



***ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ АТМОСФЕРЫ:
ИНИЦИАТОР,
ИНДИКАТОР,
ПРОВОКАТОР***


***Нагорский П.М.
Томск – 2019 г.***



Георг Вильгельм Рихман



Михаил Васильевич Ломоносов



Летом 1753 г. М. В. Ломоносов и Г. В. Рихман провели уникальный эксперимент и с помощью громовой машины доказали, что, как писала газета Русские ведомости (1753, № 45), «...сие наблюдение почитается за чрезвычайное. Из сего наблюдения явствует, что... электрическая сила без действительного грому быть может. Ежели второе правда, то не гром и молния электрической силы в воздухе, но сама электрическая сила грому и молнии причини». Ученые при огромном стечении народа устроили пальбу из целой батареи пушек, гром «сотрясал небо», но «электрический указатель» ничего не показывал («искусством произведенный гром электрической силы не показывает»).

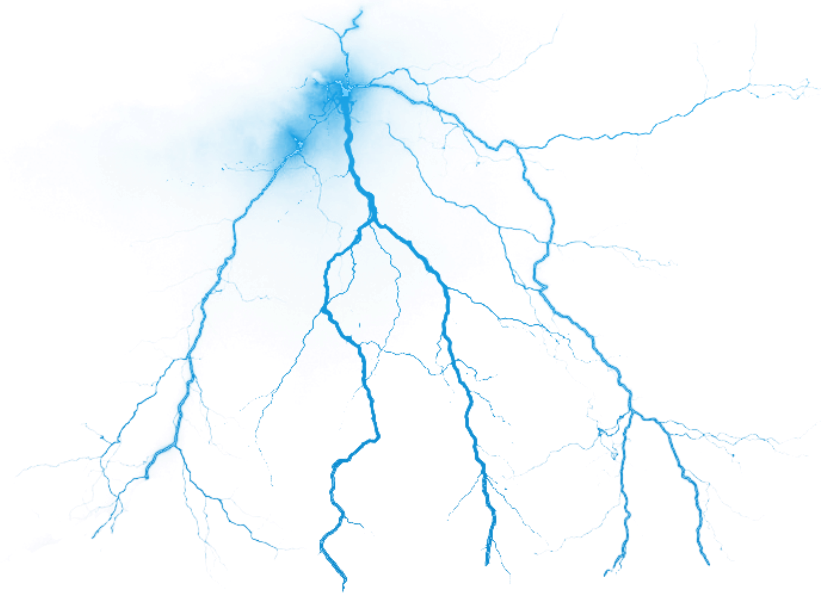
6 августа 1753 года, когда оба ученых проводили наблюдения электрических явлений во время сильной грозы, каждый в своей домашней лаборатории, произошел трагический случай. Рихман приблизился к прибору на расстояние полуметра. И в этот миг в воздухе появился синеватый огненный шар размером с крупное яблоко. Он подлетел к голове Рихмана. Раздался сильный взрыв. Ученый откинулся назад и замертво рухнул на стоявший сзади сундук. Как предполагают некоторые исследователи, огненный шар, убивший замечательного ученого, был шаровой молнией.

Предмет и объекты исследования

Атмосферное электричество – раздел физики атмосферы, изучающий электрические явления и процессы в атмосфере.

Объектами исследования атмосферного электричества являются:

- ионизация в атмосфере;
- концентрация ионов в воздухе;
- электрическая проводимость воздуха;
- объёмные заряды в атмосфере;
- заряды облаков и осадков;
- электрические поля в атмосфере;
- электрические токи в атмосфере;
- электрические разряды (молнии).



Электрические явления в атмосфере

К *первой* группе следует отнести те явления, которые связаны с глобальной электрической цепью (*ГЭЦ*), состоящей из хорошо проводящих земли и ионосферы и слабопроводящей атмосферы.

Ко *второй* – влияние напряженности электрического поля на распространение оптического излучения в аэрозольной атмосфере, включая соотношение, связывающее напряженность электрического поля и метеорологическую дальность видимости.

К *третьей* – излучения, возникающие при появлении в атмосфере мощных электрических полей. Характерный пример – обычная линейная молния, а также разряды в средней атмосфере, огни Святого Эльма, генерация молниевыми разрядами рентгеновского и гамма излучений и целый ряд других явлений.

К *следующей* группе относятся явления, связанные с молниевыми разрядами как природными химическими реакторами, приводящими в к долговременным изменениям концентрации окислов азота в верхней тропосфере и нижней стратосфере. Это, в свою очередь, ведёт к изменениям концентрации озона и, соответственно, прозрачности атмосферы в области жесткого ультрафиолетового излучения.

Глобальная электрическая цепь

Природа и основные свойства

Согласно концепции Вильсона [*Wilson C.T.R. // Proc. Phis. Soc. 1925. V. 37. P. 32-40.*] основными источниками в ГЭЦ служат кучево-дождевые и слоисто-дождевые облака, а зонами разрядки ГЭЦ – области «хорошей» погоды. Районы, где преобладает действие глобальных факторов над локальными, рассматриваются как зоны «хорошей» или ненарушенной погоды. В этих местах отсутствуют значительные концентрации аэрозолей и источники сильной ионизации. При преобладании локальных факторов (грозы, пылевые бури, облака, ветер силой более 6 м/с, дождь, пурга, метель, поземка и др.) говорят о зонах нарушенной погоды.

Концепция Вильсона получила фундаментальное подтверждение в конце 20-х годов XX века при сравнении суточной вариации атмосферного электрического поля над океанами, измеренной в условиях «хорошей» погоды с суточной вариацией количества гроз на земном шаре. Обе зависимости имеют максимум при ~19–20 UT (время по Гринвичу) и минимум при ~4 UT.

Лёгкие ионы – звено Глобальной электрической цепи

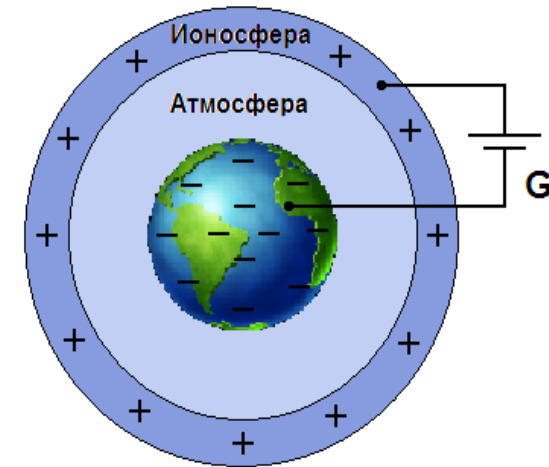
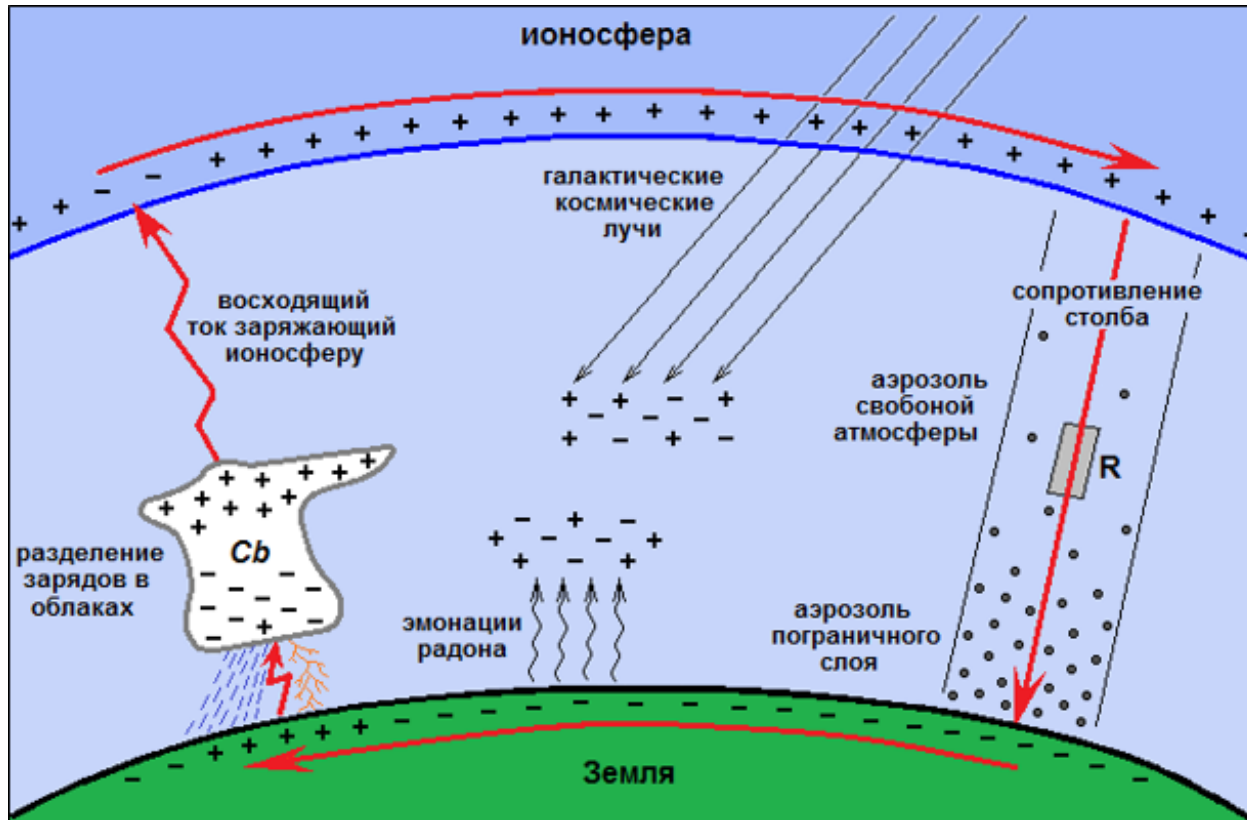


