ ( $\varnothing 5$  см) наблюдалось несколько возрастаний потока при энергиях  $> 3$  МэВ. Длительность подобных возрастаний лежала в пределах 0,5–20 мин. Как правило, эти относительно короткие возрастания наблюдались в виде пиков на фоне более длительных, до нескольких часов, TGE, имеющих мягкий спектр, в котором присутствуют значимые линии дочерних изотопов радона. В некоторых случаях TGE не сопровождалось осадками. Добавочное излучение Bi-214 могло возникать при изменении

условий выхода радона из почвы в грозовых условиях, либо приходиться из грозового облака, расстояние до которого в горах ~100 м. Жесткое излучение в узких пиках может быть интерпретировано как тормозное излучение электронов, ускоренных полем грозового облака.

### Литература

1. Садовничий В.А., Панасюк М.И., Яшин И.В. и др. Исследование космической среды на микроспутниках «Университетский-Татьяна» и «Университетский-Татьяна-2» // *Астрономический вестник*. 2011. Т. 45, №1. С. 5–31.

2. Панасюк М.И., Свертилов С.И., Богомолов В.В. и др. Эксперимент на спутнике «Вернов»: транзиентные энергичные процессы в атмосфере и магнитосфере Земли. Ч.1. Описание эксперимента // *Космические исследования*. 2016. Т. 54, №4. С. 277–285.

3. Bogomolov V., Chilingarian A., Garipov G., et al. Results of TGE Study in 0.03-10 MeV Energy Range in Ground Experiments near Moscow and Aragatz // *Proc. of Int. Symp. Thunderstorms and Elementary Particle Acceleration (TEPA-2016)*. Ed. by A.Chilingarian. ISPIRE C15-10-02.

### ВСПЛЕСКИ ГАММА ИЗЛУЧЕНИЯ ИЗ АТМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ ПО ДАННЫМ НАБЛЮДЕНИЙ НА СПУТНИКЕ «ВЕРНОВ»

М.И. Панасюк<sup>1,2</sup>, С.И. Свертилов<sup>1,2</sup>, В.В. Богомолов<sup>1,2</sup>, А.В. Богомолов<sup>1</sup>, Г.К. Гарипов<sup>1</sup>, А.Ф. Июдин<sup>1</sup>, П.А. Климов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцына, г. Москва

<sup>2</sup>Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет, г. Москва  
sis@coronas.ru

Одним из важных факторов, который в принципе может влиять на глобальную электрическую цепь, являются высотные электрические разряды. Предполагается, что с ними могут быть связаны интенсивные вспышки электромагнитного излучения, т.н. транзиенты, наблюдающиеся, в том числе в гамма диапазоне [1]. Наблюдение всплесков гамма излучения из атмосферы Земли было одной из основных задач космического эксперимента на спутнике «Вернов».

Космический аппарат «Вернов» был запущен 8 июля 2014 г. на полярную (640÷830 км) солнечно-синхронную орбиту с наклоном 98.4° и периодом обращения 100 мин. Научная аппаратура включала детекторы гамма-квантов (0,01–3,0 мэВ) и электронов (0,2–15,0 МэВ), предназначенные для изучения гамма-всплесков земного и астрофизического происхождения, вариаций потоков магнитосферных электронов релятивистских и субрелятивистских энергий, фотометр УФ (240–400 нм) и красного (610–800 нм) излучения, а также УФ телескоп для наблюдений транзиентных световых явлений в атмосфере Земли. Кроме того, в состав комплекса научной аппаратуры входили низкочастотный и радиочастотный анализаторы, обеспечивавшие измерение магнитного поля и регистрацию электромагнитных волн в диапазонах от 0,1 Гц до 40 кГц и 0,05–15,0 МГц [2]. Особенности орбиты спутника позволяли проводить наблюдения, как низкоширотных, так и высокоширотных областей атмосферы.

Для детектирования гамма-всплесков из атмосферы Земли использовались 4 сцинтилляционных (NaI(Tl)/CsI(Tl)) детектора гамма-квантов в составе блоков ДРГЭ-1, ДРГЭ-2 прибора ДРГЭ. Суммарная эффективная площадь этих детекторов составляла ~500 см<sup>2</sup>, оси детекторов были сонаправлены и ориентированы в местный надир. При этом поле зрения всех 4 детекторов составляло 2π ср. Для отбора гамма-всплесков использовался, т.н. пособытийный режим, когда для каждого детектируемого гамма-кванта фиксировалось время регистрации и значения кодов амплитуды выходного сигнала, соответствовавших энергии выделившейся в кристаллах. Первоначально в качестве кандидатов в гамма-всплески земного происхождения отбирались наиболее значимые события, для которых выполнялось условие значимого превышения среднего фонового счета на временном интервале 1 мс одновременно не менее чем в двух детекторах. Поскольку гамма-всплески земного происхождения характеризуются жестким энергетическим спектром, отбирались только события с энерговыделением >400 кэВ. Для экваториальных областей критерий значимости соответствовал одновременной регистрации возрастаний двумя детекторами на уровне достоверности 12σ или тремя детекторами на уровне

7 $\sigma$ . Для высокоширотных областей (полярной шапки) этот критерий соответствовал 8,5 $\sigma$  при регистрации двумя детекторами или 5 $\sigma$  при регистрации тремя детекторами.

После исключения возрастных интенсивности, связанных с регистрацией тяжелых заряженных частиц, были отобраны собственно кандидаты в гамма-всплески земного происхождения, удовлетворившие указанному «жесткому» критерию [3].

Был также проведен отбор кандидатов в гамма-всплески земного происхождения по более «мягкому» критерию, не включавшему требование совпадения значимых возрастных интенсивности в нескольких детекторах. Согласно этому критерию отбирались события, для которых в отдельном детекторе за 400 мкс регистрировалось не менее 5 гамма-квантов в экваториальных областях и не менее 7 в полярных. Для данных, полученных с помощью детектора ДРГЭ-11, для которого время экспозиции было наибольшим, большинство возрастных в полярных областях были имитациями всплесков тяжелыми заряженными частицами космических лучей, и только одно, зарегистрированное 22.11.14 в 5:05:03 UT, может рассматриваться как кандидат в гамма-всплески. Это событие наблюдалось над Антарктидой и, по-видимому, не было связано с грозовой активностью.

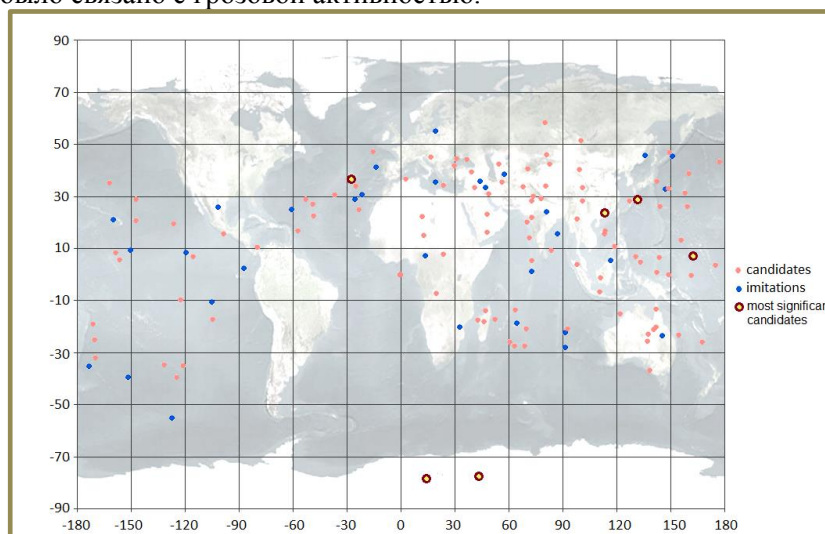


Рисунок 1. Карта распределения подспутниковых точек в моменты регистрации кандидатов в гамма-всплески из атмосферы Земли

Что касается событий, наблюдавшихся в экваториальных областях, то, как видно из рисунка 1, на котором представлена карта распределения подспутниковых точек в моменты регистрации кандидатов в гамма-всплески из атмосферы Земли, они в большинстве своем находятся в областях активного грозообразования. Последнее не удивительно, так как по условиям наблюдений практически все приэкваториальные области, так или иначе, отличаются высокой грозовой активностью. Следует, правда, отметить, что не все указанные события могут быть реальными гамма-всплесками, часть из них могут быть обусловлена случайными возрастаниями скорости счета. Всего было отобрано более 100 кандидатов в атмосферные гамма-всплески в приэкваториальных областях. С учетом реального времени экспозиции выбранному критерию отбора могли удовлетворить несколько десятков случайных возрастаний.

Таким образом, только около половины зарегистрированных кандидатов могут быть реальными гамма-всплесками атмосферного происхождения.

### Литература

1. Fishman, G.J., Bhat, P.N., Malozzi, R., et al. Discovery of intense gamma-ray flashes of atmospheric origin // Science. 1994. V. 264(5163). P. 1313–1316.
2. Панасюк М.И., Свертилов С.И., Богомолов В.В. и др. Эксперимент на спутнике «Вернов»: транзитные энергичные процессы в атмосфере и магнитосфере Земли. Ч.1. Описание эксперимента // Космические исследования. 2016. Т. 54, №4. С. 277–285.
3. Богомолов В.В., Панасюк М.И., Свертилов С.И. и др. Наблюдение гамма-всплесков земного происхождения в космическом эксперименте РЭЛЕК на спутнике Вернов // Космические исследования. 2017. Т. 55, №3. С. 169–178.

## **СЕКЦИЯ 7. Гронопеленгация и грозоащита, вопросы безопасности**

### **СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПАССИВНЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ МОНИТОРИНГА ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТИ**

*И.И. Кононов<sup>1</sup>, Е.А. Коровин<sup>2</sup>, Г.Г. Щукин<sup>2</sup>, И.Е. Юсупов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

<sup>2</sup>Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург  
igor\_kononov@mail.ru, evgen\_korovin@mail.ru

Фактическое начало в развитии инструментальных средств наблюдения за грозами связано с изобретением в середине 20-х годов прошлого века первого рамочного CRDF (Cathode-Ray Direction Finder) пеленгатора с отображением пеленга на экране электронно-лучевой трубки [1]. Уже первые опыты использования этого прибора для регистрации импульсных сигналов, возбуждаемых сильноточными компонентами молниевых вспышек в СДВ-диапазоне, показали его уникальные возможности для обнаружения, а в последующем и определения координат молниевых разрядов на очень больших удалениях от источников излучения. Удачный выбор рабочих частот в интервале 5–15 кГц, соответствующем максимуму спектральной плотности большинства регистрируемых сигналов, обеспечивали прием атмосфериков с высоким отношением сигнал-шум на расстояниях до трех-пяти тысяч километров. Для модели волноводного канала, ограниченного поверхностями Земли и ионосферы, был предложен «скачковый» алгоритм дальнометрии, создавший предпосылки для построения в комбинации с пеленгатором одной из первых версий однопунктового гронопеленгатора-дальномера (ГПД).

Важным фактором, резко повысившим возможности развертывания новых систем мониторинга ГА, явилось введение в строй американской навигационной системы GPS (а вскоре и российской ГЛОНАСС), что позволило решить задачу высокоточной (менее 1 мкс) временной синхронизации разнесенных пунктов. Интенсивное развитие в эти же годы телекоммуникационных средств связи, развертывание множества локальных сетей, вскоре объединенных в единую глобальную сеть, завершившуюся созданием Интернета, сняло проблему высокоскоростного обмена данными между разнесенными пунктами. Решение указанных проблем, многие годы тормозивших развертывание многопунктовых систем местоопределения молниевых разрядов, позволило приступить к полному обновлению парка технических средств и созданию нового поколения систем, определивших современный уровень пассивных радиотехнических средств мониторинга грозовой активности.

В течение почти полувекового периода эксплуатации, CRDF-пеленгаторы, подвергаемые многочисленным модернизациям, направленным на повышение быстродействия и совершенствование способов отображения информации, применялись в структурах как ГПД, так и многопунктовых пеленгационных систем местоопределения (ПСМ). Однако широкое распространение ПСМ этого типа тормозилось серьезными недостатками существующих в то время каналов связи (преимущественно телефонных), используемых для синхронизации разнесенных пунктов и пересылки данных регистрации в центральный пункт обработки. Низкая точность определения координат таких систем была обусловлена поляризационными ошибками (ПО). Особенно больших величин (до 10–15°) эти ошибки, обусловленные анизотропией ионосферы, достигали в ночных условиях распространения. Совокупность перечисленных выше недостатков в работе ПСМ, оборудованных узкополосными CRDF-пеленгаторами или их последующими многочисленными аналогами, не удовлетворяла возрастающим потребностям большинства потребителей и постепенно их использование в научных и утилитарных целях сокращалось.

Однако попытки улучшения качества работы рамочных пеленгаторов не прекращались. Чтобы избежать ПО, обусловленных влиянием анизотропии ионосферы, еще в работе [2] было предложено определять пеленг по начальной части сигнала, формируемой «земной» волной, не подверженной влиянию ионосферных отражений. При узкополосном приеме, в силу ряда причин этот способ оказался неэффективным. Радикальным решением, опубликованным в [3], было предложение резко увеличить полосу приема до значений 1 кГц–1 мГц и использовать

для определения пеленга только фронтальную часть (до первого максимума) «земной» части атмосфера, что позволяло не только исключить влияние ионосферы, но и существенно уменьшить составляющую ПО, обусловленную отклонением излучателя от вертикали.

В СССР развитие систем местоопределения импульсных источников СДВ-диапазона шло по сходным направлениям. Первоначально разработки велись в интересах Службы специального контроля (ССК) для определения координат эпицентров ядерных взрывов. При этом основной упор делался на развертывание большебазовых систем. В начале 70-х годов прошлого столетия был создан автоматизированный стационарный комплекс (АСК) обнаружения ядерных взрывов. [4]. В качестве эксперимента АСК был использован для наблюдений за грозовой активностью. В 1985г. аналогичный АСК был сдан в опытную эксплуатацию в Азиатской части СССР. В 1987г. на базе нескольких пунктов регистрации в Европейской части СССР, оборудованных новым поколением регистрирующей аппаратуры, изготовленных НПО «Вектор», был развернут опытный образец модернизированной системы и в 1989 г. успешно испытан по сигналам ЭМИ молниевых разрядов. К сожалению, с распадом СССР комплекс прекратил свое существование, так как большинство пунктов оказалось в сопредельных государствах. В 1995–1997 гг. проводились работы по воссозданию АСК в интересах метеорологического обеспечения различных видов вооруженных сил (ССК МО, ГМС ВС, ГГМЦ МО), в результате которых было полностью обновлено программное обеспечение, а устаревшие комплексы регистрации были заменены аппаратурными модулями «Веря», изготовленными в ЗАО НПО «Технологии мониторинга». В середине 90-х конверсионный вариант этого комплекса, известный под названием системы регистрации молниевых разрядов (СРМР), был развернут в Восточной Сибири на базе трех пунктов, размещенных в зданиях Томской, Красноярской и Иркутской баз службы авиационной охраны лесов. Комплекс представлял собой большебазовую систему смешанного (разностно-дальномерного, пеленгационного) типа. Результаты эксплуатации комплекса по регистрации и местоопределению сильноточных молниевых разрядов в 1997 г. подтвердили его достаточно высокие точностные и вероятностные характеристики. Так, по данным публикации [5], среднеквадратичная ошибка местоопределения разрядов ОЗ-типа по Красноярскому региону составила 5 км, а вероятность (эффективность) обнаружения – 80%.

К 2010 году система «Веря-МР», состоящая из 26 пунктов регистрации и развернутая в интересах ФГУ «Авиалесоохрана», обеспечивала обнаружение, определение координат и параметров молниевых разрядов на площади  $11 \cdot 10^6$  км<sup>2</sup> с погрешностью местоопределения разряда 3 км.

Методологию создания РДСМ проиллюстрируем на примере создания американской национальной сети обнаружения молний NLDN (National Lightning Detection Network), являющуюся показательной с точки зрения структуры размещения разнесенных пунктов, типов используемого оборудования, методики и техники тестирования характеристик. Создание этой сети началось в конце 70-х с развертывания нескольких локальных ПСМ в западной части США, на границе с Канадой и на Аляске, оборудованных широкополосными пеленгаторами, изготовленных в конце 70-х годов прошлого столетия американской фирмой LLP (Lightning Location and Protection) по технологии, предложенной в [3]. Первоначально система предназначалась для Бюро землеустройства США (BLM) и использовалась для оперативного обнаружения источников лесных пожаров, инициируемых сильноточными молниевыми разрядами. Вскоре на восточном побережье США была развернута еще одна локальная малобазовая ПСМ (расстояние между пунктами не превышало 50 км), также оборудованной LLP-пеленгаторами. Тщательная настройка и калибровка этой системы с исключением систематических погрешностей пеленгации, обусловленных влиянием локальных местных неоднородностей, позволяла лоцировать молниевые разряды в интерьере системы с точностью, составляющей 0,5–1 км. Успехи в локации гроз заинтересовали энергетиков. Развертывание системы на всей территории США при финансовой поддержке электрического научно-исследовательского института EPRI (Electric Power Research Institute) было начато в 1983 году.

Для сохранения достигнутой в малобазовой ПСМ точности в масштабах всей страны потребовалось бы развертывание очень большого (несколько сотен) количества пунктов. Возможное сокращение их числа путем увеличения базовых расстояний между пунктами ПСМ приводит к пропорциональному росту величины ошибок. Это побудило разработчиков национальной сети обратиться к использованию разностно-дальномерной системы в ТОА (Time Of Arrival) – модификации, характеризующейся потенциально более высокой, по

сравнению с ПСМ, точностью местоопределения, не меняющейся при увеличении базовых расстояний (при условии сохранения точности определения времен прихода сигналов в разнесенные пункты регистрации). К тому времени (1982г.) коммерческая версия РДСМ ТОА-типа LPATS (Lightning Positioning And Tracking System) была введена в строй во Флориде. Вскоре была развернута сеть из нескольких аналогичных систем, покрывавших континентальную часть США, интегрированная в развертываемую национальную систему [6].

Во вновь развертываемой системе величину базовых расстояний предполагалось выбирать в пределах 300–350 км, а временную привязку осуществлять по максимуму первой полуволны «земной» составляющей сигнала, регистрируемого в полосе 1–400 кГц. Это обеспечивает высокую точность измерения амплитуды атмосферика и последующего восстановления величины разрядного тока, которая является одним из важных системных параметров. В пределах внутренней зоны NLDN не возникает проблем с идентификацией первой полуволны в разнесенных пунктах и ее высокоточной временной привязкой, обеспечивающей точность местоопределения около 500 м. Поскольку параметры приемных устройств РДСМ практически совпадали с характеристиками широкополосных LLP-датчиков, используемых в ранее развернутых ПСМ, то все старое оборудование вместе с уже существующей инфраструктурой могло быть использовано при построении новой системы. Наличие в составе оборудования магнитных датчиков позволило без дополнительных затрат решать нередко возникающую проблему неоднозначности гиперболической оценки координат и заметно увеличить быстродействие основного алгоритма местоопределения.

С 1989 года эта смешанная система, оснащенная обновленной технологией измерений и методикой местоопределения, известными под аббревиатурой IMPACT (Improved Accuracy from Combined Technology), претерпев еще ряд модификаций [7], в составе 114 пунктов регистрации функционирует в непрерывном режиме до настоящего времени, обслуживая всю континентальную часть территории США.

Комплектация оборудования и методология местоопределения, используемые в NLDN, нашли применение в большинстве других систем, развертываемых в разных странах. Из наиболее крупных как по количеству пунктов, так и по размерам обслуживаемой территории, систем подобного типа можно выделить Канадскую систему CLDN (83 пункта) [8], впоследствии слившуюся с NLDN и образовавшую североамериканскую сеть NALLDN, обслуживающую всю континентальную часть Северной Америки [9].

Аналогичной по составу аппаратуры, структуре размещения, рабочим характеристикам (эффективность обнаружения разрядов, точность) и размерам обслуживаемой территории является Бразильская система RINDAT [10]. С 2001 года стартовал проект EUCLID (European Cooperation for Lightning Detection), первоначально объединивший в единую сеть локальные системы грозолокации шести европейских стран (Австрия, Франция, Германия, Италия, Норвегия и Словения). В настоящее время система насчитывает 164 сенсора, размещенных в 27 странах ЕС. EUCLID предоставляет данные о местах возникновения молний в пределах Европы в реальном времени (с задержкой в несколько секунд) через веб-серверы, визуализацию молниевой активности на карте и по выбранной географической привязке.

В России развернута система ТОА-типа, которая по аббревиатуре, используемой в отечественных публикациях, известна как ГПС «Алвес 9.07». Система предназначена для мониторинга грозовой активности в реальном времени, обеспечивая потенциальных потребителей информацией о текущем состоянии грозовой активности, а также о ее территориальном распределении, соответствующем различным интервалам усреднения (суточным, сезонным, годовым). Отличием от зарубежных аналогов является отказ от использования рамочных пеленгаторных антенн, что существенно снизило стоимость системы, облегчило ее настройку и эксплуатацию, однако неизбежно приводит к ошибкам, устранение которых требует усложнения алгоритма местоопределения. К настоящему времени система имеет в своем составе около 80 пунктов. Зона ее оперативного обслуживания перекрывает всю Европейскую часть России до Урала и отдельные регионы ее Азиатской части от Урала до Дальнего Востока [11].

С начала последнего столетия предпринимались значительные усилия по созданию пассивных средств мониторинга грозовой активности глобального масштаба. Здесь прежде всего следует отметить большебазовую РДСМ WWLLN (World Wide Lightning Location Network). В отличие от всех рассмотренных выше систем ТОА-типа, в основе функционирования WWLLN лежит принципиально другой метод измерения моментов прихода

сигналов, впервые предложенный в работе [12]. Время прихода определяется посредством измерения групповой задержки сигнала (ТОГА), оцениваемой по величине производной линейной составляющей его полной фазовой характеристики, регистрируемой в полосе частот 6–22 кГц. Групповая скорость рассчитывается на центральной частоте рабочего диапазона в предположении справедливости одномодового представления поля (вертикальной электрической компоненты). Чтобы перекрыть всю территорию земного шара, необходимо развернуть равномерную сеть из 50–60 пунктов, разнесенных на расстояние около 3000 км. Тестирование системы с использованием данных локации NLDN показало, что эффективность обнаружения составляет около 10% для токов более 25 кА и 35% для токов свыше 130 кА [13]. К настоящему времени становление WWLLN еще не завершено. По мнению разработчиков сети для обеспечения полного покрытия Земного шара, потребуется еще 2–3 года.

В конце 2009 г. корпорацией Vaisala было начато формирование большебазовой глобальной ТОА-сети обнаружения молний сети GLD360 (Global lightning detection network). В ней используется априорно нефиксированное количество датчиков, размещенных по всему миру. Местоположение разрядов оценивается по методике, используемой в NLDN, с тем отличием, что моменты прихода сигналов определяются не по первой полуволне широкополосного атмосферика, а по временным отсчетам, соответствующим его абсолютному максимуму или ближайшим к нему нулевым переходам.

По последним уточненным данным на 2019 г. эффективность обнаружения разряда ОЗ-типа составляет около 70%, а точность местоопределения 2–5 км. Эксплуатация сети GLD360 показала, что она способна с высоким разрешением отображать грозовую активность на больших удалениях как в реальном времени, так и на различных интервалах усреднения (часовом, суточном, сезонном) с достаточно четким отображением специфических ситуаций, возникающих в различных синоптических условиях [14]. В настоящее время эта сеть обеспечивает возможность локации молний в тех зонах земного шара, где отсутствуют обычные средства метеорологических наблюдений. Данные GLD360 предполагается использовать при наблюдении мезомасштабных циклонических образований, при исследовании конвективных структур ураганов и тайфунов.

Таким образом, пассивные радиотехнические средства мониторинга грозовой активности в процессе совершенствования технической части и алгоритмов обработки, обусловленного возрастающими требованиями потребителей к информации о грозах, достигли уровня, позволяющего реализовать определение координат молниевых разрядов в глобальном масштабе с достаточно высокой точностью. В настоящее время наиболее эффективным методом локации гроз является разностно-дальномерный, позволяющий с большей точностью, чем угломерный или угломерно-дальномерный реализовать определение координат. Вместе с тем развертывание РДСМ не всегда реализуемо, либо экономически нецелесообразно. Отсутствие строгих подходов к обоснованию выбора средств, удовлетворяющих требования потребителей информации о грозах, зачастую приводит к реализации дорогостоящих и неэффективных систем.

Дальнейшее совершенствование средств мониторинга грозовой активности связано с повышением вероятности обнаружения молниевых разрядов всех типов и точности определения их координат. При отсутствии систем контроля подтверждение высоких характеристик существующих и новых средств мониторинга грозовой активности представляется затруднительным. Для контроля точностных характеристик требуется создание средств контроля, реализуемых на основе систем искусственного инициирования разрядов, либо системами, подобными имитатору «Каскад», эксплуатируемому в Советском Союзе до 1980 г, и представляющего собой энергетический накопитель большой мощности и излучающую систему в виде троса, поднимаемого с помощью аэростата на высоту до 3 км.

Возросшие возможности современных систем мониторинга ГА, значительное расширение круга решаемых ими задач потребовало изменения традиционных подходов к анализу грозных явлений, существенного пересмотра требований к техническим характеристикам при модернизации существующего и разработке нового поколения систем местоопределения гроз, значительного расширения круга решаемых ими задач. К числу решаемых ранее проблем, направленных в основном на увеличение надежности обнаружения и точности локации отдельных молниевых разрядов, добавились не менее важные задачи, связанные с разработкой методов и алгоритмов вторичной обработки данных регистрации и локации, позволяющих:



- осуществлять пространственно-временную группировку (кластеризацию) данных, характеризующих место и время возникновения отдельных импульсов ЭМИ, возникающих в процессе развития грозовой активности, в кластеры, соответствующие таким физическим объектам как отдельная грозовая ячейка, грозовой очаг, мезомасштабный грозовой комплекс;
- группировать зарегистрированные СДВ-импульсы ЭМИ, соответствующие выделенным грозовым кластерам, во вспышки с последующей их классификацией по типам (ОЗ или ВО);
- осуществлять анализ временных изменений параметров излучения из выделенных кластеров с целью определения текущего состояния и оценки степени опасности грозовой активности, а также краткосрочный прогноз ее будущего развития с вероятностной оценкой появления сопутствующих явлений (интенсивные осадки, шквалистый ветер, град);
- формировать банки данных локации и регистрации гроз, усредненных в различных пространственно-временных масштабах и форматах, адаптированных к различным областям научно-производственного использования (в энергетике, авиации, гидрологии, метеорологии, климатологии и др.).

В частности, накапливаемая информация о временном и пространственном распределении источников молниевой опасности важна при планировании строительства различных производственных объектов, прокладке линий электропередачи и связи, разработке средств молниезащиты и количественной оценке ее эффективности.

### Литература

1. *Watson-Watt R.A., Herd J.P.* An instantaneous direct-reading radiogoniometer // *JIEE*. 1926. Vol. 64. P. 611.
2. *Adcock F., Clarke E.* The location of thunderstorms by radio direction finding // *J. Inst. Electr. Eng.* 1947. Vol. 94B. P. 118–125.
3. *Krider E.P., Noggle R.C., Uman M.A.* A gated, wide-band magnetic direction finder for lightning return strokes // *J. Appl. Meteorol.* 1976. Vol. 15. P. 301–306.
4. *Черепанов С.Н.* Создание автоматизированного стационарного комплекса обнаружения ядерных взрывов // Сб. «Рожденная атомным веком». Ч. 3. М. 2002. С. 59–69.
5. *Московенко В.М.* Использование радиотехнического метода в интересах народного хозяйства // Сб. «Рожденная атомным веком». Ч.1. М. 1998. С. 88–93.
6. *Lyons W.A., Bent R.B.* Evaluation of the time-of-arrival (TOA) technique for real-time ground strike measurements using the lightning position and tracking system (LPATS) // *Proc. 13th Conf. Severe Local Storms*. Tulsa, OK: Amer. Meteorol. Soc., Oct. 17-20. 1983. P. 37–40.
7. *Cummins K.L., Murphy M.J.* An Overview of Lightning Location Systems: History, Techniques, and Data Uses, With an In-Depth Look at the US. NLDN // *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. – 2009. Vol. 51, No. 3.
8. *Burrows, W.R., King P., Lewis P.J., Kochtubajda B., Snyder B., Turcotte V.* Lightning occurrence patterns over Canada and adjacent United States from lightning detection network observations // *Atmos. Ocean*. 2002. Vol. 40. P. 59–81.
9. *Orville R.E., Huffines G.R., Burrows W.R., Holle R.L., Cummins K.L.* The North-American Lightning Detection Network - First results: 1998–2000 // *Mon. Weather Rev.* 2002. Vol. 130, No. 8. P. 2098–2109.
10. *Pinto I.R.C.A., Abdo R.F., Garcia S.A. de M., Filho A.C.* Recent upgrades to the Brazilian Integrated Lightning Detection Network // *Proc. 19th International Lightning Detection Conference (ILDC)*. Vaisala, Tucson, Arizona. 2006.
11. *Снегуров А.В., Снегуров В.С.* Система местоопределения гроз // *Труды ГГО*. 2017. № 586. С. 117–140.
12. *Dowden R.L., Brundell J.B., Rodger C.J.* VLF lightning location by time of group arrival (TOGA) at multiple sites // *J. of Atm. and Solar-Terr. Physics*. 2002. Vol. 64(7). P. 817–830.
13. *Abarca S.F., Corbosiero K.L., Galarneau T.J. Jr.* An evaluation of the Worldwide Lightning Location Network (WWLLN) using the National Lightning Detection Network (NLDN) as ground truth // *J. Geophys. Res.* 2010. Vol. 115. D18206, doi:10.1029/2009JD013411.
14. *Holle R.L.* Meteorological examples of GLD360 events // *Proc. 22. 2-3 April 2012. Colorado, USA*.

## РЕГИСТРАЦИЯ МОЛНИЕВЫХ РАЗРЯДОВ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРИТЕЛЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ

*Е.А. Коровин, И.А. Готюр, Ю.В. Кулешов, Г.Г. Щукин*

Федеральное государственное бюджетное военное образовательное учреждение высшего образования «Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского» Министерства обороны Российской Федерации  
evgen\_korovin@mail.ru

Системы мониторинга грозовой активности [1], в основе принципа действия которых лежит прием электромагнитного излучения молниевых разряда (МР), обладают значительным радиусом действия и позволяют, как правило, с достаточной точностью определять координаты МР. Наилучшими характеристиками обладают многопунктовые системы, реализующие разностно-дальномерный метод определения координат МР. Развертывание пространственно разнесенной системы датчиков связано с решением вопросов обеспечения сети датчиков устойчивой связью, временной синхронизацией и т.д. В качестве местных датчиков грозовой активности, не требующих создания сети передачи данных, систем временной синхронизации и оплаты услуг сторонних организаций, применяются грозопеленгаторы – дальномеры (ГПД) [2], позволяющие с приемлемой точностью определять координаты молниевых разрядов в радиусе до 100 км. Также в качестве местных датчиков молний широко используются измерители напряженности электрического поля [6], позволяющие реализовать заблаговременное, до первого МР предупреждение о приближающейся грозе.

Однопунктовые системы пассивной локации гроз позволяют на основе оценок азимута и дальности определять координаты МР. Оценивание азимута в таких системах производится на основе анализа амплитуд электрической и магнитной составляющих излучения МР. Погрешность определения азимута в ГПД не превышает единиц градусов, что удовлетворяет требованиям по точности на значительных дальностях.

Дальность, или расстояние до МР в ГПД определяется во временной (с использованием т.н. фильтров-антитрасс), либо частотной (по различиям в фазовых спектрах электрической и магнитной составляющих атмосферика) областях. Для интервальной оценки дальности в зоне, ограниченной радиусом 56 км могут применяться амплитудные методы [3, 4]. Радиус рабочей зоны ГПД при использовании Е-Н алгоритмов не превышает 100 км, а погрешность оценок расстояния до МР 10–15% от дальности на дистанциях 20–80 км. При этом характерно значительное возрастание погрешности в интервалах до 20 км и от 80 до 100. В первом случае это связано с поляризационными погрешностями, вызванными отклонением канала молнии от вертикали. Во втором случае погрешности вызваны нюансами реализации метода и обусловлены противоречием требований фильтрации помехи промышленной сети (до 300 Гц) и необходимостью анализа данной части фазового спектра Е и Н составляющих принимаемого сигнала.

Проблема повышения точности в диапазоне дальностей 80–100 км может быть решена за счет совместного применения ряда мер, таких как запись с последующим вычитанием из принимаемого сигнала помехи, применение цифровых фильтров большого порядка для удаления мешающих спектральных составляющих и аналого-цифровых преобразователей с большой разрядностью. Устранить поляризационные ошибки можно путем отказа от магнитных рамочных антенн и использованием для определения направления на источник атмосферика интерферометрической системы, состоящей из многоканального радиоприемного устройства и антенной решетки. При этом определение дальности можно будет реализовать только амплитудным методом, не обеспечивающим достаточную точность в диапазоне частот антенной системы, имеющей разумные габариты.

Вместе с тем, имеется возможность оценивания дальности до МР путем анализа данных измерителей электрического поля, известных в литературе как электростатические флюксометры [10]. Автоматизация процессов сбора и обработки данных, получаемых от этих приборов, позволила на основе моделей распределения зарядов в конвективной облачности в виде точечного заряда, либо точечного диполя [5], создать системы предупреждения об опасных атмосферных явлениях. Флюксометры обеспечивают заблаговременное, до возникновения первого разряда, выявление присутствия в атмосфере значительных зарядов. Недостатком является малый радиус действия одного датчика, область предупреждения не превышает 20 км [6].

Для реализации эксперимента были использованы данные по местоположению МР, имевших место в июле 2017 г в районе, ограниченном радиусом 100 км относительно датчика электрического поля (рисунок 1). Данные о координатах МР определялись системой «Blitzortung» [9]. В качестве датчика электрического поля был использован флюксметр «Рябина» [7, 8]. ГПД располагался на крыше учебного корпуса СПбГУ в Петергофе (~23 км от измерителя напряженности поля). На рисунке 2 представлены данные по координатам МР, зафиксированным 13.07.2017 г системой «Blitzortung». В центре окружностей располагается прибор измерения электрического поля. Радиус окружностей кратен 25 километрам.



Рисунок 1. Измеритель напряженности электрического поля «Рябина»

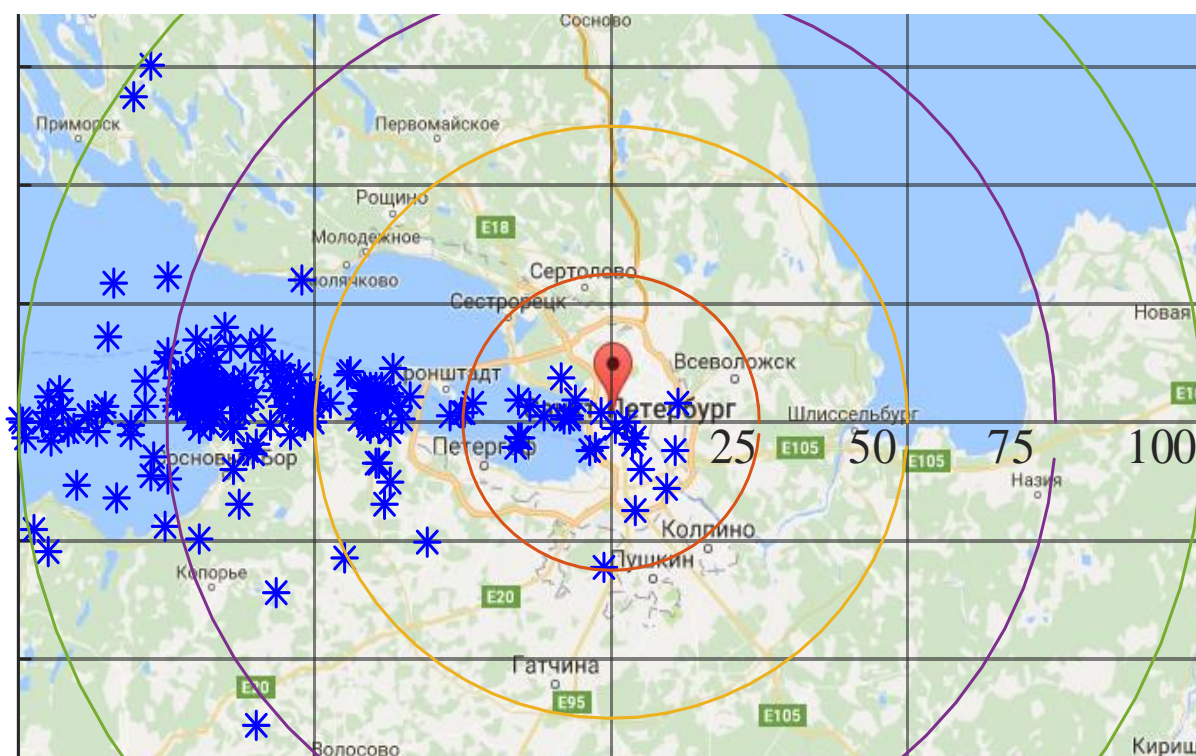


Рисунок 2. Координаты отдельных МР, зафиксированных системой «Blitzortung» 13.07.2017 г. в Ленинградской области

Для определения максимального радиуса, в пределах которого возможна идентификация опасного явления, на основе данных системы «Blitzortung», формировались двумерные массивы, включающие время и дальность (до 80 км) до МР. Совместное представление информации о значениях электрического поля и дальности до МР позволяет наглядно оценить возможности флюксметра по обнаружению МР.

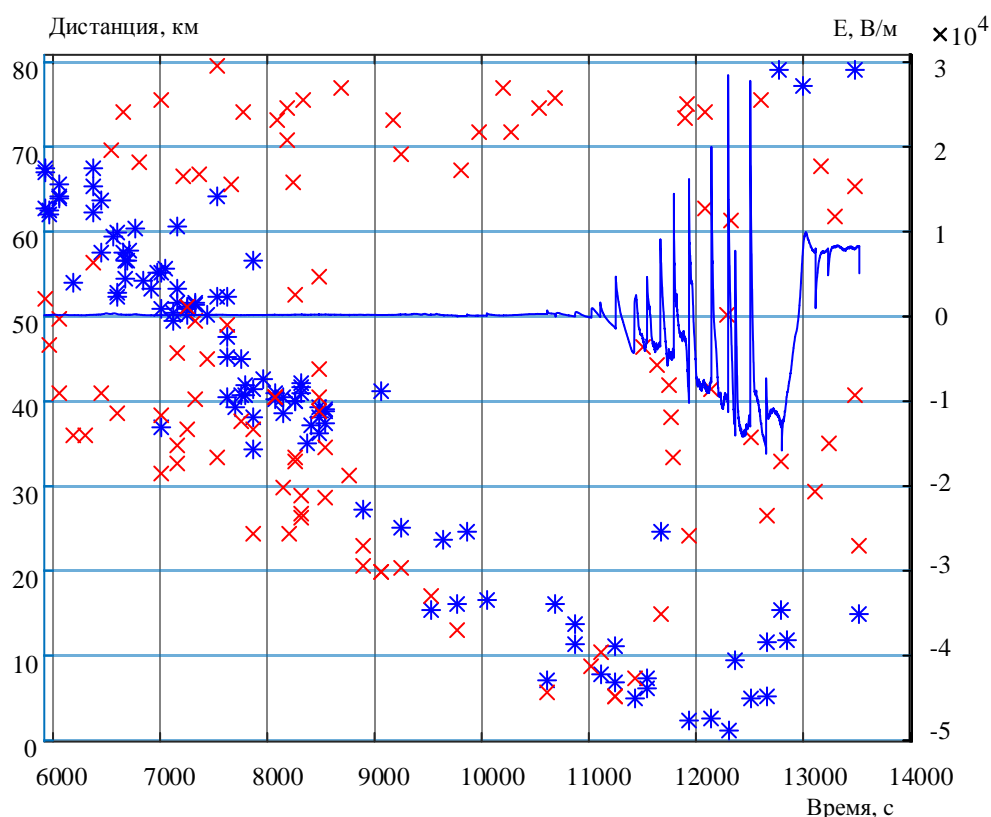


Рисунок 3. Зависимость амплитуды скачков градиента электрического поля от расстояния до МР (\* – данные системы «Blitzortung», × – данные ГПД)

На рисунке 3 представлены значения напряженности электрического поля совместно с расстояниями до МР, определяемых системой «Blitzortung» и ГПД. Из графика рисунка 3 прослеживается зависимость амплитуды скачка электрического поля от расстояния до МР (по данным системы «Blitzortung»), определяемая согласно модели точечного заряда известным [5] выражением:

$$\Delta E = \frac{\Delta QH}{4\pi\epsilon_0(R^2+H^2)^{3/2}},$$

где  $\Delta Q$  – величина заряда, нейтрализованного в результате МР,  $H$  – высота до области заряда;  $R$  – расстояние до проекции заряда на поверхность Земли.