Схема «Земного конденсатора»

Схема Глобальной электрической цепи

1. Williams E.R. The tripole structure of thunderstorms // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. – 1989. – V. 94 (D11). – P. 13151–13167.
2. Rycroft M.J., Harrison R.G., Nicoll K.A., Mareev E.A. An Overview of Earth's Global Electric Circuit and Atmospheric Conductivity // *Space Science Reviews*, (2008) 137: 83–105

Свойства ГЭЦ

Название параметра	Значение
Число гроз, действующих одновременно	1500-2000
Глобальный ток	750 – 2000 А
Ионосферный потенциал:	
а) диапазон изменения величины	150 – 600 кВ
б) среднее значение	280 кВ
Сопротивление столба атмосферы:	
а) низкие широты	$1,3 \cdot 10^{17}$ Ом/м
б) высокие широты	$3,0 \cdot 10^{17}$ Ом/м
Полное сопротивление	230 Ом
Плотность тока	$1,0-2,4 \cdot 10^{12}$ А/м ²
Градиент потенциала	125 В/м
Электропроводность атмосферы	$\sim 10^{-14}$ См/м
Время релаксации электрического заряда	5 – 10 мин

Электропроводность – величина, обратная электрическому сопротивлению ($\lambda_{\text{пр}} = 1/R$), измеряется в $\text{См} \cdot \text{м}^{-1}$ (См – Сименс). **Подвижность носителей заряда u** – это отношение средней скорости направленного движения носителей зарядов к напряженности поля ($[u] = \text{м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$).

Электропроводность атмосферы определяется характеристиками аэроионов. Выделяют обычно пять групп ионов в зависимости от их подвижности и радиуса:

- **легкие (малые) ионы** ($u_{\pm} \geq 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$, $r \leq 6,6 \cdot 10^{-8} \text{ см}$);
- **легкие промежуточные ионы** ($10^{-6} \leq u_{\pm} \leq 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$; $6,6 \cdot 10^{-8} \leq r \leq 8 \cdot 10^{-8} \text{ см}$);
- **тяжелые (большие) промежуточные ионы** ($10^{-7} \leq u_{\pm} \leq 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$; $8 \cdot 10^{-8} \leq r \leq 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ см}$);
- **ионы Ланжевена** ($2,5 \cdot 10^{-8} \leq u_{\pm} \leq 10^{-7} \text{ м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$; $2,5 \cdot 10^{-6} \leq r \leq 5,7 \cdot 10^{-6} \text{ см}$);
- **ультратяжелые ионы** ($u_{\pm} < 2,5 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$; $r > 5,7 \cdot 10^{-7} \text{ см}$).

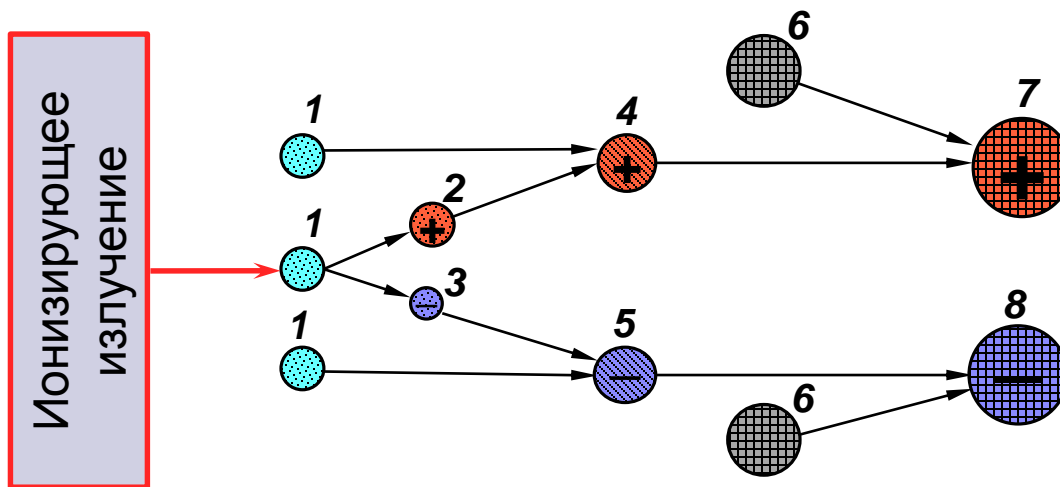
Основной вклад в электропроводность нижней атмосферы вносят легкие ионы $\lambda_{\pm} = en_{\pm}u_{\pm}$.

Виды ионов

Первично образовавшиеся молекулярные ионы существуют очень недолго (доли секунды). Под действием поляризационных сил к ним присоединяется некоторое число (порядка 10–15) молекул из окружающего воздуха, образуя достаточно устойчивые комплексы молекул – *легкие ионы* или *аэроионы*.

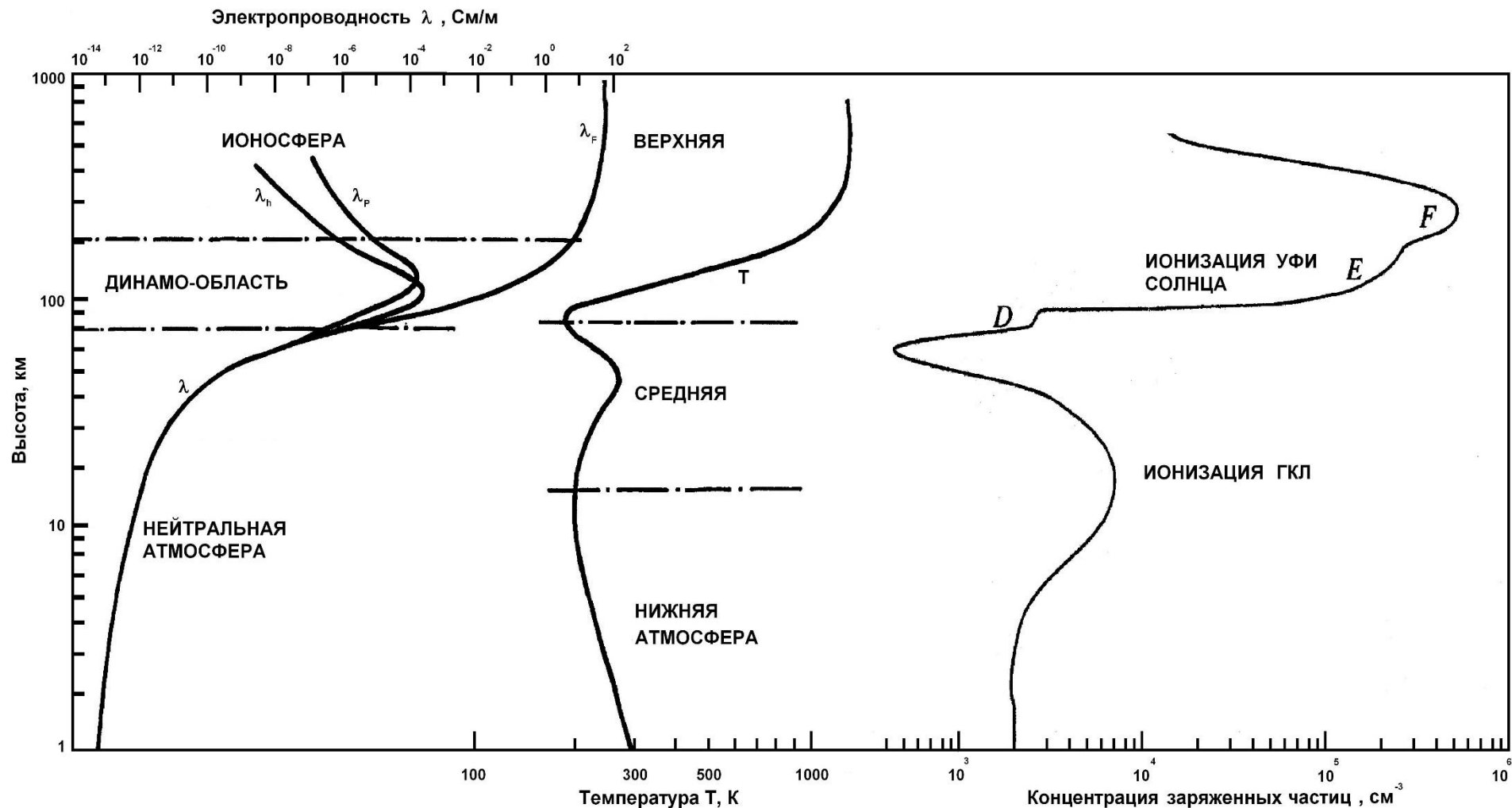
Лёгкие ионы часто присоединяются к различным ядрам конденсации (морская соль, пыль, пыльца), образуя *тяжёлые ионы* или *ионы Ланжевена*.

Также в атмосфере обнаруживаются ионы средних размеров – *средние ионы*.



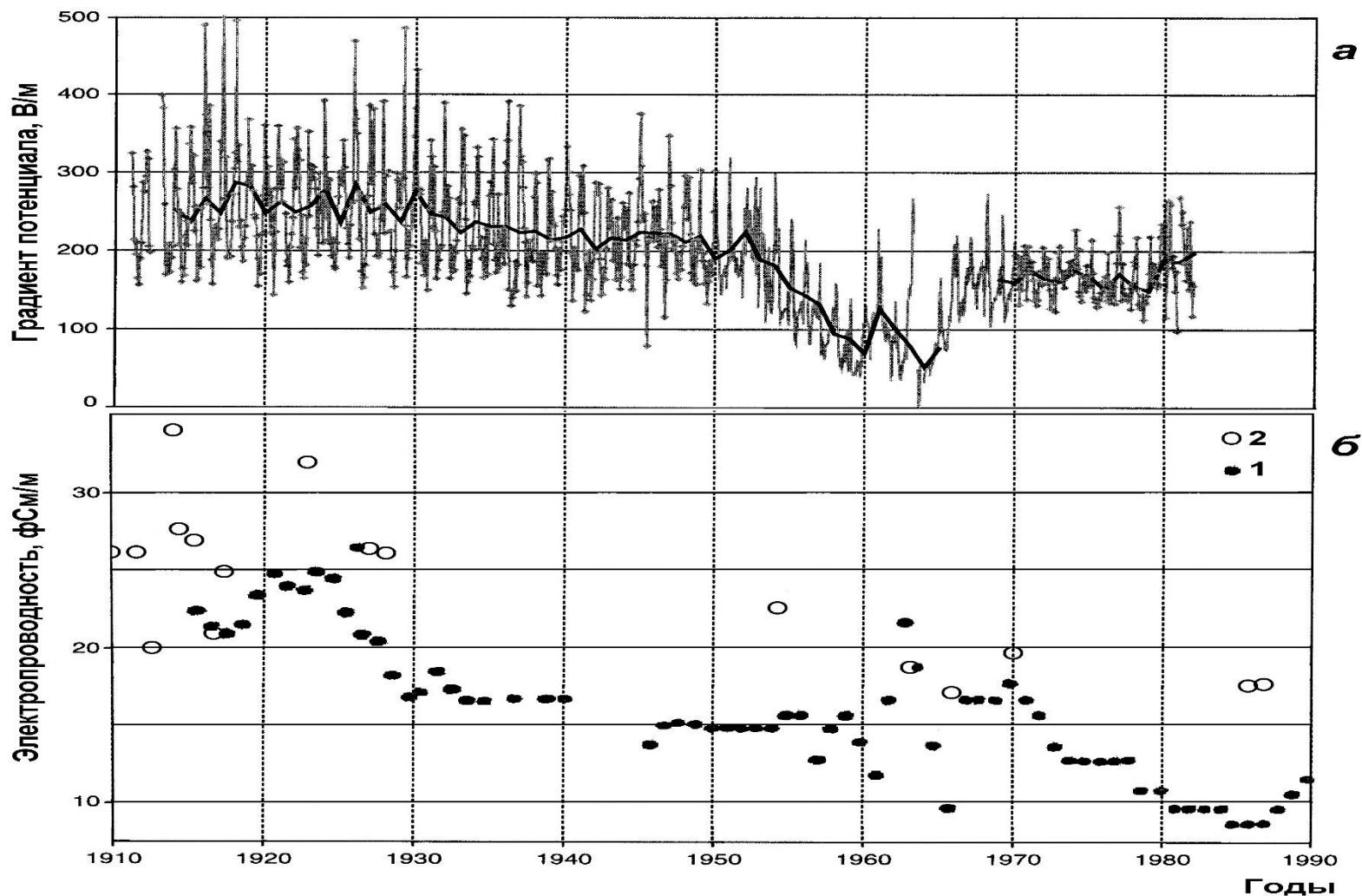
На рисунке: 1 – молекулы воздуха; 2 – нестабильный положительный легкий ион; 3 – свободный электрон; 4 и 5 – стабильный положительный и отрицательный ионы; 6 – аэрозольные частицы; 7 и 8 – положительный и отрицательный тяжёлые ионы.

Зависимость от высоты плотности заряженных частиц, температуры и проводимости

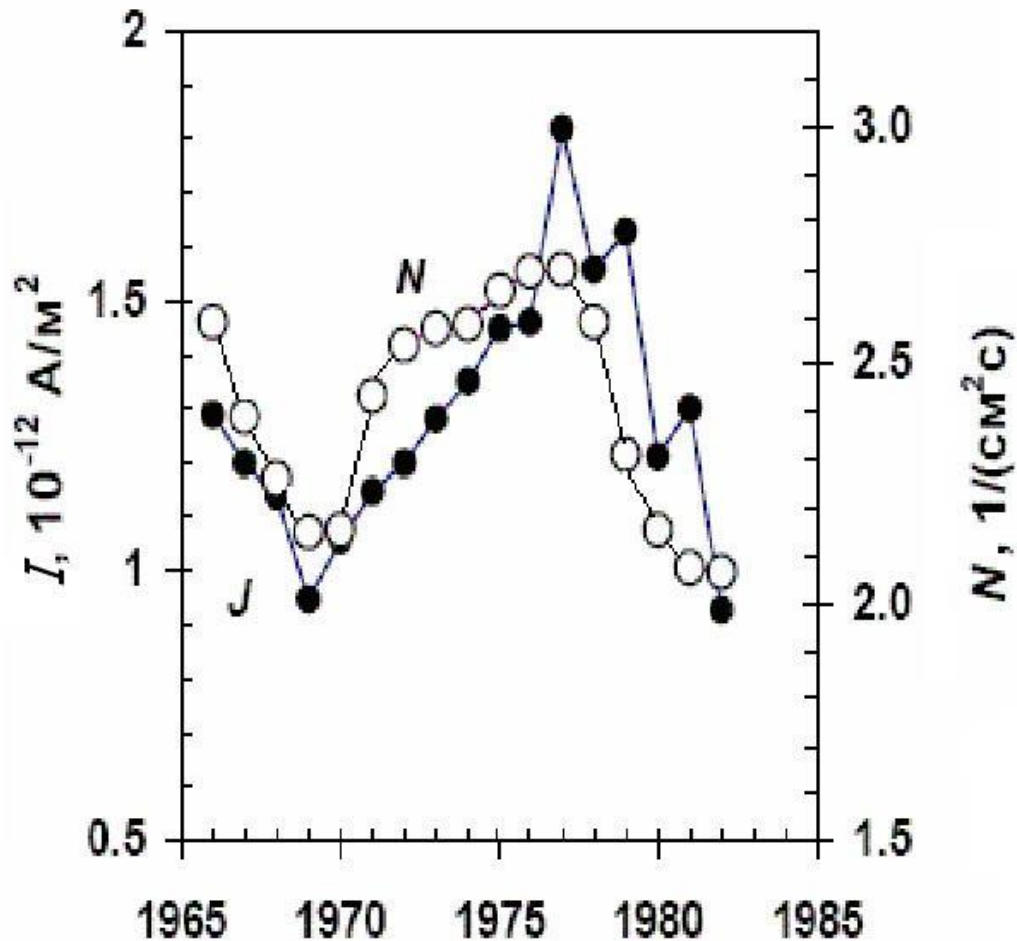


[Planetary Atmospheric Electricity // Space Science Rev. 2008. V. 137. 532 p.]