На рисунке 4 представлены данные измерителя электрического поля, демонстрирующие возможности прибора по обнаружению атмосфериков на дистанции свыше 60 км. Анализ данных эксперимента, позволяет сделать вывод о высокой чувствительности датчика напряженности поля ко всем типам МР в радиусе до 50 км, что крайне важно при выявлении предгрозового состояния.

Таким образом, датчики напряженности электрического поля позволяют уверенно идентифицировать факт молниевых разрядов любого типа на расстояниях до 50 км. Грозопеленгаторы-дальномеры, обладая достаточной точностью определения координат молниевых разрядов в зоне 20–80 км способны обеспечить прогнозирование направления движения и развития грозового фронта, но в случае формирования грозовой ячейки в непосредственной близости от объекта, неэффективны до момента обнаружения первого разряда.

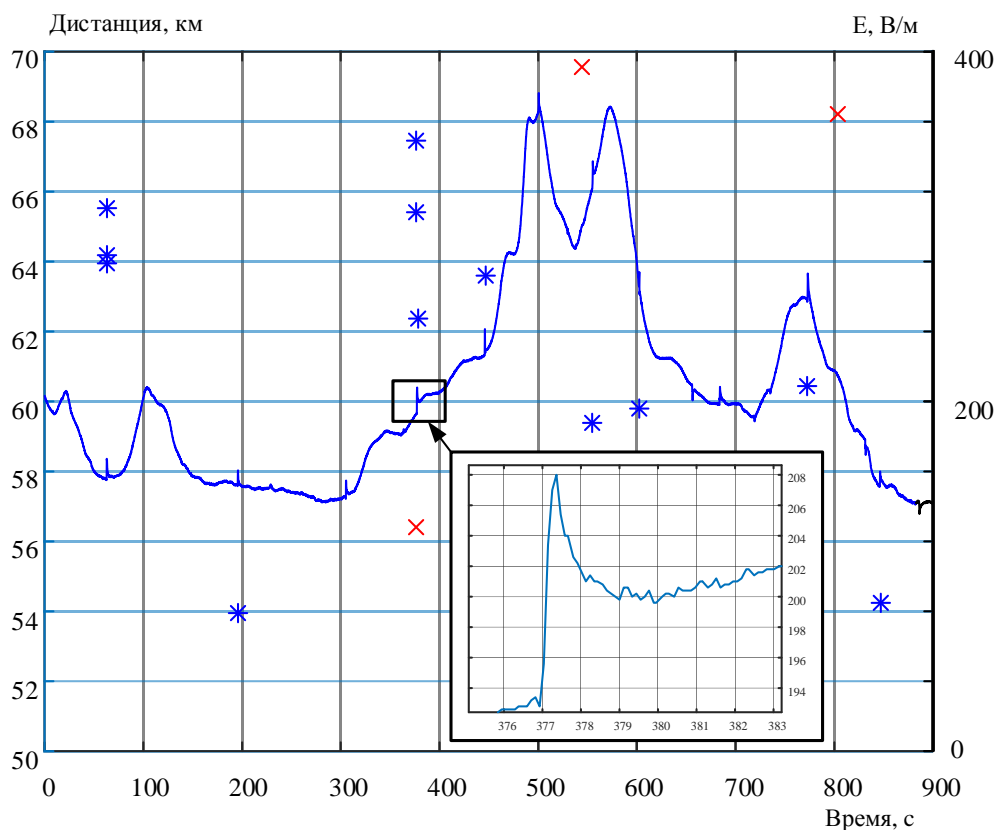


Рисунок 4. Напряженность электрического поля на дистанции более 50 км от МР

Флюксметр устраняет данный недостаток, а влияние на структуру поля всех электрических процессов в облаке позволяет с высокой вероятностью фиксировать предгрозовое состояние. Совместное применение в однопунктовых системах мониторинга грозовой активности грозопенелгатора-дальномера и измерителя электрического поля позволит повысить вероятность обнаружения грозоопасности до первой вспышки и уменьшить погрешности определения дальности в зоне до 20 км.

### Литература

1. Кононов И.И., Петренко И.А., Снегуров В.С. Радиотехнические методы местоопределения грозowych очагов. Л.: Гидрометеиздат. 1986. 222 с.
2. Кононов И.И., Юсупов И.Е., Кандарацков Н.В. Анализ однопунктовых методов пассивной локации грозowego разряда // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2013. Т. 56. № 11–12. С. 875–888.
3. Vaisala Thunderstorm Local Lightning Sensor TSS928TM <http://www.vaisala.ru/>
4. BTD-300 Thunderstorm Detector <http://www.biral.com/pcat/thunderstormlightning-detectors>
5. Launa M. Maier Electric Field Mill Network Products to Improve Detection of the Lightning Hazard. The Space Congress® Proceedings. 1987. P. 22–32.
6. Murphy M.J., Holle R.L., Demetriades N.W.S. Cloud-to-ground lightning warnings using electric field mill and lightning observations. – 20th International Lightning Detection Conference (ILDC). Proceedings. Tucson, 2008.
7. Коровин Е.А., Ефимов В.А., Денисенков Д.А., Крисанова О.А., Рудь А.А., Чернышев С.В. Датчик напряженности электрического поля Земли // Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред материалы VII Всероссийской научной конференции 2016. С. 254–259.
8. Алехин С.Г., Ефимов В.А., Полушин П.А., Готюр И.А., Жуков В.Ю., Костромитинов А.В., Кулешов Ю.В., Рудь А.А., Шукин Г.Г., Караваев Д.М., Михайловский Ю.П., Андреев-Красносельский А.А. Компенсационный электростатический флюксметр. Патент 2501029 С1 Россия МПК G01R 29/12/ Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского МО РФ, опубликовано 10.12.13 г., Бюллетень №34.
9. Network for Lightning and Thunderstorms in Real Time [http://en.blitzortung.org/live\\_lightning\\_maps.php](http://en.blitzortung.org/live_lightning_maps.php).
10. Имянитов И.М. Приборы и методы для изучения электричества атмосферы М.: Гостехиздат. 1957.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТНЫХ И ВЕРОЯТНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАССИВНЫХ СДВ СРЕДСТВ МОНИТОРИНГА ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТИ

*И.И. Кононов, И.Е. Юсупов*

СПбГУ, г. Санкт-Петербург  
igor\_kononov@mail.ru

Развертывание в конце 90-х спутниковых навигационных систем GPS и ГЛОНАСС, обеспечивших высокоточную синхронизацию разнесенных пунктов, а также создание Интернета, позволяющего осуществлять скоростной обмен данными между ними, – привели к повсеместному развертыванию многопунктовых систем местоопределения, в основном пеленгационных (ПСМ) и разностно-дальномерных (РДСМ). К настоящему времени среди различных версий таких систем наилучшими техническими характеристиками обладают многопунктовые широкополосные версии разностно-дальномерных систем СДВ-диапазона. Успехи пассивной грозолокации заметно увеличили число потенциальных потребителей, что, в свою очередь, привело к возрастанию требований к некоторым характеристикам существующих и вновь разрабатываемых систем. В частности, это коснулось необходимости улучшения одного из важнейших параметров СДВ-систем мониторинга ГА – эффективности обнаружения молниевых вспышек (МВ), причем не только ОЗ-типа (содержащих в структуре сопутствующего ЭМИ импульсы, возбуждаемые сильноточными обратными ударами, развивающимися между землей и облаком), но также вспышек ВО-типа, все разрядные явления которых происходят внутри облака. В связи с новыми требованиями возникла необходимость оценить возможность решения этой задачи как уже существующими, так и вновь создаваемыми СДВ-системами мониторинга грозовой активности. Некоторые результаты подобных исследований представлены в недавних публикациях [1, 2]. В них приводятся предварительные оценки эффективности обнаружения МВ низкочастотными разностно-дальномерными системами типа американской NLDN и французской Météorage. В обоих случаях для оценки этого параметра привлекаются данные картирования молниевых вспышек системами УКВ-диапазона типа LMA, имеющими значения этого параметра, приближающимися к 100%.

Целью настоящей работы является оценка эффективности обнаружения молниевых вспышек ВО- и ОЗ-типов модифицированными техническими средствами СДВ-диапазона и исследование возможности местоопределения входящих в их структуру сильноточных разрядных компонент СДВ-пеленгационной системой, оснащенной импульсными широкополосными пеленгаторами, изготовленными на кафедре радиофизики СПбГУ.

Представленные в работе результаты оценок эффективности обнаружения МВ получены с использованием данных регистрации ЭМИ молниевых вспышек в УКВ (110 МГц) и СДВ (0,3–50 кГц) диапазонах, а также некоторых результатов, полученных при тестировании пеленгаторов и оборудованной ими двухпунктовой ПСМ.

Для исследования возможности местоопределения сильноточных компонент, формирующих пачечную структуру импульсного СДВ-излучения молниевых вспышек различных типов привлекаются данные регистрации ЭМИ из грозовых очагов, выделенных с использованием показаний разностно-дальномерной системы Bltzortug.

Как известно, сильноточные разрядные процессы, развивающиеся внутри облаков и сопровождающиеся импульсным ЭМИ, надежно регистрируемым в СДВ-диапазоне, имеют место в молниевых вспышках практически всех типов. Они проявляются в виде отдельных импульсов или дискретных пачек импульсов на всем протяжении их развития, длящегося десятки-сотни миллисекунд. Наиболее значительные разрядные процессы (по величине протекающих токов и вертикальной протяженности) возникают на стадиях начального пробоя ВО-вспышек или предварительного пробоя (предшествующего развитию лидера и первого обратного удара) вспышек ОЗ-типа. Сильноточные разряды, формирующие пачки так называемых К-импульсов, возникают и на других стадиях развития молниевых вспышек по мере вовлечения в разрядную активность новых зарядовых центров внутри облака.

Оценки эффективности обнаружения (ЭО) молниевых вспышек всех типов получены путем сопоставления синхронных данных непрерывной регистрации ЭМИ грозовых процессов регистраторами УКВ-диапазона. Вспышка считается обнаруженной, если на протяжении ее развития, зафиксированного приемником УКВ-диапазона, произошел хотя бы один

сильноточный разряд, зафиксированный СДВ-регистратором. Факт возникновения сигнала зависит от порога срабатывания регистратора. Результаты обработки данных непрерывной регистрации очень интенсивной грозовой активности со значительным преобладанием вспышек ВО-типа (средняя величина соотношения интенсивностей ВО/ОЗ превысила 5) в течение одного грозового дня в радиусе 200 км (ограничивающего зону обнаружения УКВ-регистратора) показали, что на уровне 0,5 В/м, соответствующего порогу срабатывания тестируемого СДВ-пеленгатора, эффективность обнаружения вспышек ВО-типа составила 30–50% (заметим, что ЭО вспышек ОЗ-типа превышает 90%). При снижении порога до 0,1 В/м ЭО увеличилась до 70–80%. Эффективность обнаружения МВ двухпунктовой малобазовой ПСМ, оборудованной тестируемыми пеленгаторами, снизилась по сравнению с приведенными выше значениями незначительно (примерно на 10–15%). Интересно отметить также возможность воспроизведения СДВ-системой пространственной конфигурации молниевой вспышки. Размеры вспышек примерно соответствуют аналогичным образцам, приведенным в публикации [1].

В работе проведены также исследование временной структуры пачек импульсного излучения молниевых вспышек и параметров входящих в них импульсов в масштабах импульсных пакетов, соответствующих стадиям предварительного пробоя. Оказывается, что межимпульсные интервалы подчиняются логнормальному закону распределения, характеризуемого параметрами: мода = 135 мкс, медиана = 409 мкс. При таких значениях в системах типа NLDN (с базовыми расстояниями 300–400 км) возникает серьезная проблема с идентификацией сигналов в разнесенных пунктах, что требует значительной модификации алгоритма местоопределения, как это отмечается в работе [1].

В то же время оказывается возможным определение местоположений внутривысписечных пачек пеленгационной системой по усредненным значениям оценок пеленгов, полученным по совокупности импульсов в пачках. Как показывают оценки, полученные в рамках настоящей публикации, их отличия от значений пеленгов, восстановленных по данным РДСМ Blitzortung, составляют 1–2°, а величина ско не превышает 3° в диапазоне 50–200 км и лишь на малых расстояниях (20–30 км) возрастает до 5–7°. Этот факт служит косвенным подтверждением значительной вертикальной протяженности разрядов рассматриваемого типа.

### Литература

1. *Murphy M. J., Ryan K. Said.* Toward lightning mapping with long-baseline LF networks // Proc. 25 ILDC / 2018. 23-25 March. Ft. Lauderdale. Florida. USA.
2. *Stéphane Pédeboy, Paul Barnéoud, Eric Defer, Sylvain Coquillat.* Analysis of the Intra-Cloud lightning activity detected with Low Frequency Lightning Locating Systems // Proc. 25 ILDC. 2018. 23-25 March. Ft. Lauderdale. Florida. USA.

### СТАТИСТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ МОЛНИЕВЫХ РАЗРЯДОВ НА ЮГЕ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ

*А.Х. Аджиев<sup>1</sup>, Д.Д. Кулиев<sup>1</sup>, С.Т. Казакова<sup>1</sup>, И.А. Муратов<sup>1</sup>, А.С. Будаев<sup>1</sup>, М.В. Жарашуев<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик  
vgikbr@yandex.ru

Знание закономерностей пространственно-временного распределения грозовой активности для конкретной местности имеют важное значение при выработке мер по организации молниезащиты зданий, сооружений, энергетических объектов, линий электропередач и объектов жизнедеятельности населения.

На территории России грозы наблюдаются, практически, повсеместно. К общим тенденциям их распределения относятся увеличение числа гроз с севера страны на юг и усиление грозовой деятельности при повышении рельефа. Таким образом, наибольшим числом дней с грозой характеризуются горные районы, расположенные на юге континентальной части страны – в пределах Северо-Кавказского, Южного, Уральского, Сибирского и Дальневосточного федеральных округов [1].

В пределах юга европейской части России (Северо-Кавказский и Южный федеральный округ) грозовая деятельность возможна практически круглогодично [2]. Наиболее часто грозы отмечаются в летний период.

Закономерности пространственно-временного (сезонного) распределения гроз на территории юга Европейской части России к настоящему времени исследованы не в полном объеме. Данная работа посвящена выявлению закономерностей пространственно-временного распределения грозовой активности на Северном Кавказе.

Грозопеленгационная сеть (ГПС) LS8000, установленная на Северном Кавказе, позволяет фиксировать, в режиме реального времени, молниевые разряды, происходящие над всей территорией ЮФО и СКФО. О каждом молниевом разряде ГПС LS8000 получает следующие параметры: географические координаты местоположения молниевом разряда, время разряда, сила тока в канале молнии, полярность разряда и ряд других [3, 4]. Вся полученная ГПС информация о молниевых разрядах архивируется и сохраняется в базе данных. В данной работе использованы данные о наземных молниевых разрядах, полученные LS8000 за период 2009–2015 года. Данные по молниевым разрядам группировались по территориям субъектов Северного Кавказа и рассчитывались статистические параметры по каждому субъекту раздельно и по всему региону в целом.

В результате расчётов получены следующие результаты.

На рисунке 1 показана плотность наземных разрядов за исследуемый период по югу европейской части России. Размер ячеек  $10 \times 10$  км. Из приведенного рисунка видно, что участки (ячейки) с наибольшими плотностями наземных молний приходятся на горные и предгорные районы Краснодарского края, Адыгеи, Карачаево-Черкесии и Кабардино-Балкарии.

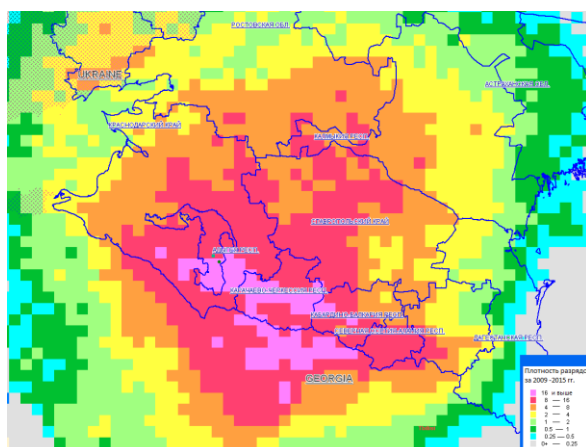


Рисунок 1. Плотность наземных разрядов за 2009–2015 гг.

На рисунке 2 приведена диаграмма средней плотности для каждого субъекта. Эти величины вычислялись как отношение количества всех наземных молниевых разрядов на территории конкретного субъекта к площади этого субъекта.

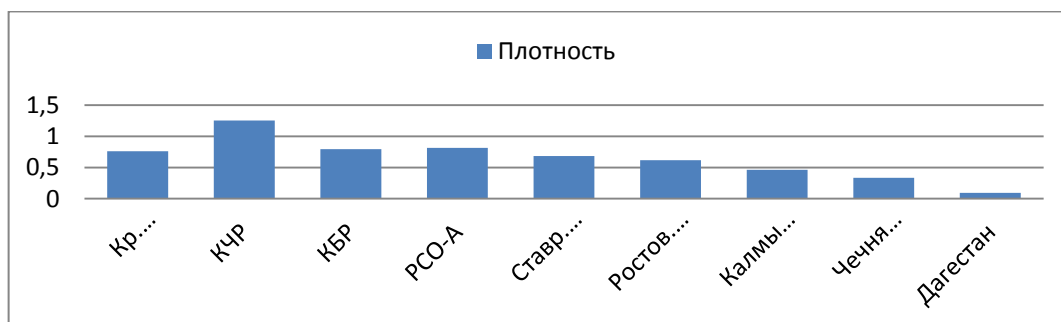


Рисунок 2. Средняя плотность наземных разрядов для субъектов СКФО и ЮФО



Как видно из рисунка 2, средняя поражаемость территорий выбранных субъектов наземными молниями колеблется от 0,1 до 1,25 ударов на 1 кв. км. в год. Наибольшая плотность поражения земли наземными молниями имеет место в КЧР (1,25 ударов на 1 км<sup>2</sup> в год). Наименьшее на территории республики Дагестан (0,1 ударов на 1 км<sup>2</sup> в год).

Такое различие обусловлено особенностями грозовой активности на Северном Кавказе.

Также вычислены соотношения молний положительной и отрицательной полярности, статистические параметры значений токов в канале молнии по всем рассматриваемым субъектам. Эти результаты приведены в таблице 1. Обозначения в таблице следующие:

$I_{cp+}$  – среднее значение тока в канале молний положительной полярности;

$I_{cp-}$  – среднее значение тока в канале молний отрицательной полярности;

$I_{мед+}$  – медианное значение тока в канале молний положительной полярности;

$I_{мед-}$  – медианное значение тока в канале молний отрицательной полярности;

$|I_{cp}|$  – среднее значение абсолютного значения (модуля) тока по всем молниевым разрядам.

Таблица 1

### Характеристики токов молний по субъектам РФ на Юге России

Субъекты	Доля молний положительной полярности, %	Доля молний отрицательной полярности, %	Токи в канале молнии				
			$I_{cp+}$	$I_{cp-}$	$I_{мед+}$	$I_{мед-}$	$ I_{cp} $
Краснодарский край и Адыгея	21,90	78,10	32,72	-24,04	30,21	-22,67	25,23
КЧР	8,03	91,97	28,47	-16,1	15,96	-11,67	17,31
КБР	13,19	86,81	31,88	-12,45	15,46	-6,75	14,04
Северная Осетия	8,54	91,46	31,89	-16,54	14,25	-11,38	18,44
Ставропольский край	16,79	83,21	30,61	-12,79	21,17	-11,33	14,45
Ростовская область	6,86	93,14	33,72	-17,11	17,75	-13,08	18,11
Калмыкия	24,82	75,18	31,07	-22,63	24,17	-23,25	23,5
Чечня и Ингушетия	14,65	85,35	45,13	-23,61	15,5	-12,08	27,23
Дагестан	20,90	79,10	47	-29,5	24,04	-23,63	33,82

Из таблицы видно, что средние и медианные значения токов молний положительной полярности имеют большие значения, чем аналогичные значения у молний отрицательной полярности, для всех рассматриваемых субъектов. Заметные различия наблюдаются между субъектами и по соотношению молний различной полярности. Доля молний положительной полярности меньше 10% у трёх субъектов (КЧР, Северная Осетия и Ростовская область), от 10 до 20% еще у четырех субъектов (КБР, Ставропольский край, Чечня и Ингушетия). У остальных субъектов эта доля больше 20%.

Таким образом, по данным регистраций наземных молниевых разрядов над южным регионом европейской части России за 2009–2015 гг. исследованы пространственные распределения молниевой активности по субъектам этого региона. Получены статистические параметры молниевых разрядов по каждому субъекту отдельно. Показано, что наибольшая интенсивность молниевых разрядов приходится на горные и предгорные районы Краснодарского края, Адыгеи, Карачаево-Черкесии и Кабардино-Балкарии. Наибольшая средняя плотность молниевых разрядов наблюдается в КЧР (1,25 ударов на 1 км<sup>2</sup> в год), наименьшее на территории республики Дагестан (0,1 ударов на 1 км<sup>2</sup> в год).

### Литература

1. Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций в Российской Федерации (под общ. ред. Шойгу С. К.). М.: ИПЦ «Дизайн. Информация. Картография», 2005. 270 с.
2. Аджиев А. Х., Богаченко Е.М. Грозы Северного Кавказа // Нальчик: ООО «Полиградосервис и Т». 2011. 151 с.

3. *Аджиев А.Х., Тапасханов В.О., Стасенко В.Н.* Система грозопеленгации на Северном Кавказе // Метеорология и гидрология. 2013. №1. С. 5–11.

4. *Аджиев А.Х., Кулиев Д.Д.* Характеристики грозовой активности и параметры молниевых разрядов на территории юга европейской части России // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Том 54, №4. С.437–445.

## ПАРАМЕТРЫ МОЛНИЕВОЙ АКТИВНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ ПО ДАННЫМ ГРОЗОПЕЛЕНГАТОРА

*Д.А. Константинова, О.Е. Нечепуренко*

Национальный исследовательский Томский государственный университет  
da\_konstantinova@mail.ru

Разряды молний относятся к одним из самых распространенных и разрушительных явлений природы и наносят ущерб многим отраслям промышленности: авиации, системам связи, энергетической отрасли и т.п. Для предотвращения негативных последствий необходима современная система грозомониторинга и специализированного прогноза погоды, чтобы определить точную метеорологическую обстановку в режиме реального времени, что реализуется системой StormTracker канадской фирмы Voltek.

Такой грозоотметчик установлен в Томске для регистрации атмосферных электрических разрядов с радиусом обнаружения до 480 км [1, 2]. Регистрация разрядов молний происходит круглосуточно в автоматическом режиме посредством ПО NexStorm Lite, а процесс обработки информации осуществляется с помощью программы RimDataLightning. Система позволяет определить местоположение точки удара молнии, время разряда молнии, а также отследить продвижение грозových очагов. Зарегистрированные события отображаются на карте в полярной системе координат, центром которой является город Томск. Кроме того, различные виды инструментальных наблюдений за электромагнитными возмущениями, в том числе с использованием спутников, проводятся в отдельных регионах России [3–8].

Целью данной работы является оценка параметров грозových разрядов по данным грозопеленгатора Voltek за теплый период 2017 года. В данной работе рассмотрено количество разрядов типа «облако-земля» (Ground-to-Cloud, CG) и внутриоблачные разряды (Intra-cloud, IC), а также проанализированы полярность разрядов и годовой ход количества разрядов и компонент молний.

Соотношение грозových разрядов типа CG меняется в зависимости от физико-географических условий, и среднее значение доли таких разрядов для исследуемой территории составляет около 30% [9]. В результате исследований [10] было установлено, что независимо от типа молний и орографии в умеренных широтах 90% разрядов переносит отрицательный заряд (CG–).

По результатам регистрации получено, что внутриоблачные разряды составляют 58% от общего числа разрядов (таблица 1). Положительную полярность (IC+) из них имеет 57% разрядов, а отрицательную (IC–) 43%. Количество разрядов типа CG составляют 42% от общего числа разрядов. Положительную полярность (CG+) среди разрядов типа «облако-земля» имеет 14% разрядов, а отрицательный заряд (CG–) переносят только 86%.

*Таблица 1*

**Количество грозových разрядов**

	Разряды молний на землю		Внутриоблачные разряды	
	CG +	CG –	IC +	IC –
Количество компонент разряда	Всего разрядов молний 609978 – (100%)			
	239587 (39,3%) / (100%)		370391 (60,7%) / (100%)	
	273232	254681	188031	139449
	16,2%	83,8%	57,2%	42,8%
Количество разрядов	Всего разрядов молний 427869 – (100%)			
	177988 (41,6%) / (100%)		249881 (58,4%) / (100%)	
	25288	152700	141536	108345
	13,7%	86,3%	56,6%	43,4%

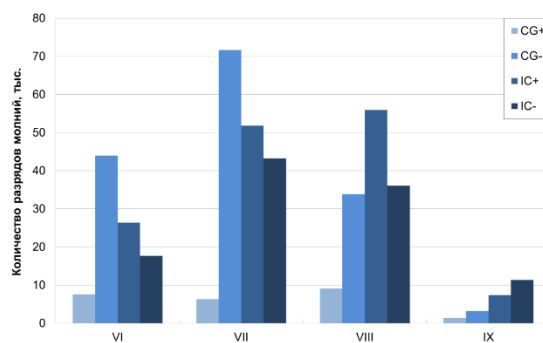


Рисунок 1. Количество разрядов молний различного типа CG+, CG– (облако-земля) и IC+, IC– (внутриоблачные)

На рисунке 1 представлено сезонное распределение количества разрядов молний за отдельные месяцы исследуемого периода. Максимальное количество разрядов фиксируется в июле, что полностью отражает годовое распределение числа дней с грозой и термодинамических характеристик атмосферы, связанных с развитием конвективной неустойчивости.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-45-700010 p\_a).

### Литература

1. *Верхулевский К.М.* Системы обнаружения и прогнозирования грозовых явлений производства компании «Voltek» // Метеорология и гидрология. 2015. №7. С. 93–104.
2. *Константинова Д.А., Горбатенко В.П.* Результаты регистрации молний над юго-восточной территорией Западной Сибири // Известия вузов. Физика. 2011. Т. 54, № 11/3. С. 156–162.
3. *Аджиев А.Х., Стасенко В.Н., Тапасханов В.О.* Система грозопеленгации гроз на северном Кавказе // Метеорология и гидрология. 2013. № 1. С. 2–11
4. *Тарабукина Л.Д., Козлов В.И.* Сравнение измерений нескольких систем регистрации молниевых радиоимпульсов // Вестник СВФУ. 2018. № 2 (64). С. 77–86.
5. *Мареев Е.А.* Достижения и перспективы исследований глобальной электрической цепи // Успехи физических наук. 2010. Т. 180, № 5. С. 527–534.
6. *Беликова М.Ю., Каранина С.Ю., Каранин А.В., Глебова А.В.* Визуализация и анализ данных сети WWLLN на территории Алтае-Саянского региона средствами ВЕБ-ГИС // Кибернетика и программирование. 2018. № 2. С. 1–8.
7. *Тарабукина Л.Д., Козлов В.И., Каримов Р.Р., Муллаяров В.А.* Пространственное распределение грозовых разрядов в Северной Азии // Метеорология и гидрология. 2017. № 2. С. 20–29.
8. *Бурцев А.В., Фастий Г.П., Ярошевич В.В.* Сопоставление результатов регистрации различных систем грозопеленгации в Кольском регионе // Труды Кольского научного центра РАН. 2018. Т. 9, № 3–16. С. 48–52.
9. *Козлов В.И., Муллаяров В.А., Григорьев Ю.М., Тарабукина Л.Д.* Параметры грозовой активности и молниевых разрядов на территории центральной Якутии в 2009–2012 гг. // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50, вып. 3. С. 365–371.
10. *Berger K., Anderson R.B., Kroninger H.* Parameters of lightning flashes // Electra. 1975. № 41. P. 23–37.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ХОДА ПАРАМЕТРОВ ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТИ НА СЕВЕРНОМ КАВКАЗЕ ПО ДАННЫМ ГРОЗОПЕЛЕНГАЦИИ

*А.А. Аджиева<sup>1</sup>, В.А. Шаповалов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В.М. Кокова», г. Нальчик

<sup>2</sup>Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик  
aida-adzhieva@mail.ru, vet555\_83@mail.ru

Правильная организация молниезащитных мероприятий во многих случаях позволяет избежать ущерба или существенно снизить его. Необходимость мониторинга характеристик грозовой деятельности диктуется как ростом материального ущерба, так и увеличением числа случаев серьезных травм и даже гибели людей от опасных природных явлений,

сопровождающих грозовые процессы. Пеленгация молниевых разрядов представляет собой источник метеорологических данных, который имеется во многих странах, но не эксплуатируется в оптимальном режиме. Современные автоматизированные системы грозопеленгации в отличие от грозоотметчиков и грозорегистраторов помимо подсчета количества разрядов решают также задачи определения направления и установления местоположения разрядов.

В мировой практике грозопеленгации с внедрением новых технологий происходит накопление фактических данных об особенностях электрической активности мощных конвективных облаков, которые в силу определенных причинно-следственных связей с некоторой заблаговременностью дают информацию о существенной микрофизической перестройке облака и возможных опасных явлениях [2].

Таким образом, становится актуальной задача исследования устойчивости таких связей в условиях различных регионов. Параметры молниевых разрядов являются предметом интенсивных исследований дистанционными методами, в связи с их опасностью и малодоступностью для иных методов исследования. В настоящее время изменяются требования к совершенствованию безопасности жизнедеятельности, грозо- и молниезащиты [5, 8, 12]. На базе внедрения новых систем грозопеленгации в нашей стране [1, 6, 7] и за рубежом [9–11] уточняются и корректируются многие методические параметры, ведется систематический анализ информации, разрабатывается методическое обеспечение защиты населения и инфраструктуры.

Возрастает значимость комплексных исследований и многолетнего мониторинга грозовых явлений, систематического анализа данных о молниевой активности, для поиска мер защиты и предупреждения о развитии опасных грозовых процессов.

Для определения амплитуд тока молний, продолжительности разрядов и длительности фронта волны токов молний и других параметров грозовой активности использованы данные системы грозопеленгации, установленной на Северном Кавказе. Система состоит из 8 сенсоров-грозопеленгаторов LS8000 фирмы Vaisala и центрального пункта приема и обработки информации от грозопеленгаторов [1, 2, 4].

Сенсоры системы установлены в Ставропольском крае, Ростовской области, Кабардино-Балкарской и Карачаево-Черкесской республиках. Зона обзора грозопеленгационной сети при этом около 1,8 млн. км<sup>2</sup>. Эффективность обнаружения грозовых разрядов достигает 90–95%, а погрешность измерения координат составляет 1–2 км (рисунок 1).

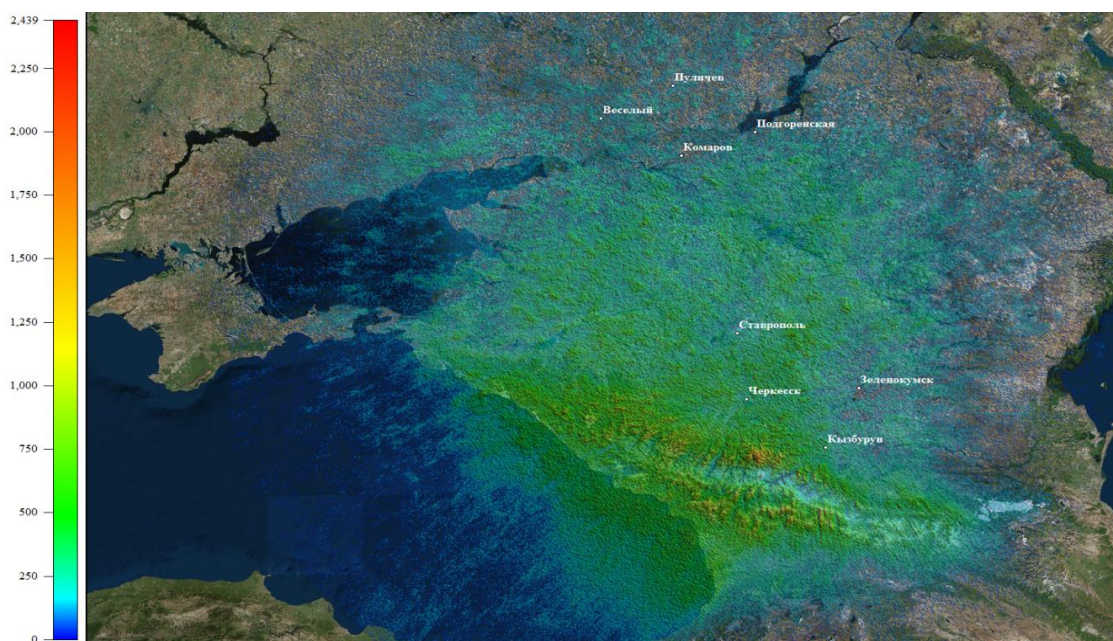


Рисунок 1. Размещение грозопеленгаторов системы LS 8000 и распределение числа молниевых разрядов на км<sup>2</sup> по данным LS 8000

Каждый грозопеленгатор имеет два датчика – низкочастотный (LF) и высокочастотный (VHF). LF–датчик регистрирует разряды облако-земля и внутриоблачные, а VHF–датчик внутриоблачные разряды. Также в программно-аппаратный комплекс входят антенны GPS, позволяющие получать точное время со спутников GPS, что, в свою очередь, позволяет синхронизировать все временные измерения, производимые всеми сенсорами со временем на центральном пункте. Временные значения определяются с точностью 100 наносекунд. При молниевом разряде датчики определяют азимут на разряд, время прихода сигнала и силу сигнала.

Центр приема данных грозопеленгационной сети отслеживает значения параметров молниевых разрядов, позволяет вести мониторинг в реальном масштабе времени, обеспечивает прием информации о молниях со всей доступной сенсорам территории, её архивирование и передачу потребителям.

По данным грозорегистрации выполнен анализ особенностей развития грозовых процессов и параметров молнии в различных районах территории Юга Европейской части России.

За период с 2009 по 2016 год было получено 56724108 регистраций разрядов. Объем исследуемой выборки для положительных и отрицательных разрядов на землю составляет 5161044 регистраций. Количество регистраций положительных разрядов на землю составило 561850, отрицательных – 4599194.

Самый частый (209403, 24434 и 193047 случая) импульс измеренной силы тока составляет 14; –15 и 6 кА для обобщенных, отрицательных и положительных регистраций соответственно. Самая большая зарегистрированная амплитуда 750–750 и 582 кА. Медиана вариант, расположенная в середине упорядоченного вариационного ряда, делящая его на две равные части равна 17; –17 и 14 кА, Средние значения силы тока соответственно 23; 4; –23 и 26,5 кА. Дисперсия исследуемых сигналов – степень рассеяния вокруг среднего их значения - равна 342; 17; 277; 7 и 859,2 (кА)<sup>2</sup>, а среднеквадратическое отклонение 18,5, 16,66 и 29,31 кА. Самый слабый измеренный импульс составляет 1 кА. Размах выборки – разница между полученными максимальным и минимальным сигналами 1332 кА.

Высокогорные области Кавказа из-за своей малой освоенности характеризуются низким уровнем риска, несмотря на значительную опасность грозовых процессов. К зоне преимущественно низкого и среднего риска можно отнести Волгоградскую и Астраханскую области, а также Республику Калмыкия. При этом на территории последней преобладают районы с низким уровнем риска гроз и молний. К районам с высокой степенью риска, как показывают исследования, относятся хорошо освоенные районы Краснодарского и Ставропольского краев, республик Адыгея, Кабардино-Балкария, Осетия, Ингушетия [3].

С увеличением высоты местности над уровнем моря значение  $I_m$  уменьшается. Это связано с тем, что грозо-разрядная деятельность, как правило, связана с развитием конвекции и образованием кучево-дождевых облаков. Между облаком и подстилающей поверхностью происходит интенсивный влагообмен, на который рельеф местности оказывает значительное влияние.

Наибольшие токи молний регистрируются в степной зоне. Среднее значение амплитуды в степной зоне составляет 23 кА, а в горной части – 14 кА, т.е. с высотой местности токи молнии уменьшаются. Эту особенность необходимо учитывать для разработки рекомендаций по грозозащите конкретных высоковольтных линий, зданий и других сооружений в указанных районах.

Можно заметить, что наибольшая удельная поражаемость молниями (5 разр./год·км<sup>2</sup>) имеет место в районе г. Сочи вдоль Черноморского побережья, наименьшая на Северо-востоке региона (до 2 разр./год·км<sup>2</sup>).

Оказалось, что и наибольшая частота возникновения различных чрезвычайных ситуаций при грозах наблюдается именно вдоль Кавказского хребта и они, как правило, связаны с авариями на линиях электроснабжения.

На основе анализа материалов регистраций параметров молний установлено, что параметры разрядов в различных областях отличаются и могут меняться со временем. Это означает, что для эффективной эксплуатации систем молниезащиты и осуществления мер обеспечения безопасности жизнедеятельности при грозах требуется проведение мониторинга грозоразрядной обстановки в каждом отдельном регионе.

## Литература

1. *Аджиев А.Х. и др.* Мониторинг характеристик грозовой активности на юге европейской части России // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2017. №. 4 (189).
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. №3. 2016. С. 46–54.
3. *Аджиева А.А., Разумова Н.В., Шагин С.И.* Грозы и молнии на юге Европейской части России // Проблемы Региональной Экологии. 2009. №2. С. 217–220.
4. *Аджиева А.А., Шаповалов В.А.* Кластерный анализ в автоматическом выявлении и сопровождении грозовых очагов по данным грозопеленгационной сети // Инженерный вестник Дона. № 2. 2016. С. 164–171.
5. *Бочковский Б.Б., Мерзляков А.С.* Определение интенсивности грозовой деятельности // Энергия единой сети. 2012. №. 3. С. 30–35.
6. *Горбатенко В.П., Ершова Т.В., Константинова Д.А.* Пространственное распределение плотности разрядов молнии в землю над территорией Западной Сибири // Вестн. Том. гос. ун-та. 2009. № 329. С. 251–255.
7. *Козлов В.И., Муллаяров В.А.* Грозовая активность в Якутии. Якутск: Изд-во Якутского научного центра СО РАН, 2003. 97с.
8. *Никитин Д.* Системы грозопеленгации на страже электросетевого хозяйства // Энергорынок. 2010. №. 6. С. 17.
9. *Defer E., Lagouvardos K., Kotroni V.* Lightning activity in the eastern Mediterranean region // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2005. Т. 110, №. D24.
10. *Pinto I., Pinto Jr O.* Cloud-to-ground lightning distribution in Brazil // Journal of Atmospheric and solar-terrestrial physics. 2003. Т. 65, №. 6. С. 733–737.
11. *Pinto O., Naccarato K. P., Pinto I. R. C. A.* The new Brazilian lightning detection network: First results // Lightning Protection (XI SIPDA). 2011. International Symposium on. IEEE. 2011. С. 152–153.
12. *Uman M., Rakov V.* A critical review of nonconventional approaches to lightning protection // American Meteorological Society. 2002. P. 1809–1820.

## МЕТОДИКА МОНИТОРИНГА МОЛНИЕВОЙ АКТИВНОСТИ ПО ДАННЫМ ПРОСТРАНСТВЕННО-РАСПРЕДЕЛЕННОЙ НАБЛЮДАТЕЛЬНОЙ СЕТИ

*И.Е. Кузнецов<sup>1</sup>, А.С. Белинский<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>ВУНЦ ВВС «ВВА им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж  
bas1405@yandex.ru, vaiumet@mail.ru

В настоящее время, несмотря на предпринимаемые меры, на территории Российской Федерации и за ее рубежом наблюдается значительное увеличение случаев поражения молниями людей, хозяйственных и военных объектов, вооружения и военной техники. Имеющиеся в арсенале потребителей методы и средства не всегда надежно предсказывают районы возникновения грозовых разрядов и молниевую активность. Вместе с тем, развитие современных электронно-вычислительных комплексов позволяют реализовывать математические алгоритмы, основанные на данных пространственно-распределенной метеорологической наблюдательной сети [1, 2].

Целью работы является повышение эффективности методов пеленгации грозовых разрядов и оценки молниевой активности конвективных облаков на основе данных пространственно-распределенной наблюдательной сети.

Наиболее эффективный для решения задачи местоопределения грозовых разрядов (ГР) способ – разностно-пеленгационный, суть которого состоит в использовании 4 приемников электромагнитного сигнала в ОНЧ диапазоне длин волн, измерении разности времени прихода сигнала на 2 приемника, вычислении азимута и координат точки принадлежащей линии пеленга грозового разряда [3]. Оценка эффективности предлагаемого способа показала его невысокую точность при пеленгации на курсах, смещенных относительно базы двух опорных приемных устройств (рисунок 1).

Метод основан на оптимальной последовательной обработке результатов многократных измерений координат одного и того же ГР. Суть метода состоит в следующем:  $n$  грозопеленгаторов, входящих в систему, объединяются в  $l=C_n^3$  подсистем. Каждая из

подсистем измеряет координаты ГР, что обеспечивает многократное измерение местоположения каждого ГР. Результирующая оценки координат ГР находится как средневзвешенная оценок каждой из подсистем с весами, обратными дисперсиям этих оценок.

Рассмотрим более подробно процедуру оптимальной оценки координат ГР по данным измерения их в  $l$  подсистемах.

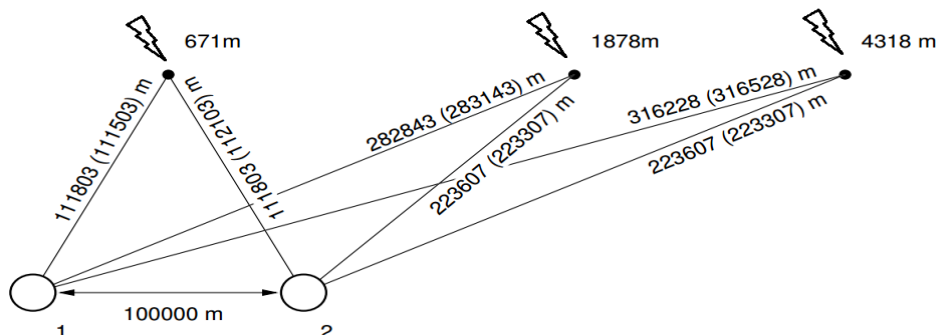


Рисунок 1. Ошибки определения местоположения грозопеленгатора

По результатам измерения пеленгов ГР двумя пеленгаторами грубо оцениваем координаты ГР.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{C_n^2}, \quad \bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{C_n^2}, \quad (1)$$

где  $x_i$ ;  $y_i$  – координаты точек пересечения  $i$ -й пары грозопеленгаторов.

Измеряются удаления ГР от каждого из  $n$  пеленгаторов:

$$R_i = \sqrt{(\bar{X} - x_i)^2 + (\bar{Y} - y_i)^2} \quad (2)$$

где  $x_i$ ;  $y_i$  – координаты  $i$ -го пеленгатора.

Используя значения  $R_i$ , производится оптимальная оценка координат ГР каждой из подсистем [2]:

$$X_k = \frac{B_k E_k - C_k D_k}{A_k C_k - B_k^2}, \quad Y_k = \frac{B_k D_k - A_k E_k}{A_k C_k - B_k^2}, \quad (3)$$

Здесь  $k$  – номер подсистемы,  $k = 1, \dots, l$ ,  $A_k, B_k, C_k, D_k, E_k$  – коэффициенты, вычисляемые в соответствии с выражениями

$$A_k = \sum_j \frac{\cos^2 \beta_j}{R_j^2 \sigma_{\beta_j}^2}, \quad B_k = \sum_j \frac{\sin^2 \beta_j}{R_j^2 \sigma_{\beta_j}^2}, \quad C_k = \sum_j \frac{\sin^2 \beta_j}{R_j^2 \sigma_{\beta_j}^2}, \quad (4)$$

$$D_k = \sum_j \frac{x_j \cos^2 \beta_j - 0,5 y_j \sin^2 \beta_j}{R_j^2 \sigma_{\beta_j}^2}, \quad E_k = \sum_j \frac{0,5 x_j \sin^2 \beta_j - y_j \sin^2 \beta_j}{R_j^2 \sigma_{\beta_j}^2}, \quad (5)$$

где  $j$  – номера пеленгаторов, входящих в  $k$ -ю подсистему,  $\beta_j$  – пеленги ГР, измеренные этими пеленгаторами,  $\sigma_{\beta_j}^2$  – дисперсия – ошибок измерения пеленга ГР  $j$ -м пеленгатором (при использовании одинаковых пеленгаторов).

Рассчитывается круговая среднеквадратичная ошибка измерения координат ГР каждой из подсистем:

$$\sigma_k = \sqrt{\frac{A_k + C_k}{A_k C_k - B_k^2}}. \quad (6)$$

Выбирается подсистема с минимальной среднеквадратической ошибкой. Назовем оптимальную оценку координат ГР этой подсистемы отсчетом координат ГР.

Используя полученный отсчет, производится уточнение (корректировка)  $R_i$  в соответствии с выражением (2). Эти значения используются как априорная информация для повторной оптимальной оценки координат ГР оставшимися  $(l - 1)$  подсистемами (соотношения (4), (6)). Рассчитываются среднеквадратические ошибки этих подсистем и находится второй отсчет координат ГР, по данным которого корректируются  $R_i$  для получения оптимальных оценок оставшимися  $l - 2$  подсистемами и получения третьего отсчета координат. Рассмотренные процедуры повторяются, пока не будут получены все  $l$  отсчетов. Далее находят результирующую оценку координат ГР, как средневзвешенную отсчетов:

$$X = \sum_{k=1}^l x_k \frac{\sigma_k^2}{\sigma^2}, \quad Y = \sum_{k=1}^l y_k \frac{\sigma_k^2}{\sigma^2}, \quad (7)$$

где  $\sigma_k^2$  – дисперсия оценки ГР при  $k$ -м отсчете, а  $\sigma^2$  – дисперсия результирующей оценки, которая находится из

$$\frac{1}{\sigma^2} = \sum_{k=1}^l \frac{1}{\sigma_k^2} \quad (8)$$

Проведенные расчеты для системы, состоящей из четырех пеленгаторов, показали, что площадь, в пределах которой среднеквадратическая ошибка определения координат ГР гарантирует его практически достоверное обнаружение с самолетов пожарной охраны лесов, увеличивается в 1,5–2 раза. Можно ожидать, что использование предлагаемого метода позволит повысить эффективность действующих и вводимых в эксплуатацию систем грозопеленгации.

### Литература

1. Билетов М.В., Кузнецов И.Е., Тищенко А.И. Основы радиолокационной метеорологии. М.: Воениздат. 2008. 325 с.
2. Ростовцев Ю.Г. Основы построения автоматизированных систем сбора и обработки информации. М.: Высшая школа. 2005. 247 с.
3. Кононов Я.Я., Петренко И.В., Снегуров В.С. Радиотехнические методы местоопределения грозовых очагов. Л.: Гидрометеиздат. 1986. 226 с.

## ГРОЗОПЕЛЕНГАЦИОННАЯ СИСТЕМА РОСГИДРОМЕТА

*А.В. Снегуров, В.С. Снегуров*

ГГО им. А. И. Воейкова, г. Санкт-Петербург  
info@alwes.ru

Грозопеленгационная система Росгидромета разработана и построена ФГБУ «ГГО» совместно с ООО «Алвес» в рамках ФЦП «Геофизика» в 2008–2015 гг. В состав ГПС входят аппаратно-программный комплекс (АПК) с ПО версии «Алвес 9.07.14» (рисунок 1) и 57 пунктов регистрации ЭМИ грозовых разрядов на Европейской части России и Урале (рисунок 2), оснащенных сертифицированными Индикаторами грозовой опасности версии «Alwes 7.04» (Индикатор) отечественного производства.

АПК ГПС предназначен для сбора, обработки и визуализации данных о грозовой активности в реальном времени, объединения с данными различных систем грозопеленгации, с данными о метеоявлениях по ДМРЛ и ИСЗ.



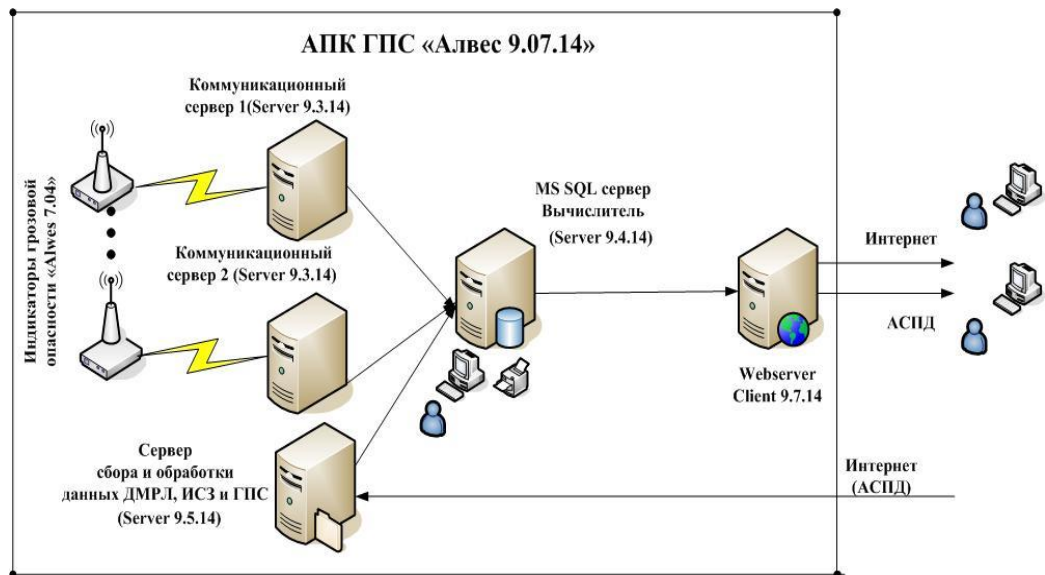


Рисунок 1. Блок-схема АПК ГПС «Алвес 9.07.14»

Программа Server 9.3.14 сервера АПК ГПС осуществляет сбор данных с Индикаторов (рисунок 2), передаёт их на SQL-сервер и контролирует состояние Индикаторов АПК ГПС. Программа Server 9.4.14 сохраняет в файл время и данные регистрации ЭМИ грозовых разрядов, рассчитывает географические координаты молниевых разрядов, также выполняет дополнительные сервисные функции, например, вычисляет средние и средние квадратические ошибки измерения координат, формирует карты грозовой активности на контролируемой территории, объединяет данные ГПС с информацией о метеоявлениях по ДМРЛ и других средств измерений, поступающих с сервера сбора и обработки (программа «Server 9.5.14»). Программа Client 9.7.14 предназначена для представления данных АПК ГПС по ячейкам 4x4 км (сайт [www.lightning.ru](http://www.lightning.ru)). Примеры представления информации приводятся на рисунках 3 и 4.

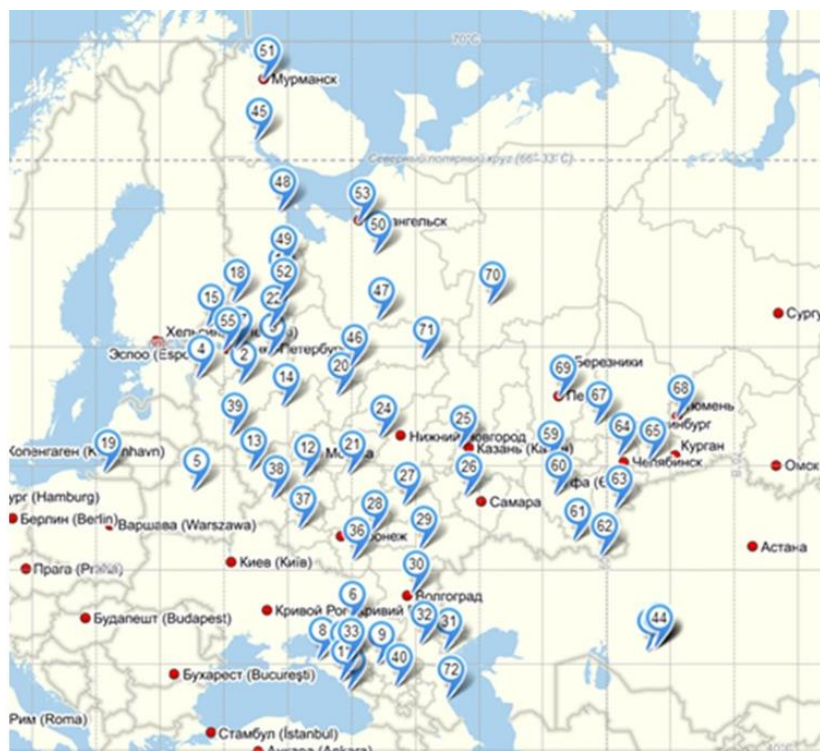


Рисунок 2. Схема расположения Индикаторов грозовой опасности

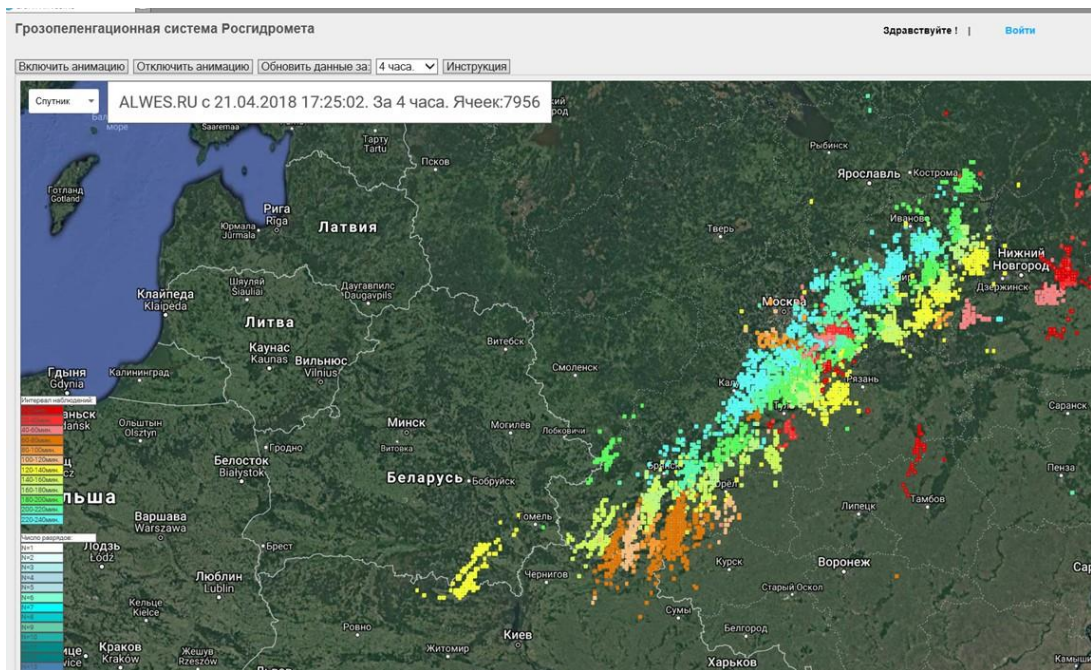


Рисунок 3. Пример визуализации данных наблюдений за грозами ГПС Росгидромета в течение 4-х часов с 13:25:02 до 17:25:02 21 апреля 2018 г. (с 20 минутным интервалом накопления информации)

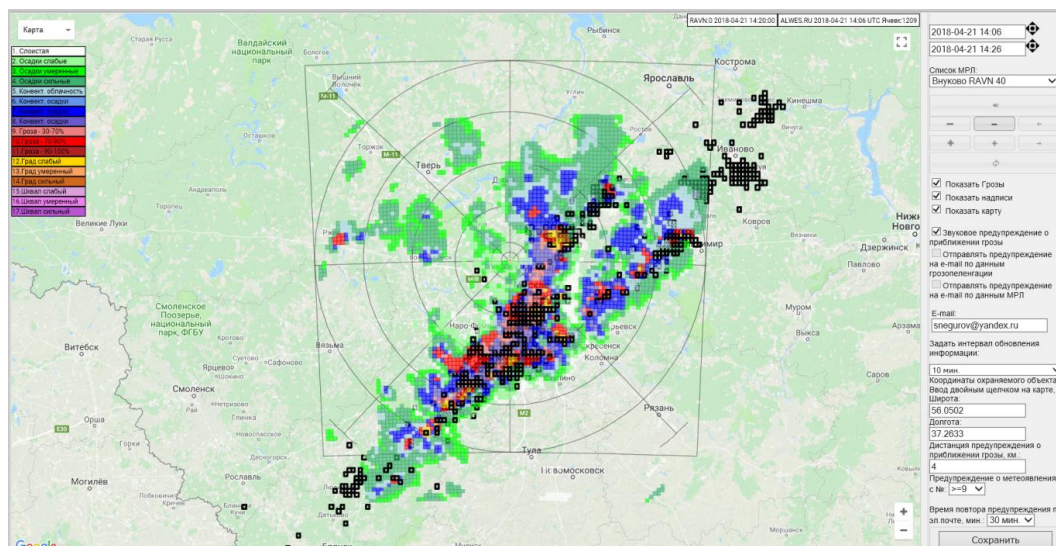


Рисунок 4. Пример визуализации данных наблюдений за грозами ГПС Росгидромета и метеоявлений по ДМРЛ (Внуково) с 14:06 до 14:26 21 апреля 2018 г. (квадраты черного цвета обозначают грозовые ячейки 4÷4 км)

База данных АПК ГПС содержит информацию о времени регистрации, координатах и параметрах ЭМИ грозовых разрядов (амплитуда электрического поля, форма атмосферика, тип разряда, полярность, длительность переднего фронта и первой полуволны).

По поручению Росгидромета в 2018 году ГГО разработаны предложения по развитию ГПС на Азиатскую часть России и Республику Крым (рисунки 5 и 6).

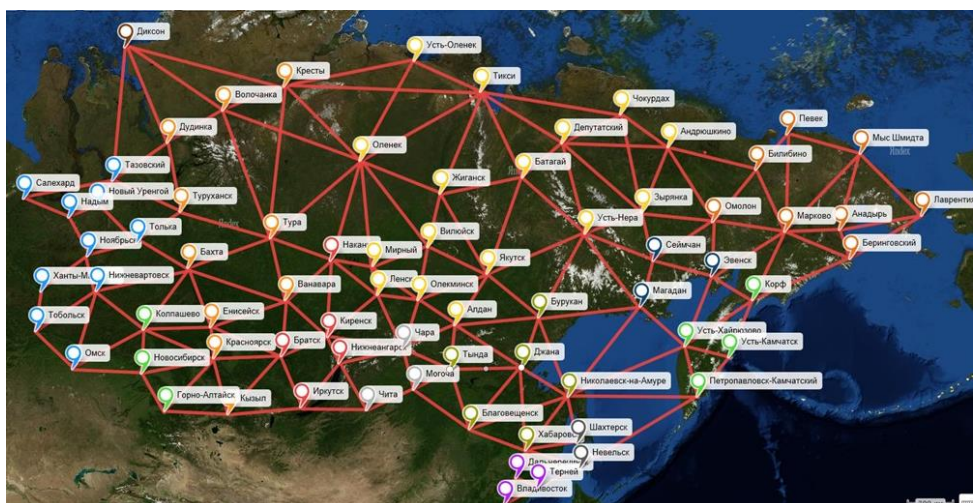


Рисунок 5. Схема размещения Индикаторов на ЕЧР



Рисунок 6. Схема размещения Индикаторов на территории Республики Крым

АПК ГПС обеспечивает передачу совмещенной информации через Интернет ([www.meteorf.ru/product/info/](http://www.meteorf.ru/product/info/), <http://voeikovmgo.ru/>, [www.lightnings.ru](http://www.lightnings.ru)) и по каналам ведомственной связи Росгидромета.

## СТАТИСТИЧЕСКИЕ ПАССИВНЫЕ МЕТОДЫ ЛОКАЛИЗАЦИИ ДИПОЛЬНОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А.К. Богушов<sup>1</sup>, А.В. Панюков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск  
 bogushovak@susu.ru, paniukovav@susu.ru

В проекте МНТЦ №1822 ISTC [1] был разработан прототип однопунктового грозопеленгатора-дальномера и способ применения этих устройств в сети. Испытания показали, что только 10% разрядов из более чем 2,5 млн. зарегистрированных были классифицированы как излучение от молниевых разрядов, остальные представляли собой предгрозовое излучение. Ранее подобное предгрозовое излучение либо не обрабатывалось, либо обрабатывалось некорректно однопунктовыми системами местоопределения гроз. В целом результаты проекта продемонстрировали возможность и необходимость создания нового поколения систем местоопределения гроз и расширения круга решаемых ими задач. Это

ведет не только к существенному пересмотру требований к их техническим характеристикам, но и к разработке новых математических моделей и алгоритмов анализа грозовых явлений.

Параметризация алгоритмов путем применения семейства полосовых фильтров позволяет значительно улучшить качество оценки искомых параметров, однако, это значительно увеличивает вычислительную сложность задачи. Чтобы решить эту проблему, был предложен спектрально-статистический метод [2–4].

На основе анализа спектров сигналов множество всех гармоник были выработаны рекомендации:

- Для вычисления параметров  $\alpha$ ,  $\nu$  математической модели [2, 3] следует использовать диапазон частот  $\Omega_1 \in [122\text{Гц}, 2500\text{Гц}]$ .

- Параметр  $u$  следует вычислять на частотах  $\Omega_2 \in [16\text{кГц}, 50\text{кГц}]$ , где спектральная плотность мощности сигнала от источника отлична от нуля.

- Для вычисления интенсивности шума (для оценки отношения сигнал/шум) достаточно использовать 200 высокочастотных гармоник это соответствуют 10% от общего числа гармоник и позволяет определить множество  $\Omega_3 \in [225\text{кГц}, 250\text{кГц}]$ .

Алгоритмам вторичной обработки [5, 6] найденных параметров  $u$ ,  $\nu$ ,  $\alpha$  для множества сигналов, зарегистрированных в течение некоторого промежутка времени. Из-за имеющейся неопределенности в определении угловых координат источников принятых сигналов требуется дополнительная программа визуализации вероятного местоположения очага. В работе разработаны методы визуализации области содержащей источники излучения основанные на принятии гипотезы о равномерном распределении вероятности угла  $\psi_0$ .

Для реализации всех алгоритмов системы [7] разработана библиотека программ «Lightning Detector» [8]. Она написана на языке программирования Python, а для реализации численных методов используется библиотека Numpy. В библиотеке реализованы прямой, экстремальный, параметрические версии прямого и экстремального методов, и спектрально-статистический метод. В работе приведен программный интерфейс библиотеки, примеры вызова методов, пример работы с симулятором сигналов, а также реализации прямого, параметрического прямого методов.

С момента появления и по настоящее время концепция облачных вычислений глубоко проникает в различные информационно-технологические сферы и занимает всё более весомую роль в практике и позволяет получать ряд преимуществ: удобный доступ к данным из любого места, обмен данными между пользователями, минимизация затрат на инфраструктуру, гибкий подход к наращиванию необходимых ресурсов, постоянное обновление программного обеспечения, оплата за фактически использованные ресурсы.

Для работы с методами библиотеки «Lightning Detector» был разработан веб-сервис, который состоит из следующих компонентов:

1. REST API – интерфейс для работы с сервисом. Выполняет задачи по регистрации сигналов от различных датчиков, получение результатов расчетов.
2. Административная панель – выполняет задачи по управлению сервисом.
3. Набор модулей для выполнения фоновых задач.
4. Postgres SQL – хранение аккаунтов пользователей, список сенсоров, зарегистрированные сигналы.
5. Redis – механизм коммуникации между компонентами системы.

В заключении приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Построены параметрические модификации прямого и экстремального алгоритмов.
2. Разработан новый спектрально-статистический алгоритм для определения местоположения дипольного источника ЭМИ.
3. Создан облачный сервис для управления сетями датчиков-грозопеленгаторов, а также мониторинга грозовой активности.

Данный сервис построен на базе современных технологий и может быть использован для построения комплексов прогнозирования грозовой активности нового поколения. В рамках работы реализованы новые алгоритмы, которые существенно улучшают характеристики существующих однопунктовых грозопеленгаторов.

## Литература

1. URL: <https://www.istc.int/ru/project/CA0166914DBF304CC3256A85003942D3> Lightning Location System. (дата обращения 15.04.2019).
2. *Панюков А.В., Богушов А.К.* Параметризация алгоритмов идентификации электрического диполя // Вестник ЮУрГУ. Серия: «Математическое моделирование и программирование». 2012. № 18(277). С.32–43.
3. *Панюков А.В., Богушов А.К.* Спектрально-статистический метод определения параметров положения дипольного источника электромагнитного излучения // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2016. Т. 59, № 4. С. 308–319.
4. *Панюков А.В., Богушов А.К.* Спектрально-статистический подход к проблеме идентификации параметров положения дипольного источника электромагнитного излучения // VII Всероссийская конференция по атмосферному электричеству. Санкт-Петербург: 2012. Сентябрь. С. 179–180.
5. *Богушов А.К., Панюков А.В.* Применение методов вторичной обработки информации о грозовой активности для предупреждения аварий // III Всероссийская научно-техническая конференция «Безопасность критических инфраструктур и территорий». Екатеринбург: 2009. Ноябрь. С. 117–118.
6. *Богушов А.К., Панюков А.В.* Методы вторичной обработки результатов мониторинга грозоопасности // VII Всероссийская конференция по атмосферному электричеству. Санкт-Петербург: 2012. Сентябрь. С. 40–42.
7. *Панюков А.В., Богушов А.К.* Однопунктовая система местоопределения гроз в ближней зоне // Патент RU 2599775 С1. 2015.
8. *Богушов А.К., Панюков А.В.* Программное обеспечение задачи идентификации местоположения дипломного источника электромагнитного излучения «Lightning Detector» №2014610201. 2014.

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОКОВ МОЛНИЙ НА ЮГЕ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ

*В.А. Кузьмин*

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик  
zknjaz-kbsu@mail.ru

Грозы относятся к числу наиболее опасных явлений погоды. С ними нередко связаны возникновения пожаров, разрушения зданий, повреждения линий электропередач, нарушения движения самолетов и поездов и др. прямое попадание молнии в человека обычно приводит к летальному исходу. 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.

Оперативное определение местоположения гроз, интенсивности, направления и скорости перемещения и среднестатистических параметров молний имеет большое практическое значение для многих отраслей хозяйственной деятельности человека. В частности, для метеообеспечения авиации, молниезащиты энергетических объектов и др. А знание среднестатистических параметров молний и удельной поражаемости территории молниями способствуют разработке молниезащитных мероприятий различных объектов.

В настоящее время происходит переход от визуально-слуховых наблюдений за грозами к инструментальному мониторингу. В данной работе представлены результаты инструментальных измерений атмосферно – электрических характеристик. С целью более детального пространственно-временного анализа изменений электрического поля атмосферы в данной работе проведены совместные исследования суточных вариаций напряженности электрического поля атмосферы при грозах и параметров разрядов молний в зоне репрезентативной регистрации датчиками электрического

Для этих целей с 2008 г. на Северном Кавказе эксплуатируется грозорегистратор LS8000 [1]. Благодаря 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 классификация по типам и полярностям (знак переносимого молнией на землю электрического заряда);

- значения 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, в виде цветовой индикации на различных карт. В целом на территории юга европейской части России наблюдается достаточно стабильная грозовая активность. Всего за годы работы с 2008 по 2018 гг. система зарегистрировала около 2000 дней с грозой. Из них более 200 дня характеризуются как интенсивные грозы с количеством наземных молний в грозовой период более 10 000 разрядов в день.

Наибольшее число дней с грозой отмечено в 2009 г. – 308 дня, и наименьшее – 219 дня в 2014 г. Средняя грозовая активность на рассматриваемой территории за указанный период составляет 239 дня с грозой в год.

Сезонный ход грозовой активности представлен на рисунке 1.

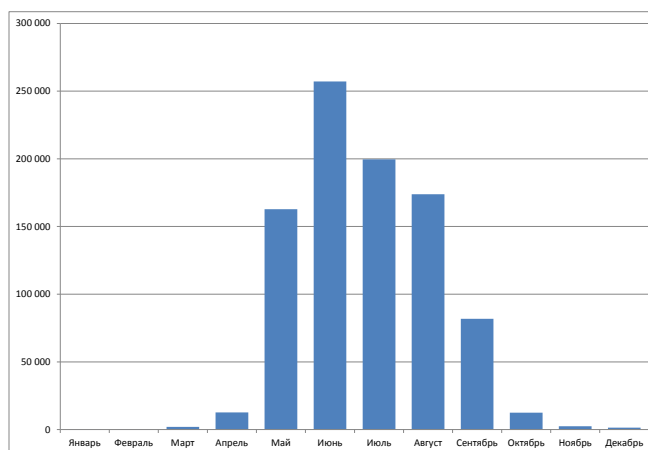


Рисунок 1. Среднее количество наземных молниевых разрядов по месяцам за период 2008 – 2018 года

Для юга европейской части России характерно значительное преобладание облачных (меж облачных) разрядов молний до 88% от общего числа регистрируемых грозорегистратором LS8000 молний. При этом доля положительных разрядов от общего числа наземных молний составляет около 23%, что соответствует принятым значениям для средних широт (20%).

Для расчетов токов молнии используются выражение:

$$I(t) = I_{\max} \left( e^{-\frac{t}{t_1}} - e^{-\frac{t}{t_2}} \right) . \quad (1)$$

Вышеприведенные параметры меняются в зависимости от места, климатических особенностей района и орографии местности. Для их определения используются различные радиотехнические средства и методы расчета.

В данной работе для определения параметров тока молнии на Северном Кавказе использованы данные, полученные грозорегистратором LS 8000 установленном в Высокогорном геофизическом институте .

Анализ базы данных позволил найти средние значения амплитуды токов  $I_{\max}$ , времени нарастания  $\tau_{\phi}$  и времени спада  $\tau_c$  волны тока в каналах молний различных полярностей.

Анализ данных также показал, что для отрицательных молний:

$$\begin{aligned} I_{\max} &= 16,8 \text{ кА} \\ \tau_{\phi} &= 11,6 \text{ мкс} \\ \tau_c &= 26,6 \text{ мкс}. \end{aligned} \quad (2)$$

Для положительных молний:

$$\begin{aligned} I_{\max} &= 22,9 \text{ кА} \\ \tau_{\phi} &= 13,3 \text{ мкс} \\ \tau_c &= 22,4 \text{ мкс}. \end{aligned} \quad (3)$$

Используя базу данных и полученные значения параметров молний различной полярности (2) и (3) методами математической статистики нами найдены выражения для токов молний.

Для токов отрицательных молний получили функцию приближения

$$I_{\text{отриц}}(t) = C_1 \cdot t^{a_1} \cdot e^{-b_1 t}, \quad (4)$$

где  $C_1=0,040351$ ,  $a_1 = 4,425217$  и  $b_1= 0,416271$ .

На рисунке 2 приведены экспериментальные значения тока молнии отрицательной полярности (кривая 1) и значения функции (4). Имеет место достаточно хорошее совпадение экспериментальных и теоретических значений импульсов токов отрицательной полярности.

Для токов положительных молний получили функцию приближения

$$I_{\text{полож}}(t) = C_2 \cdot t^{a_2} \cdot e^{-b_2 t}, \quad (5)$$

где  $C_2 = 0,124844$ ,  $a_2 = 3,456659$  и  $b_2= 0,283944$ .

На рисунке 2 приведены экспериментальные значения тока молнии положительной полярности (кривая 1) и значения функции (4). Как видно из рисунка имеет место достаточно хорошее совпадение экспериментальных и теоретических значений  $I(t)$ .

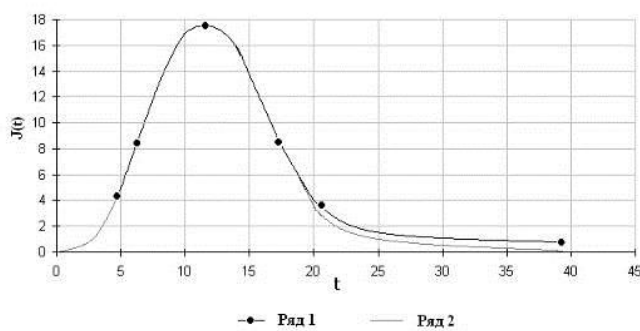


Рисунок 2. Стилизованная кривая импульса тока первого компонента отрицательной молнии:

Ряд 1 – экспериментальные данные;

Ряд 2 – график функции (9) с параметрами  $C_1 = 0,040351$ ,  $a_1 = 4,425217$  и  $b_1 = 0,416271$ .

### Литература

1. Аджиев А.Х., Тапасханов В.О., Стасенко В.Н. Система грозопеленгации на Северном Кавказе / Метеорология и гидрология №1. 2013. С. 5–11.

## **СЕКЦИЯ 8. Грозовое электричество и химия атмосферы; экологические аспекты атмосферного электричества**

### **МЕТОДЫ ИЗМЕНЕНИЯ ГРОЗОВОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА ПУТЕМ МОДИФИЦИРОВАНИЯ КОНВЕКТИВНЫХ ОБЛАКОВ ЕСТЕСТВЕННОГО И ИСКУССТВЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ**

*А.П. Доронин, Ю.В. Кулешов, В.М. Петроченко, Г.Г. Щукин*

Военно-космическая академия им. А.Ф.Можайского г. Санкт-Петербург  
vka@mil.ru

Грозовое электричество является основной причиной возникновения гроз, которые относятся к опасным явлениям погоды, связанным с конвективными облаками и способным приводить к значительному ущербу и человеческим жертвам [1]. Число пожаров от гроз в мире варьируется для различных стран и их регионов от 1 до 67%. В США молния вызывает от 6000 до 10000 пожаров. На долю лесных пожаров от гроз на территории России в среднем приходится 10–15% случаев от общего числа пожаров. При этом отмечается, что для некоторых регионов Российской Федерации грозовая активность является почти основным виновником возникновения пожаров растительности. Например, в Приохотье (Хабаровский край) с 1973 г. по 1996 г. от гроз возникло в среднем 16 пожаров в год, т.е. 375 пожаров (это 82,3% от общего числа), а по вине человека всего 81 пожар (17,7% от общего числа). По Сибири ежегодно регистрируется до 71% грозных лесных пожаров в районах Прииртышья, до 35–40% – в Красноярском крае [2].

По мнению авторов [3], электрические процессы способствуют появлению в облаках и других опасных явлений погоды (порывы ветра, торнадо, град). С учетом вышеизложенного представляется актуальным проведение исследований, связанных с изысканием методов и средств, позволяющих изменять степень электризации конвективных облаков.

В настоящее время большая часть ученых считает, что основным механизмом электризации облаков является взаимодействие крупных и мелких ледяных частиц [4–6]. Особенно это относится к предгрозовой стадии облака.

Для изменения размеров и количества крупных ледяных частиц в облаке используются методы воздействия, основанные на применении льдообразующих реагентов [1, 4, 7]. Путем регулирования количества вводимого в облако льдообразующего реагента возможно как усиление (ускорение) электризации, так и ее подавление (замедление).

Обычно разделяют воздействия на два крупных блока – механизма воздействия на генерацию электрических зарядов облака (1) и механизма воздействия на внешнюю цель электрического генератора (2), которые, в свою очередь, подразделяются на 1,1–1,8 и 2,1–2,5 (см. рисунок 1) [3].

Анализ существующих и предлагаемых в настоящее время методов воздействия на электрические процессы в облаках позволяет сделать вывод о том, что на практике целесообразно использовать методы, основанные на создании нисходящих движений в облаках с целью их разрушения. По современным представлениям [3, 8], использование нисходящих движений в облаке достигается путем:

- сброса грубодисперсных порошков (например, цемента);
- применения реактивных самолетов в режиме кабрирования;
- применения большегрузных парашютов;
- создания направленных взрывов;
- вызывания осадков, создающих нисходящий поток.



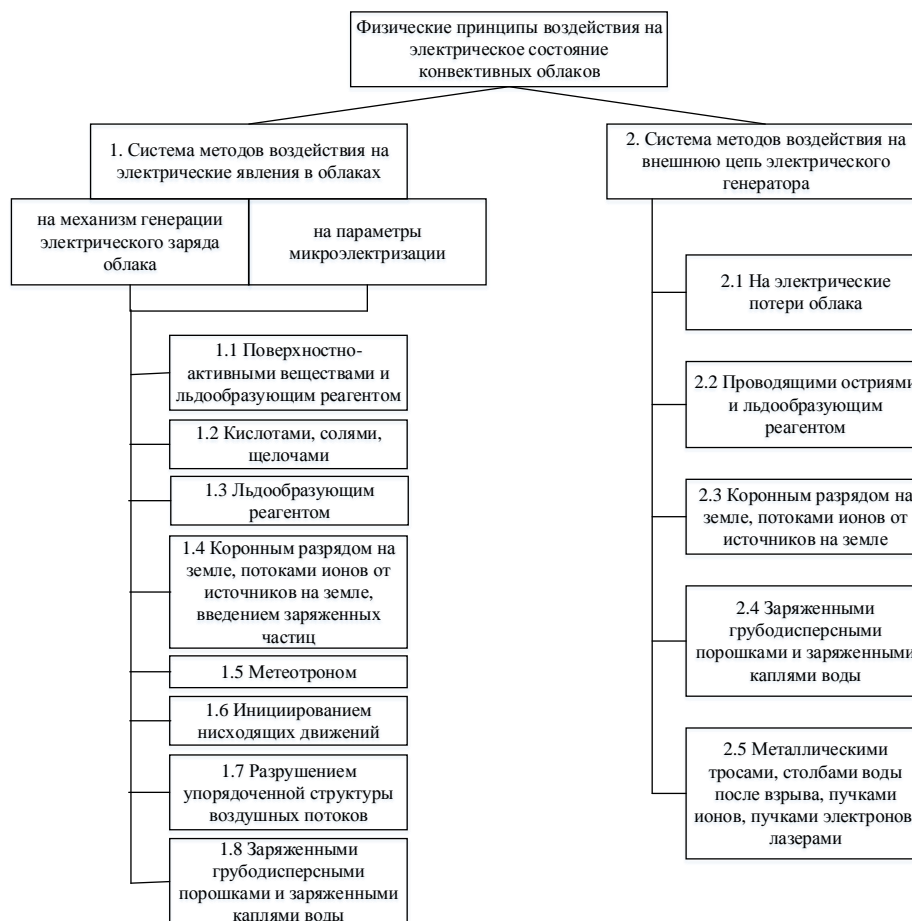


Рисунок 1. Физические принципы воздействия на электрическое состояние конвективных облаков

На практике используется, в основном, метод, основанный на сбросе грубодисперсных порошков (цемента). Практика проведения натуральных экспериментов по разрушению конвективных облаков путем сброса в их вершину упаковок с цементом, показала, что представляется возможным достижение положительного эффекта при вертикальной протяженности слоя облаков не более 4 км. С учетом этого обстоятельства в настоящей работе в результате обработки материалов самолетного зондирования атмосферы ТАЭ-7,7м по станциям Внуково и Санкт-Петербург за 1953–1964 гг. приведены количественные оценки пригодности конвективных облаков к воздействию с целью их разрушения в месяцы теплого полугодия (апрель–сентябрь). Всего обработано около 9000 (8873) подъемов самолетов-зондировщиков. Эти данные представлены на рисунках 2 и 3.