Изменения напряженности поля и электропроводности с 1910 по 1990 гг.

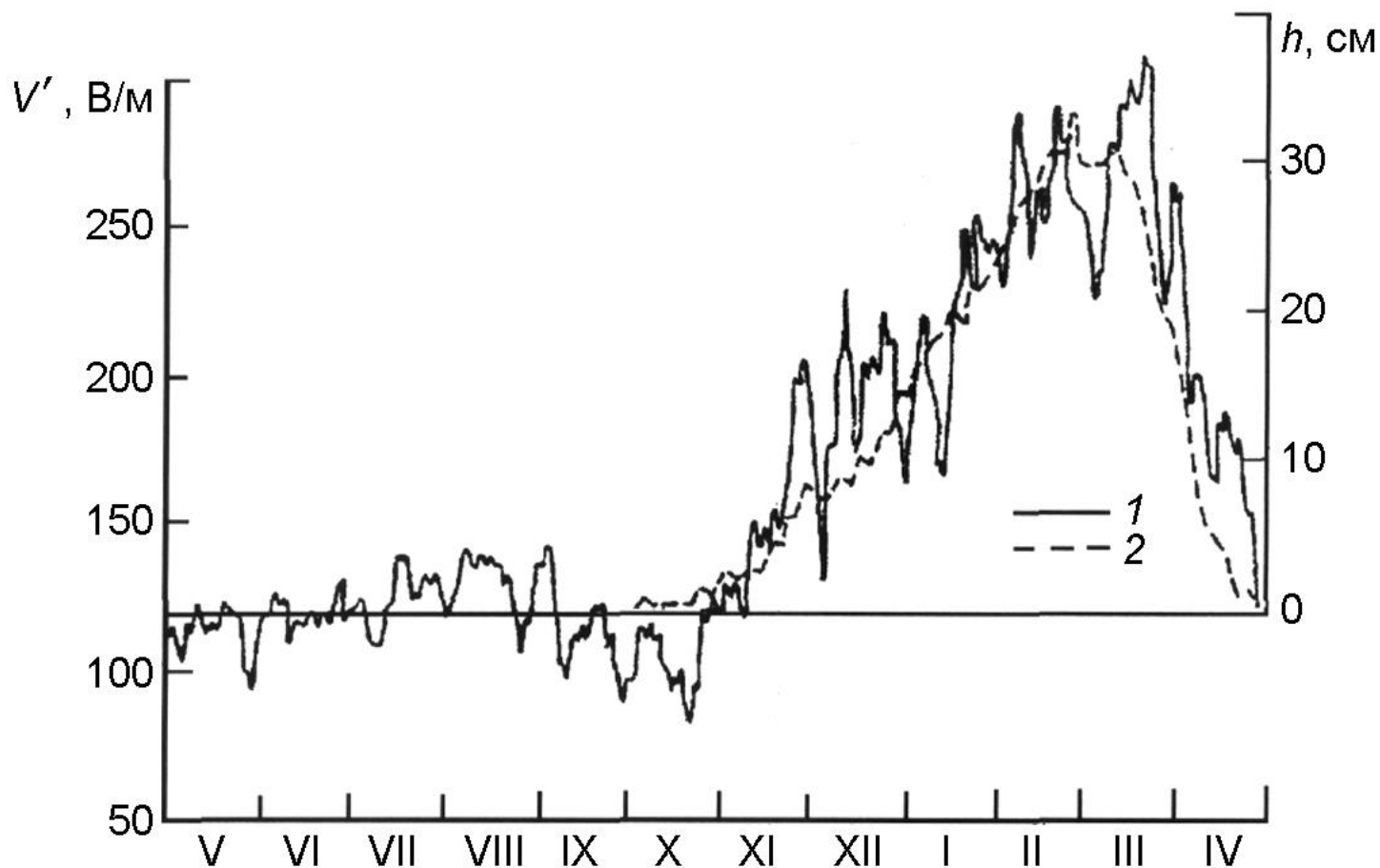


1.[Климин Н.Н., Шварц Я.М. // Метеорол. и гидрол. 1996. № 11. С. 20-26.]

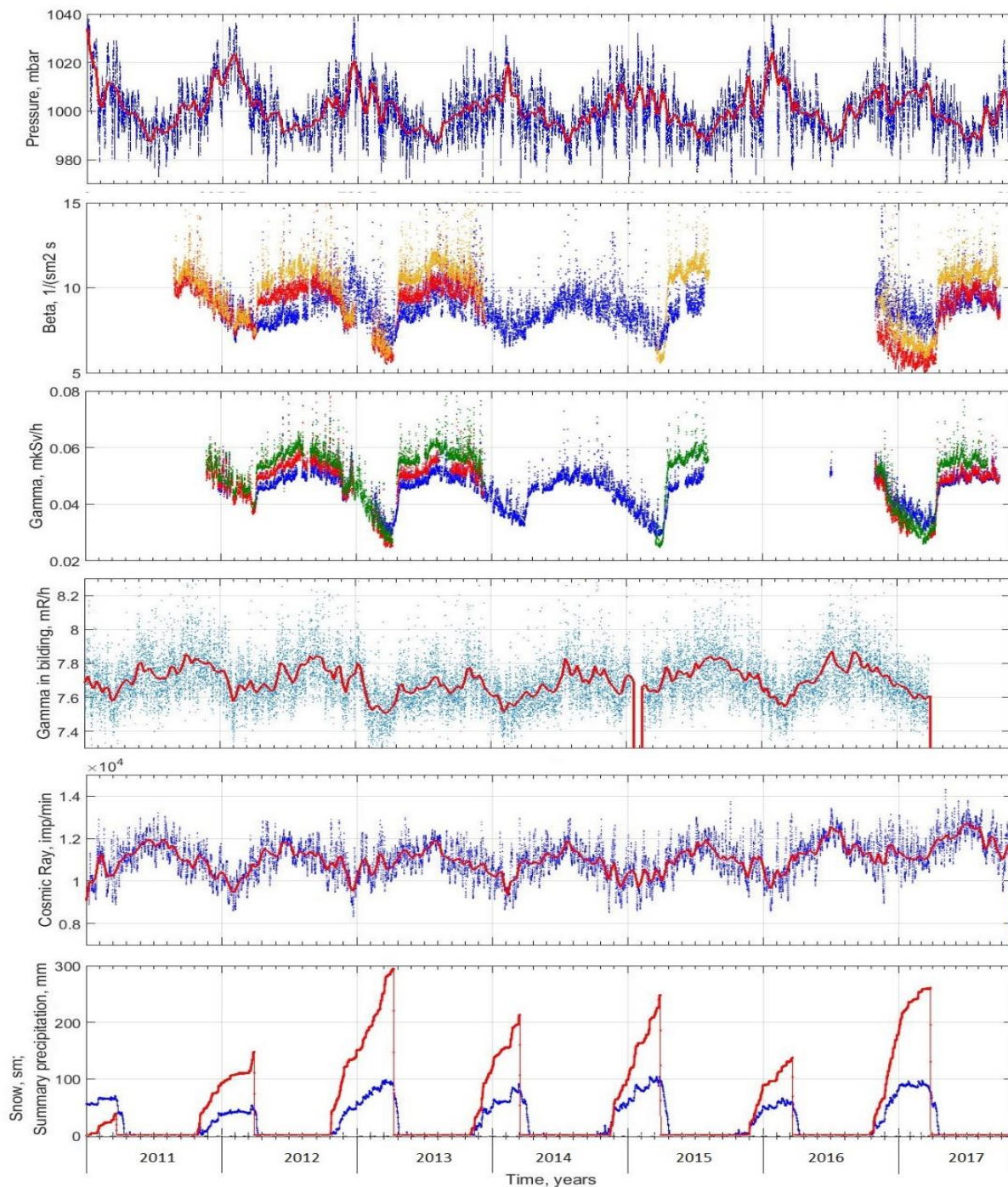


Временные зависимости величины атмосферного тока I (темные кружки) и потока космических лучей N на средних широтах на $h \approx 22 \text{ км}$ (светлые кружки).