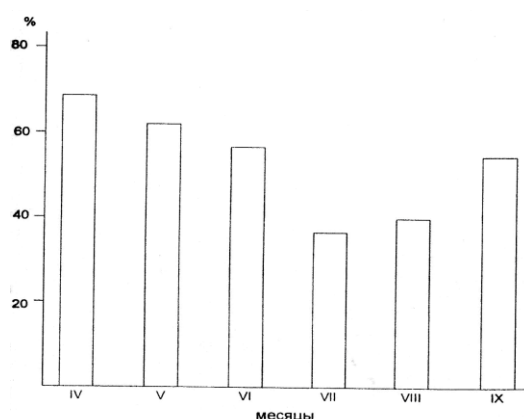
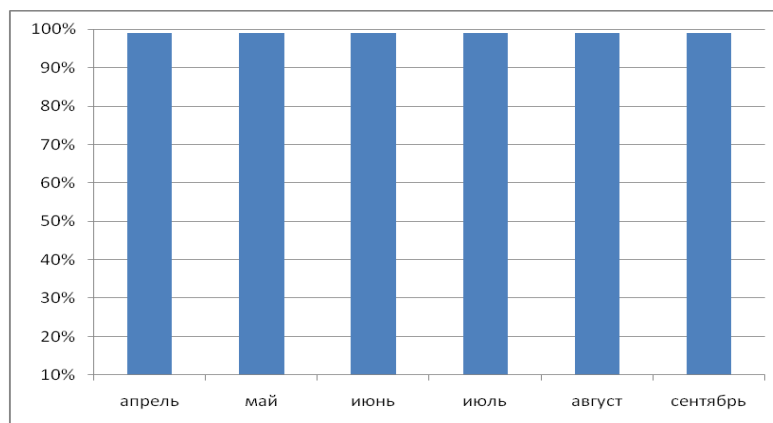


Рисунок 2. Повторяемость конвективных облаков, пригодных для воздействия с целью разрушения над Центральным районом Европейской территории России



*Рисунок 3. Повторяемость конвективных облаков, пригодных для воздействия с целью разрушения над Северным районом Европейской территории России*

Поскольку воздействия на конвективные облака в этом случае целесообразно осуществлять методом сброса сыпучих материалов (например, цемента), то ни температура, ни фазовое строение облака в этом случае во внимание не принимались.

Приведенные на рисунке 2 оценки повторяемости конвективных облаков, пригодных к рассеянию над Центральным районом Европейской территории России показывают, что чаще всего условия для воздействия на облака отмечаются в апреле (68%).

В июле таких облаков наблюдается меньше всего – 40%. В целом в теплое полугодие повторяемость пригодных к рассеянию конвективных облаков составляет чуть более 50%.

Что касается оценок пригодности конвективных облаков к разрушению над Северным районом Европейской территории России, то можно отметить следующее. Согласно данным, приведенным на рисунке 3, в теплый период года повторяемость конвективных облаков, пригодных для разрушения во все месяцы (апрель-сентябрь), составляет почти 100% (99%). Столь высокие значения оценок повторяемости конвективных облаков, пригодных для разрушения обусловлены тем, что над Северным районом Европейской территории России облака мощностью более 4 км достаточно редко наблюдаются из-за места расположения рассматриваемого района.

Рассмотренные выше методы изменения электрического состояния конвективных облаков относятся к уже сформировавшимся облачным образованиям. Вместе с тем, в работе [3] (рисунок 1) указывается, что изменения состояния атмосферного электричества можно достичь также и путем создания искусственных конвективных облаков при использовании метеотронов.

Метеотрон представляет собой техническое устройство, позволяющее создавать в атмосфере искусственные восходящие вертикальные движения воздуха. Поднимающийся воздух охлаждается, и на некоторой высоте его температура достигает точки росы.

Таким образом, создаются условия для конденсации водяного пара в капельки воды или сублимации в ледяные кристаллы при наличии ядер конденсации или замерзания. В конечном итоге все эти процессы могут привести к образованию конвективного облака.

Первый метеотрон был построен в 1961 году А. Дессеном во Франции, в Центре атмосферных исследований [9, 10] и включал в себя приблизительно 100 горелок, в каждую из которых под большим давлением поступала нефть в количестве от 10 до 15 л/мин. Мощность установки составляла приблизительно 600–1000 тысяч ватт [11].

Более мощная установка для инициирования восходящих потоков воздуха в атмосфере была создана в конце 70-х годов в Институте геологии и геофизики Сибирского отделения АН СССР (метеотрон Новикова С.И.). В метеотроне предусматривалось использование 120 струйных горелок, которые позволяли получать мощность порядка 10 млн. кВт, что на порядок больше мощности метеотрона Дессена.

Общим существенным недостатком, указанных выше метеотронов является неполное сгорание горючего, что сопровождается выделением большого количества сажи, существенно загрязняющей окружающую атмосферу.

Для устранения загрязнения атмосферы в Институте прикладной геофизики было предложено сжигать горючее не в горелках, а при помощи турбореактивных двигателей. Было

создано два макета таких установок: один на базе четырех турбореактивных двигателей РД-3М, второй – на базе десяти несколько более усовершенствованных двигателей РД-3М-500.

Натурные эксперименты с установками данного института, проведенные в летние месяцы 1966 года в Риге в условиях безоблачной погоды показали, что к концу ряда опытов начиналось развитие естественных кучевых облаков, обычно в районе побережья вдали от установки [11].

Анализ функционирования стационарных метеотронов позволил сделать вывод о том, что для проведения работ требуется большой расход топлива, при этом результат не всегда очевиден. Использование метеотронов Института прикладной геофизики связано с серьезными трудностями, вызванными разборкой-сборкой и транспортировкой.

С учетом вышеизложенного для создания конвективных облаков в качестве метеотрона предлагается использовать тепловую машину, представляющую собой авиационный турбореактивный двигатель, установленный на шасси автотранспортного средства [12]. В качестве примера на рисунке 4 представлен внешний вид тепловой машины специальной – ТМС-65. Особенностью данной установки является возможность регулирования сопла двигателя в вертикальной плоскости.



*Рисунок 4. Тепловая машина ТМС-65 на шасси автомобиля Урал-375Д*

Создание конвективных облаков достигается путем введения в сопло двигателя водного раствора гигроскопических веществ (хлористый кальций, карбамид, аммиачная селитра, поваренная соль и др.) определенной концентрации или водные растворы смесей этих веществ определенной концентрации. Натурные эксперименты по созданию туманов, волнистообразных и конвективных облаков с использованием указанных выше химических и технических средств были проведены в различные сезоны и в разных районах Российской Федерации [12]. В качестве примера на рисунке 5 показаны фрагменты эксперимента по созданию конвективных облаков в центральном районе Европейской территории России.

Созданное конвективное облако очень быстро переросло в мощно-кучевое, чему способствовали благоприятные метеорологические условия (низкий уровень конденсации до которого достигала струя с реагентом, выходящая из сопла двигателя, слабый ветер (1–3 м/с), большая относительная влажность (85–90%), отсутствие слоя инверсии в пограничном слое). Спустя 1–2 часа облако достигло формы кучево-дождевого облака, что, несомненно, может свидетельствовать об изменении уровня атмосферного (грозового) электричества.

Таким образом, в работе предложены основные практические методы изменения электрического состояния конвективных облаков, основанные на создании нисходящих движений в облаке путем сброса в них упаковок с грубодисперсными порошками (например, с цементом), а также на создании искусственных конвективных облаков с помощью тепловой машины специальной (например, ТМС-65), диспергирующей водные растворы гигроскопических реагентов.



*Рисунок 5. Фото эксперимента по созданию конвективных облаков*

В первом случае, воздействие на естественные облака вертикального развития проводится с целью исключения возможности перерастания конвективных облаков (в частности, мощно-кучевых) в кучево-дождевые (градовые, грозовые), которые могут явиться источником молний, способных привести к возникновению пожаров.

Во втором случае, напротив, создаются реальные возможности изменения состояния атмосферного электричества в сторону его увеличения, вплоть до грозового. Технически сегодня это уже вполне осуществимо. Области же практического использования данного направления требуют специального обоснования и исследования.

#### **Литература**

1. Колосков Б.П., Корнеев В.П., Щукин Г.Г. Методы и средства модификации облаков, осадков и туманов. СПб.: РГГМУ. 2012. 342 с.
2. Дмитриев А.Н., Кречетова С.Ю., Кочеева Н.А. Грозы и лесные пожары от гроз на территории Республики Алтай: монография / Дмитриев А.Н., Кречетова С.Ю., Кочеева Н.А. Горно-Алтайск: РИО ГАГУ, 2011. 154 с.

3. Михайловский Ю.П., Синькевич А.А. О методах активных воздействий на электрические явления в облаках // Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, 23-27 октября 2017 г. Часть 2. Нальчик. Уфа: АЭТЕРНА, 2017. С. 197–205.

4. Зимин Б.И. Регулирование развития грозовой активности конвективных облаков при воздействии льдообразующими аэрозолями // Труды ЦАО. 1978. В. 136. С. 104.

5. Имянитов И.М., Никандров В.Я. О возможности воздействия на электрические процессы в облаках // В сб. Краткие тексты и тезисы докладов к совещанию по активным воздействиям на электрические процессы в облаках. Л.: Изд. ГГО. 1965. С. 138–142.

6. 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 // Труды ГГО. 1957. В. 67. С. 33–58.

7. Качурин Л.Г. Физические основы воздействия на атмосферные процессы. Л.: Гидрометеоиздат. 1990. 464 с.

8. Доронин А.П. Воздействия на атмосферные явления и процессы. Учебное пособие. СПб.: ВКА им. А.Ф.Можайского. 2014. 293 с.

9. Дессенс А. Можем ли мы изменить климат. Л.: Гидрометеоиздат. 1969. 194 с.

10. Dessens H., Dessens J. Experience avec le meteoron au Centre de Recherches atmospheriques // J. Rech. Atm., 1964. Vol. 1. P. 158–162.

11. Вульфсон Н.И., Левин Л.М. Метеотрон как средство воздействия на атмосферу. М.: Московское отделение гидрометеоиздата. 1987. 130 с.

12. Доронин А.П., Кулешов Ю.В., Петроченко В.М., Шукин Г.Г. Искусственные облака и туманы как перспективное средство решения хозяйственных и экологических задач // Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, 23-27 октября 2017 г. Часть 2. Нальчик. Уфа: АЭТЕРНА, 2017. С. 141–149.

## АНТРОПОГЕННЫЕ ФАКТОРЫ, ПРИВОДЯЩИЕ К ВОЗНИКНОВЕНИЮ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

*Г.И. Мазуров, В.И. Акселевич*

ГГО им. А.И. Воейкова, г. Санкт-Петербург  
nanmaz@rambler.ru

Более полувека назад возникла проблема электризации самолетов при полетах в облаках и осадках [1]. Анализ летных происшествий, связанных с поражением самолетов молниями, показал, что чаще самолет поражается молнией зимой, ранней весной и поздней осенью (рисунок 1), хотя количество дней с грозой резко увеличивается летом. Напрашивается вывод о том, что дело заключается в накоплении статического заряда при трении самолета при полете в облаках [2].

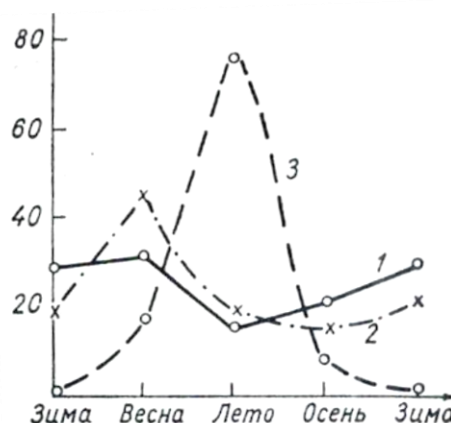


Рисунок 1. Вероятность (%) поражения самолетов молниями: 1 – по данным США; 2 – по данным СССР; 3 – повторяемость по сезонам

Статическое электричество это совокупность явлений, связанных с возникновением, сохранением и релаксацией свободного электрического заряда на поверхности или в объёме диэлектриков или на изолированных проводниках [3]. К сожалению, такие заряды встречаются чаще, чем мы думаем [4] и, что эта частота будет только увеличиваться с развитием новых технологий, увеличением скоростей и внедрением новых материалов.

Источники энергии подразделяются на природные и антропогенные. К природным источникам относятся молнии, извержения, землетрясения, атмосферные явления (ураганы, смерчи и т.п.) и другие. Антропогенные источники создаются человеком. В ходе научно-технической революции появились источники, обеспечивающие очень высокие уровни энергии, существенно расширился перечень известных форм энергии и их характеристика.

Если первые (природные) источники полностью относятся к геологии и гидрометеорологии, то вторые частично можно отнести к антропогенным. Например, движение различных аппаратов в окружающей среде. В первую очередь это движение современных скоростных самолетов, преодолевающих громадные расстояния. В результате на самолетах скапливаются огромные заряды статического электричества и на концах крыльев происходят разряды, приводящие к нарушению радиосвязи и провоцирующие электрические разряды в виде молний даже при полете в слоистообразных облаках [5].

Среди причин возникновения статического электричества наличие контакта между поверхностями 2-х материалов, наличие радиационного излучения, ультрафиолета, быстрый перепад температур. Статическое электричество чаще всего возникает при наличии контакта между поверхностями, хотя сама эта процедура ещё до конца не ясна.

Электризация диэлектриков трением может возникнуть при соприкосновении двух разнородных веществ из-за различия атомных и молекулярных сил (из-за различия работы выхода электрона из материалов). При этом происходит перераспределение электронов (в жидкостях и газах ещё и ионов) с образованием на соприкасающихся поверхностях электрических слоёв с равными знаками электрических зарядов. Фактически атомы и молекулы одного вещества, обладающие более сильным притяжением, отрывают электроны от другого вещества, создавая вихревое движение ионов среды, в которой они заключены.

Полученная разность потенциалов соприкасающихся поверхностей зависит от ряда факторов – диэлектрических свойств материалов, значения их взаимного давления при соприкосновении, влажности и температуры поверхностей этих тел, климатических условий. При последующем разделении этих тел каждое из них сохраняет свой электрический заряд, а с увеличением расстояния между ними за счёт совершаемой работы по разделению зарядов, разность потенциалов возрастает и может достигнуть десятков и сотен киловольт.

Электрические разряды могут образовываться вследствие некоторой электропроводности влажного воздуха. Считается, что заряды накапливаются в сухом воздухе, влажность которого не превышает 85%, но в облаках она больше. Электростатический разряд происходит при очень высоком напряжении и чрезвычайно низких токах.

Аналогично, современный автотранспорт накапливает при длительных поездках в сухую погоду заряды статического электричества [6].

В результате движения воздушных потоков, насыщенных водяными парами, образуются грозовые облака, являющиеся носителями статического электричества. Электрические разряды образуются между разноименными заряженными облаками или, чаще, между заряженным облаком и озоновым слоем земли, с последующим разрядом на землю. При достижении критической разности потенциалов происходит разряд молнии между облаками, на земле или в околокосмическом слое планеты. Для защиты от молний устанавливаются молниеотводы, проводящие разряд напрямую в землю.

Помимо молний, грозовые облака могут вызывать на изолированных металлических предметах опасные электрические потенциалы из-за электростатической индукции.

### Литература

1. Александров В.С., Евсеев Б.Ф., Имянитов И.М., Межлумян Р.А. Методы определения опасных в электрическом отношении зон в слоисто-дождевых облаках. Труды Всесоюзной конференции по вопросам метеорологического обеспечения сверхзвуковой авиации // Л.: Гидрометеиздат. 1972. С. 313–323.
2. Имянитов И.М. Электризация самолетов в облаках и осадках. Л.: Гидрометеиздат. 1970. 212 с.
3. ГОСТ 12.1.018-93 «Пожаровзрывобезопасность статического электричества» <http://www.fireman.ru/bd/gost/12-1-018/121018.html>.

4. Лёб Л. Основные процессы электрических разрядов в газах. Перевод с англ. ГТТИ. М. Л., 1950. 47 с.
5. Джорджио В.А. Исследование струйных течений в Советском Союзе за десятилетие 1957–1967 гг. Труды конференции по проблемам авиационной метеорологии. Л.: 1968. С. 195–207.
6. Торгунаков Е.А., Мазуров Г.И., Акселевич В.И. Безопасность жизнедеятельности. СПб. Изд. СПбУУиЭ, 2012. 444 с.

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГРОЗОВОЙ АКТИВНОСТИ, ИНТЕНСИВНОСТИ  
КОНВЕКТИВНОГО ПРОЦЕССА И СОДЕРЖАНИЯ СОЕДИНЕНИЙ АЗОТА В ОСАДКАХ  
г. НАЛЬЧИКА 2017 ГОДА**

*Л.З. Жинжакова, А.С. Отарова*

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик  
otarova08@mail.ru

Поступление соединения азота в атмосферу может быть обусловлено, как антропогенными источниками, так и природными процессами, ведущая роль среди которых принадлежит электрохимическим реакциям атмосферного азота при молниевых разрядах. С целью выявления основных процессов, определяющих загрязненность осадков, и степени влияния грозовых разрядов были сопоставлены характеристики облаков и концентрации ЗВ в сопутствующих осадках.

Наблюдения за атмосферными осадками 2017 года проводили в Нальчике (предгорно-низкогорная зона). Пункт наблюдений располагался на границе курортной и городской зоны. Измеренные концентрации сравнивали с соответствующими им параметрами, характеризующими конвективный процесс. Данные о грозовой активности получены с помощью системы грозопеленгации LS8000. Используются архивные материалы радиолокаторов СКВС о перемещении облаков и облачных систем в районе наблюдений и их отражаемости. Установлено, что в большинстве случаев при максимальных величинах  $I_g(z)$ , составивших от 5,5 до 6,5 и высоте верхней границы более 10 км концентрации всех трех форм связанного азота в сопутствующих осадках входят в диапазон значений в ряду наблюдений, т.е. занимают места между 1-ым и 3-им квартилями. Также не выявлено зависимости между содержанием в дождевой воде нитритов, нитратов и ионов аммония и интенсивностью гроз. Наблюдаемые различия в большей мере связаны с количеством выпадавших осадков. Представлена интенсивность осадков в грозо-градовые процессы, где значения варьировали в широких пределах: от 4 до 50 мм осадков (рисунок1). При интенсивных грозах также не проявлялась тенденция к повышению уровня загрязнения атмосферных осадков соединениями азота.

Диапазоны в пункте Нальчик по  $\text{NO}_3^-$  ионов составили  $1 \div 4$  мг/л, что находится в пределах диапазона общей выборки, концентрация  $\text{NO}_2^-$  при грозах различной интенсивности находилась в типичном для региона диапазоне 0,01–0,06 мг/л и падала до 0,01–0,02 мг/л, если увеличивалось количество осадков (рисунок2). В осадках теплого периода 2017 года значения ионов  $\text{NH}_4^+$  отличались незначительно (1–2 мг/л).

Таким образом, вклад гроз в загрязнение осадков соединениями азота не велик по сравнению с антропогенными источниками. На основании анализа содержания соединений азота в атмосферных осадках Нальчика в 2017 году можно сделать вывод о том, что в предгорно-низкогорной зоне Центрального Кавказа уровень загрязнения атмосферных осадков в основном связан с подоблачным вымыванием ЗВ, как отмечалось ранее в работах [1, 2]. Однако анализ градин, выпавших 19.04.2017 года, где интенсивность осадков превышала более  $50 \frac{\text{мм}}{\text{час}}$  (время выпадения града  $17^{50} - 18^{00}$ ), дает основание утверждать, что возможны высокие антропогенные загрязнения атмосферных осадков (Дополнительные сведения: накануне проведено активное воздействие, выпущено 120 ракет «Алазань-6» – с северо-запада вдоль хребта Зольский - Баксанский - Чегемский - Кенженский районы).

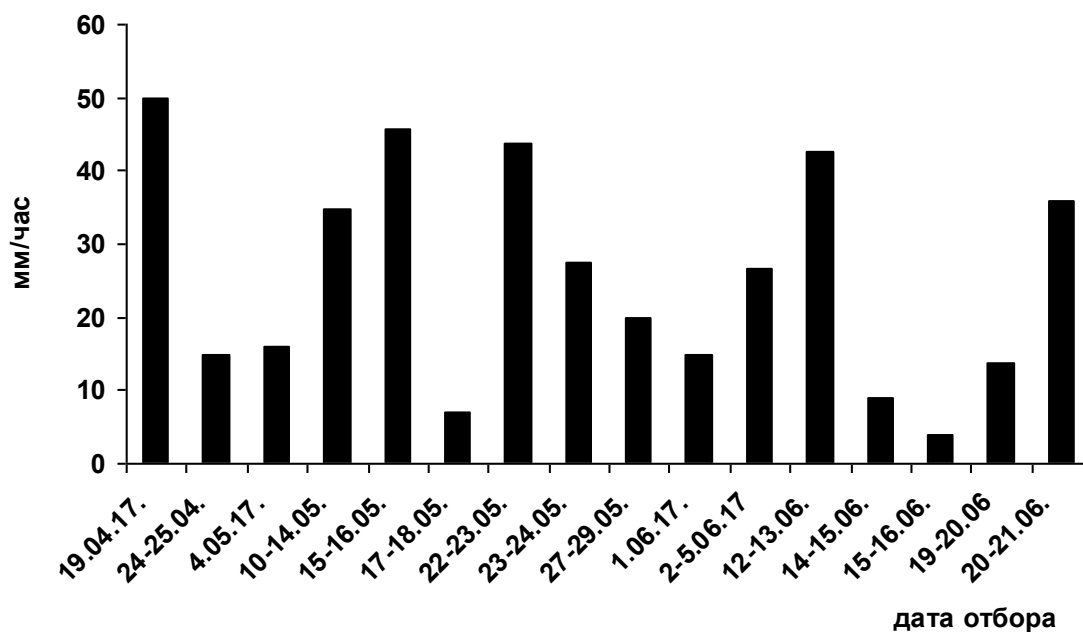


Рисунок 1. Интенсивность осадков во время грозоградовых процессов весенне-летнего периода 2017 г. (г. Нальчик)

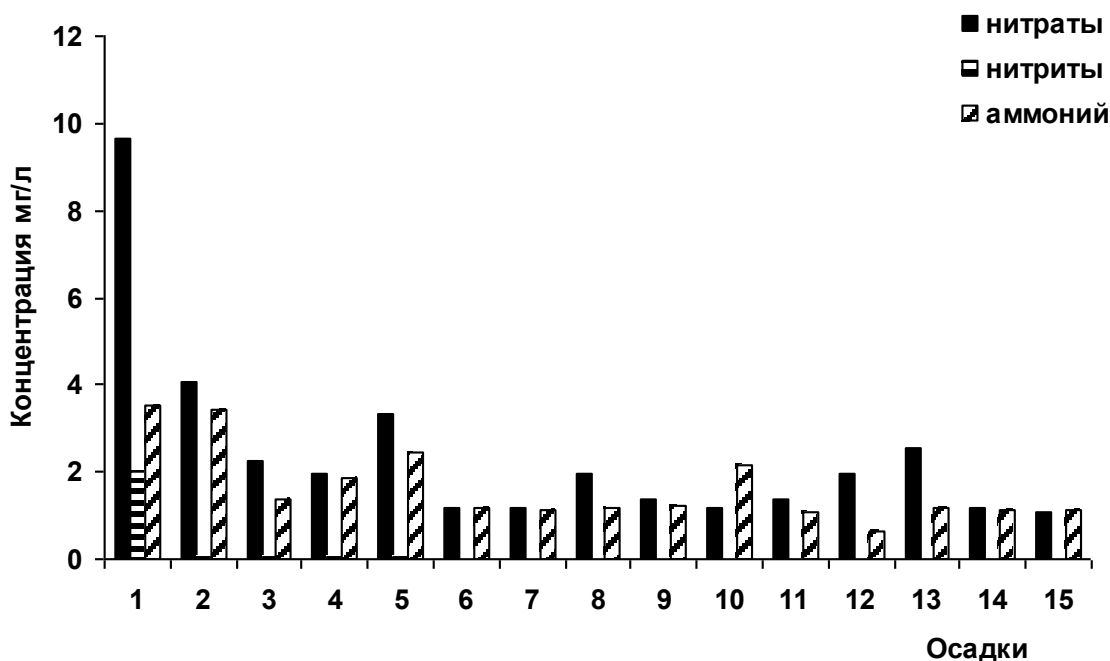


Рисунок 2. Содержание неорганических соединений азота в атмосферных осадках г. Нальчик, 2017 г.

Градовая вода (19.04) отличалась значениями по всем соединениям азота ( $\text{NO}_3^-$  – 9,67 мг/л,  $\text{NO}_2^-$  – 2,02 мг/л,  $\text{NH}_4^+$  – 3,51 мг/л), что многократно выше в представленных осадках весенне-летнего периода.

Определенный вклад в загрязнение атмосферных осадков могут вносить и облачные процессы осадкообразования, включая электрохимические реакции.



## Литература

1. Реутова Т.В., Жинжакова Л.З., Маиуков Х.Х. Исследование содержания неорганических соединений азота в атмосферных осадках предгорно-низкогорной зоны Центрального Кавказа // Известия ВУЗов Северо-Кавказский регион. Физика атмосферы. 2010. Спецвыпуск. С. 85–87.
2. Реутова Т.В., Жинжакова Л.З., Маиуков Х.Х. Поступление поллютантов с атмосферными осадками в условиях предгорно-низкогорной зоны Центрального Кавказа на урбанизированную (г. Нальчик) и фоновую территорию // Материалы VI международной научной конференции. «Экологические и гидрометеорологические проблемы больших городов и промышленных зон» 2–4 июля 2012. Санкт-Петербург. С. 203–204.

## КЛАССИФИКАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ДЛЯ РАНЖИРОВАНИЯ МЕТЕОТРОПНЫХ РЕАКЦИЙ ЛЮДЕЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВАРИАЦИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ АТМОСФЕРЫ

*Х.Х. Маиуков<sup>1</sup>, А.А. Ташилова<sup>1</sup>, Л.А. Кешева<sup>1</sup>, И.Х. Маиуков<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик  
tashilovaa@mail.ru

К одним из важных факторов внешней среды, оказывающих влияние на самочувствие людей, относятся метеорологические факторы, в том числе электромагнитные поля, которые генерируются различными метеопроцессами и распространяются практически без затухания на большие расстояния. В данной работе приведены результаты, которые продолжают начатые исследования некоторых скрытых закономерностей хаотического воздействия напряженности электрического поля атмосферы на людей с сердечно-сосудистыми заболеваниями [1].

В период с 2006 по 2008 гг. в г. Нальчик был проведен мониторинг по регистрации градиента потенциала электрического поля атмосферы у поверхности земли с помощью регистрирующей аппаратуры ФГБУ «ВГИ». В состав комплекса входили электростатический флюксметр, вторичный преобразователь, аналогово-цифровой преобразователь (АЦП), персональный компьютер. В качестве прибора для измерения напряженности электрического поля атмосферы у земли в комплексе использовался датчик «Поле-2», разработанный в Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова (ГГО). За этот же период со станций скорой медицинской помощи г. Нальчика были собраны и систематизированы среднесуточные данные о количестве обращений по следующим болезням: гипертония, гипертонический криз, общий инфаркт миокарда, сердечно-сосудистая патология, стенокардия (ИБС), аритмия. Статистическая обработка данных проводилась с использованием методов описательной статистики, корреляционного анализа, факторного анализа, кластерного анализа и линейной регрессионной модели. Расчеты осуществлялись с использованием пакета прикладных программ SPSS 21.0 [2].

В обобщающих работах уже обращалось внимание на то, что люди чутко реагируют на малейшие изменения в синоптической ситуации и на контрастность в смене погоды. В работах [3, 4] приводятся результаты исследований по температуре приземного воздуха, давлению и влажности атмосферы. Авторами отмечено, что риск развития обострений гипертонической болезни повышается при снижении температуры атмосферного воздуха и увеличении атмосферного давления и относительной влажности воздуха.

Большинство взаимосвязей между заболеваниями и напряженностью поля – нелинейные и многофакторные, что требует использования адекватных методов анализа, в нашем исследовании – корреляционный, регрессионный анализ, факторный кластерный анализ. Для выявления возможной зависимости частоты обострений заболеваний от изменения напряженности электрического поля исследование проводилось в несколько этапов.

В предварительном анализе по данным за указанный период были выявлены тенденции сезонного уменьшения (от холодного к теплому сезону) как средней напряженности, так и количества вызовов скорой помощи по болезням. Наибольшее среднесуточное количество вызовов приходилось на гипертоническую болезнь – 32, наименьшее – на инфаркт миокарда, в среднем 1 вызов за день. Общая сумма вызовов максимальна для гипертонии 5931, и минимальна для инфаркта миокарда – 179 вызовов за полгода. Мода характеризует наиболее часто встречающееся количество вызовов в день, для гипертонической болезни это 29 вызовов, для инфаркта миокарда – 0 вызовов.

На первом этапе была определена корреляция между среднесуточной интенсивностью напряженности электрического поля атмосферы у земли  $E$  (В/м) и количеством вызовов в день по болезням: они малы (от  $R=0,026$  до  $R=0,257$ ) и статистически незначимы ( $\text{Sig.}>0,05$ ). Однако имеется значимая корреляция (на уровне значимости  $\text{Sig.}<0,05$ ) между некоторыми болезнями, принадлежащими к одному типу заболеваний.

С помощью факторного анализа количество вызовов были сгруппированы по трем факторам, внутри каждого – болезни с максимальными факторными нагрузками. В факторе 1 – гипертонический криз, сердечно-сосудистые заболевания и стенокардия (факторные нагрузки 0,706; 0,559; 0,775), в факторе 2 – аритмия (факторная нагрузка 0,878) и в факторе 3 – гипертоническая болезнь и инфаркт миокарда (факторные нагрузки – 0,572; 0,860). Далее был проведен корреляционный анализ между напряженностью и тремя факторами.

По результатам корреляционного анализа получено, что значимый коэффициент корреляции  $R = 0,218$  (при  $\text{Sig.}=0,041<0,05$ ) имел место для фактора 1, объединяющий болезни: гипертонический криз, сердечно-сосудистые заболевания и стенокардия.

Для дальнейшего определения условий максимальной зависимости метеотропной реакции больных с болезнями фактора 1 проводился кластерный анализ (КА). С помощью КА проводилась классификация объекта, а именно: разбиение совокупности дней на однородные подмножества с пиками количества вызовов и изменением напряженности поля атмосферы у земли. В результате проведения кластерного анализа были сформированы три массива данных для первого кластера, второго кластера и третьего. В первый кластер вошло 29 дней, во второй кластер – 33 дня и в третий кластер – 25 дней с искомыми характеристиками (максимальная зависимость обострений болезней от напряженности поля земли).

Для каждого кластера (1, 2, 3) был проведен корреляционный анализ для выявления зависимости частоты вызовов болезней 1-го фактора от напряженности электрического поля. Получено, что максимальная зависимость количества вызовов по болезням из 1-го фактора (гипертонический криз, сосудистые заболевания, стенокардия) от изменения напряженности электрического поля у земли с коэффициентом корреляции  $R = -0,59$  (с уровнем значимости  $\text{Sig.}=0,001$  при допустимой ошибке  $p<0,01$ ) имеется для 1-кластера, в который вошли процессы со следующими датами: февраль 2007 г. – 1, 4, 5, 13, 16, 17, 20, 21; апрель 2007 г. – 1, 2, 10, 11, 12, 13, 14, 18, 23, 24, 30; июнь 2007 г. – 1, 2, 13, 14, 15, 16, 17, 22, 25, 26. Проведен регрессионный анализ и получено уравнение регрессии зависимости стандартизированной величины частоты вызовов заболеваний 1-го фактора  $Zf1$  от стандартизированного значения напряженности электрического поля за сутки ( $Zint$ ):

$$Zf1 = -0,298 - 0,523Zint$$

Из уравнения видно, что при нулевом значении стандартизированной напряженности, стандартизированное количество вызовов равно « $-0,298$ », что исходя из определения стандартизированной величины, характеризует величину вызовов как меньше среднего. Положительные стандартизированные значения напряженности (выше среднего исходного значения) приводят к сокращению числа вызовов ( $Zf1<0$ ). Отрицательные стандартизированные значения напряженности (ниже среднего исходного значения) приводят к увеличению числа вызовов ( $Zf1>0$ ).

### Литература

1. Ташилова А.А., Машуков Х.Х., Машуков И.Х., Кешева Л.А.. Исследование влияния вариаций напряженности электрического поля у земли на больных гипертонией сердечно – сосудистыми заболеваниями методами статистического анализа // Материалы первой международной конференции «Молодежь в формировании инновационной экономики и переход к обществу знаний». Россия. Нальчик. 19–20 сентября. 2012. С. 353–356.
2. Моосмюллер Г., Ребекк Н.Н. Маркетинговые исследования с SPSS. Москва. Инфра. М. 2009. 160 с.
3. Алябина О.В., Васильев В.П., Максимов А.В. Влияние климатических факторов на обострение артериальной гипертензии жителей города // Известия Алтайского государственного университета. 2007. С. 11–14.
4. Бобина И.В., Кобзева О.О. Влияние метеорологических факторов на частоту обострений артериальной гипертензии // Известия Алтайского государственного университета. 2010. С. 13–16.

## ВЛИЯНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ НА СОСТОЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В РАЙОНЕ КАРЬЕРА ОТКРЫТЫХ ГОРНЫХ РАЗРАБОТОК

*Р.Х. Зекореев<sup>1</sup>, Х.Х. Машиуков<sup>1</sup>, М.М. Камбиев<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик  
zeri54@mail.ru

Электрическое поле атмосферы у поверхности земли при отсутствии нарушений погоды (гроза, дождь, туман, облачность и др.) количественно характеризуется напряженностью вертикальной составляющей этого поля, где ее среднее значение составляет примерно 120–130 В/м, которое с высотой испытывает быстрое уменьшение. На величину напряженности поля оказывает влияние концентрация ионов, аэрозолей и турбулентное состояние атмосферы в пункте наблюдения.

Наблюдения, проведенные вблизи источников антропогенного загрязнения, подтверждают его влияние на изменение состояния электрического поля в приземном слое атмосферы. Так, наблюдения, проведенные в Восточной Сибири [1] в районе карьера открытых разработок мрамора (Слюдянка), показали повышенные значения напряженности поля, связанные с загрязнением воздуха в районе карьера аэрозольными частицами пыли.

Измерения напряженности поля, проводившиеся на пике Чегет (высота 3040 м), показывают, что суточный ход напряженности поля хорошо коррелирует с унитарной вариацией атмосферного потенциала и мало отличается от измеренных значений поля на тех же высотах, за исключением случаев, когда наблюдался ветер северного или северо-восточного направления, где на расстоянии 40 км расположен промышленный объект [2].

Наблюдения за состоянием электрического поля проводились нами в рамках договора с Тырныаузским вольфрамо – молибденовым комбинатом летом 1990 года. Пункт наблюдения находился в районе Мукуланского карьера открытых горных разработок вольфрамо-молибденовых руд на высоте около 2500 м (Северный Кавказ). Для определения влияния антропогенного фактора на состояние электрического поля, измерения напряженности поля проводились в дни с ненарушенной погодой.

В качестве измерителя вертикальной составляющей напряженности поля  $E$  использовался электростатический флюксметр ротационного типа [3], который размещался на ровной горизонтальной площадке так, чтобы измерительная пластина флюксметра находилась на одном уровне с выбранной площадкой.

Анализ результатов регистрации напряженности поля в дни с ненарушенной погодой показывает, что существует прямая связь между напряженностью поля и концентрацией и спектром размеров аэрозольных частиц в районе карьера. Дневной часовой ход напряженности поля 25 июля приводится на Рисунке 1, отсюда видно, что значение напряженности поля  $E$  находится в пределах 600–1000 В/м, что на порядок выше значений поля для хорошей погоды в чистой атмосфере, приведенных в работе [4].

Повышенные значения напряженности поля в районе Мукуланского карьера, на наш взгляд, можно объяснить процессом электризации, в результате которой образуется избыточный объемный заряд у поверхности земли. Накопление объемного заряда происходит при механическом разрушении частиц горных пород и нарушении контакта между ними, что приводит к появлению заряда на этих частицах.

Одновременно с этим процессом происходит селективная зарядка аэрозольных частиц пыли в зависимости от размера этих частиц, также происходит захват легких аэроионов воздуха частицами пыли, что приводит к уменьшению электропроводности воздуха и росту напряженности электрического поля в районе карьера. Так как действующий карьер генерирует непрерывно в атмосферу аэрозольные частицы, основная доля которых приходится на частицы размером от 0,1 до 10 мкм, время их жизни достаточно велико. Более крупные частицы быстрее выпадают на Землю за счет седиментации, например, согласно [5] частица диаметром 0,1 мкм оседает со скоростью  $8,97 \cdot 10^{-5}$  см/с, следовательно такие частицы могут находиться во взвешенном состоянии долгое время, исчисляемое сутками, а крупные частицы например, диаметром 10 мкм оседают со скоростью 0,303 см/с. Отсюда можно сделать вывод, что повышенные значения напряженности электрического поля в районе Мукуланского карьера обусловлены влиянием интенсивного образования аэрозольных частиц пыли при разработке

горных пород в карьере, в результате которого происходит образование положительного объемного заряда в приземном слое за счет механизма электризации, приведенного выше.

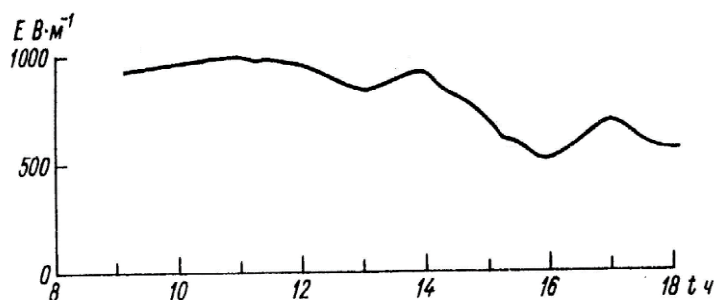


Рисунок 1. Дневной часовой ход напряженности электрического поля в районе Мукуланского карьера 25 июля 1990 г.

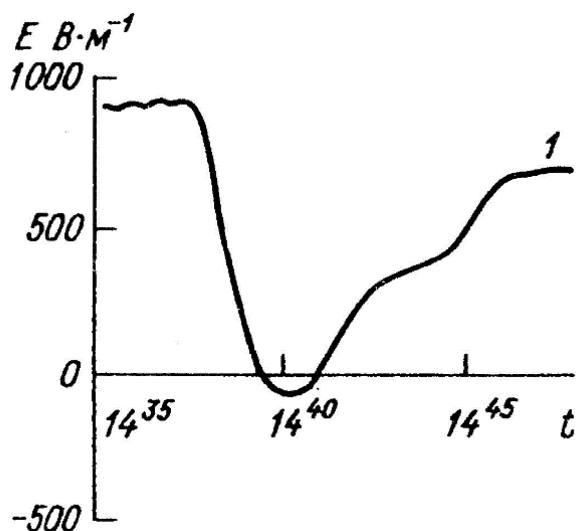


Рисунок 2. Локальные изменения напряженности электрического поля 25 июля 1990 г.

Локальные изменения напряженности поля, представленные на рисунке 2, вызваны на наш взгляд влиянием отрицательного объемного заряда, сосредоточенного в визуально наблюдаемом плотном пылевом облаке, поднявшемся выше измерительной площадки на 5–6 м, на расстоянии около 15 м и осевшем в течение приблизительно 8 мин, и состоявшем, по-видимому, из более крупных частиц, скорость оседания которых составила около 3 см/с. Отсюда, согласно [5] диаметр таких частиц составляет около 30 мкм. Этот эффект также подтверждает тезис о селективной зарядке аэрозольных частиц в зависимости от их размеров.

Полученные данные представляют научный и практический интерес для оценки и оперативного контроля и своевременного предупреждения аэрозольного загрязнения атмосферы в районе карьеров и других промышленных объектов, которое представляет опасность для окружающей среды и некоторых технических средств и объектов.