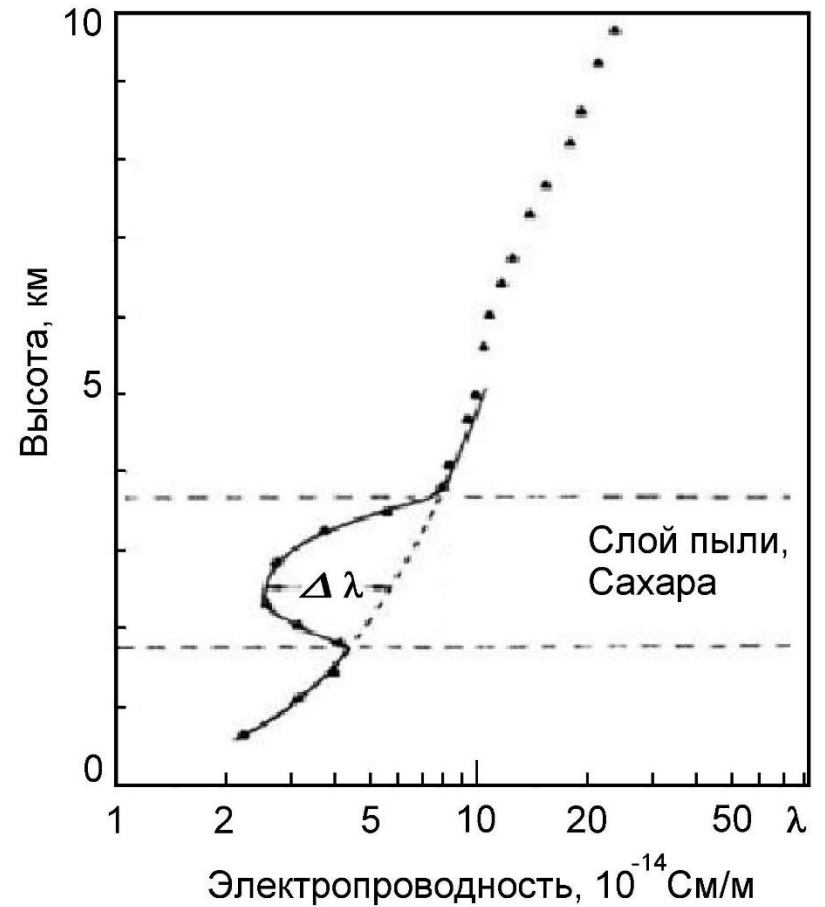
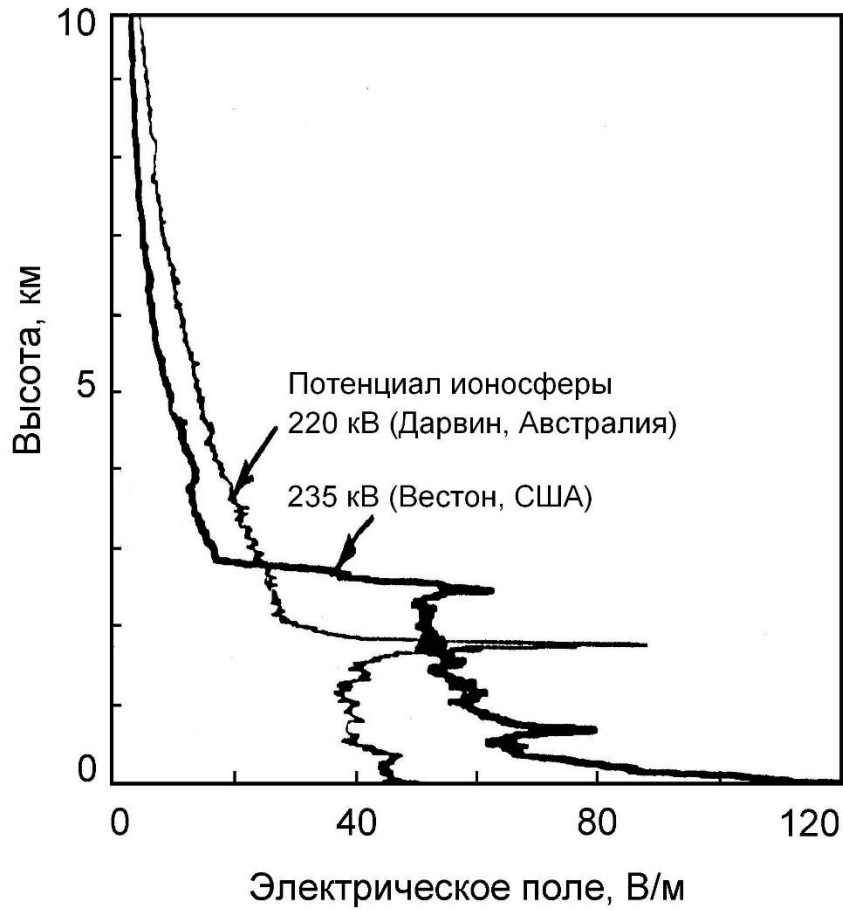
[*Ермаков В.И., Стожков Ю.И.* Физика грозových облаков. М.: ФИАН, Препринт № 2. 40 с].



Годовой ход средних значений градиента потенциала (1) и высоты снежного покрова (2) по наблюдениям в Воейково [*Махоткин Л.Г.* Снова о гипотезе Эберета // Труды ГГО. – 1974. – Вып. 301. – С. 70-74].

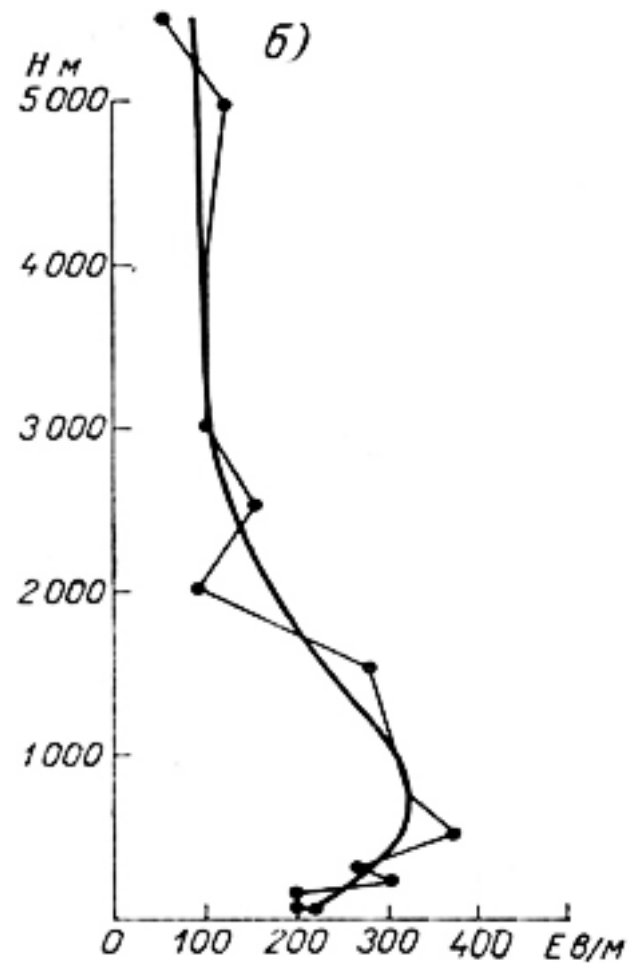
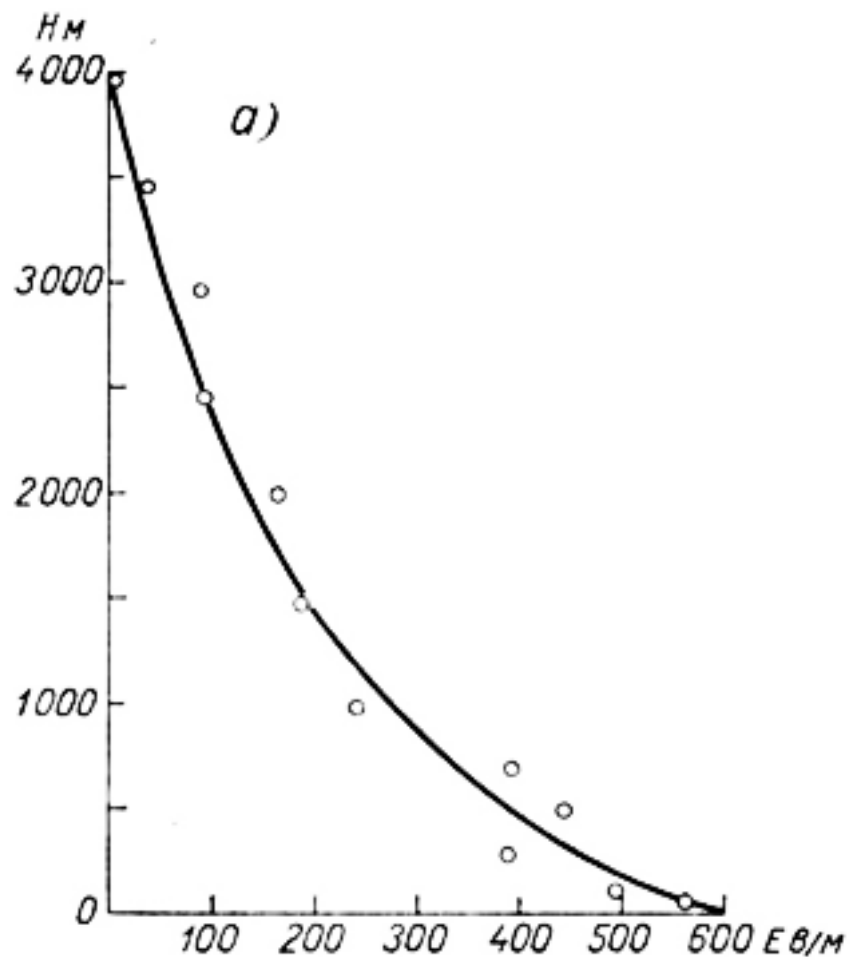