#### Литература

1. Филиппов А.Х., Кречетов А.А., Зарифанов Н.Г. Результаты исследования атмосферного электричества в Восточной Сибири // Труды Всесоюз. Симп. по атмосферному электричеству. Л.: Гидрометеиздат. 1984.
2. Аджиев А.Х., Вакалов И.А., Куповых Г.В. и др. Наблюдения за атмосферным электричеством в высокогорном пункте пик Чегет // Тез. докл. IV Всесоюз. симп. по атмосферному электричеству. Нальчик. 1990.

3. Зекореев Р.Х., Камбиев М.М., Маиуков Х.Х. Некоторые результаты исследования параметров атмосферного электричества в районе Мукуланского карьера (Северный Кавказ). Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. Физика атмосферы Вып.3. г. Ростов. 2010.

4. Пудовкина И.Б. Некоторые результаты изучения местных аномалий электрического поля атмосферы в районе Баксанского ущелья // Тр. Эльбрусской экспедиции. 1961. № 215.

5. Райст П. Аэрозоли. М.: Мир. 1987. 240 с.

## СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МОЛНИЙ ТИПА ЗЕМЛЯ – ОБЛАКО НА ТЕРРИТОРИИ СЕВЕРНОГО КАВКАЗА И СТАВРОПОЛЬСКОГО КРАЯ

М.В. Жарашуев<sup>1</sup>, М.Т. Текуева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», Нальчик

<sup>2</sup>Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик  
mgk777@mail.ru, tekueva.m@mail.ru

Молнии несут серьезную угрозу безопасности жизнедеятельности человека и наносят существенный ущерб народному хозяйству [3]. При этом наибольший ущерб несут молнии облако-земля.

Для оптимизации мероприятий по грозозащите полезным является статистический анализ молниевой активности на территории подлежащей грозозащите.

Целью данной работы является статистическое исследование разрядов земля-небо на Северном Кавказе и Ставропольском крае, в радиусе действия локатора МРЛ-5 [1, 4, 5, 6], расположенного в г. Михайловск Ставропольского Края.

В данной работе проведен статистический анализ грозовой активности на территории 173056 км<sup>2</sup>, все разряды были зафиксированы с помощью системы грозопеленгации LS8000 [2], при этом разряды облако-земля были разделены по квадратам фиксации молний, и равнялись 500х500 метров. Специальной программой разработанной для исследования грозоградных процессов, был проведен подсчет молниевых разрядов за период с 2009 по 2018 гг. В зависимости от орографии все молниевые разряды были разделены на 5 групп по координатам их обнаружения, при этом высоты исследуемых орографических кластеров составляют:

- 1) Низкогорье от 0 до 200 метров (9,9%);
- 2) Возвышенности от 200 до 500 метров (18,9%);
- 3) Нагорные плато от 500 м до 1 км (22,7%);
- 4) Низкогорье от 1 км до 2 км (26%);
- 5) Высокогорье свыше 2 км (22,6%).

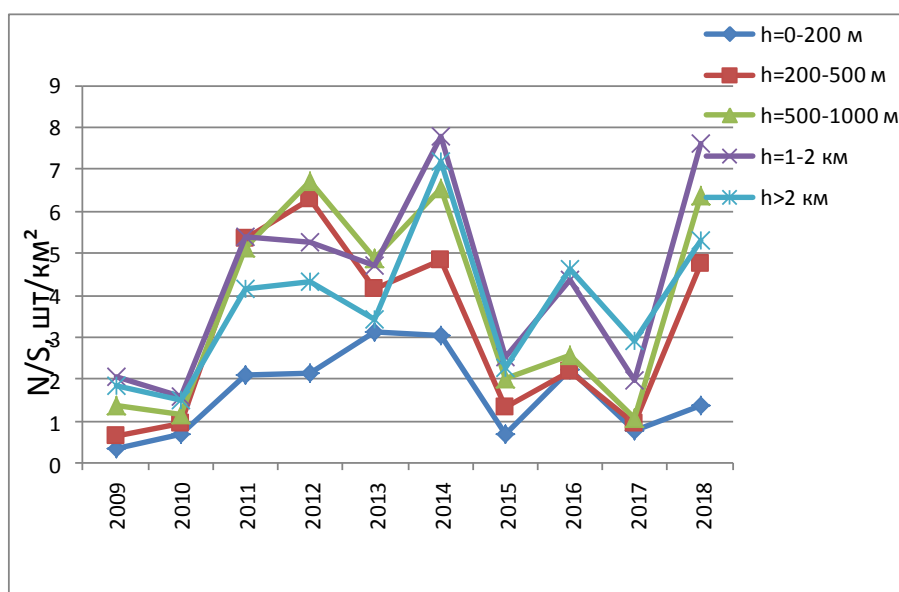


Рисунок 1. Количество молний облако-земля на квадратный километр за апрель-сентябрь в зависимости от высоты подстилающей поверхности по годам

Из данного графика видно, что количество гроз, зафиксированных грозопеленгационной системой, включающей в себя грозопеленгаторы, расположенные в г. Ставрополь, г. Зеленокумск, на полигоне Кызбурун и в г. Черкесск, варьировалось от года к году. Так, наиболее спокойными были 2009, 2010, 2015 и 2017 года. При этом четко прослеживается тенденция к увеличению количества гроз на квадратный километр в зависимости от высоты подстилающей поверхности.

Анализ повторяемости разрядов по годам (рисунок 1) показал, что грозы чаще бывают на равнине и убывают с ростом высоты подстилающей поверхности.

В период с 2009 по 2018 гг. в радиусе 208 км вокруг Ставропольского АМРК (т.е. на площади 173056 км<sup>2</sup>) отмечалось 4395205 молниевых разрядов типа облако-земля: из них 72% были отрицательными, а 28% положительными. При этом большинство молний, бьющих по земле на исследуемой территории, приходится на высоты подстилающей поверхности 1000–2000 метров, и составляет порядка 26%, пропорционально убывая до 9,9% на равнине.

Исследование количества молний, ударяющих на квадрат площади (рисунок 2), за 2009–2018 гг. показало, что молнии в два раза чаще бьют на равнине, чем в горах.

Месячный ход грозовой активности за период 2009–2018 гг., представленный на рисунке 3, показал, что наиболее грозоопасными месяцами являются июнь и июль, а менее грозоопасными апрель и сентябрь.

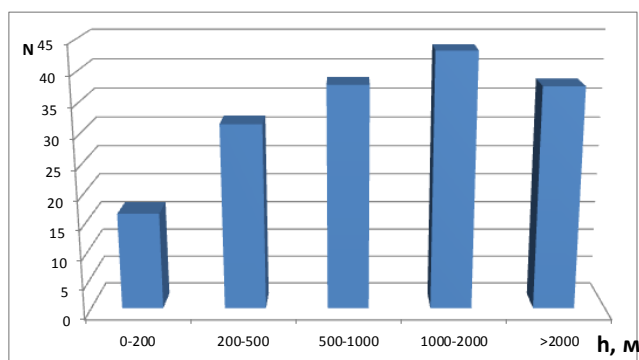


Рисунок 2. Количество молниевых разрядов типа земля-небо, на квадратный километр в зависимости от высоты подстилающей поверхности за период 2009–2018 гг.

Большую важность для авиации имеют данные о повторяемости опасной облачности. В качестве одного из параметров, характеризующих степень опасности облачности, используется наличие грозовых разрядов, которое коррелирует с турбулентностью, большими скоростями воздушных потоков, интенсивными осадками, в том числе и с градом.

Проведенные исследования показали, что в среднем больше всего гроз встречается на высотах от 1000 до 2000 м, при этом была обнаружена тенденция к линейному увеличению количества гроз с мая по сентябрь для высокогорья.

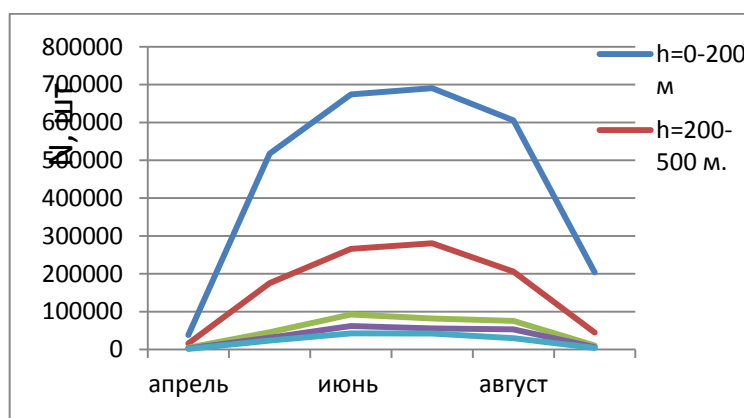


Рисунок 3. Месячный ход грозовой активности

Особенностью климата наиболее грозоопасных районов от г. Эльбрус вниз в северо-западном направлении низкогогорья Кавказа является то, что, несмотря на высоту рельефа, им присущи особенности долин и равнин, что создает благоприятные условия для развития грозоградных процессов на наветренных склонах.

### Литература

1. *Абшаев А.М., Жарашуев М.В.* Автоматизированная идентификация конвективных ячеек в кучево-дождевой облачности. Материалы IX конференции молодых ученых. Нальчик. 2008. 47 с.
2. *Аджиев А.Х., Аджиева А.А., Тумгоева А.А.* Влияние орографии на характеристики грозовой деятельности // Известия вузов Северо-Кавказский регион. 2008. № 2. С. 109–112.
3. *Базелян Э.М., Горин Б.Н., Левитов В.И.* Физические и инженерные основы молниезащиты. Л. 1978.
4. *Жарашуев М.В., Макитов В.С., Кагермазов А.Х., Кулиев Д.Д.* Метод калибровки локаторов сети штормоповещения // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2017. № 586. С. 164–174.
5. *Жарашуев М.В., Гергоков А.Х., Кагермазов А.Х., Макитов В.С., Созаева Л.Т.* Метод повышения эффективности сопоставления радиолокационной и наземной информации // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2018. № 588. С. 139–149.
6. *Jarashuev M.V.* Statistical analysis of hail activity in Stavropol krai and Crimea // Russian Meteorology and Hydrology. №7. 2012. P 455–460.
7. Where LightningStrikes. NASA Science. Science News. (December 5, 2001). Проверено 15 апреля 2011. Архивировано 23 августа 2011 года.

## **СЕКЦИЯ 9. Лабораторное моделирование электрических процессов в атмосфере**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВ ПРИМЕНЕНИЯ ГРУПП МОДЕЛЬНЫХ ГИДРОМЕТЕОРОВ ДЛЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ МОЛНИИ**

*А.Г. Темников<sup>1</sup>, Д.С. Журавкова<sup>1</sup>, А.В. Орлов<sup>1</sup>, Л.Л. Черненко<sup>1</sup>, Н.Ю. Лысов<sup>1</sup>,  
О.С. Белова<sup>1</sup>, Т.К. Кившар<sup>1</sup>, В.В. Воеводин<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
“Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва  
a\_g\_temnikov@mail.ru, TemnikovAG@mpei.ru

Проблемы активного управления процессами инициирования молнии остаются актуальными на сегодняшний день [1, 2]. Удары молнии во взрывоопасные и особо ответственные объекты чреваты катастрофическими последствиями. В этом случае перспективным способом молниезащиты будет исключение поражения объекта молнией путем ее искусственного инициирования из грозового облака до того, когда оно приблизилось к объекту. Известными способами искусственного инициирования молнии вдали от защищаемых объектов являются инициирование триггерных молний (ракетами, тянущими протяженный металлический проводник) [3] и лазерное инициирование [4]. В то же время одним из возможных факторов инициирования природной молнии предполагается наличие в грозовом облаке массивов крупного града [5]. Поэтому введение групп крупных модельных гидрометеоров (ГМ) в грозовое облако может оказаться одним из перспективных направлений искусственного инициирования молнии в грозовых облаках. В докладе обобщаются результаты экспериментальных исследований применения групп модельных ГМ для инициирования канальных разрядов из системы искусственных грозовых ячеек и обсуждаются перспективы их применения для разработки способов искусственного инициирования молнии [6].

Характерные картины инициирования канальных разрядов между искусственными грозовыми ячейками и землей, и между ячейками разной полярности группами модельных ГМ показаны на Рисунке 1 и Рисунке 2, соответственно. Эксперименты показали, что эффективность инициирования канальных разрядов зависит от размеров и формы проводящих модельных ГМ, которые могут быть разбиты на пять классов в зависимости от коэффициента усиления поля ( $k_{yc}$ ), были выделены следующие классы модельных ГМ: класс 1 –  $k_{yc} \approx 3-4$ ; класс 2 –  $k_{yc} \approx 5-9$ ; класс 3 –  $k_{yc} \approx 10-19$ ; класс 4 –  $k_{yc} \approx 20-49$ ; класс 5 –  $k_{yc} > 50$ . Другим фактором, существенно влияющим на эффективность инициирования канальных разрядов в искусственных грозовых ячейках, стало формирование из модельных ГМ протяженной группы через обеспечение формирования искровых разрядов между соседними ГМ в группе для того, чтобы создать протяженную разрядную систему, способную инициировать объемный лидерный разряд. Эксперименты показали, что использование диэлектрической лески или диэлектрической ленты между ГМ и группами ГМ стимулирует формирование искровых разрядов между модельными ГМ и канальных разрядов между группами ГМ, объединяя их в проводящий протяженный объект без отрицательного влияния на локальное электрическое поле заряженных облаков.

Выявлено, что при введении в грозовое облако нескольких групп ГМ, вероятность инициирования разрядов и общая длина разрядной системы возрастают. Максимальные вероятности инициирования канальных разрядов между отрицательно заряженными ячейками и землей 97% и между положительно заряженными ячейками и землей 88% достигаются при введении нескольких групп модельных ГМ класса 2, соединенных диэлектрической леской. При инициировании внутриоблачных разрядов между разноименно заряженными искусственными грозовыми ячейками несколькими группами модельных ГМ 2 и 3 класса максимальная вероятность инициирования находилась в диапазоне 86–90%. Эффективность (от 1 до 3) использования групп модельных ГМ разного класса для инициирования молнии из грозовых ячеек обобщена в таблице 1.





Рисунок 1. Иницирование каналных разрядов между системой отрицательно заряженных грозовых ячеек и землей массивами модельных ГМ

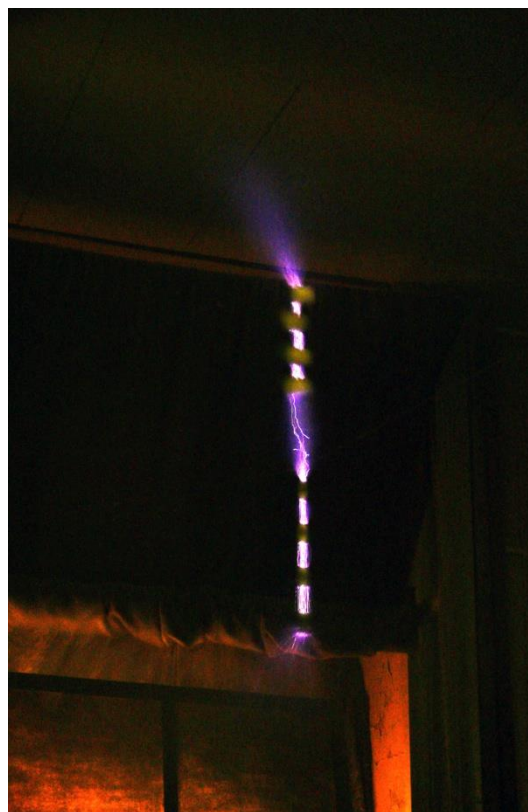


Рисунок 2. Иницирование каналных разрядов между системой разноименно заряженных грозовых ячеек с участием массивов модельных ГМ

Таблица 1

### Эффективность иницирования молнии группами модельных ГМ

Класс модельных ГМ	Способ объединения ГМ в группу	Вид иницирования молнии		
		Отрицательная нисходящая	Положительная нисходящая	Внутриоблачная молния
Класс 1	Леска	2	2	2
	Лента	1	1	1
Класс 2	Леска	3	3	3
	Лента	2	2	2
Класс 3	Леска	3	3	3
	Лента	2	3	2
Класс 4	Леска	1	2	1
	Лента	3	2	1
Класс 5	Леска	-	-	-
	Лента	-	-	-

Таким образом, наиболее перспективными для искусственного иницирования молнии будут группы модельных ГМ классов 2 и 3, объединяемые диэлектрической леской. Варианты их использования в естественных грозах обсуждаются в докладе.

### Литература

1. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Механизм притяжения молнии и проблема лазерного управления молнией. Успехи физических наук. 2000. Т. 170, № 7. С. 753–769.
2. Mazur A. Principles of lightning physics. IoP Publishing. Bristol & New York. 2016.
3. Камруков А.С., Пашкевич М.Ю., Березинский Н.А. и др. Метод создания токопроводящих объемов в атмосфере для иницирования молниевых разрядов. Докл. Всерос. Конф. по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы: 2017. Ч. 2. С. 206–213.

4. *Apollonov V.V.* High power lasers and new applications. International Journal of Engineering Research and Development. 2012. vol. 11, No. 3. P. 34–50.

5. *Mazur V., Ruhnke L.H., Grzybowski S., Taylor C.D., Petersen D.A.* Addressing the hydrometeor theory of lightning initiation with experiments in a high-voltage laboratory. Proceedings of the ICAE 2014. p 180.

6. *Темников А.Г., Черненский Л.Л., Орлов А.В., Лысов Н.Ю., Журавкова Д.С., Белова О.С., Герастенок Т.К.* Применение искусственных грозовых ячеек для исследования проблем инициирования молнии между грозовым облаком и землей. Известия Российской академии наук. Энергетика. 2017. № 2. С. 1–14.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГРУПП МОДЕЛЬНЫХ ГИДРОМЕТЕОРОВ НА ФОРМУ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ИМПУЛЬСОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, РЕГИСТРИРУЕМОГО ВБЛИЗИ ИСКУССТВЕННЫХ ГРОЗОВЫХ ЯЧЕЕК**

*А.Г. Темников<sup>1</sup>, О.С. Белова<sup>1</sup>, Л.Л. Черненский<sup>1</sup>, А.В. Орлов<sup>1</sup>, Н.Ю. Лысов<sup>1</sup>,  
Т.К. Кившар<sup>1</sup>, Д.С. Журавкова<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва  
a\_g\_temnikov@mail.ru; TemnikovAG@mpei.ru

Электромагнитное излучение молнии в грозовых облаках имеет широкий спектральный диапазон и является важным фактором для понимания физики молнии и эффективности работы систем определения места удара и параметров разряда молнии [1, 2]. Облачные разряды и внутриоблачные части разряда молнии между облаком и землей, в принципе, могут формироваться и развиваться в областях облака, характеризующихся большой концентрацией града. Отмечается, что градовые массивы могут играть существенную роль на различных стадиях развития молнии [3]. В последние годы все больше внимания уделяется возможному влиянию областей большой концентрации града в грозовом облаке на формирование в них разрядных явлений и характеристики их электромагнитного излучения, регистрируемого на поверхности земли [4].

В докладе представляются результаты экспериментальных исследований влияния групп крупных модельных гидрометеоров (ГМ) на характеристики импульсов электромагнитного излучения разрядов, формирующихся между системой отрицательных (положительных) искусственных грозовых ячеек и землей. Основные параметры экспериментального комплекса «Гроза» приведены в [5]. Характерная схема эксперимента показана на Рисунке 1. В искусственные грозовые ячейки и в пространство между ними вводились одна или несколько групп ГМ сантиметрового диапазона размеров. Регистрировались ток разряда, иницируемого между заряженными облаками и землей, и его электромагнитное излучение. Характерная картина формирования канальных разрядов между системой отрицательно (положительно) заряженных искусственных грозовых ячеек и землей и расположения плоских антенн А1–А3 относительно области формирования разрядных явлений показана на Рисунке 2. Антенны А1 и А3 располагались на поверхности земли «рядом» и «вдали» от места формирования разряда. Антенна 2 находилась на боковой стенке аэрозольной камеры примерно на высоте расположения групп ГМ.

Эксперименты показали, что введение модельных ГМ существенно увеличивало вероятность формирования повторных разрядов для ячеек обеих полярностей. Характерные для этого случая импульсы тока разряда и его электромагнитного излучения, регистрируемого антеннами, показаны на Рисунке 3 и Рисунке 4, соответственно.

Обобщение результатов экспериментов показало, что для отрицательных ячеек амплитуда импульса тока первого удара, амплитуды сигналов, регистрируемых антеннами, длительности импульсов, в среднем в 1,7–3,5 раза больше, чем для второго удара. Для положительно заряженных ячеек установлена противоположная тенденция – значения параметров повторного разряда на 25–45% больше, чем аналогичные для первого разряда в землю. Установлены зависимости между параметрами импульсов тока главного разряда и характеристиками сигналов, регистрируемых антеннами. В частности, наблюдается выраженная зависимость между амплитудами импульса тока разряда и максимальными значениями сигналов на антеннах для обеих полярностей ячеек (рисунок 5 и рисунок 6).

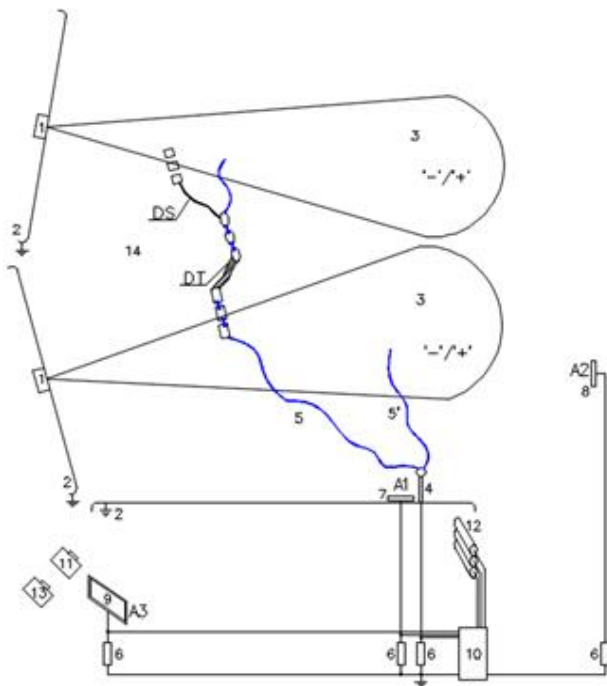


Рисунок 1. Схема эксперимента: 3 – ячейки, 4 – электрод, 5 и 5\* – разряды, 7–9 – антенны, 10 – осциллографы, 11 – цифровой фотоаппарат, 14 – группы модельных ГМ

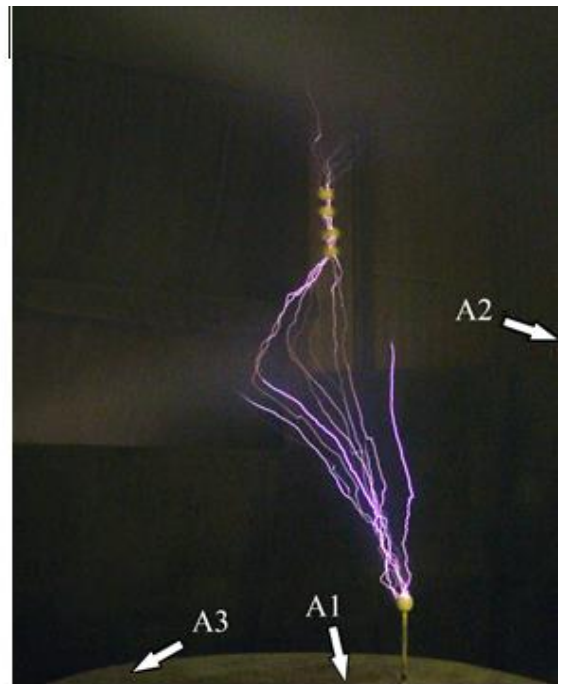


Рисунок 2. Характерная картина формирования разрядов между системой искусственных грозовых ячеек и землей и расположения плоских антенн

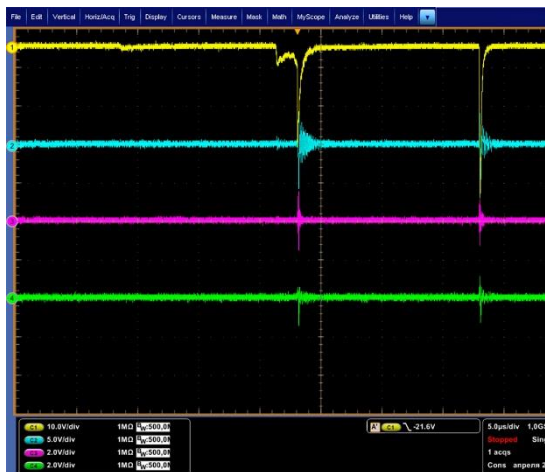


Рисунок 3. Осциллограммы тока (кривая 1, шунт 0,5 Ом) и сигналов, зарегистрированных антеннами A1–A3 (кривые 2–4) при отрицательно заряженных ячейках

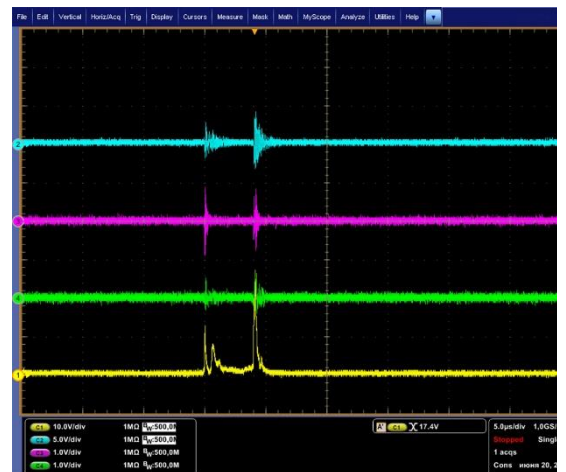


Рисунок 4. Осциллограммы тока (кривая 1, шунт 0,5 Ом) и сигналов, зарегистрированных антеннами A1–A3 (кривые 2–4) при положительно заряженных ячейках

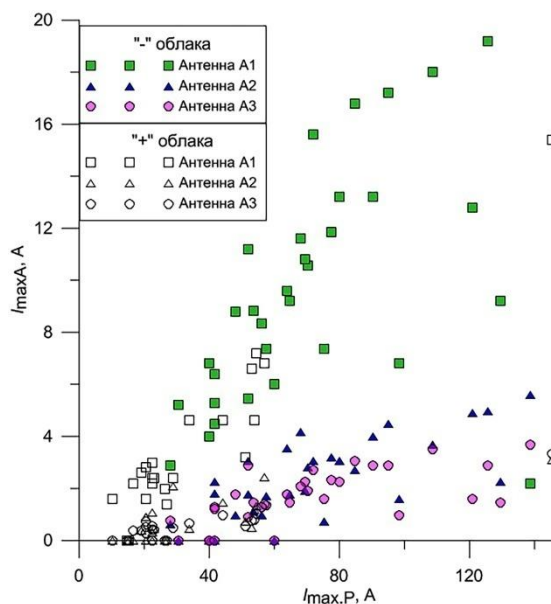


Рисунок 5. Зависимость амплитуды сигналов антенн А1–А3 от амплитуды импульса тока первого разряда

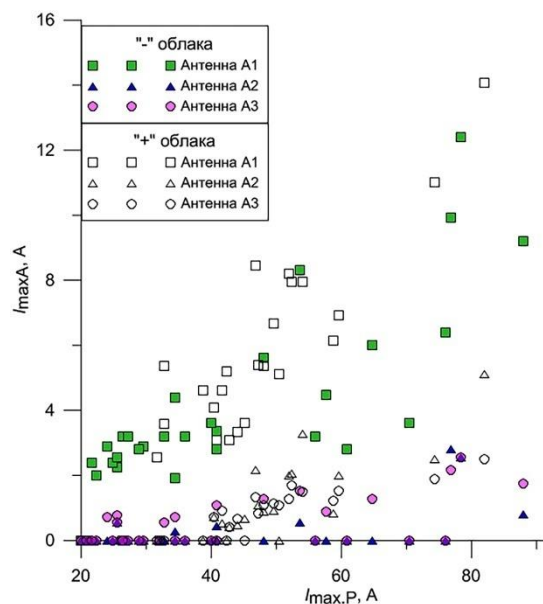


Рисунок 6. Зависимость амплитуды сигналов антенн А1–А3 от амплитуды импульса тока второго разряда

Использование полученных результатов для случаев электромагнитного излучения от разрядных явлений в естественных грозовых облаках, в том числе при наличии в них градовых массивов, обсуждается в докладе.

### Литература

1. Betz H.D., Schumann U., Laroche P. Lightning Principles, Instruments and Applications. Review of Modern Lightning Research. Eds.: Springer. 2009.
2. Nag A., Murphy M. J., Schulz W., Cummins K. L. Lightning location systems: Insights on characteristics and validation technique // Earth and Space Science. Vol. 2. 2015.
3. Changnon S. A. Temporal and spatial relations between hail and lightning // Journal of Applied Meteorology. Vol. 31, No. 6. 1992. P 587–604.
4. Wapler K. The life-cycle of hailstorms: Lightning radar reflectivity and rotation characteristics // Atmospheric Research. Vol. 193. 2017. P 60–72.
5. Temnikov A.G. Using of artificial clouds of charged water aerosol for investigations of physics of lightning and lightning protection. IEEE Conference Publications: Lightning Protection (ICLP). 2012. International Conference on. DOI: 10.1109/ICLP.2012.6344279. 2012.

### ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ЛЬДООБРАЗУЮЩИЕ СВОЙСТВА РЕАГЕНТА ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ РАЗЛИЧНЫХ МЕХАНИЗМОВ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Б.М. Хучунаев<sup>1</sup>, А.А. Ташилова<sup>1</sup>, Н.В. Теунова<sup>1</sup>, А.Х. Будаев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик  
buzgigit@mail.ru

Исследования, проведенные в последние годы в этом направлении, показывают, что рост ледяных частиц из паровой фазы зависит от напряженности электрического поля, заряда кристаллизующего ядра и от реализации того или иного механизма роста.

В работе [1] приводятся результаты исследований того, что одним из способов увеличения скорости образования стабильного ледяного зародыша является наличие электрического поля.

Интересные результаты по кристаллизации воды получены в работе [2]. Авторы показали, что при высокой напряженности электрического поля происходит кристаллизация тонкой пленки воды при комнатной температуре.

Для изучения влияния электрического поля на процессы образования кристаллов льда на частицах реагента были проведены эксперименты в лаборатории микрофизики облаков Высокогорного геофизического института. Аппаратура, используемая для проведения экспериментов, была описана в работе [3].

Для изучения влияния электрического поля на удельный выход льдообразующих ядер при реализации механизма конденсация-кристаллизация эксперименты проводились по стандартной методике, когда сжигание реагента AgI происходит в камере возгонки с дальнейшим переносом диспергированного аэрозоля в малую облачную камеру [4]. Напряженность электрического поля создавалась двумя параллельными пластинами, установленными в малой облачной камере, на которые подавалось напряжение 8 кВ; расстояние между пластинами – 0,2 м. Напряженность электрического поля держалось около  $4 \cdot 10^4$  В/м.

По экспериментальным данным построены зависимости удельного выхода кристаллов от температуры при наличии и отсутствии электрического поля (рисунок 1). На рисунке видно, что в обоих случаях с увеличением температуры удельный выход кристаллов уменьшается примерно с одинаковой скоростью: при увеличении температуры на  $1^\circ\text{C}$ , удельный выход кристаллов уменьшается на  $6 \cdot 10^{11}$ .

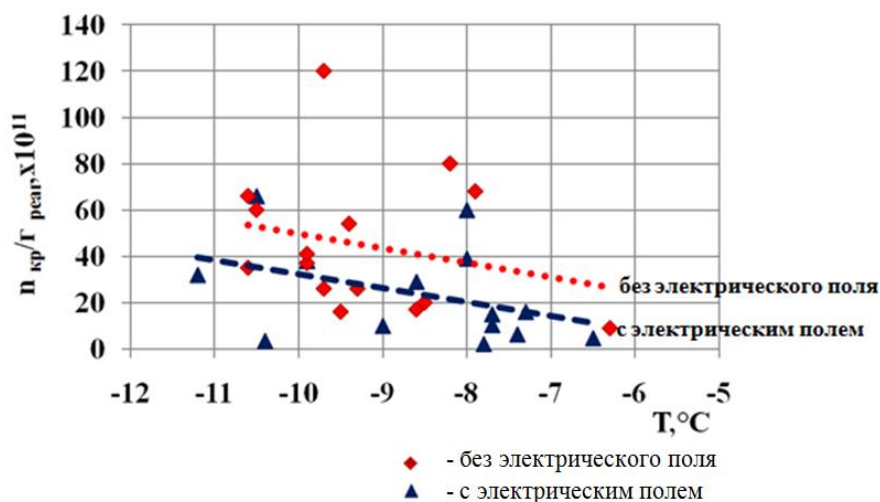


Рисунок 1. Зависимость удельного выхода кристаллов от температуры при наличии и отсутствии электрического поля

Эксперименты по определению влияния электрического поля на льдообразующие свойства реагента при реализации механизма погружения проводились в малой облачной камере. В камере возгонки сжигался реагент AgI, затем воздух с частицами реагента перекачивался (барботировался) через емкость с дистиллированной водой, в результате чего частицы реагента оставались в воде. Подготовленная таким образом вода разбрызгивалась в малой облачной камере с помощью установки для диспергирования капель [4]. Скорость барботирования составляла один литр в минуту. Напряженность электрического поля оставалась такой же, как и в предыдущем эксперименте.

Результаты экспериментов по определению удельного выхода частиц реагента при наличии и отсутствии электрического поля приведены на рисунке 2.

Как видно из рисунка при реализации механизма погружения напряженность электрического поля до  $4 \cdot 10^4$  В/м не влияет на процессы образования кристаллов льда на частицах реагента.

Для реализации контактного механизма кристаллизации исследуемый реагент помещался в корзиночку-спираль из нихрома, расположенную в камере возгонки реагента и сжигался. На дне камеры возгонки устанавливались стеклянные подложки, на которые происходило осаждение реагента.

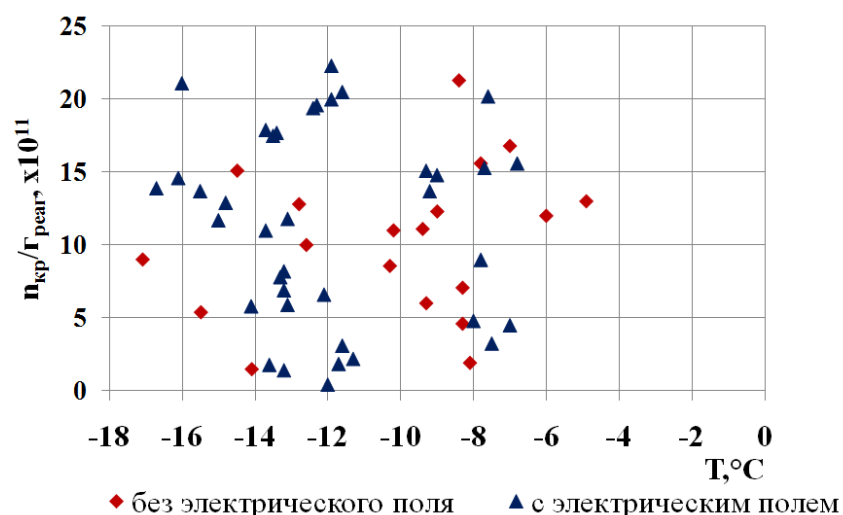


Рисунок 2. Зависимость удельного выхода кристаллов от температуры при наличии и отсутствии электрического поля в результате реализации механизма погружения

Затем, подложки с осажденными частицами реагента переносили в малую облачную камеру, где с помощью парогенератора относительная влажность доводилась до 100%. После этого с помощью устройства для диспергирования в камере разбрызгивались капли. Капли под действием силы тяжести оседали на стеклянные подложки с частицами реагента и кристаллизовались. По такой схеме был реализован контактный механизм кристаллизации.

Ледяные кристаллы подсчитывались с помощью автоматизированной системы, затем определялся удельный выход кристаллов [4].

Результаты экспериментов приведены в таблице 1.

Таким образом, при реализации контактного механизма удельный выход льдообразующих ядер составил  $\sim 10^8$  (таблица 1), что на 2–3 порядка меньше, чем при сухом введении и реализации механизма погружения ( $\sim 10^{11}$ , рисунок 1, 2). Необходимо отметить, что порядок удельного выхода льдообразующих ядер формируется только в зависимости от механизма кристаллизации и не зависит от наличия или отсутствия электрического поля.

Таблица 1

**Удельный выход кристаллов при наличии и отсутствии электрического поля в результате реализации контактного механизма**

При отсутствии электрического поля		При наличии электрического поля	
Температура в камере, °C	Удельный выход, г <sup>-1</sup>	Температура в камере, °C	Удельный выход, г <sup>-1</sup>
-14,1	0,67 x 10 <sup>8</sup>	-12,4	1,15 x 10 <sup>8</sup>
-14,4	1,53 x 10 <sup>8</sup>	-13,3	11,0 x 10 <sup>8</sup>
-13,0	0,75 x 10 <sup>8</sup>	-16,0	2,38 x 10 <sup>8</sup>
-14,1	3,73 x 10 <sup>8</sup>	-13,5	12,3 x 10 <sup>8</sup>
-13,2	2,65 x 10 <sup>8</sup>	-15,4	0,34 x 10 <sup>8</sup>
-14,5	0,13 x 10 <sup>8</sup>		
-14,1	0,18 x 10 <sup>8</sup>		
Осредненная температура, °C	Осредненный удельный выход, г <sup>-1</sup>	Осредненная температура, °C	Осредненный удельный выход, г <sup>-1</sup>
-13,9	1,4 · 10 <sup>8</sup>	-14,1	5,4 · 10 <sup>8</sup>

В результате проведенных экспериментов получены следующие результаты:

- удельный выход льдообразующих ядер в облачной камере при реализации механизма конденсация – кристаллизация (сухое введение) уменьшается при наличии электрического поля. При этом, просветление облачной среды между пластинами с напряженностью электрического поля происходит на 10–20 с 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 удельный выход льдообразующих ядер на 2–3 порядка меньше, чем при сухом введении.

### Литература

1. Ronen Zangi, Alan E. Mark Electrofreezing of confined water. The Journal of Chemical Physics. 120. 2004. P. 7123–7130.
2. Choi E.M., Yoon Y.H., Lee S., Kang H. Physical review letters. 2005. APS Freezing transition of interfacial water at room temperature under electric fields с сайта uni-leipzig.de
3. Хучунаев Б.М., Будаев А.Х., Теунова Н.В., Ташилова А.А., Панаэтов В.П. Влияние электрического поля на процессы образования кристаллов льда на частицах реагента на основе AgI. Доклады Всероссийской конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, г. Нальчик, 23–27 октября 2017 г., Ч. 2. С. 232–237.
4. Отчет о научно-исследовательской работе «Комплексные исследования закономерностей формирования макро- и микроструктурных характеристик мощных конвективных облаков и разработка новых принципов воздействия на процессы образования града». Нальчик. 2016. с. 235.

## ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ПРОЦЕССЫ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ КАПЕЛЬ ВОДЫ В ПОТОКЕ ВОЗДУХА

С.Б. Балкарова<sup>1</sup>, Л.Т. Созаева<sup>2</sup>, С.О. Геккиева<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Кабардино-Балкарский государственный университет, г. Нальчик

<sup>2</sup>Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик  
balkarova-07@mail.ru

Несмотря на большой объем исследований, проведенных в данной области, многие вопросы, связанные с образованием и ростом града, до настоящего времени остаются недостаточно изученными. К ним относятся условия образования зародышей града и их последующего роста в облаках. Поэтому для восстановления картины процесса образования и роста града применяются лабораторные исследования в аэродинамической трубе [1]. В ходе проведения эксперимента капли дистиллированной воды размером 3÷6 мм подвешивались в рабочей зоне аэродинамической трубы. Капли удерживались потоком воздуха, скорость которого достигала 6÷9 м/с. Температура потока воздуха по смоченному термометру равнялась 7.5÷18.75 °С. Исследовалась зависимость температуры замерзания капли от времени. На рисунке 1а изображен типичный вид кривой  $T = f(\tau)$ , полученный на основе исследования капель размером более 3 мм в аэродинамической трубе при отсутствии электрического поля.

Из рисунка 1 видно, что процессы охлаждения (участок 3) и затвердевания (участок 2) при отсутствии (кривая а) и наличии (кривая б) электрического поля в обоих опытах практически совпадают. При охлаждении капли за счет дендритной кристаллизации образуется ледяная корка на капле толщиной, определяемой по формуле:

$$\Delta r = \frac{R c_{ж} (T_{пл} - T_n)}{3 L_{пл}} \quad (1)$$

где  $c_{ж}$  – теплоемкость воды;  $T_n$  – температура переохлаждения воды;  $T_{пл}$  – температура кристаллизации (фазового перехода);  $L_{пл}$  – скрытая теплота фазового перехода;  $R$  – радиус затвердевшей частицы. В этот момент выделяется скрытая теплота фазового перехода, и температура капли резко (скачкообразно) повышается до 0 °С.

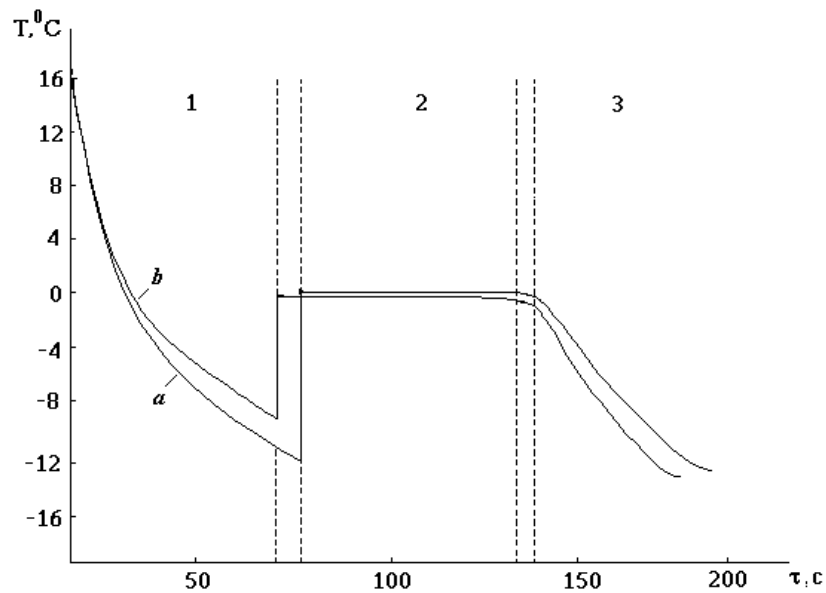


Рисунок 1. Зависимость температуры замерзания капли от времени:  
 кривая (а) – при отсутствии электрического поля;  
 кривая (б) – при наличии электрического поля;  
 1 – охлаждение капли воды; 2 – затвердевание; 3 – охлаждение замерзшей капли

Задача о затвердевании капли воды сводится к задаче о затвердевании шара при граничных условиях третьего рода, где за температуру среды принимается температура мокрого термометра потока воздуха, а в качестве коэффициента теплоотдачи принимается обобщенный коэффициент теплоотдачи, который учитывает перенос теплоты с поверхности частицы и находится из эксперимента. Вследствие этого была разработана методика обработки экспериментальных данных, согласно которой для определения полного времени затвердевания каплей воды  $\tau_0$  в аэродинамической трубе используется следующая формула:

$$\tau_0 = \frac{\rho_{\text{л}} \cdot L_{\text{пл}}}{6\lambda_{\text{л}}(T_{\text{пл}} - T_{\text{н}})} \cdot \left( R - \frac{2\lambda_{\text{л}}R}{\alpha^*} \right) \cdot \left( 1 + \frac{c_{\text{л}}(T_{\text{пл}} - T_{\text{н}})}{L_{\text{пл}}} \right) \cdot \left( 1 + \frac{c_{\text{ж}}(T - T_{\text{пл}})}{L_{\text{пл}}} \right) \quad (2)$$

где  $c_{\text{л}}(T_{\text{пл}} - T_{\text{н}})/L_{\text{пл}}$  – критерий Стефана;  $1 + c_{\text{ж}}\Delta T_{\text{н}}/L_{\text{пл}}$  – множитель, учитывающий переохлаждение капли перед затвердеванием;  $L_{\text{пл}}$  – теплота затвердевания;  $T_{\text{н}}$  – температура переохлаждения воды;  $T_{\text{пл}}$  – температура кристаллизации (фазового перехода);  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала термодары;  $\alpha^*$  – обобщенный коэффициент теплоотдачи;  $\rho_{\text{л}}$  – плотность льда;  $c_{\text{л}}$  – массовая теплоемкость льда;  $c_{\text{ж}}$  – теплоемкость воды;  $T$  – температура затвердевшей капли. Следует отметить, что скачок температуры при наличии постоянного электрического поля на  $(2 \div 4)^\circ\text{C}$  выше, чем при его отсутствии, а время ожидания начала затвердевания тоже меньше, чем при наличии электрического поля.

На рисунке 2 приводятся кривая среднего времени ожидания момента начала замерзания от температуры по результатам наших лабораторных экспериментов.

Оказалось, что зависимость температуры замерзания капли  $T$  от времени  $\tau$  описывается полиномиальной функцией:

$$T = -2 \cdot 10^{-11} \tau^4 + 3 \cdot 10^{-8} \tau^3 + 1 \cdot 10^{-5} \tau^2 - 0.0569 \tau + 15.531 \quad (3)$$

На основе статистической обработки экспериментальных данных было получено уравнение множественной регрессии, связывающее время полного замерзания левитирующих каплей воды от диаметра  $d$  и температуры среды  $T$ :

$$t = -0.417 + 2.3 \cdot 10^{-2} d - 0.188 T \quad (4)$$



Коэффициент корреляции уравнения имеет значение  $R = 0,934$ , а коэффициент детерминации  $D = 0,869$ . Как известно, чем ближе  $D$  к 1, тем сильнее зависимость, в нашем случае, между временем полного замерзания и диаметром капли и температурой среды связь сильная.

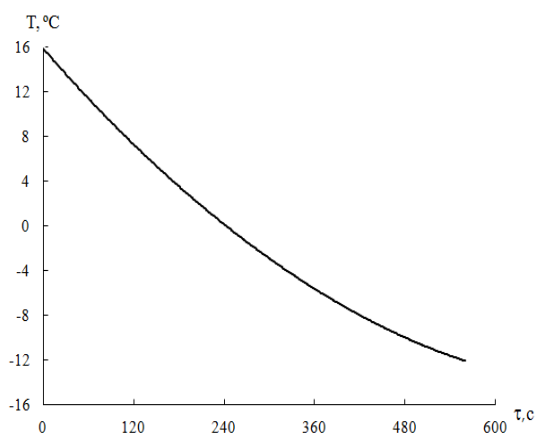


Рисунок 2. Зависимость среднего времени ожидания момента начала замерзания от температуры  $T$

В работе получены результаты, полезные при теоретическом и лабораторном моделировании механизмов образования и роста градин:

- температурно-временные зависимости продолжительности кристаллизации левитирующих капель воды в потоке воздуха при отсутствии и наличии электрического поля;
- уравнение множественной регрессии, связывающее время полного замерзания в потоке воздуха капель, их размеры и температуру среды.

Особого внимания заслуживает результат о смещении температуры замерзания капли в область более высоких значений температур на  $(2\div 4^{\circ}\text{C})$  при наличии электрического поля, что может найти применение в вопросах активного воздействия кристаллизующим реагентом на грозоградные облака и туманы.

### Литература

1. Тлисов М.И., Балкарова С.Б., Калов Р.Х. Лабораторное моделирование влияния электрического поля на процесс кристаллизации дождевых капель // Сборник научных трудов 5-ой Российской конференции по атмосферному электричеству. Том I. Владимир. 2003. С. 226–229.

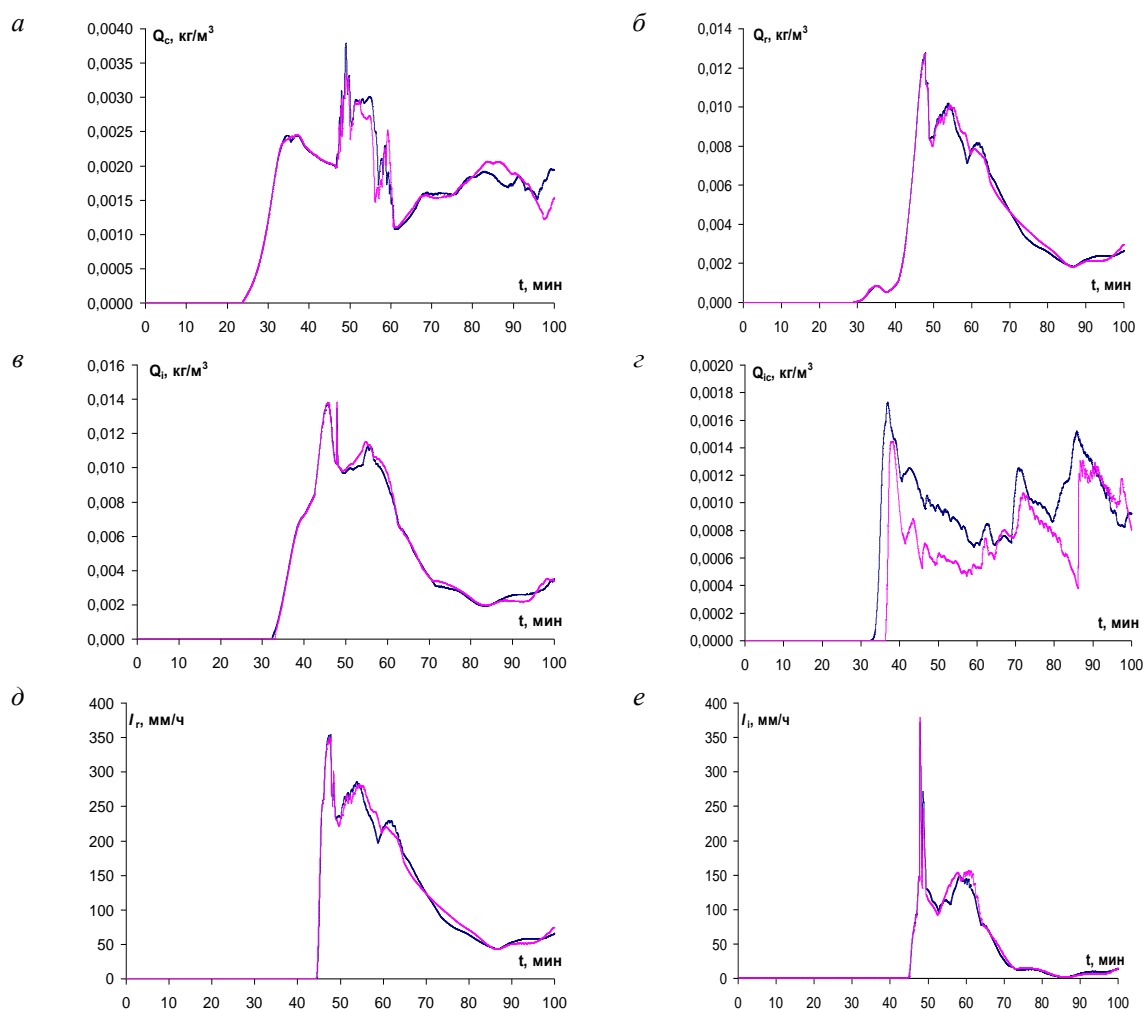
**СЕКЦИЯ 10. Математическое моделирование электрических процессов  
в атмосфере**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ОСАДКООБРАЗОВАНИЯ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ  
СТРУКТУРЫ ГРОЗО-ГРАДОВОГО КУЧЕВО-ДОЖДЕВОГО ОБЛАКА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ  
ТРЕХМЕРНОГО ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

*Н.Е. Веремей<sup>1</sup>, Ю.А. Довгалоук<sup>1</sup>, М.Л. Торопова<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>ГГО им. А.И. Воейкова, г. Санкт-Петербург  
veremey@gmail.com

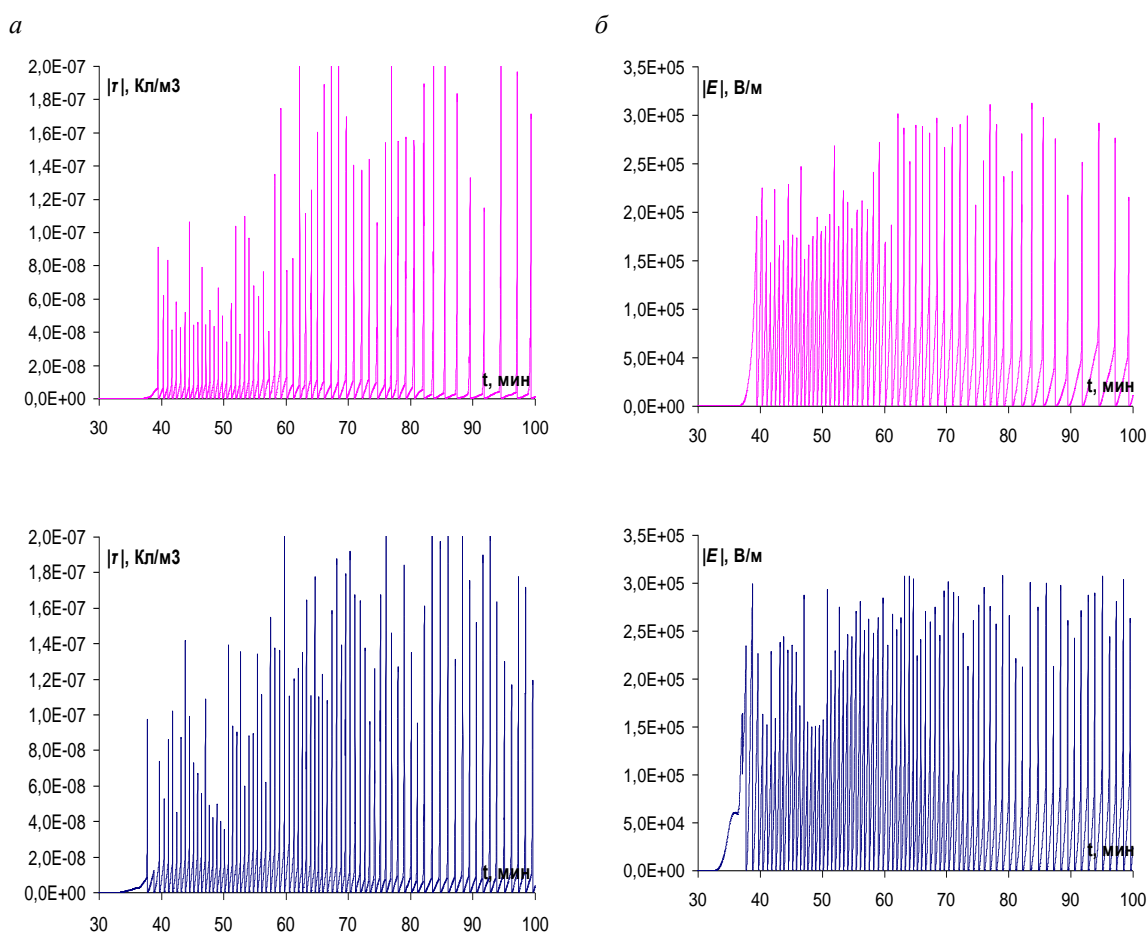
Методом численного моделирования проведен анализ необычно интенсивного грозо-градового процесса, наблюдавшегося в Санкт-Петербурге 22.07.2017 г. Для расчетов использовалась нестационарная трехмерная модель конвективного облака. Исследовалась роль гетерогенного замерзания облачных капель в осадкообразовании и электризации облака. Сравнивались два случая: без учета (А) и с учетом (Б) указанного процесса. Временной ход максимумов характеристик облака и осадков представлен на рисунке 1.



*Рисунок 1. Временной ход высоты водности облачных капель (а), водности дождевых капель (б), ледности ледяных частиц осадков (в), ледности кристаллов (г), а также максимальной по площади интенсивности дождя (д) и града (е) у подстилающей поверхности.*

*Красная и синяя кривые – случаи А и Б соответственно*

На рисунке 2 приведен временной ход пространственного максимума объемной плотности электрического заряда  $\tau$  и напряженности электрического поля  $E$ . Видно, что когда в облаке и под ним накапливается достаточная масса осадков (при  $t > 33$  мин), начинается быстрая электризация облачных элементов и разделение зарядов, приводящее к увеличению  $E$ . Основные механизмы электризации облачных элементов – поляризационный, а также разделение зарядов при столкновениях ледяных частиц. В случае Б частота разрядов оказывается заметно выше, чем в случае А. Это подтверждает важную роль льдообразования в процессе электризации облака.



*Рисунок 2. Временной ход максимального по высоте значения модуля объемной плотности электрического заряда (а) и модуля напряженности электрического поля (б). Красная и синяя кривые (на отдельных графиках) – случаи А и Б соответственно*

Большой интерес представляют результаты моделирования зарядовой структуры облака. На рисунке 3 приведены вертикальные разрезы профиля  $\tau$  и вертикальной составляющей  $E$  для случаев А и Б. Здесь же приведен вертикальный разрез профиля суммарного содержания облачных капель и ледяных кристаллов (без учета осадков). Рассматриваются моменты времени, предшествующие первому молниевому разряду на несколько минут. Видно, что учет гетерогенного замерзания облачных капель приводит к инвертированию зарядовой структуры облака. Этот эффект был ранее выявлен экспериментально [1] и подтвержден нами с помощью полутрехмерной модели [2]. С помощью трехмерной же модели данный эффект получен нами впервые.

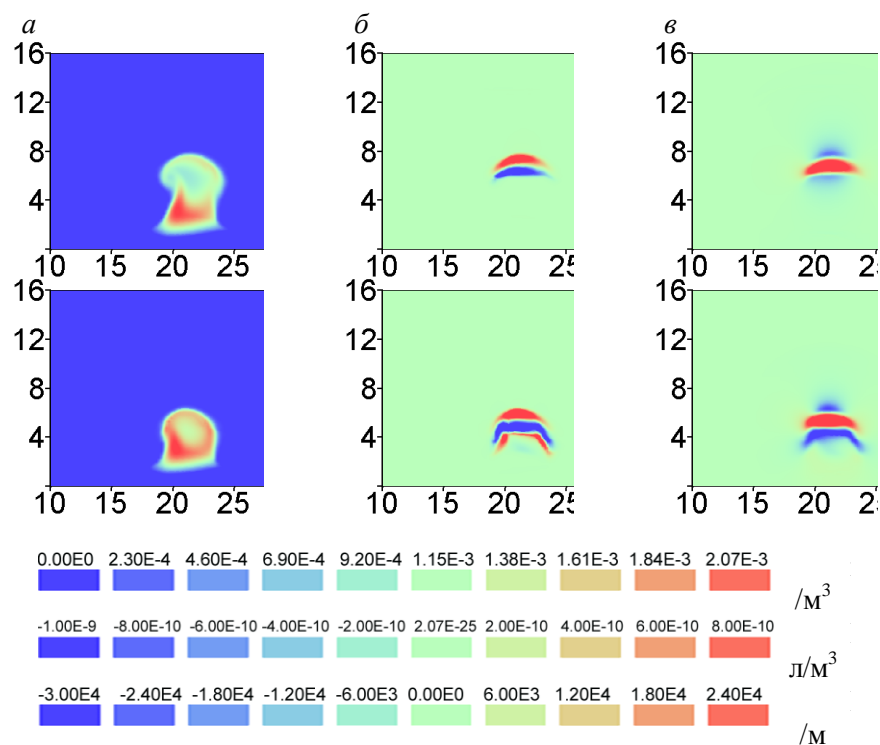


Рисунок 3. Вертикальный разрез профиля: суммарной водности облачных капель и ледности кристаллов (а), объемной плотности электрического заряда (б) и вертикальной составляющей вектора напряженности электрического поля (в) для случаев А ( $t=38,3$  мин) и Б ( $t=36,7$  мин) в плоскости XZ ( $Y=10$  км)

Работа подготовлена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 17–05–00965, БРИКС\_Т 18–55–80020).

### Литература

1. Pawar S.D., Gopalakrishnan V., Murugavel P., Sinkevich A. Deen Mani La. 2014. Effects of environmental conditions on inducing charge structures of thunderstorms over Eastern India // Earth, Planets and Space. 66:54. P. 2–14. doi:10.1186/1880–5981–66–54.
2. Веремей Н.Е., Довгалоюк Ю.А., Гопалакришнан В., Комаровских К.Ф., Муругавел П., Павар С.Д., Синькевич А.А. 2015. Исследование влияния сильного аэрозольного загрязнения атмосферы на динамику электрической структуры кучево-дождевого облака методом численного моделирования // Метеорология и гидрология. № 12. С. 5–18.

### АЛГОРИТМ ДЛЯ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ГРОЗОВЫХ ПРОЦЕССОВ В КОНВЕКТИВНОМ ОБЛАКЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

Е.Н. Станкова<sup>1</sup>, Е.В. Хватков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный университет (СПбГУ), г. Санкт-Петербург  
e.stankova@spbu.ru

Для оперативного прогнозирования таких опасных явлений, как гроза, до сих пор используются полуэмпирические методы Пескова, Ягудина, Решетова, Лебедевой и др. [1], основанные на расчете комплексных коэффициентов, являющихся функциями некоторых параметров облака, которые определяются либо с помощью синоптической карты, либо с помощью аэрологической диаграммы. Использование с целью прогноза современных численных моделей облаков ограничивается, с одной стороны, отсутствием вычислительных ресурсов, которые требуются для реализации, например, современных трехмерных моделей с подробным описанием микрофизических и электрических характеристик облака. Такие модели с наибольшей степенью подробности описывают динамические, микрофизические и

электрические процессы в облаках во всей сложности их взаимодействия и, следовательно, должны обеспечивать наилучшее качество прогнозов. Однако их использование для оперативного прогнозирования в небольших метеорологических центрах, работающих, например, в аэропортах, невозможно. С другой стороны, использование моделей меньшей размерности и меньшей функциональности, где, например, отсутствует блок, описывающий электрические процессы, ставит задачу определения вероятности развития грозы только по результатам анализа расчетных значений динамических и микрофизических характеристик облака, которые являются выходными данными модели.

В настоящее время адекватным инструментом для такого рода анализа является машинное обучение, концепция которого заключается в работе с большими объемами данных и выявлении на их основе различных взаимосвязей и закономерностей – восстановлении зависимостей по эмпирическим данным. Использование методов машинного обучения в метеорологии носит двойственный характер. С одной стороны, разрабатываются «чистые» модели машинного обучения, где на основе данных наблюдений, полученных на метеостанциях, центрах погоды и т. д., прогнозируются определенные параметры атмосферы. С другой стороны, методы машинного обучения используются для верификации моделей путем установления взаимосвязей между модельными прогнозами и фактической метеорологической ситуацией.

В нашей работе использовался, так называемый «гибридный» подход, сочетающий методы численного моделирования и машинного обучения для выявления зависимости динамических, микрофизических и электрических параметров конвективных облаков. Для проведения численных расчетов использовалась полуторамерная нестационарная модель конвективного облака с подробным описанием микрофизических процессов [1–3], которая позволяет получать динамические и микрофизические характеристики конвективного облака с высокой степенью достоверности без больших вычислительных затрат. В качестве входных данных модели использовались данные радиозондирования атмосферы (зондировки), полученные с помощью использования комплексной информационной системы, предназначенной для формирования входных данных моделей конвективных облаков [4–6]. Всего было получено 676 зондировок: 196 из них были собраны, когда никакого явления не наблюдалось, 220 – когда наблюдалась гроза, 174 – ливень, 86 – слабый дождь. Для моделирования развития облака в случае наличия в подоблачном слое слоев температурной инверсии и изотермии (задерживающих слоев) исходные данные были подвергнуты предобработке (препроцессингу). Зондировки были модифицированы путем нахождения высоты уровня конденсации с помощью формулы Ипполитова [7, 8] с последующим проведением сухо адиабатического градиента до этого уровня. Использование машинного обучения предполагает формирование обучающего множества. Для этой цели все расчеты по модели были автоматизированы, что позволило проводить обработку сразу группы зондировок вместо работы с каждой из них по отдельности.

Для выявления среди выходных данных модели наиболее значимых признаков, хорошо коррелирующих с целевой переменной, использовался Recursive Feature Elimination алгоритм с автоматическим выбором признаков (и их количества) посредством техники оценки результата методом скользящего окна для метода опорных векторов с линейным ядром. Использовались следующие методы машинного обучения: метод опорных векторов, логистическая регрессия, гребневая регрессия, алгоритм k ближайших соседей (k-nearest neighbor algorithm) в сочетании с алгоритмом AdaBoost. Для реализации всех методов машинного обучения использовалась библиотека scikit-learn. Точность использования методов составила: логистическая регрессия – 94,6%, гребневая регрессия – 95,0%, метод опорных векторов – 96,1%, алгоритм k ближайших соседей и алгоритм AdaBoost – 99%. Алгоритм реализации прогноза грозы предполагает использование оперативных данных радиозондирования в качестве входных данных, по которым с помощью модели производится расчёт возможного развития облака. Выходные данные анализируются по высоте и времени для выбора оптимальных параметров облака, которые могут быть использованы как признаки для вычисления значения решающих функций в методах машинного обучения. Если хотя бы три из четырех решающих функций определяют наличие опасного конвективного явления, можно давать соответствующий прогноз.

## Литература

1. *Абрамович К.Г., Васильев А.А., Булдовский Г.С., Борисова В.В., Глазунов В.Г., Горлах И.А., Лешкевич Т.В., Ляхов А.А., Рацимор М.Я., Решетов Г.Д., Рубинштейн М.В., Шакина Н.П.* Руководство по

прогнозированию метеорологических условий для авиации. Под редакцией К.Г. Абрамович, А.А. Васильева. М.: Госкомгидромет.С. 198–308

2. *Raba H.O., Stankova E.H.* Исследование влияния компенсирующего нисходящего потока, сопутствующего конвективным течениям, на жизненный цикл облака с помощью полуторомерной модели с двумя цилиндрами // Труды ГГО. 2009. Вып.559. С. 192–209.

3. *Raba N., Stankova E.* On the Possibilities of Multi-Core Processor Use for Real-Time Forecast of Dangerous Convective Phenomena // LNCS 2010. V. 6017. P. 130–138.

4. *Raba N., Stankova E.* On the Problem of Numerical Modeling of Dangerous Convective Phenomena: Possibilities of Real-Time Forecast with the Help of Multi-core Processors // LNCS 2011. V. 6786. P. 633–642.

5. *Dmitry A. Petrov and Elena N. Stankova* Use of Consolidation Technology for Meteorological Data Processing // LNCS 2014. V. 8579. P. 440–451.

6. *Станкова Е.Н., Петров Д.А.* Комплексная информационная система, предназначенная для формирования входных данных моделей конвективных облаков // Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления. Серия 10. 2015. Вып. 3. С. 83–95.

7. *Dmitry A. Petrov and Elena N. Stankova* Integrated Information System for Verification of the Models of Convective Clouds // LNCS 2015. V. 9158. P. 321–330.

8. *Мамвеев Л.* Курс общей метеорологии. Физика атмосферы Издание второе, переработанное и дополненное. Л.: Гидрометеиздат. 1984. с. 751.

## УПРОЩЕННАЯ МОДЕЛЬ РОСТА ЗАРЯДА КАПЕЛЬ И ЛЕДЯНЫХ ЧАСТИЦ ВО ФРАКТАЛЬНОЙ ОБЛАЧНОЙ СРЕДЕ

*Т.С. Кумыков<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Институт прикладной математики и автоматизации КБНЦ РАН, г. Нальчик  
macist20@mail.ru

Теоретическим исследованием роста заряда облачных частиц занимались многие ученые, которые в своих работах не учитывали фрактальность облачной среды. При исследовании грозовых облаков одним из важных факторов, влияющих на различные процессы внутри облака, является электрический заряд облачных частиц [1–4]. Как известно, зарядами могут обладать капли, градины, аэрозоли, космическая пыль и т. д. [5]. Наличие заряда у облачных частиц приводит к изменению граничных условий электродинамики применяемое к исследованию грозовых облаков. При этом важным звеном в исследовании заряженных частиц в облаках является учет фрактальности облачной среды, так как облака имеют фрактальную природу, т. е. самоподобно – самоафинную фрактальную структуру, и в целом могут формироваться из фрактальных кластеров. Поэтому исследование заряда облачных частиц с использованием фрактально-динамического подхода [6] носит актуальный характер. Исследование различных геопроцессов в облаках с учетом фрактальности среды можно проводить с использованием метода дробного интегрирования [7, 8], который позволит избежать численного решения сложных систем. В настоящее время можно сказать, что описание процессов в облаках невозможно без применения понятия фрактала. Фрактальная среда представляет собой среду, распределенную в пространстве, массовая размерность которой меньше размерности заполняемого пространства. Учет этого фактора принципиально меняет уравнение динамики заряда облачных частиц, превращая его в дифференциальное уравнение динамики заряда частиц дробного порядка. В работе рассмотрен рост заряда облачных частиц, предполагая, что процесс протекает в униполярно заряженной части облака. При этом считали, что процесс зарядки частиц, определяемый формулой [5]:

$$Q = \varphi r, \quad (1)$$

где  $Q$  – заряд частицы,  $\varphi$  – электрокинетический потенциал,  $r$  – радиус частицы, приемлемым.

Учитывая, что рост облачных частиц может протекать в основном под влиянием двух механизмов: в случае капли – конденсации и коагуляции; в случае ледяных частиц – сублимации водяного пара и коагуляции, а также используя производную по Капуто  $\partial_{at}^\alpha u(t)$  и понятие эффективной скорости изменения некоторой физической величины  $Q$ , определяемой в виде

$$\left\langle \frac{dQ}{dt} \right\rangle = \frac{1}{\tau} D_{0t}^{\alpha-1} \frac{dQ(t)}{dt} = \frac{1}{\tau} \partial_{0t}^{\alpha} Q(t), \quad 0 < \alpha < 1, \quad (2)$$

где  $D_{0t}^{\alpha}$  – оператор дробного интегро-дифференцирования Римана–Лиувилля, получено уравнение динамики заряда облачных частиц учитывающее фрактальность облачной среды:

для капель:

$$Q_d = Q_{d_0} E_{\alpha,1}(\beta t^2), \quad 0 < \alpha < 1, \quad (3)$$

где  $E_{\alpha,1}(\beta t^2) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\beta^i t^{2i}}{\Gamma(\alpha i + 1)}$  – функция типа Миттаг-Леффлера,  $\beta = \tau \left[ \frac{\varepsilon D}{R_d^2} + W R_d \right]$ ,  $\tau$  – некоторое характерное время,  $R_d$  – размер капли,  $\varepsilon$  – безразмерное абсолютное пересыщение,  $D$  – коэффициент диффузии водяного пара в воздухе,  $W = E s n \Delta v$  – вероятность столкновения капель,  $E$  – коэффициент соударения,  $s$  – эффективная площадь соударения,  $n$  – число частиц с радиусом  $r$  в единице объема,  $\Delta v$  – скорость падения частиц;

для ледяных частиц:

$$Q_i = Q_{i_0} E_{\alpha,1}(\gamma t^2), \quad 0 < \alpha < 1, \quad (4)$$

где  $E_{\alpha,1}(\gamma t^2) = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\gamma^i t^{2i}}{\Gamma(\alpha i + 1)}$  – функция типа Миттаг-Леффлера,  $\gamma = \tau \left[ \frac{3cfB}{R_i^2 \rho} + W R_i \right]$ ,  $f$  – ветровой множитель,  $c$  – емкость,  $B$  – показатель Мейсона (вычислено Б. Дж. Мейсоном),  $R_i$  – размер ледяной частицы,  $\rho$  – плотность льдинки.

Уравнения (3) и (4) описывают динамику заряда капель и ледяных частиц, в которых учитывается фрактальность облачной среды. Полученные формулы могут быть использованы для расчета изменения заряда облачных частиц под влиянием процессов конденсации, сублимации и коагуляции с заданными параметрами с учетом фрактальности среды. Проведенные численные эксперименты для оценки влияния фрактальности среды на заряд облачных частиц при различных сочетаниях микрофизических параметров показали общую зависимость заряда частиц от параметра фрактальности среды.

### Литература

1. Аджиев А.Х., Калов Р.Х., Сижажев С.М. Развитие гроз в конвективных облаках // Труды ВГИ. 2001. В. 91. С. 90–99.
2. Аджиев А.Х., Куповых Г.В. Атмосферно-электрические явления на Северном Кавказе Таганрог: Таганрогский государственный радиотехнический университет, 2004. 122 с.
3. Аджиев А. Х., Шапавалов А. В. Физикоматематическое моделирование электризации конвективных облаков при естественном их развитии // Труды ВГИ. 1991. В. 83. С. 3–12.
4. Мареев Е. Л., Трахтенгерц В. Ю., Иудин Д. И. и др. Современные проблемы исследования грозового электричества // Проектирование и технология электронных средств. 2004. С. 7–16.
5. Шишкин Н.С. Облака, осадки и грозное электричество. Л: Гидрометеиздат. 1964. 402 с.
6. Iudin D.I., Trakhtengerts V.Y., Hayakawa M. Fractal dynamics of electric discharges in a thundercloud // Phys. Rev. E. 2003. V. 68. P. 016601.
7. Кумыков Т.С. Динамики заряда облачных капель во фрактальной среде // Математическое моделирование. 2016. №12. С. 56–62.
8. Кумыков Т.С. Математическое моделирование формирования разности потенциалов при кристаллизации облачных капель с учетом фрактальности среды // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математическое моделирование и программирование. 2017. Т. 10, №3. С. 16–24.

### МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

Г.В. Куповых<sup>1</sup>, Т.В. Кудринская<sup>1</sup>, Д.В. Тимошенко<sup>1</sup>, А.Г. Клово<sup>1</sup>, С.С. Свидельский<sup>1</sup>, В.С. Литвинова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Южный федеральный университет, г. Таганрог  
kupovykh@sfnedu.ru

Электродинамическое состояние приземного слоя определяется так называемым электродным эффектом [2, 3]. В зависимости от метеорологического режима атмосферы рассматриваются два крайних случая: классический и турбулентный электродный эффект.

Присутствие аэрозольных частиц в атмосфере, являющихся стоком для аэроионов, оказывает влияние на электродный эффект, и при достаточно больших концентрациях электрическое состояние приземного слоя может определяться только тяжелыми ионами, образовавшимися за счет взаимодействия аэрозоля с аэроионами [3].

Для горизонтально-однородного турбулентного приземного слоя, свободного от аэрозольных частиц, электродинамическая модель имеет вид [2, 3]:

$$\frac{\partial n_{1,2}}{\partial t} \pm \frac{\partial}{\partial z} \left( b_{1,2} \cdot n_{1,2} E - D_T(z,t) \frac{\partial n_{1,2}}{\partial z} \right) = q - \alpha n_1 n_2; \quad \frac{\partial E}{\partial z} = 4\pi e(n_1 - n_2), \quad (1)$$

где  $n_{1,2}$  – объемная концентрация положительных и отрицательных аэроионов,  $b_{1,2}$  – их подвижности,  $E(z)$  – напряженность электрического поля,  $q(z)$  – скорость ионообразования,  $\alpha$  – коэффициент рекомбинации,  $D_T(z,t)$  – коэффициент турбулентной диффузии,  $e$  – элементарный заряд. Для анализа системы (1) представим ее в безразмерной форме:  $t' = t/T$ ,  $z' = z/l_1$ ,  $n'_{1,2} = n_{1,2}/n_\infty$ ,  $E' = E/E_\infty$ ,  $n_\infty = \sqrt{q_\infty/\alpha}$ ,  $l_1 = D_T \cdot \tau$ ,  $\tau = (q_\infty \cdot \alpha)^{-1/2}$ .

Получаем:

$$\frac{\tau}{T} \frac{\partial n'_{1,2}}{\partial t'} \pm \frac{\partial}{\partial z'} \left( z' \frac{\partial n'_{1,2}}{\partial z'} \right) \pm \xi_{1,2} \frac{\partial}{\partial z'} (n'_{1,2} E') = \frac{q}{q_\infty} - n'_1 n'_2; \quad \frac{\partial E'}{\partial z'} = \gamma (n'_1 - n'_2), \quad (2)$$

Характерное время протекания гидродинамических процессов ( $T$ ) составляет несколько часов, тогда как время протекания электрических процессов ( $\tau$ ) равно 250 с ( $q = 10^7 \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$  и  $\alpha = 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$ ). Система уравнений (2) характеризуется безразмерными параметрами, которые могут служить критериями применения той или иной модели электродного эффекта в зависимости от физических и метеорологических условий.

$$\xi_{1,2} = \frac{|b_{1,2}| \cdot E_\infty \cdot \tau}{l_1}, \quad \gamma = 4\pi e l_1 \frac{n_\infty}{E_\infty}, \quad (3)$$

1. Очевидно, в случае  $|\gamma| \ll 1$ , электрическим полем, создаваемым электрическим объемным зарядом, можно пренебречь, а это означает отсутствие электродного эффекта.

2. Когда параметр  $\xi_{1,2} \geq 1$ , пространственно-временное распределение аэроионов обусловлено только электрическими силами, т.е. имеет место, классический электродный эффект [2, 3]. Высота классического электродного слоя обычно составляет 3–5 м. При усилении электрического поля значения электродного эффекта ( $E_0/E_\infty$ ) практически не меняются, а толщина электродного слоя и, следовательно, масштаб распределения его характеристик увеличивается. Объемный электрический заряд вблизи поверхности земли положителен. Отрицательный объемный заряд появляется при наличии тонкого слоя (несколько десятков сантиметров) повышенной ионизации у поверхности земли и приводит к реверсу электродного эффекта. Такой же эффект возникает при небольшой степени ионизации воздуха, но при слабых электрических полях (порядка нескольких десятков вольт на метр). Время установления стационарного режима составляет 5-7 мин.

3. Если параметр  $\xi_{1,2} < 1$ , то перенос аэроионов в атмосфере осуществляется, наряду с электрическими силами, турбулентными потоками воздуха, т.е. имеет место турбулентный электродный эффект [2, 3]. Толщина турбулентного электродного слоя с увеличением скорости ветра растет и достигает нескольких десятков метров. Профили положительных и отрицательных аэроионов становятся близкими (разница значений на высоте 1 м не превышает 10%). При увеличении степени ионизации воздуха и небольшой скорости ветра (не более 1 м/с) у земли появляется отрицательный объемный заряд, как и в случае классического электродного эффекта, при этом масштаб его распределения увеличивается до 10–15 м. При небольших скоростях ветра (~1 м/с) или сильном электрическом поле (около 500 В/м) влияние турбулентности уменьшается и электрическая структура становится похожей на нетурбулентный случай. Время установления стационарного режима составляет примерно 15 мин.

4. Если выполняется условие  $\xi_{1,2} \ll 1$ , то исходная система (1) расщепляется, и в нулевом приближении распределения концентраций аэроионов не зависят от электрического поля, а



определяется только турбулентным обменом [3]. В приближении сильного турбулентного перемешивания (скорость ветра 5–6 м/с) профили аэроионов определяются масштабом  $l_m = (D_m \tau)^{\frac{1}{2-m}}$ ,  $\tau = (q_\infty \alpha)^{-\frac{1}{2}}$ ,  $m$  – параметр стратификации приземного слоя. Масштаб распределения электрического поля равен  $L_m = (D_m \tau_{\lambda_\infty})^{\frac{1}{2-m}}$ ,  $\tau_{\lambda_\infty} = (4 \pi \lambda_\infty)^{-1}$ , который определяет толщину турбулентного электродного слоя.

5. Рассмотрим проблему моделирования глобальных возмущений электрического поля. Из системы уравнений (1) следует уравнение для плотности полного электрического тока ( $j$ ) в приземном слое атмосферы [1, 3]:

$$\frac{\partial E}{\partial t} + 4\pi\lambda E - D_T(z, t) \frac{\partial^2 E}{\partial z^2} = 4\pi j. \quad (4)$$

Вариации плотности электрического тока  $j(t)$  вблизи поверхности земли определяются нестационарностью электрических полей выше приземного слоя, т.е. обуславливаются глобальными изменениями потенциала ионосферы. При изменении плотности электрического тока в левой части (4) по гармоническому закону в турбулентном приземном слое существует сдвиг фазы колебаний электрического поля по отношению к колебаниям плотности электрического тока [1].