Динамика сезонно-годовых вариаций различных видов ионизирующих излучений во внутренней и во внешней антропогенной геосфере и их связь с давлением (верхняя панель) и высотой снежного покрова (нижняя панель).

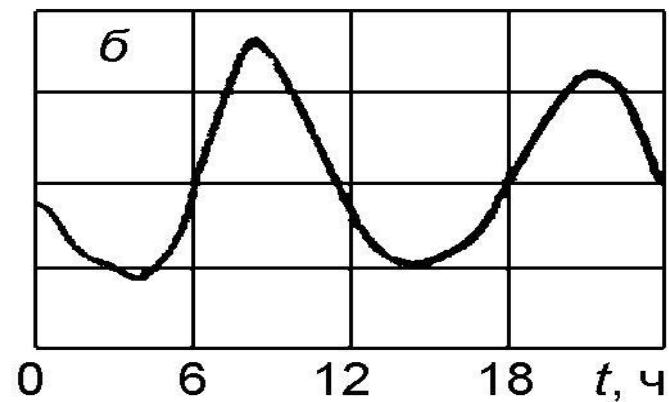
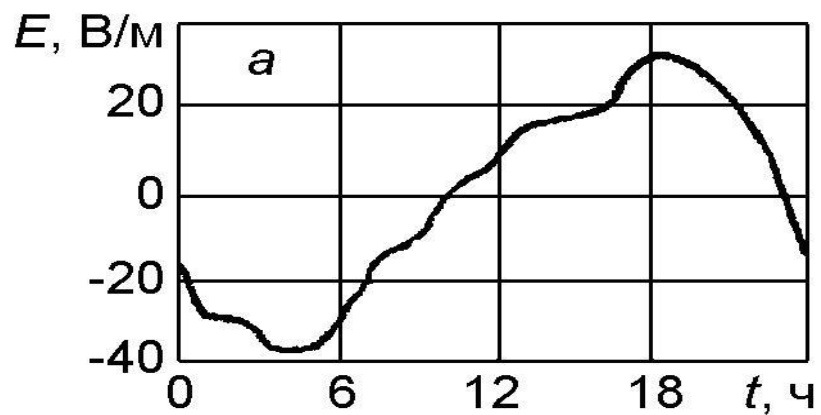


Зависимости напряженности поля (слева) и электропроводности (справа) от высоты; цифры у кривых – потенциал атмосферы в месте измерения

Электрическое поле в атмосфере



Изменение напряжённости поля с высотой в безоблачную погоду
а – над морем, б – над сушей



Суточные вариации градиента потенциала:
 а – кривая Карнеги; б - .вариации напряженности в средних широтах.

Электрическая структура слоистообразных облаков

Среди слоистообразных облаков наблюдаются как *многозарядные* (в одной части облака заряд одного знака, в другой – другого), так и *однозарядные* (в пределах всего облака заряд одного знака) облака.

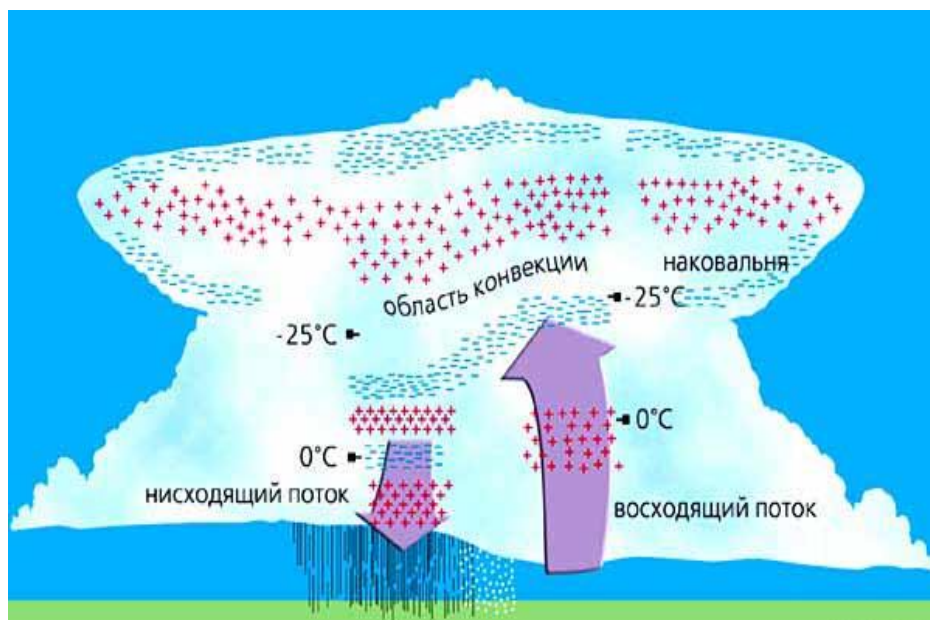
Тонкие слоистообразные облака часто бывают однозарядными. При этом, заряд противоположного знака чаще всего находится над облаком в слое, непосредственно к нему прилегающему. Среди однозарядных на долю положительно заряженных облаков приходится 67%, а на долю отрицательно заряженных – 33%.

Среди облаков *St*, *Sc*, кроме однозарядных, наблюдаются ещё *двухзарядные облака*, в которых или верхняя часть заряжена положительно, а нижняя – отрицательно (на долю таких облаков приходится 72%) или, наоборот, верхняя часть несёт отрицательный, а нижняя положительный заряд (на них приходится 28% случаев).

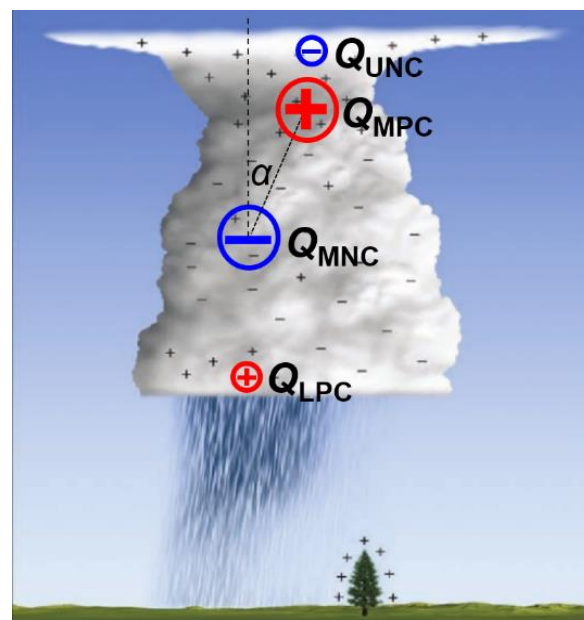
Электрическая структура конвективных облаков

Кучевые облака, как правило, содержат *два основных заряда*: в 75% случаев верхнюю часть занимает положительный заряд, а нижнюю – отрицательный.

Кучево-дождевые облака характеризуются наиболее сложной электрической структурой: в зрелом *Cb* в зоне *восходящего потока* наблюдается до *четырёх объёмных зарядов* различного знака, а в *зоне нисходящего потока* – до *шести*. В целом, кучево-дождевое облако можно считать *четырёхзарядным* (Q_{MPC} , Q_{MNC} , Q_{LPC} , Q_{UNC}), т. к. дополнительные заряды в нисходящем потоке существенно уступают по величине остальным.

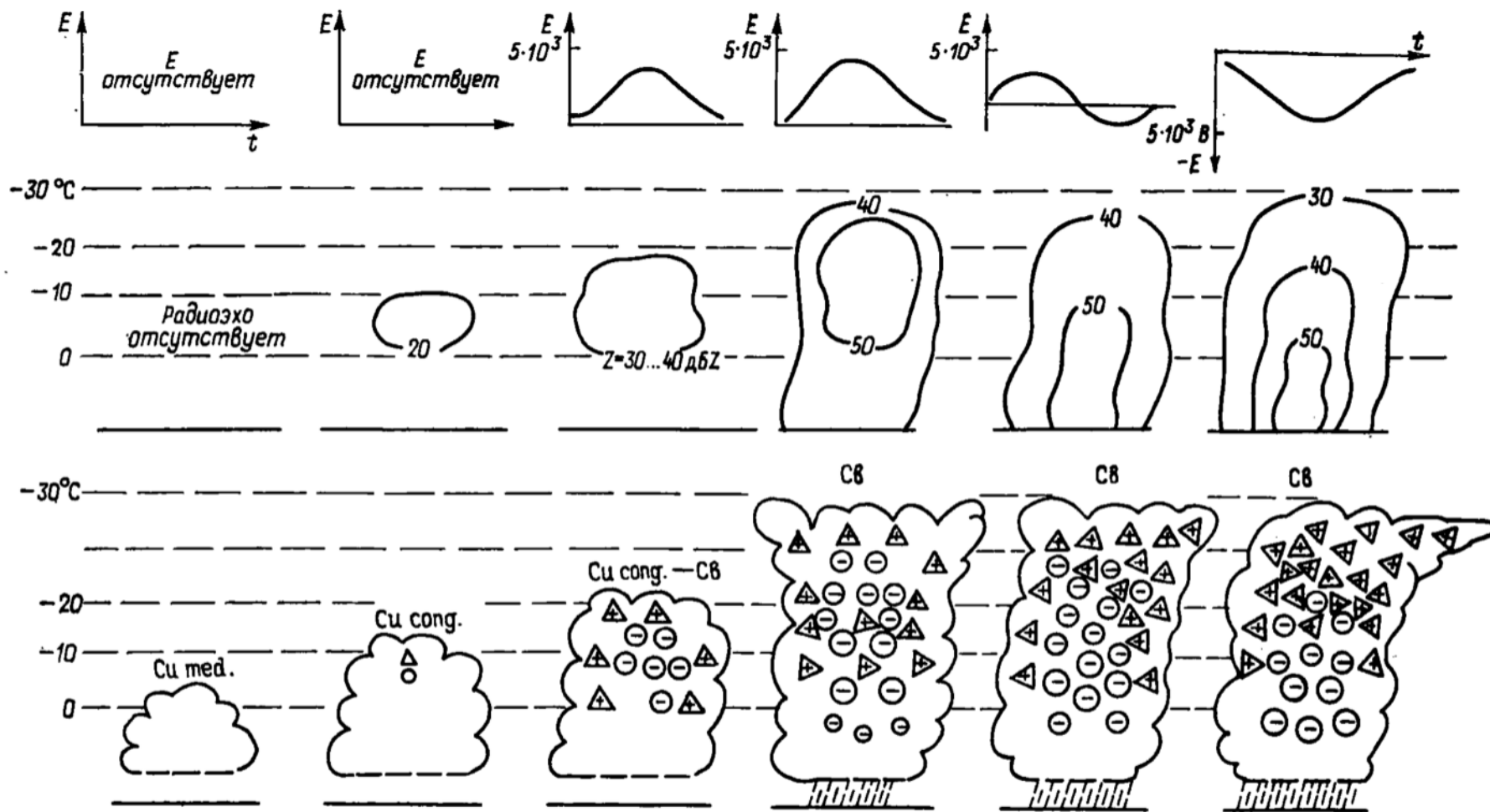


Схемы электрической структуры в зоне восходящего и нисходящего потоков *Cb*



Приближённая аппроксимация электрической структуры зрелого *Cb*

Трансформация электрической структуры Св



Схемы изменения напряжённости электрического поля над кучево-дождевым облаком, радио-эха Св и его электрической структуры

Виды электрических разрядов в тропосфере

Электрические разряды (молнии) в тропосфере

Коронные разряды
(Огни святого Эльма)

Молниевые в грозовых
Cb и их окрестностях

Вулканические молнии,
молнии в метелях и
пыльных бурях

Чёточные молнии

Линейные молнии

Шаровые молнии

Внутриоблачные

Облако–Облако

Облако–Земля

Облако–Воздух

Нисходящие

Восходящие

Положительные

Отрицательные

Внутриоблачные разряды



Разряды Облако-Облако



Разряды Облако-Воздух



Отрицательные разряды Облако-Земля



Положительные разряды Облако-Земля



Восходящие разряды (разряды Земля-Облако)



Эйфелева башня (324 м),
г. Париж



Останкинская башня (540 м),
г. Москва



Бурдж-Халифа (828 м),
г. Дубай

Чёточные молнии

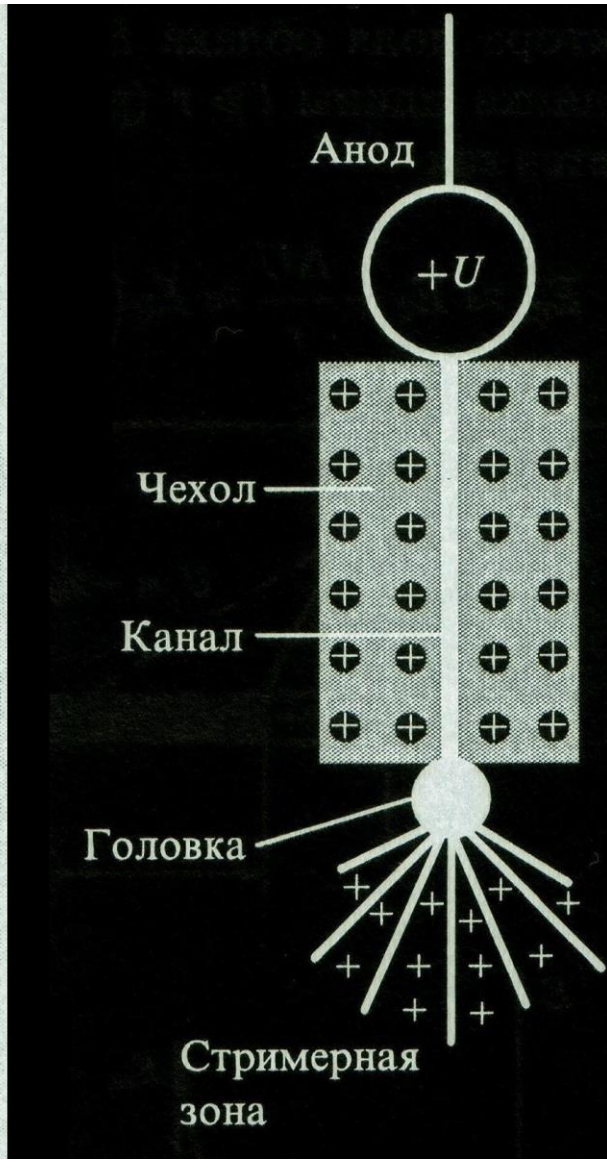
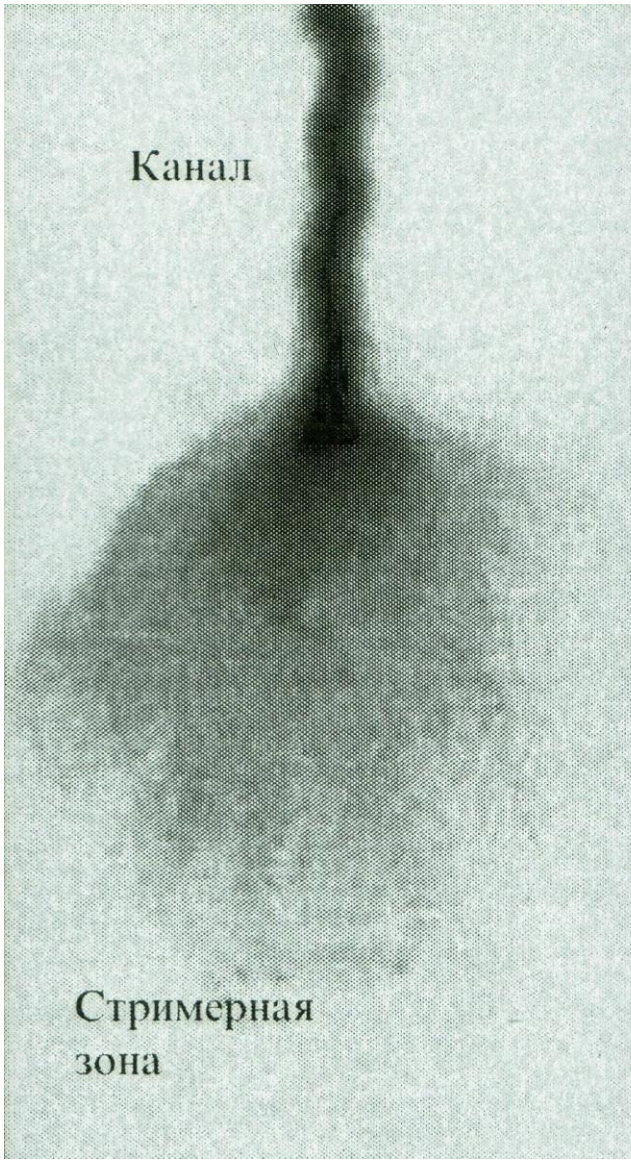