При анализе данных регулярных атмосферно-электрических наблюдений вполне подходят стационарные модели электродного эффекта, тогда как для решения задач о вариациях электрических характеристик необходимы нестационарные модели с учетом аэрозольного и радиоактивного загрязнения атмосферы.

### Литература

1. Клово А.Г., Куповых Г.В., Свидельский С.С., Тимошенко Д.В. Моделирование глобальных вариаций электрического поля в приземной атмосфере // Труды Военно-космической академии им А.Ф. Можайского. Вып. 662 «Проблемы военно-прикладной геофизики и контроля состояния природной среды». 2018. С. 37–41
2. Куповых Г.В. Электродинамические процессы в приземном слое атмосферы. Таганрог. Изд-во ТТИ ЮФУ. 2009. 114 с.
3. Морозов В.Н., Куповых Г.В. Математическое моделирование глобальной атмосферной электрической цепи и электричества приземного слоя. Монография. СПб.: Астерион. 2017. 307 с.
4. Редин А.А., Куповых Г.В., Клово А.Г., Болдырев А.С. Математическое моделирование электродинамических процессов в условиях аэрозольного загрязнения атмосферы // Известия ЮФУ. Технические науки. № 8. 2011. С. 111–121

### ВОЗМУЩЕНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ, ИНИЦИИРУЕМЫЕ ПРИ РАБОТЕ СТЕНДА «СУРА», НА РАССТОЯНИИ СВЫШЕ 500 КМ ОТ ИСТОЧНИКА

Ю.М. Михайлов<sup>1</sup>, В.И. Гайдук<sup>1</sup>, О.В. Капустина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк  
yumikh@izmiran.ru

Свойства низкочастотных сигналов, возникающих при работе стенда «СУРА», давно привлекают внимание исследователей. Накоплен большой материал о характеристиках геомагнитных вариаций, наблюдаемых в ночное время на средних широтах. В работе [1] исследованы возмущения на расстояниях порядка 10–20 км от источника. В работе [2] было высказано предположение, что возмущения магнитного поля на ст. Карпогоры (расстояние до стенда >500 км) вызваны его работой.

Нами проведен анализ записей геомагнитного поля с  $\Delta t = 1$  мин, регистрируемых по программе «INTERMAGNET», в период, совпадающий с работой стенда «СУРА» в 2010г. Обнаружены сигналы, близкие или подобные РС2–РС4 [3] пульсациям, хотя у них отмечаются особенности, которые не укладываются в общие закономерности. Эти сигналы регистрируются либо на одной из компонент (X, Y), либо на обеих, а число периодов колебаний очень малое.

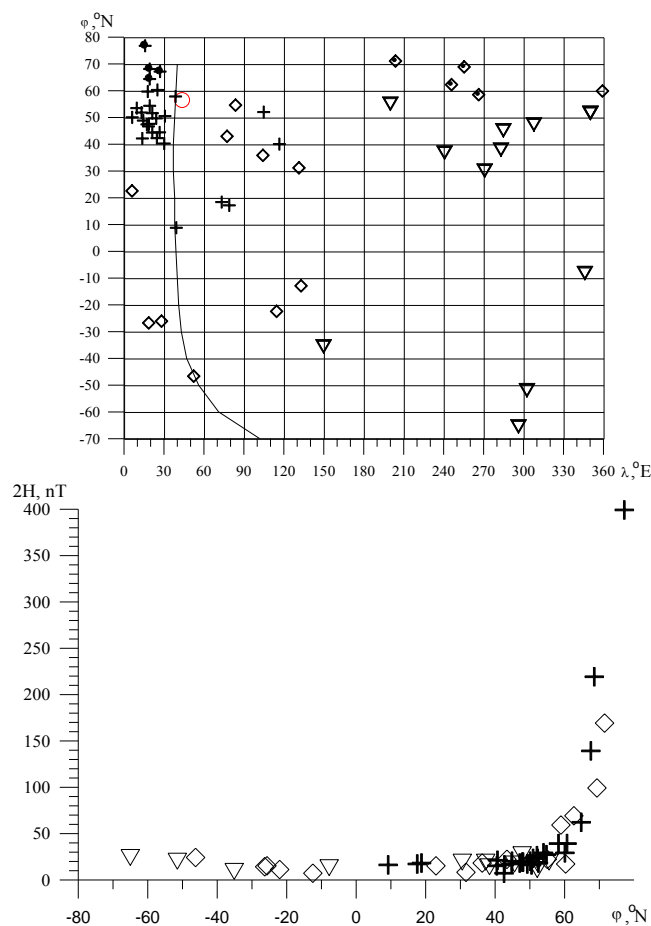


Рисунок 1. Сеть станций, на которых зарегистрирован необычный сигнал, совпадающий по времени с работой стенда «СУРА» (слева) и зависимость двойной амплитуды от географической широты (справа)

На рисунке 1 слева в географических координатах представлена сеть станций, на которых зарегистрирован этот сигнал. Плюсиками отмечены станции, формы сигналов которых похожи на форму в п. Карпогоры; ромбиком – отличающиеся формы: либо один максимум или ступенька, либо задержка, на некоторых станциях X и Y-компоненты в противофазе; треугольниками – сигнал перевернутый, т.е. минимум, а не максимум; сигнал с максимальной амплитудой более сложный: длительность больше, чем у других, H-компонента перевернута, есть задержка по времени и, возможно, спектр богаче. Черные точки отмечают станции, на которых двойная амплитуда сигнала  $>50$  нТл. Наиболее отчетливо выражена широтная зависимость амплитуды откликов, приведенная на рисунке справа. Можно предположить, что эта зависимость в чем-то похожа на широтную зависимость PC2-PC4 [3]. Выполнен спектральный анализ данных некоторых станций. На рисунке 2 слева представлены результаты для станций LYC, Lycksele,  $64,6^\circ\text{N } 18,8^\circ\text{E}$ ; BOX, Borok,  $58,07^\circ\text{N } 38,23^\circ\text{E}$ ; BEL, Belsk,  $51,84^\circ\text{N } 20,79^\circ\text{E}$ . Видно, что формы откликов достаточно похожи как во временной области (нижний рисунок), так и в спектре (средний рисунок представляет зависимость от частоты, верхний – от периода). Справа приведены данные для HRN, Hornsund,  $77,0^\circ\text{N } 15,37^\circ\text{E}$ ; ABK, Abisko,  $68,358^\circ\text{N } 18,823^\circ\text{E}$ ; YKC, Yellowknife,  $62,480^\circ\text{N } 245,518^\circ\text{E}$ . Эти сигналы существенно различаются по форме и спектральному составу.

Задача о возмущениях магнитного поля, возникающих при работе стенда «СУРА» на расстояниях более 500 км, не решается с использованием теории модуляции квазистационарных ионосферных токов и, таким образом, стимулирует поиск нового механизма генерации сигнала в средних и высоких широтах [1].

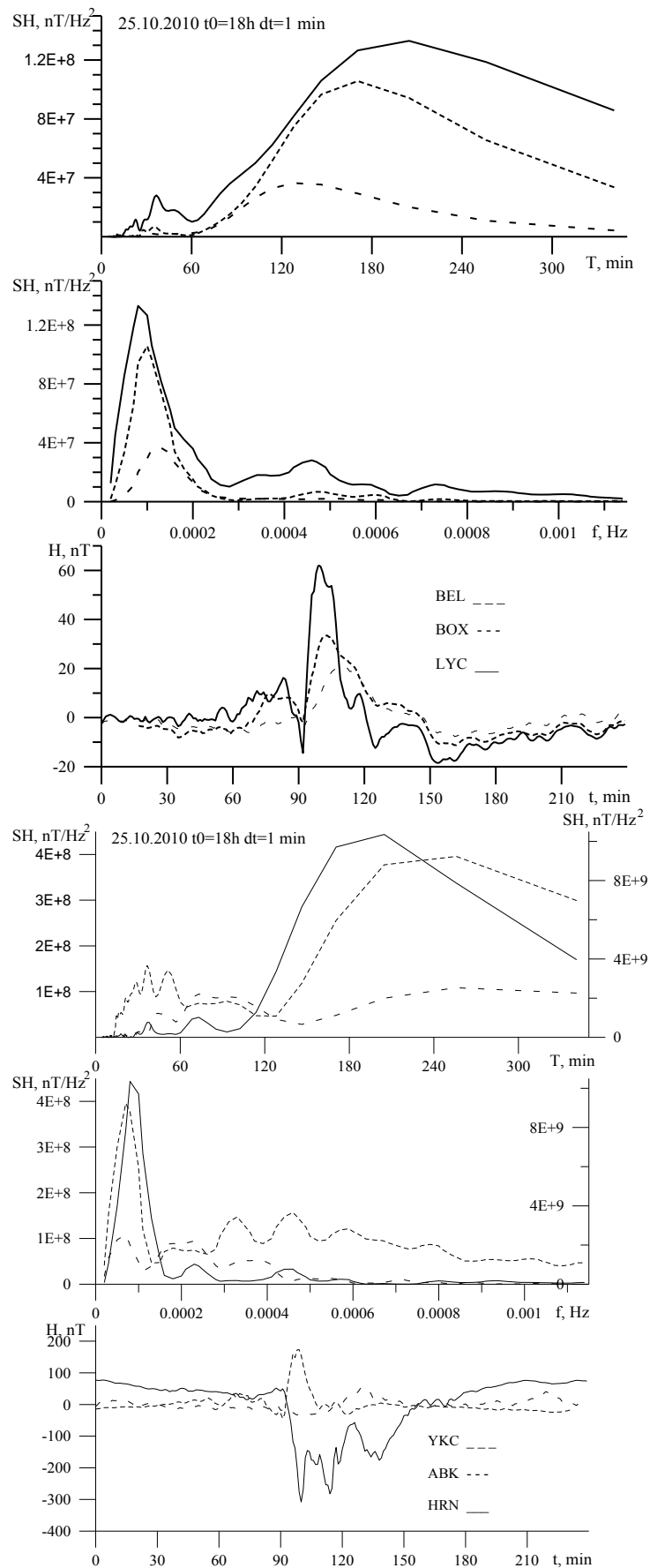


Рисунок 2. Временные формы и спектры записей:  
 слева LYC – сплошные, BOX – пунктирные и BEL – штрих-пунктирные линии;  
 справа HRN – сплошные и ABK – пунктирные и YKC – штрих-пунктирные линии

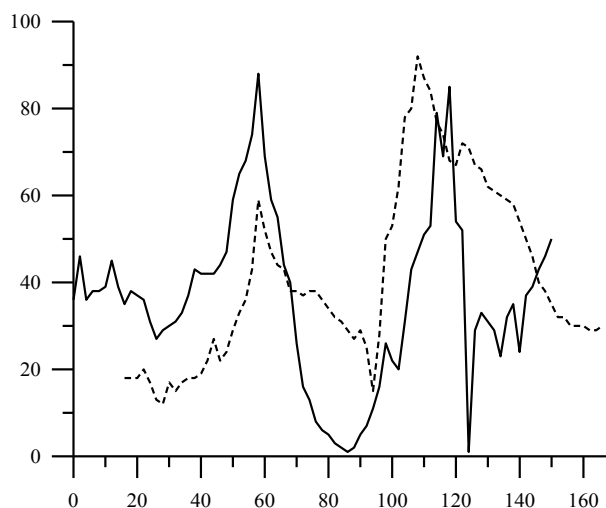


Рисунок 3. Временная форма геомагнитных пульсаций в относительном масштабе по амплитуде на земле – сплошная линия и на спутнике – пунктирная

На рисунке 3 показано подобие временной формы геомагнитных пульсаций  $B_y$ , регистрировавшихся на ст. Карпогоры 25.10.2010 г. 18.15–20–15 UT [2] во время работы стенда «СУРА» с вариациями магнитного поля, измеряемого на борту спутника магнитометром SRG5 при работе Хе-пушки в эксперименте АПЭКС [4]. Для наглядности масштаб по времени для спутниковых данных увеличен в 23 раза. Возникновение этих вариаций связывают с триггерным механизмом.

#### Литература

1. Котик Д.С., Рябов А.В., Ермакова Е.Н., Першин А.В., Иванов В.Н., Есин В.П. Свойства УНЧ/ОНЧ сигналов, генерируемых стендом «СУРА» в верхней ионосфере. Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2013. Т. 56, №6. С. 382–394.
2. Ружин Ю.Я., Кузнецов В.Д., Пластинин Ю.А. Эффекты, стимулированные излучением стенда «СУРА» по программе геофизических экспериментов на МКС в 2017 г. Геомагнетизм и аэронавигация. 2018. Т. 58, №5. С. 630–637.
3. Клейменова Н.Г. Модель космоса. Геомагнитные пульсации. Т. 1. М.: Изд-во МГУ. 2007. С. 611–627.
4. Mikhailov Yu.M., Oraevsky V.N., Sobolev Ya.P., Dokoukin V.S., Kapustina O.V., Shibaev I.G., Afonin V.V. Waves generated in the vicinity of Xenon plasma gun in the APEX-experiment. Phys. Chem. Earth. 2000. Vol. 25. No. 1–2. P. 67–70.

### ОБ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОНИКНОВЕНИЯ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ НАЗЕМНЫХ ИСТОЧНИКОВ В ИОНОСФЕРУ С УЧЕТОМ АНИЗОТРОПИИ ПРОВОДИМОСТИ

В.В. Хегай<sup>1</sup>, А.В. Карелин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ИЗМИРАН, г. Москва, г. Троицк

<sup>2</sup>ФГУП ЦНИИмаш, г. Королев

hegai@izmiran.ru, avkarelin@mail.ru

Вопрос о проникновении в ионосферу электрических полей от источников, локализованных в приземном слое атмосферы [0, 20 км] исторически впервые был рассмотрен в [1]. Из этой работы вытекал следующий основной вывод: полной экранировки поля на высотах ионосферы не происходит, и величина проникшего в ионосферу поля может быть порядка 1 мВ/м. При этом происходит ослабление величины поля по сравнению с его значением на уровнях тропосферы в  $10^8$  раз, т.е. со 100 кВ/м до ~1 мВ/м (поле в 100 кВ/м может быть на уровнях тропосферы обусловлено гигантским грозовым облаком). С точки зрения атмосферного электричества, величина поля в 1 мВ/м, означает практически равенство его нулю. Однако, для ионосферы такая величина поля уже значима и пренебречь им нельзя. Как показали более тщательные расчеты [2], величина поля в ионосфере от гигантского грозового облака может быть ~0,3 мВ/м при заряде облака 50 кулон. Переоценка величины

электрического поля в [1] обусловлена пренебрежением роли интегральной проводимости Педерсена ( $\Sigma_P$ ) выше 150 км. В работе [2] учитывается интегральная проводимость  $\Sigma_P$ , которая входит в верхнее граничное условие – непрерывность тока на уровне  $h = 90$  км.

В настоящей работе представлены расчеты радиальной компоненты электростатического поля  $E_r$ , на высоте ионосферы 90 км от крупномасштабного наземного источника сейсмогенного поля в ночных условиях на средних широтах при низкой активности Солнца с учетом анизотропии проводимости (выше уровня 70 км) и без её учёта и рассмотрено влияние величины интегральной проводимости Педерсена на максимальную величину проникшего в ионосферу поля.

Расчеты выполнены аналогично [3], в цилиндрической системе координат  $(r, \varphi, z)$ , начало которой находится на горизонтальной плоскости, расположенной на высоте  $z = h = 0$  км. Ось  $z$  направлена вертикально вверх. Распределение вертикальной компоненты электростатического поля  $E_z$ , обусловленного локализованным источником, на плоскости  $h = 0$  км является азимутально-симметричным и имеет следующую гауссоподобную зависимость от координаты  $r$ :

$$E_z = E_0 \exp[-\ln(10) \times (r/r_0)^2],$$

где  $E_0$  и  $r_0$  – соответственно максимальное значение  $E_z$  и радиус области возмущения поля, на котором исходное поле падает в 10 раз.

Результаты расчета зависимостей нормированной на  $E_0$  горизонтальной компоненты электрического поля  $E_r$  от  $r$  в ионосфере на высотах  $h \geq 90$  км для  $r_0 = 1000$  км иллюстрирует рисунок 1.

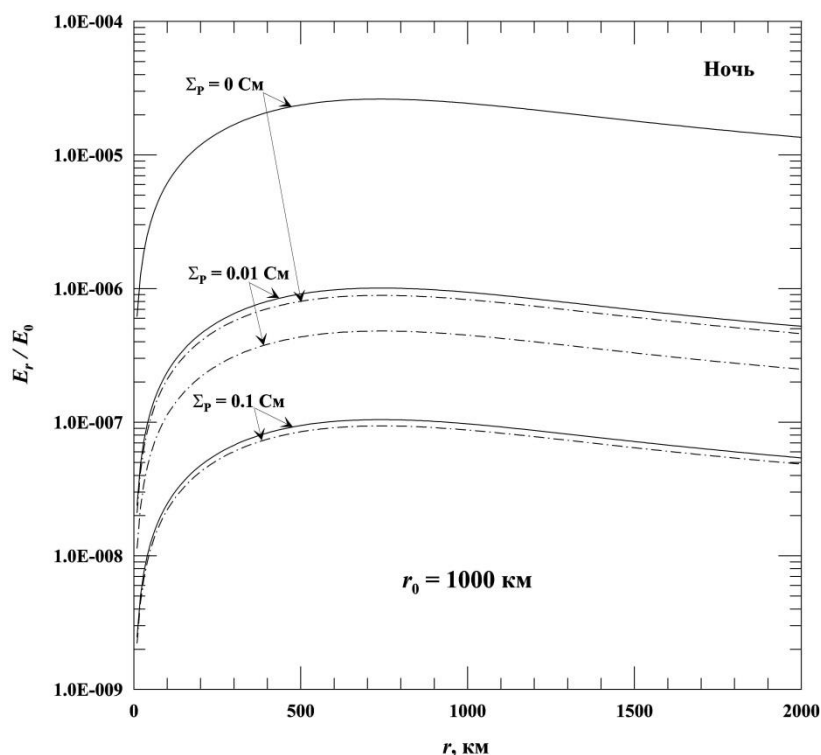


Рисунок 1. Вычисленные зависимости от  $r$  величины напряженности горизонтальной компоненты электростатического поля от крупномасштабного наземного источника ( $r_0 = 1000$  км) в ионосфере на высотах  $h \geq 90$  км, нормированные на  $E_0$ . Сплошные линии отмечают расчеты, выполненные с учетом анизотропии проводимости в интервале высот от 70 до 90 км, а штрих-пунктирные линии – без учета анизотропии. Величины интегральной проводимости  $\Sigma_P$  указаны над кривыми, отмеченными стрелками

Видно, что с уменьшением  $\Sigma_P$  на порядок величины эффективность проникновения поля в ионосферу также возрастает примерно на порядок. При этом возрастает и роль анизотропии. Если при  $\Sigma_P = 0,1$  См (ночь, условия низкой солнечной активности) анизотропия увеличивает эффективность проникновения поля примерно на 11%, то при  $\Sigma_P = 0,01$  См поле возрастает более чем вдвое по сравнению с изотропным случаем (в ночной ионосфере внутри крупномасштабных плазменных пузырей  $\Sigma_P$  может быть и менее 0,01 См [4]). В предельном

случае, когда  $\Sigma_p = 0$ , поле возрастает более чем на порядок величины при учете анизотропии. Укажем здесь также, что эффективность проникновения электростатического поля в ионосферу днем будет намного меньше, чем ночью, поскольку величина интегральной проводимости  $\Sigma_p$  дневной ионосферы примерно на два порядка больше, чем ночной.

Таким образом, эффективность проникновения квазистатических электрических полей в ионосферу весьма низка, однако в случае крупномасштабных источников ( $r_0 \geq 1000$  км) и наличия у поверхности Земли локализованных вертикальных полей ( $E_0$ ) с величиной порядка кВ/м в ионосфере могут проявляться горизонтальные поля ( $E_r$ ) вплоть до единиц мВ/м, что достаточно для появления наблюдаемых вариаций плотности плазмы в ионосфере. Степень проникновения электрического поля в ионосферу определяется величиной интегральной проводимости Педерсена (растет по мере уменьшения  $\Sigma_p$ ) и анизотропным характером проводимости. Именно анизотропия проводимости может увеличить его амплитуду до 1 мВ/м на высотах ионосферы для крупномасштабных наземных источников.

Работа выполнена при поддержке Программы №28 фундаментальных исследований Президиума РАН «Космос: исследования фундаментальных процессов и их взаимосвязей»

### Литература

1. Park C.G., Dejnakaritra M. Penetration of thundercloud electric fields into the ionosphere and magnetosphere: 1. Middle and subauroral latitudes // J. Geophys. Res. 1973. V. 78. No. 28. P. 6623–6633.
2. Kim V.P., Hegai V.V. On the electric fields produced by dipolar coulomb charges of an individual thundercloud in the ionosphere // J. Astron. Space Sci. 2015. V. 32. No. 2. P. 141–144.
3. Hegai V.V., Kim V.P., Liu J.Y. On a possible seismomagnetic effect in the topside ionosphere // Adv. Space Res. 2015. V. 56. Issue 8. P. 1707–1713.
4. Huang C.S., Foster J.C., Sahai Y. Significant depletions of the ionospheric plasma density at middle latitudes: A possible signature of equatorial spread F bubbles near the plasmapause // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. Iss. A5. A05315.

## ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В ГРОВОУХ ОБЛАКАХ И ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ

*Р.Х. Калов<sup>1</sup>, С.Б. Балкарова<sup>2</sup>, Х.М. Калов<sup>1</sup>, М.Б. Этезова<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик

<sup>2</sup>Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, г. Нальчик  
ruslan\_kalov@mail.ru, balkarova-07@mail.ru, madi.etezova@yandex.ru

Наблюдаемые в природе (облака, осадки, грозы и др.) и технических устройствах (теплотехника, хладотехника) явления тепло- и массопереноса включают в себя, как правило, все элементарные способы переноса тепла и влаги. В настоящей работе рассматриваются три основных вида тепломаассопереноса в двухкомпонентной среде, содержащей водяные капли и влажный воздух: 1. Количество тепла, передаваемое конвективным теплообменом  $dQ_k$ ; 2. Количество тепла, передаваемое путем массопереноса  $dQ_m$ ; 3. Количество тепла, передаваемое лучистым теплообменом  $dQ_l$ .

Общее количество теплового потока:

$$dQ_\tau = dQ_k + dQ_m + dQ_l, \quad (1)$$

$$\text{где } dQ_k = \alpha \cdot \Delta T \cdot dF; \quad dQ_m = \sigma \cdot r(d'' - d) \cdot dF; \quad dQ_l = c \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] dF;$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $\Delta T = T_1 - T_2$  – разность между температурами компонент среды;  $F$  – теплоотдающая поверхность;  $\sigma$  – коэффициент массоотдачи;  $d''$  – влагосодержание насыщенного влажного воздуха;  $d$  – влагосодержание ненасыщенного влажного воздуха;  $r$  – теплота парообразования;  $c = c_0 \cdot \varepsilon$  – коэффициент лучеиспускания поверхности водяных капель. Здесь  $c_0$  – коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела;  $\varepsilon$  – степень черноты поверхности воды (или коэффициент теплового излучения).

Рассмотрим два частных случая решения общего уравнения теплового потока (1): 1-ый случай – когда количество теплоты, передаваемое лучистым теплопереносом  $dQ_{\lambda}$ , невелико и его можно не учитывать в общем тепловом потоке; 2-ой случай – когда количество теплоты, передаваемое путем массопереноса  $dQ_{\mu}$ , невелико и его в пределах точности используемых расчетных величин теплового потока можно не учитывать.

Первый случай упрощения уравнения (1).

Вместо  $dQ_{\kappa}$  и  $dQ_{\mu}$  в уравнение (1) подставим их значения

$$dQ = \alpha \cdot \Delta T \cdot dF + \sigma \cdot r(d'' - d)dF + dQ_{\lambda}. \quad (2)$$

Правую часть уравнения (2) преобразуем. Из первого и второго члена вынесем за скобки  $\sigma$  и  $dF$ .

$$dQ = \sigma \left[ \frac{\alpha}{\sigma} \Delta T + r(d'' - d) \right] dF + dQ_{\lambda}. \quad (3)$$

Будем считать, что при рассмотрении данного явления соблюдается тройная аналогия (аналогия переноса импульса, энергии, массы). Этот процесс описывается законом Льюиса. Тогда:

$$\frac{\alpha}{\sigma} = c_{p'}, \quad (4)$$

где  $c_{p'} = c_{p_r} + c_{p_n} \cdot d$  – массовая изобарная теплоемкость влажного воздуха.

Здесь  $c_{p_r}$  – изобарная теплоемкость сухой части влажного воздуха;  $c_{p_n}$  – массовая изобарная теплоемкость водяного пара.

С учетом соотношения (4) уравнение (3) запишем следующим образом:

$$dQ = \sigma [c_{p'} \cdot \Delta T + r(d'' - d)] dF + dQ_{\lambda}. \quad (5)$$

Термодинамические параметры влажного воздуха взаимосвязаны следующими выражениями:

$$r = r_0 \cdot (c_{\text{жс}} - c_{p_n}) t_g; \quad (6)$$

$$i = c_{p_r} \cdot t_r + r_0 \cdot d + c_{p_n} \cdot t_r \cdot d; \quad (7)$$

$$i'' = c_{p_r} \cdot t_g + r_0 \cdot d'' + c_{p_n} \cdot t_g \cdot d''. \quad (8)$$

где  $r_0 = 2500 \text{ кДж} / \text{кг}$  – теплота парообразования воды при  $t = 0^\circ\text{C}$ ;  $i$  – энтальпия ненасыщенного влажного воздуха;  $i''$  – энтальпия насыщенного влажного воздуха;  $c_{\text{жс}}$  – массовая теплоемкость воды;  $t_r$  – температура газа за пределами теплового и диффузионного пограничных слоев;  $t_g$  – температура воды.

С учетом уравнений (6)–(8) зависимость (5) можно записать в виде:

$$dQ = \sigma [(i'' - i) - (d'' - d)c_{\text{жс}} \cdot t_g] dF + dQ_{\lambda} \quad (9)$$

или

$$dQ = \sigma (i'' - i) dF - c_{\text{жс}} \cdot t_g \cdot dM + dQ_{\lambda}, \quad (10)$$

где

$$dM = \sigma (d'' - d) dF.$$

Уравнение (10) может быть приведено к виду:

$$dQ = A \sigma (i'' - i) dF + dQ_{\lambda}, \quad (11)$$

где

$$A = 1 - \frac{c_{\text{жс}} t_g dM}{(i'' - i) dF}.$$

По данным [1–3] можно считать, что для воздухоохладителей  $A = 1$  уравнение (11) примет вид:

$$dQ = \sigma(i'' - i)dF + dQ_{\text{л}}. \quad (12)$$

Таблица 1

**Ориентировочные значения  $A$ , рекомендуемые для расчета по данным [2]**

$t_{\text{г}}, ^\circ\text{C}$	10	15	20	25	30	35
$A$	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94

Если экстраполировать последние данные в сторону понижения температуры  $t_{\text{г}}$ , то при  $t_{\text{г}} = 5^\circ\text{C} - A = 1$ .

При постоянстве параметров и величин, характеризующих процесс тепло- и массопереноса между водой и влажным воздухом, интеграл уравнения (12) будет равен:

$$Q = \sigma(i'' - i)F + Q_{\text{л}}. \quad (13)$$

Если роль лучистой составляющей теплового потока невелика, то ее в ряде случаев можно и не учитывать. Тогда уравнение (13) примет вид:

$$Q = \sigma(i'' - i)F \quad (14)$$

Второй случай упрощения уравнения (1).

Уравнение (1) перепишем в виде

$$dQ = \alpha \cdot \Delta T dF + dQ_{\text{м}} + c \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] dF \quad (15)$$

или

$$dQ = \alpha_{\text{об}} \cdot \Delta T dF + dQ_{\text{м}}, \quad (16)$$

где

$$\alpha_{\text{об}} = \alpha + \alpha_{\text{л}}. \quad (17)$$

Здесь:

$$\alpha_{\text{л}} = \frac{c \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right]}{\Delta T}. \quad (18)$$

Привлекательность такой записи в виде уравнений (15)–(18) состоит в том, что численные значения выражения  $\frac{\left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4}{\Delta T}$  приводятся в таблицах.

При постоянстве параметров и величин, характеризующих тепло- и массоперенос, уравнение (16) можно преобразовать следующим образом:

$$Q = \alpha_{\text{об}} \cdot \Delta T F + Q_{\text{м}}. \quad (19)$$

Если составляющая теплового потока, обусловленная массопереносом невелика, и ее в пределах точности используемых зависимостей можно не учитывать, то уравнение (19) примет вид:

$$Q = \alpha_{\text{об}} \cdot \Delta T \cdot F. \quad (20)$$

Таким образом, приводится общая формула расчета тепло- и массообмена между водой и влажным воздухом в природе (облака, осадки, грозы) и в технике (тепло- и хладотехника).



Общая формула включает в себя три физических механизма обмена влагой и теплом: конвективный теплообмен, массоперенос и лучистый теплообмен.

Получены упрощенные частные решения общей формулы расчета тепло- массообмена для двух физических механизмов (массоперенос, лучистый теплообмен). В случае, если в общем тепло- и массопереносе лучистый теплообмен  $dQ_{\text{л}}$  несущественен и его можно не учитывать, то общая формула расчета имеет простой вид (14). Если же количество теплоты передаваемое путем массопереноса  $dQ_{\text{м}}$ , невелико и его в пределах точности используемых зависимостей можно не учитывать, то упрощенное уравнение примет вид (20).

### Литература

1. Богданов С.Н., Бучко Н.А., Гуйго Э.И. и др. Теоретические основы хладотехники. Теплообмен // Под редакцией Гуйго Э.И. М.: Агропромиздат. 1986. 320 с.
2. Быков А.В. Теоретические основы получения искусственного холода. Справочник. Холодильная техника. // М.: Пищевая промышленность. 1980. 232 с.
3. Богданов С.Н., Бурцев С.И. и др. Холодильная техника. Кондиционирование воздуха. Свойства веществ: Справочник // Под редакцией С.Н. Богданова. 4-е изд. СПб.: СПбГАХ и ПТ. 1999. 320 с.

### АНАЛИЗ НЕДЕЛЬНОГО ХОДА НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ АТМОСФЕРЫ ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ КБР ПО ДАННЫМ СЕТИ ИЗ ЧЕТЫРЕХ ДАТЧИКОВ EFM550

*И.Х. Машуков<sup>1</sup>, А.А. Аджиева<sup>2</sup>, В.А. Шаповалов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В.М. Кокова», г. Нальчик  
vet555\_83@mail.ru, aida-adzhieva@mail.ru

В атмосфере имеют место постоянные колебания электрического поля, возникающего в результате накопления отрицательных зарядов в одних и положительных — в других слоях. Перераспределение тяжелых и легких частиц приводит к накоплению в , разных местах объемных зарядов разного знака. Напряженность электрического поля может резко меняться, в особенности при быстром движении масс воздуха вместе с частицами воды и пыли по вертикали.

Одной из специальных задач атмосферного электричества является исследование вариаций электрического поля в приземном слое атмосферы глобального и локального происхождения. Экспериментальное решение этой проблемы требует длительных рядов наблюдений. Кроме того, даже в условиях «хорошей погоды» (скорость ветра не более 6 м/с, облачность не выше 3–4 баллов, отсутствие дождя, тумана, метелей и т.п.) на получаемые данные оказывают значительное влияние метеорологические факторы, степень ионизации воздуха, наличие аэрозольных частиц в атмосфере и т.п. В связи с этим, с одной стороны, необходим поиск мест, пригодных для осуществления мониторинга электрического поля атмосферы, с другой стороны, необходимо развитие теоретических моделей, описывающих нестационарные электрические процессы в приземном слое.

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) и программное обеспечение для решения задач измерения, передачи и визуализации значений напряженности электрического поля атмосферы [6, 9].

Комплекс функционирует с 2010 года, были 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.

Данные с четырех измерителей напряженности электрического поля атмосферы поступают на сервер, предназначенный для хранения данных значений напряженности электрического поля атмосферы.

Частота измерений значений напряженности электрического поля атмосферы составляет 2 Гц.

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 [1, 3–5].

На следующем рисунке показан недельный ход напряженности электрического поля атмосферы 25 июня 2014 г. по 1 июля 2014 года по данным четырех датчиков – измерителя электрического поля в атмосфере EFM550.



*Рисунок 1. Распределение средней напряженности электрического поля атмосферы в условиях ясной погоды по данным датчиков EFM 550*

Эффекты локального масштаба для вариаций электрического поля, определяются в том числе, метеорологическими условиями, характерными для данного района [2, 7]: 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. На рисунке 1 видно как во время гроз электрическое поле меняется в широких пределах и может изменить направление на противоположное, но это происходит на небольшой площади, непосредственно под грозовой ячейкой и в течение короткого времени.

Высота местоположения измерителей напряженности электрического поля приведена в таблице 1. Можно проследить зависимость средней напряженности поля от высоты местности. Хотя следует сказать, что показания измерителей поля в большей степени обусловлены локальными особенностями и метеоусловиями.

**Распределение средней напряженности электрического поля атмосферы по данным датчиков измерителей напряженности поля EFM 550**

Дата	Чегет 3034м	Кызбурун 705м	Нальчик 536м	Урвань 302м
2014.06.25	640,224	54,599	37,577	104,839
2014.06.26	502,868	91,408	37,019	93,731
2014.06.27	470,585	74,181	66,069	97,971
2014.06.28	466,601	-0,023	24,301	50,66
2014.06.29	385,645	6,415	23,663	59,348
2014.06.30	688,704	20,819	40	60,567
2014.07.01	554,583	35,253	35,065	89,593

Для обработки данных авторами было разработано специализированное программное обеспечение [8].

Таким образом, в ходе проведенных исследований отмечена сильная изменчивость атмосферноэлектрических величин под влиянием метеорологических условий, даже при отсутствии осадкообразующей облачности. Самые значительные нарушения нормального электрического поля происходят при грозовой деятельности. Все это позволяет использовать напряженность электрического поля атмосферы как интегральную характеристику для анализа оперативной метеорологической ситуации в локальной области.

### Литература

1. Анисимов С.В., Шихова Н.М., Мареев Е.А., Шаталина М.В. Структуры и спектры турбулентных пульсаций аэроэлектрического поля // Известия АН. Физика атмосферы и океана. 2003. Т. 39, №6. С. 765–780.
2. Болдырев А.С., Болдырева К.А., Куповых Г.В., Пестов Д.А., Пестова О.В., Редин А.А. К вопросу о мониторинге электрического поля атмосферы по данным наземных наблюдений // Современные проблемы науки и образования. № 6. 2013. С. 875–884.
3. Имянитов И.М., Шифрин К.С. Современное состояние исследований атмосферного электричества // Успехи физических наук. 1962. Т. 76, №. 4. С. 593–642.
4. Кашилева Л.В. Атмосферное электричество. СПб.: РГГМУ. 2008. 116 с.
5. Куповых Г.В. Электрический объемный заряд в приземном слое // Известия ЮФУ. Технические науки. 1998. №3. 134 с.
6. Машуков И.Х., Аджиева А.А., Шаповалов В.А. Исследование характеристик напряженности электрического поля в приземном слое по измерениям сети датчиков EFM550 // Третья Всероссийская конференция «Глобальная электрическая цепь» г. Борок 25–29 сентября 2017. С. 51–52.
7. Шаповалов В.А. Анализ временных рядов метеорологических параметров и их прогнозирование в мезорайоне // Аджиева А.А., Шаповалов В.А. // Известия КБНЦ РАН. 2012. № 1(45). С. 32–37.
8. Шаповалов В.А., Машуков И.Х. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. // Программа для обработки и визуализации данных измерений параметров атмосферы «AEFM-DM-2017». № 2018618300 от 11.07.2018 г.
9. Adzhieva, A.A., Shapovalov, V.A., Mashukov, I.Kh. 2017: Local Sensing of Atmospheric Electric Field around Nalchik City. Advanced Environmental, Chemical, and Biological Sensing Technologies XIV, edited by Tuan Vo-Dinh, Robert A. Lieberman, Proc. of SPIE Vol. 10215, 102150W (May 3, 2017); doi: 10.1117/12.2279940.

### ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ДЕФОРМАЦИИ РАСТУЩИХ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ КАПЕЛЬ НА ИХ РАССЕИВАЮЩИЕ СВОЙСТВА

*Л.Т. Созаева<sup>1</sup>, В.С. Макитов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», г. Нальчик  
ljk\_62@rambler.ru

Разработка новых методов радиолокационных исследований микрофизических параметров грозоградовых облаков предполагает учет влияния электрической активности облачной среды на процессы роста капель и кристаллов. В особенной степени это важно для

правильной физической интерпретации характеристик отраженного радиолокационного сигнала при формировании ливневых осадков и града.

Как известно, в условиях свободного падения капли принимают различные формы. В период первоначального роста они сферические. По мере роста в облаках под действием сил гравитации и сопротивления воздуха приобретают форму сплюсненного сфероида. Начиная с диаметра 6 мм и более, капли становятся неустойчивыми и начинают распадаться на отдельные фрагменты, размеры которых соответствуют размерам дождевых капель, которые и достигают поверхности земли. В реальных грозоградовых облаках на рост капель оказывает влияние еще и электрическое поле, инициируемое естественной грозовой активностью, сопровождающей процесс формирования ливневых осадков и града.

В этом случае большой интерес представляют экспериментальные работы, авторы которых анализируют рост капель в аэродинамической трубе при отсутствии и наличии электромагнитного поля [1, 2]. Оказывается, под влиянием горизонтального электрического поля капли существенно растягиваются. Степени деформации (удлинения) капель с эквивалентными радиусами 3,3; 3,5 и 3,625 мм, полученные в аэродинамической трубе при наличии горизонтального электрического поля позаимствованы из [1] и приведены в таблице 1.

Исследовались рассеивающие свойства капель диаметром от 0,1 до 8 мм, падающих в нижней части облака, где преобладают температуры около 10°C. В этой части облака могут присутствовать крупные капли (до 8 мм). Характеристики рассеяния реальных капель определялись для различных размеров и форм.

Расчеты поперечных сечений обратного рассеяния сферических капель были проведены по Ми, а сфероидальных капель с учетом фактора формы по Фарафонову В.Г. [3, 4]. Данные таблицы 1 были использованы для расчета характеристик рассеяния при наличии горизонтального электрического поля.

Таблица 1

**Степени деформации (удлинения) капель при наличии горизонтального электрического поля**

Эквивалентный радиус, мм	Оси сфероида		Фактор формы, а/б
	большая, а	малая, б	
1	2	3	4
Средняя деформация капель			
3,3	14,98	4,39	3,4123
3,5	15,8	4,67	3,3833
3,625	17,08	4,73	3,6110
Максимальная деформация капель			
3,3	17,7	4,04	4,3812
3,5	19,05	4,25	4,4824
3,625	20,07	4,36	4,6032
Экстремальная деформация капель			
3,5	29	3,44	8,4302
3,625	42	3,01	13,9535

На рисунке 1 представлены нормализованные поперечные сечения обратного рассеяния капель воды. При увеличении степени деформации растущих в электрическом поле капель, значения поперечных сечений обратного рассеяния более существенно отклоняются от аналогичных значений для эквивалентных сфер воды. При этом различия между поперечниками обратного рассеяния вертикальной (ТМ – моды) и горизонтальной (ТЕ – моды) поляризации для случаев средней (average) и максимальной (maximum) деформации практически совпадают, хотя и значительно отличаются от значений для частиц с идентичным эквивалентным радиусом при отсутствии электрического поля. Мы имеем два случая с экстремальной деформацией (extreme), когда горизонтальные размеры капель перед разбрызгиванием достигали 29 и 42 мм соответственно. Очевидно, что в естественных условиях, при отсутствии электрического поля приближение растущей капли к таким размерам невозможно. Именно для этих размеров отмечается максимальное различие между горизонтально и вертикально поляризованными составляющими. Как известно, значения реальной радиолокационной отражаемости определяются спектральными характеристиками

облачного объема, которые в большей степени зависят именно от наиболее крупных частиц спектра. В этом плане наличие таких капель может существенно изменить значения как радиолокационной отражаемости, так и поляризационных характеристик зон локализации ливневых осадков и града.

Таким образом, при увеличении степени деформаций растущей в электрическом поле капли, значения поперечного сечения обратного рассеяния более существенно отклоняются от аналогичных значений для эквивалентных сфер воды. Различия между поперечными сечениями обратного рассеяния при вертикальной и горизонтальной поляризации для случаев средней и максимальной деформации практически совпадают, хотя и значительно отличаются от значений для частиц с идентичным эквивалентным радиусом при отсутствии электрического поля. Максимальное различие между горизонтально и вертикально поляризованными составляющими отмечается для капель сфероидальной формы с экстремальными горизонтальными размерами (29 и 42 мм).

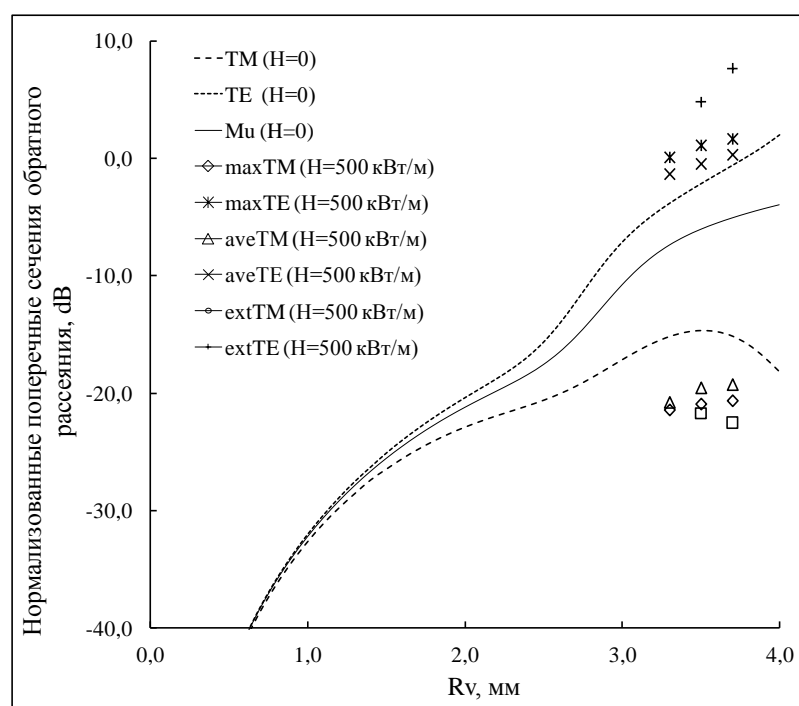


Рисунок 1. Нормализованные поперечные сечения обратного рассеяния капель различной степени деформации на длине волны 5,5 см: средней (ave), максимальной (max) и экстремальной (ext) при отсутствии ( $H=0$ ) и при наличии горизонтального электрического поля ( $H=500$  кВт/м)

Полученные результаты могут быть полезны при разработке методов радиолокационного исследования грозоградовых облаков. В том числе с использованием ДМРЛ-С (доплеровский радиолокатор с двойной поляризацией), которые устанавливаются Росгидрометом на территории России с целью создания единой системы радиолокационных метеорологических наблюдений.

### Литература

1. Bhalwankar R.V., Deshpande C.G. and Kamra A.K. Breakup modes of the drops suspended in a vertical wind tunnel in presence of the horizontal electric field // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 10.1002/2016 JD025805. P. 1838–1849.
2. Bhalwankar R.V. and Kamra A.K. A wind tunnel investigation of the deformation of water drops in the vertical and horizontal electric fields // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 2007. Vol. 112. D10215. doi:10.1029/2006JD007863.
3. Farafonov V.G. Application of non-orthogonal bases in the theory of light scattering by spheroidal particles. In Kokhanovsky A.A. (Ed.), Light Scattering Reviews, London: Springer-Praxis. 2013. №8. P. 189–268.

## ТРЕХМЕРНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОНВЕКТИВНОГО ОБЛАКА С ДЕТАЛЬНЫМ УЧЕТОМ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ, МИКРОФИЗИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

В.А. Шаповалов<sup>1</sup>, Б.А. Ашабоков<sup>1</sup>, А.В. Шаповалов<sup>1</sup>, М.А. Шериева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Высокогорный геофизический институт, г. Нальчик  
atajuk@mail.ru

В физике облаков по объективным причинам менее всего изучены электрические процессы, хотя этому направлению уделяется большое внимание. Математическое моделирование позволяет исследовать многие аспекты электрических процессов в конвективных облаках, которые в силу опасности, недоступности и других причин не удалось изучить [1–15]. С помощью моделирования важно исследовать взаимодействие микрофизических и электрических процессов, которое играет существенную роль в образовании осадков в мощных облаках.

В данной работе представлена разработанная трехмерная нестационарная численная модель конвективных облаков с детальным учетом термодинамических, микрофизических и электрических процессов. Модель отличается от аналогов тем, что в ней используется детальная микрофизика с несколькими десятками градаций размеров жидких и твердых частиц, учитываются: накопление зарядов в облаке, потенциал и напряженность электрического поля, электрическая коагуляция облачных частиц.

Гидротермодинамический блок модели состоит из уравнений движения, описывающих влажную конвекцию в приближении Буссинеска. В уравнениях учитываются адвективный и турбулентный перенос, силы плавучести, трения и барических градиентов. Микрофизический блок модели описывает процессы нуклеации, конденсации, коагуляции капель с каплями, сублимации, аккреции, замерзания капель, осаждения облачных частиц в поле силы тяжести, их перенос воздушными потоками, а также взаимодействие облачных частиц под влиянием электрического поля облака [1].

Постановка задачи математической модели конвективного облака включает следующие уравнения термодинамики, микрофизики и электростатики:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla)u = -\nabla \pi' + \Delta' u + l v, \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla)v = -\nabla \pi' + \Delta' v - l u, \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla)w = -\nabla \pi' + \Delta' w + g \left( \frac{\theta'}{\theta_0} + 0,61 s' - Q_s \right), \quad (3)$$

уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \sigma w, \quad (4)$$

уравнения термодинамики:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla)\theta = \frac{L_K}{c_p T} \frac{\delta M_K}{\delta t} + \frac{L_C}{c_p T} \frac{\delta M_C}{\delta t} + \frac{L_3}{c_p T} \frac{\delta M_3}{\delta t} + \Delta' \theta, \quad (5)$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla)s = -\frac{\delta M_K}{\delta t} - \frac{\delta M_C}{\delta t} + \Delta' s, \quad (6)$$

уравнения для функций распределения капель, кристаллов и осколков замерзания по массам:

$$\frac{\partial f_1}{\partial t} + u \frac{\partial f_1}{\partial x} + v \frac{\partial f_1}{\partial y} + (w - V_1) \frac{\partial f_1}{\partial z} = \left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_K + \left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{K\Gamma} + \left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{AK} + \left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_{DP} + \left( \frac{\partial f_1}{\partial t} \right)_3 + \Delta' f_1 + I_1, \quad (7)$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial t} + u \frac{\partial f_2}{\partial x} + v \frac{\partial f_2}{\partial y} + (w - V_2) \frac{\partial f_2}{\partial z} = \left( \frac{\partial f_2}{\partial t} \right)_c + \left( \frac{\partial f_2}{\partial t} \right)_{AK} + \left( \frac{\partial f_2}{\partial t} \right)_3 + \Delta' f_2 + I_2 + I_{AB}, \quad (8)$$

$$\frac{\partial f_3}{\partial t} + u \frac{\partial f_3}{\partial x} + v \frac{\partial f_3}{\partial y} + (w - V_2) \frac{\partial f_3}{\partial z} = \left( \frac{\partial f_3}{\partial t} \right)_3 + \left( \frac{\partial f_3}{\partial t} \right)_{AK} + \Delta' f_3, \quad (9)$$

уравнения для расчета количества электричества:

$$\rho_- = a_2 \int_0^\infty m f_2 dm - \lambda_2 E - \gamma_2 \sum_i \rho_-^i, \quad (10)$$

$$\rho_+ = a_3 \int_0^\infty m f_3 dm - \lambda_3 E - \gamma_3 \sum_i \rho_+^i$$

уравнение Пуассона для потенциала электростатического поля:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = - \frac{\rho_e}{\epsilon_0}, \quad (11)$$

Начальные условия для уравнений (1)–(11) имеют следующий вид:

$$u(\vec{r}, 0) = u_0(\vec{r}), v(\vec{r}, 0) = v_0(\vec{r}), w(\vec{r}, 0) = w_0(\vec{r}), \theta(\vec{r}, 0) = \theta_0(\vec{r}), s(\vec{r}, 0) = s_0(\vec{r}), \quad (12)$$

$$f_1(\vec{r}, m, 0) = f_2(\vec{r}, m, 0) = f_3(\vec{r}, m, 0) = 0, \rho_-(\vec{r}, 0) = \rho_+(\vec{r}, 0) = 0. \quad (13)$$

Граничные условия:

$$u(\vec{r}, t) = u_0(\vec{r}), v(\vec{r}, t) = v_0(\vec{r}), w(\vec{r}, t) = w_0(\vec{r}), \theta(\vec{r}, t) = \theta_0(\vec{r}), s(\vec{r}, t) = s_0(\vec{r}) \Big|_{x=0, L_x; y=0, L_y; z=L_z}$$

$$u(\vec{r}, t) = v(\vec{r}, t) = w(\vec{r}, t) = 0, \theta(\vec{r}, t) = \theta_0(\vec{r}), s(\vec{r}, t) = s_0(\vec{r}) \Big|_{z=0} \quad (14)$$

$$f_1(\vec{r}, m, t) = f_2(\vec{r}, m, t) = f_3(\vec{r}, m, t) = 0 \Big|_{x=0, L_x; y=0, L_y; z=L_z}$$

$$\frac{\partial f_1(\vec{r}, m, t)}{\partial z} = \frac{\partial f_2(\vec{r}, m, t)}{\partial z} = \frac{\partial f_3(\vec{r}, m, t)}{\partial z} = 0 \Big|_{z=0} \quad (15)$$

$$\frac{\partial U(\vec{r}, t)}{\partial x} = 0 \Big|_{x=0, L_x}, \frac{\partial U(\vec{r}, t)}{\partial y} = 0 \Big|_{y=0, L_y}, \frac{\partial U(\vec{r}, t)}{\partial z} = 0 \Big|_{z=L_z}, U(\vec{r}, t) = 0 \Big|_{z=0} \quad (16)$$

Система уравнений применяется для пространственно-временной области

$$0 \leq x \leq L_x, \quad 0 \leq y \leq L_y, \quad 0 \leq z \leq L_z, \quad 0 \leq m < \infty, \quad t > 0. \quad (17)$$

Используются обозначения:

$$(\vec{V} \cdot \nabla) \equiv u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + w \frac{\partial}{\partial z}, \quad \Delta' = \frac{\partial}{\partial x} K \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} K \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} K \frac{\partial}{\partial z},$$

$\vec{r} = \{x, y, z\}$  – вектор координат,  $\vec{V} = \{u, v, w\}$  – вектор скорости,  $u(\vec{r}), v(\vec{r}), w(\vec{r})$  – компоненты вектора скорости;  $l$  – параметр, учитывающий инерционные силы;  $\theta(\vec{r})$  – потенциальная температура;  $\pi(\vec{r}) = c_p \bar{\theta} (P(z)/1000)^{R/C_p}$  – безразмерное давление;  $\bar{\theta}$  – средняя потенциальная температура;  $R$  – газовая постоянная;  $s(\vec{r})$  – удельная влажность воздуха;  $Q_s(\vec{r})$  – суммарное отношение смеси жидкой и твердой фаз в облаке;  $\sigma(z)$  – параметр, учитывающий изменение плотности воздуха с высотой;  $P(z)$  и  $T(\vec{r})$  – соответственно давление и температура;  $c_p$  – теплоемкость воздуха при постоянном давлении;  $L_K, L_C, L_3$  – соответственно удельная теплота конденсации, сублимации и замерзания;  $\pi'(\vec{r}), \theta'(\vec{r}), s'(\vec{r})$  – отклонения безразмерного давления, потенциальной температуры и удельной влажности от их фоновых значений в окружающей атмосфере  $\pi_0(\vec{r}), \theta_0(\vec{r}), s_0(\vec{r})$ ;  $\frac{\delta M_K}{\delta t}, \frac{\delta M_C}{\delta t}$  – изменения удельной влажности за счет диффузии пара на капли и кристаллы;  $\frac{\delta M_3}{\delta t}$  – масса капельной воды, замерзающей в единицу времени в единице объема воздуха;  $K(\vec{r})$  – коэффициент турбулентной диффузии.  $V_1(m), V_2(m)$  – установившиеся скорости падения жидких и твердых

частиц;  $\left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_K$ ,  $\left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_{KT}$ ,  $\left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_{AK}$ ,  $\left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_{DP}$ ,  $\left(\frac{\partial f_1}{\partial t}\right)_3$  – изменения функции распределения капель за счет микрофизических процессов конденсации, коагуляции капель, аккреции капель и кристаллов, дробления и замерзания соответственно;  $\left(\frac{\partial f_2}{\partial t}\right)_c$ ,  $\left(\frac{\partial f_2}{\partial t}\right)_{AK}$ ,  $\left(\frac{\partial f_2}{\partial t}\right)_3$  – изменения функции распределения кристаллов за счет сублимации, аккреции и замерзания капель;  $\left(\frac{\partial f_3}{\partial t}\right)_3$ ,  $\left(\frac{\partial f_3}{\partial t}\right)_{AK}$  – изменения функции распределения  $f_3(\vec{r}, m, t)$  за счет образования осколков при спонтанном замерзании переохлажденных облачных капель и их аккреции с кристаллами;  $I_1$  и  $I_2$  – источники капель и кристаллов;  $I_{AB}$  – источник искусственных кристаллов при активном воздействии;  $\rho_e(\vec{r}, t)$  – суммарный объемный электрический заряд,  $\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная вакуума.

В модели детально учитываются процессы электризации облачных частиц на основе полученных закономерностей развития грозовой деятельности в облаках и значений коэффициентов разделения зарядов, связанных с замерзанием капель воды, ростом крупы и градин и взаимодействием градин с кристалликами льда и переохлажденными каплями.

За счет микрофизических процессов замерзания капель и аккреции в облаке идет накопление отрицательного заряда на ледяных частицах. Одновременно формируется положительный заряд, состоящий из зарядов отдельных частиц – осколков замерзания капель.

Микроскопические осколки замерзания выносятся потоками в верхнюю часть облака, где образуется преимущественно положительный объемный заряд  $\rho_+(\vec{r}, t)$ . Область сосредоточения отрицательно заряженных ледяных частиц образует зону преимущественно отрицательного объемного заряда  $\rho_-(\vec{r}, t)$ .

При моделировании на каждом временном шаге рассчитываются объемные заряды в облаке, потенциал электростатического поля, создаваемого этими зарядами, а также горизонтальные  $E_x(\vec{r})$ ,  $E_y(\vec{r})$  и вертикальная  $E_z(\vec{r})$  составляющие напряженности электрического поля облака.

Значение суммарного (положительного и отрицательного) объемных зарядов  $\rho_e(\vec{r})$  используется для определения потенциала  $U(\vec{r})$  создаваемого ими электростатического поля. Для этого на каждом временном шаге решается трехмерное уравнение Пуассона (11). Значения напряженности электрического поля учитывалось в работе для расчета коэффициентов электрической коагуляции облачных частиц. Для этого использовались аппроксимационные формулы, построенные по существующим теоретическим и экспериментальным данным для этого параметра.

Для сопоставления с данными наблюдений в модели рассчитывается радиолокационная отражаемость облака на длинах волн 3, 5 и 10 см.

Система уравнений модели (1)–(17) решалась методами расщепления по физическим процессам и по координатного расщепления.

Ниже приведены результаты исследований формирования термодинамических, микроструктурных и электрических параметров конвективных облаков при различных состояниях атмосферы.

Размеры пространственной области при расчетах задавались от 40 до 80 км по горизонтали и 16 км по вертикали. Шаг сетки по координатам X, Y составлял 500–1000 м, по Z – 250–500 м. Ось X направлена на восток, Y – на север, Z – по вертикали. Облако инициировалось заданием импульса у поверхности земли с перегревом  $\Delta T=1-4^\circ\text{C}$ , форма и размеры импульса также варьировались в численных экспериментах.

При выполнении численных экспериментов были использованы данные аэрологического зондирования в аэропорту Минеральные Воды и, в ряде экспериментов, трехмерные данные по термодинамическим параметрам и горизонтальному ветру. Выбирались дни, когда по факту в радиусе репрезентативности зонда наблюдались ливни, грозы, град. Для сравнения с реальными облаками использовались данные радиолокационных наблюдений.

Формирование и накопление электрических зарядов в облаке происходит в результате замерзания капель, аккреции (взаимодействия капель и кристаллов) и столкновения



кристаллов. Вследствие разных скоростей падения в воздухе микроосколков (заряжающихся преимущественно положительно) и более крупных частиц, крупы и града (заряжающихся преимущественно отрицательно), происходит пространственное разделение зарядов: в предвершинной части облака преобладает положительный объёмный заряд, ниже – отрицательный. Плотность положительного заряда на 20-й минуте достигала  $2,8 \cdot 10^{-9}$  Кл/м<sup>3</sup>, отрицательного –  $1,5 \cdot 10^{-9}$  Кл/м<sup>3</sup>, электрический потенциал равнялся  $1,4 \cdot 10^9$  В. Компоненты  $E_x$ ,  $E_y$  напряжённости поля составляли около 1300 В/см,  $E_z \approx 2000$  В/см. По результатам моделирования было исследовано пространственное распределение суммарного объёмного заряда в облаке в различные моменты времени (рисунок 1). Рассчитываемая в каждый момент времени в узлах пространственной сетки напряжённость электростатического поля учитывалась при вычислении значений коэффициентов коагуляции капель и кристаллов.

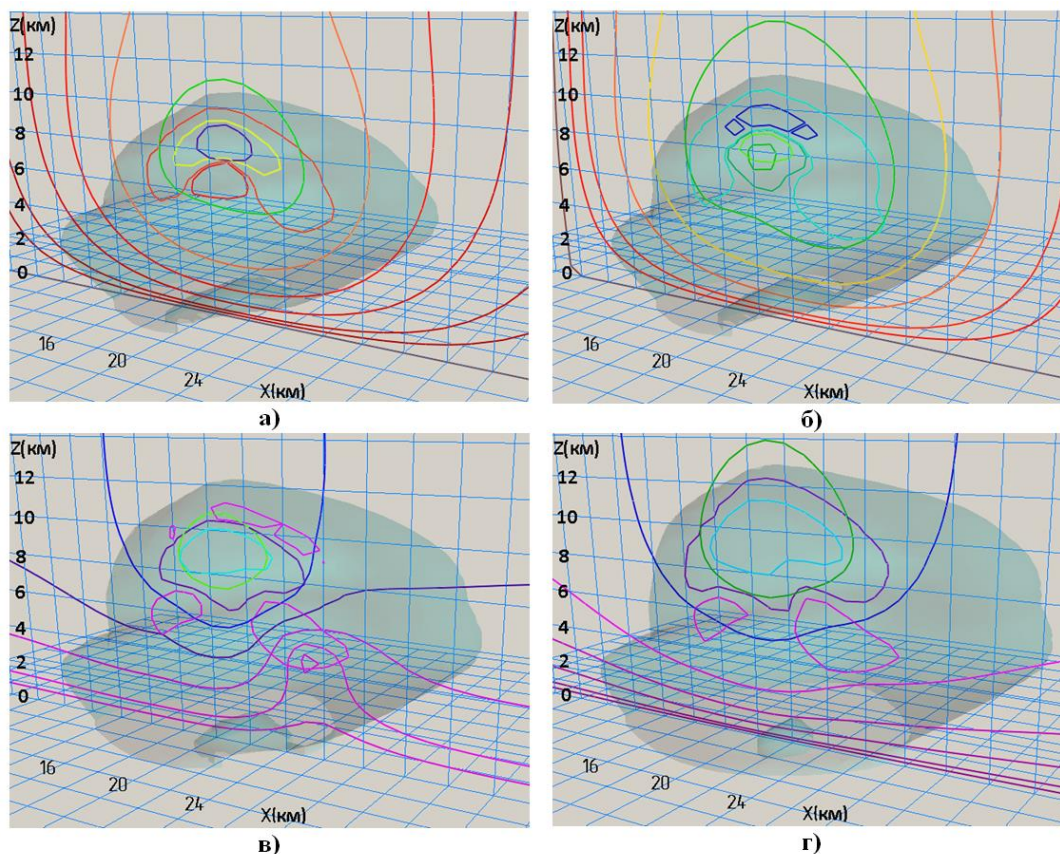


Рисунок 1. Изолинии объёмного заряда и потенциала в вертикальной плоскости, проходящей через облако, на фоне изоповерхности радиолокационной отражаемости  $Z_{rad} = 10$  dBZ, в моменты времени а)  $t=30$  мин; б)  $t=33,5$  мин; в)  $t=37$  мин; г)  $t=40,5$  мин. Изолинии объёмного заряда (замкнутые контуры) имеют значения:  
 $-5.0 \cdot 10^{-9}, -1.0 \cdot 10^{-9}, -1.0 \cdot 10^{-10}, 1.0 \cdot 10^{-10}, 1.0 \cdot 10^{-9}, 5.0 \cdot 10^{-9}$  Кл/м<sup>3</sup>;  
 изолинии потенциала, создаваемого этим зарядом уровней (в порядке от внешнего контура к центру):  
 $-5.0 \cdot 10^8, -2.5 \cdot 10^8, -1.0 \cdot 10^8, -5 \cdot 10^7, -2.5 \cdot 10^7, -1.0 \cdot 10^7, -5.0 \cdot 10^6, 5.0 \cdot 10^6, 1.0 \cdot 10^7, 2.5 \cdot 10^7, 5.0 \cdot 10^7, 1.0 \cdot 10^8, 2.5 \cdot 10^8, 5.0 \cdot 10^8$  В

Были проведены численные эксперименты с учётом электрической коагуляции облачных частиц и без её учёта. Сравнение времени образования осадков в этих двух случаях показало, что за счёт электрической коагуляции время роста частиц осадков в мощном конвективном облаке существенно сокращается на 10–14 минут (20÷30%).

Результаты расчётов на основе трёхмерной модели с детальным учётом гидродинамических, термодинамических, микрофизических и электрических процессов показывают, что эти процессы в конвективных облаках взаимно влияют друг на друга. Это нелинейное взаимодействие имеет весьма сложный характер и играет важную роль в формировании микроструктуры облаков. Динамические процессы вызывают деформацию полей термодинамических параметров в облаке, которые, в свою очередь, определяют

микрофизические процессы и рост частиц осадков. Электрические параметры влияют на развитие осадков. В численных экспериментах получено, что в облаке наблюдается положительная обратная связь между ростом массы ледяных частиц и объемным электрическим зарядом.

Необходимость изучения взаимодействия процессов в конвективных облаках связана с их важной ролью в облако- и осадкообразовании.

Заключение. Разработана трехмерная нестационарная численная модель конвективного облака с детальным учетом термодинамических, микрофизических и электрических процессов. Формализован процесс накопления электрического заряда при замерзании капель и аккреции. Разработаны алгоритмы расчета системы уравнений модели, потенциала и напряженности электростатического поля, электрической коагуляции. Модель позволяет рассчитывать термодинамические, микроструктурные и электрические параметры конвективных облаков на различных стадиях развития облака. При инициализации модели использовалось трехмерное начальное распределение полей термодинамических параметров в домене, построенное по данным глобальной модели GFS.

Исследованы важные аспекты механизма образования электрического заряда и поля в облаках с учетом взаимодействия термодинамических, микрофизических и электрических процессов. Определены пространственное распределение и количественные значения объемных электрических зарядов и напряженности поля в облаке и вокруг него в последовательные моменты времени в процессе эволюции.

Отмечается положительная обратная связь между ростом частиц осадков в облаке и увеличением напряженности электростатического поля. По результатам моделирования получено, что на стадии максимального развития конвективного облака за счет электрической коагуляции происходит наиболее интенсивный рост жидких и твердых осадков.

### Литература

1. *Ashabokov B.A et al.* Numerical simulation of thermodynamic, microstructural, and electric characteristics of convective clouds at the growth and mature stages / Ashabokov B.A., Shapovalov A.V., Kuliev D.D., Prodan K.A., Shapovalov V.A. // Radiophysics and Quantum Electronics. Volume 56. Issue 11. 2014. P. 811–817.
2. *Adzhiev A.K. et al.* Atmospheric electric field strength and thunderstorms in the North Caucasus / Adzhiev A.K., Stasenko V.N., Shapovalov A.V., Shapovalov V.A. // Russian Meteorology and Hydrology. 2016. Vol. 41. No. 3, P. 186–192.
3. *Bychkov A.A., Shapovalov V.A.* Formation of Bulk Electric Charges and Fields during Development of Thunderstorm Clouds // International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973–4562 . 2017. Volume 12, Number 23. P. 13142–13149.
4. *Ашабоков Б.А., Шаповалов А.В.* Конвективные облака: численные модели и результаты моделирования в естественных условиях и при активном воздействии. Нальчик: Изд-во ИИПРУ РАН. 2008. 257 с.
5. *Веремей Н.Е., Довгалюк Ю.А., Затевахин М.А., Игнатъев А.А., Морозов В.Н., Пастушков Р.С.* Описание базовой численной нестационарной трехмерной модели конвективного облака // Труды ГГО. 2016. В. 582. С. 45–91.
6. *Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Владимиров С.А., Дрофа А.С., Затевахин М.А., Игнатъев А.А., Морозов В.Н., Пастушков Р.С., Синькевич А.А., Шаповалов А.В.* Концепция разработки численной нестационарной трехмерной модели эволюции осадкообразующего конвективного облака в естественных условиях и при активных воздействиях // Труды ГГО. 2016. В. 582. С. 7–44.
7. *Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Владимиров С.А., Дрофа А.С., Затевахин М.А., Игнатъев А.А., Морозов В.Н., Пастушков Р.С., Синькевич А.А., Стасенко В.Н., Степаненко В.Д., Шаповалов А.В., Щукин Г.Г.* Концепция разработки трехмерной модели осадкообразующего конвективного облака. I. Структура модели и основные уравнения гидротермодинамического блока // Труды ГГО. 2008. В. 558. С. 102–142.
8. *Довгалюк Ю.А., Веремей Н.Е., Владимиров С.А., Дрофа А.С., Затевахин М.А., Игнатъев А.А., Морозов В.Н., Пастушков Р.С., Синькевич А.А., Стасенко В.Н., Степаненко В.Д., Шаповалов А.В., Щукин Г.Г.* Концепция разработки трехмерной модели осадкообразующего конвективного облака. II. Микрофизический блок модели // Труды ГГО. 2010. В. 562. С. 7–39.
9. *Коган Е.Л., Мазин И.П., Сергеев Б.Н., Хворостьянов В.И.* Численное моделирование облаков. М.: Гидрометеиздат. 1984. 184 с.
10. *Berry E.X., Reinhard R.L.* An analysis of cloud drop growth by collection. Part I. Double distributions // J. Atmos. Sci. 1974. V. 31, № 7. P. 1825–1831.

11. *Clark T.* Numerical Simulation with a Tree-Dimension Cloud Model: lateral Boundary Condition Experiments and Multiceller Severe Storm Simulations // *J. Atmos. Sci.* 1979. V. 36, № 11. P. 2191–2215.
12. *Cotton W.R., Stephens M.A., Neherkorn T., Tripoli G. J.* The Colorado State University three-dimensional cloud model. Part II: An ice phase parameterization // *J. Rech. Atmos.* 1982. V. 16, P. 295–320.
13. *Farley R.B.* Numerical Modeling of Hailstone Growth. Part III: Simulation of an Alberta Hailstorm Natural Seeded Cases // *J. Claim. Appl. Met.* 1987. V. 26, № 7. P. 789–812.
14. *Orville R.D., Kopp F.J.* Numerical simulation of the life history of a hailstorm // *J. Atm. Sci.* 1977. V. 34, № 10. P. 1596–1618.
15. *Straka J.M.* Cloud and precipitation microphysics. Principles and Parameterizations. Cambridge University Press. 2009. 392 p.
16. *Rawlins F.* A numerical study of thunderstorm electrification using a three dimensional model incorporating the ice phase // *Quart. Jour. of the Royal Met. Society.* 1982. V. 108. P. 779–801.
17. *Shapovalov V., Shapovalov A., Koloskov B., Kalov R. and Stasenko V.* Numerical Study of the Dynamic, Thermodynamic and Microstructural Parameters of Convective Clouds // *Natural Science.* 2018. V. 10. P. 63–69. DOI: 10.4236/ns.2018.102006.
18. *Sinkevich A.A., Dovgalyuk Y.A., Veremei N.E. et al.* Investigations of the development of thunderstorm with hail. Part 3. Numerical simulation of cloud evolution // *Russian Meteorology and Hydrology.* 2017. V. 42. Issue 8. P. 494-502. DOI: 10.3103/S1068373917080027.
19. *Veremey N.E., Dovgalyuk, Y.A., Zatevakhin, M.A. et al.* Study of the Evolution of the Electric Structure of a Convective Cloud Using the Data of a Numerical Nonstationary Three-Dimensional Model // *Radiophys Quantum El.* 2014. V. 56, Issue 11–12, P. 801–810. DOI: 10.1007/s11141-014-9482-0.

## **ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО УСВОЕНИЮ ДАННЫХ СЕТИ ГРОЗОПЕЛЕНГАЦИИ: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ**

*К.Г. Рубинштейн<sup>1,3</sup>, И.М. Губенко<sup>2,3</sup>, Ю.И. Юсупов<sup>3</sup>, Н.Д. Тихоненко<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Гидрометцентр, г. Москва

<sup>2</sup>ИБРАЭ РАН, г. Москва

<sup>3</sup> НПЦ «Мэп Мейкер», г. Москва

k.g.rubin@googlemail.com, img0504@yandex.ru, usupov@gismeteo.ru, n.tikhonenko@gismeteo.com

Данная работа посвящена анализу первых результатов исследования влияния учета данных грозопеленгаторной сети Worldwide Lightning Location Network (WWLLN) на качество численного прогноза погоды с помощью технологии, близкой к методике, изложенной в [1]. Опишем применённую в данном исследовании технологию усвоения данных сети грозопеленгации. Процедура использует две основные гипотезы. Первая заключается в том, что WWLLN фиксирует 100% гроз в расчетной области или в области интереса. Вторая – что, в точках, в которых сеть грозопеленгации не было зафиксировано гроз, то глубокой конвекции нет. Если гроза наблюдалась, и спрогнозирована, то ячейка остается без изменений. В других случаях схема работает как триггер, усиливая конвекцию в точках, где наблюдались молнии и уменьшая конвекцию в областях, где молнии не наблюдались. Схема включается в течение первых 24 часов прогноза. Определение в процедуре соответствия облачного слоя требованиям глубокой или мелкой конвекции подробно изложено в работе [1].

Для прогнозов погоды использовалась модель WRF-ARW версии 3.9.1 [2]. Прогнозы рассчитывались по области с пространственным разрешением в 18 км с использованием следующих параметризаций физических процессов: конвекции – Kain–Fritsch, Микрофизика облаков – NSSL 2–moment Scheme with CCN Prediction и др. [2]. Анализировались результаты семи прогнозов на 48 часов в Краснодарском крае летом 2017 г. (31 мая, 7, 22, 23 июня, 20 июля, 22 августа, 23 сентября). В эти даты были рассчитаны абсолютные ошибки температуры воздуха на 2 метрах, относительной влажности на 2 м, приземного давления и осадков. Все оценки проводились для прогнозов без учета усвоения и с учетом данных сетей грозопеленгации. В таблице 1 приведены оценки абсолютных ошибок приземных температуры воздуха, влажности, давления и осадков для всех семи случаев прогнозов, рассчитанные по двадцати синоптическим станциям Краснодарского края. Можно видеть, что средние абсолютные ошибки для всех величин благодаря учету гроз уменьшаются.

**Оценки абсолютных ошибок приземных температуры воздуха, влажности, давления и осадков**

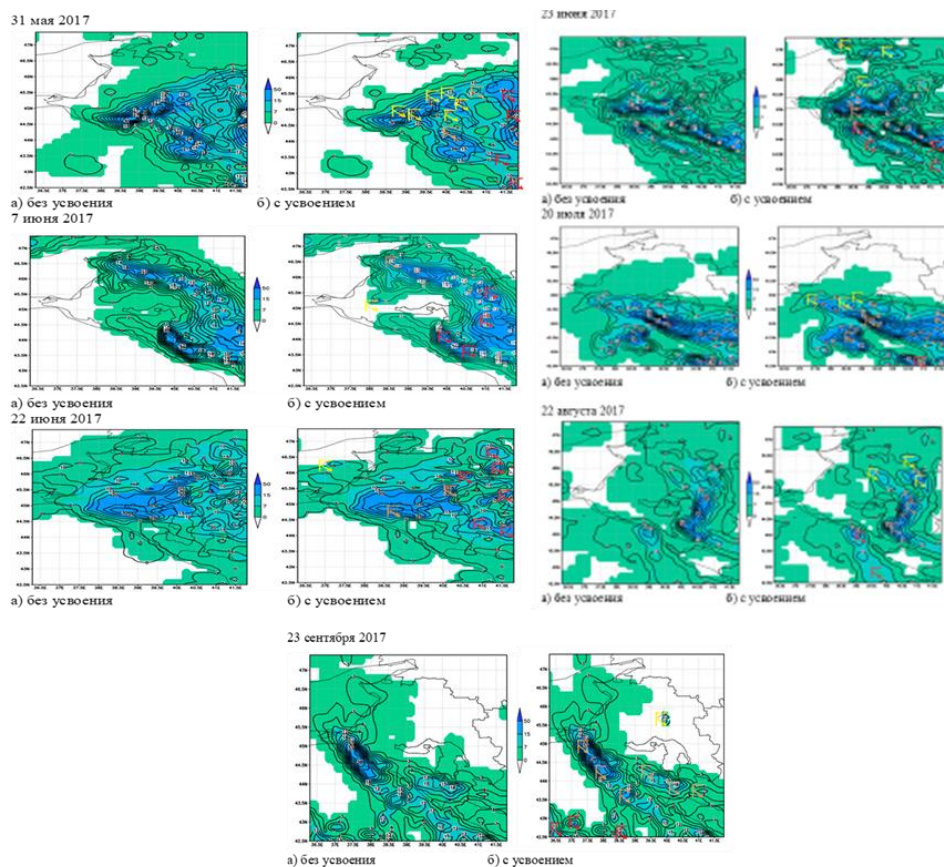
Забл., ч	31 мая 2017		7 июня 2017		22 июня 2017		23 июня 2017		20 июля 2017		22 августа 2017		23 сентября 2017	
	без усв.	с усв.	без усв.	с усв.	без усв.	с усв.	без усв.	с усв.	без усв.	с усв.	без усв.	с усв.	без усв.	с усв.
Температура, °С														
0	0,4	0,2	0,5	0,7	0,6	0,4	0,2	0,2	0,3	0,6	0,3	0,2	0,7	0,5
3	0,6	0,5	1,3	0,9	0,6	0,1	0,7	0,7	0,2	0,3	0,2	0,2	0,1	0,3
6	0,5	0,1	2,6	1,5	0,2	0,4	0,3	0,2	0,3	0,0	0,1	0,2	0,0	0,1
12	2,1	1,2	0,7	0,7	0,2	0,2	0,4	0,1	0,6	0,2	0,7	0,2	0,2	0,2
24	0,5	0,5	0,9	1,0	0,2	0,6	0,5	0,5	0,9	0,2	0,2	0,2	1,3	0,7
48	0,2	0,3	0,6	0,9	0,6	0,4	1,2	0,2	1,3	0,8	0,2	0,3	1,3	0,6
Относительная влажность, %														
0	11,8	10,0	10,8	8,0	13,5	7,9	5,9	5,9	9,4	8,2	7,2	7,0	8,3	7,1
3	13,6	12,7	14,8	12,0	13,8	11,0	9,2	6,7	11,0	9,8	7,2	7,3	8,3	7,7
6	14,5	15,4	16,4	11,2	14,2	13,1	9,1	7,7	11,4	10,6	7,7	7,3	8,9	7,7
12	14,5	17,2	18,6	15,6	14,5	13,5	9,2	7,7	13,0	13,0	7,7	7,3	9,2	8,3
24	20,8	19,0	22,6	18,4	15,6	13,8	10,2	8,2	13,8	13,0	8,2	7,7	9,8	8,9
48	21,7	21,7	22,8	18,8	15,9	14,9	10,4	9,9	13,8	13,4	11,0	9,6	11,0	9,5
Давление, гПа														
0	0,6	0,5	0,8	0,6	0,4	0,3	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,5	0,4
3	0,6	0,6	0,8	0,6	0,4	0,4	0,9	0,7	0,6	0,6	0,5	0,4	0,5	0,4
6	0,6	0,6	0,9	0,6	0,5	0,5	1,0	0,7	0,6	0,7	0,6	0,4	0,6	0,5
12	0,7	0,6	0,9	0,8	0,6	0,5	1,1	0,9	0,9	0,8	0,8	0,6	0,6	0,5
24	0,9	0,7	1,0	0,9	0,8	0,8	1,1	0,8	0,9	1,0	0,8	0,6	0,8	0,6
48	1,1	1,0	1,1	1,0	0,9	0,8	1,3	1,0	1,0	1,0	0,9	0,7	1,0	0,7
Осадки, мм														
12	0,7	0,6	0,6	0,3	1,3	1	2,0	1,7	1,2	1,4	1,0	0,6	0,8	1,0
24	1,8	1,1	1,8	1,2	3	2,0	1,3	1,3	1,4	2,0	1,6	1,2	1,1	0,8
48	2,1	1,6	4,0	3,5	3,7	2,9	3,4	2,4	3,4	3,8	1,8	2,0	1,7	1,3

На рисунке 1 представлены карты прогнозов осадков, полученные для Краснодарского края с помощью модели без учета данных сети грозопеленгации (а) и с учетом таковых (б) в соответствии с приведенным выше алгоритмом.

На этих картах заливкой нанесены прогнозы осадков, полученные в модели, а изолиниями в качестве эталона нанесены суточные данные осадков GPCP. Значками обозначены грозы по сети WWLLN (желтым – грозы за 0–8 ч, бежевым – 9–17 ч, красным – 18–24 ч). На картах без усвоения можно видеть, что слабые осадки 0–7 мм далеко не соответствуют эталону и занимают значительно большую территорию. Переход от глубокой конвекции к мелкой во всей области, где не наблюдались грозы (белые поля), позволил заметно приблизить конфигурацию прогностических осадков к данным наблюдений. Эта тенденция прослеживается во всех семи прогнозах.

Таким образом, впервые в России представлены результаты экспериментов по усвоению данных сетей грозопеленгации в модели прогноза погоды. Описана использованная процедура усвоения данных грозопеленгаторных сетей. Приведены оценки абсолютной ошибки приземных температур, влажности и приземного давления по Краснодарскому краю для семи прогнозов, в течении которых наблюдались интенсивные грозовые явления.

Продемонстрирована работа использованной процедуры и на примере сравнения карт накопленных суточных осадков для семи прогнозов с учетом и без учета сети WWLLN. Показано, что конфигурация полей прогностических осадков заметно улучшается.



*Рисунок 1. Карты прогнозов осадков, полученные для Краснодарского края с помощью модели без учета данных и с учетом данных сети грозопеленгации*

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта А 19-05-00047 и мол\_а 18-35-00044.

### Литература

1. Giannaros T.M., Kotroni V, Lagouvardos K. WRF-LTNGDA: A lightning data assimilation technique implemented in the WRF model for improving precipitation forecasts // Environmental modelling & software. 2016. 76. С. 54–68.
2. WRF–ARW Model Users Site URL: <http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/> (дата обращения 10.03.2019).