Фотография разряда чёточной молнии в мачту

Исследование искусственных разрядов (молний)

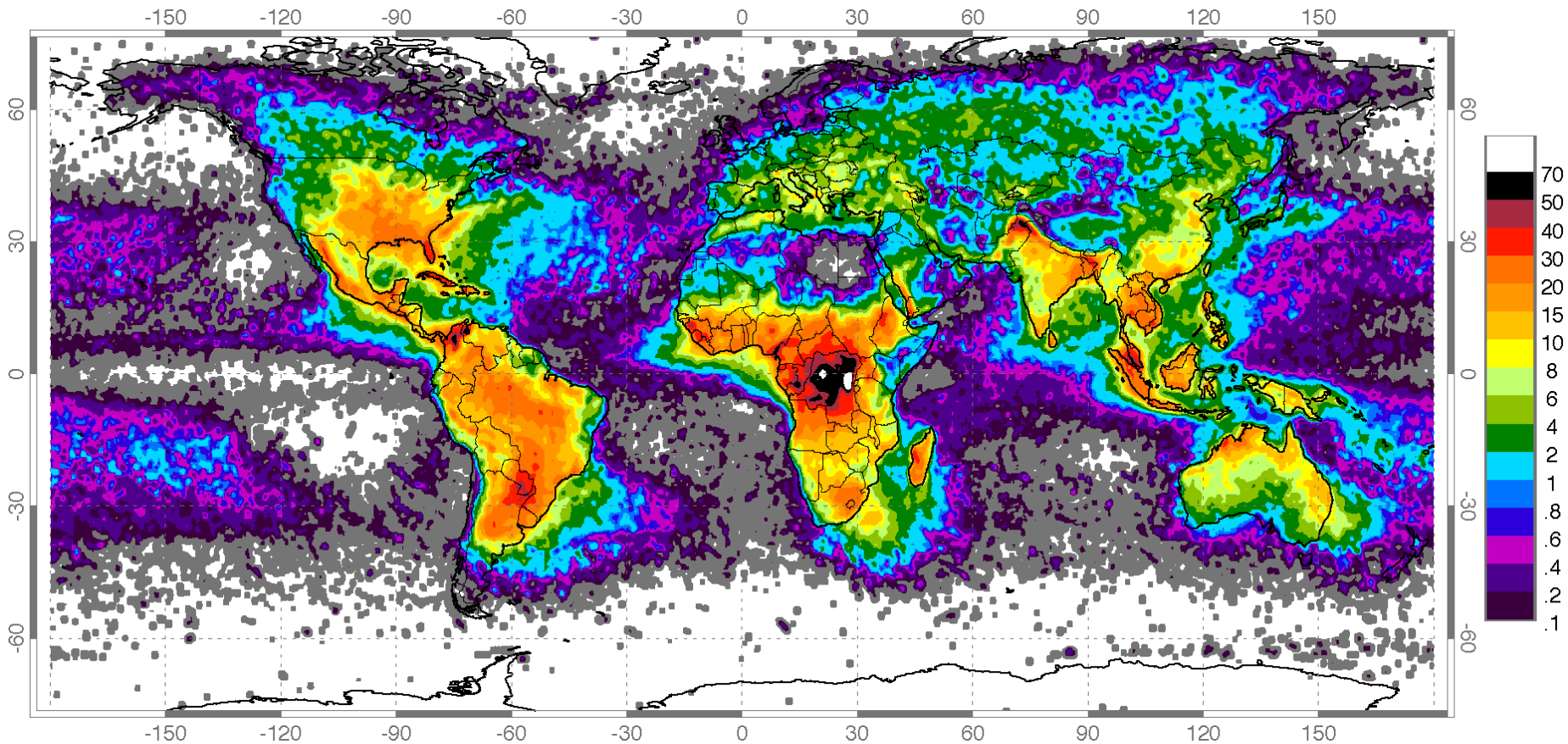


Искусственная молния в Высоковольтный центр ВЭИ, г. Истра (Московская обл.), Россия



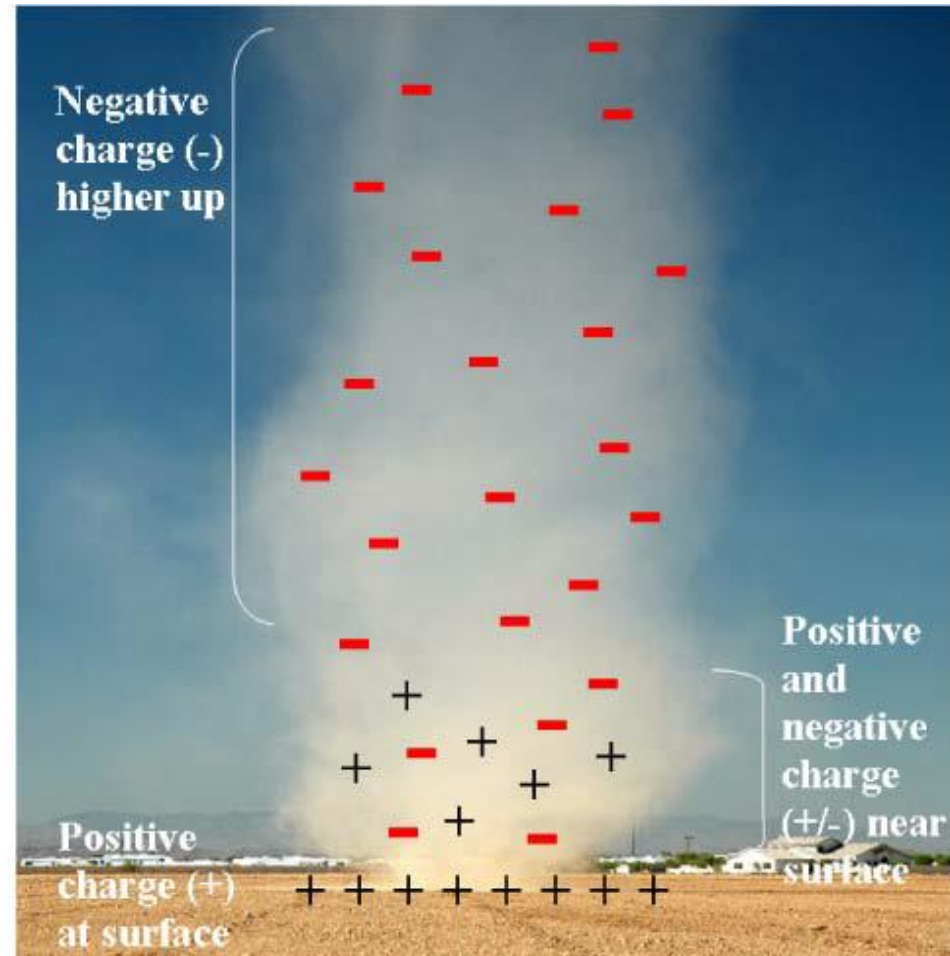
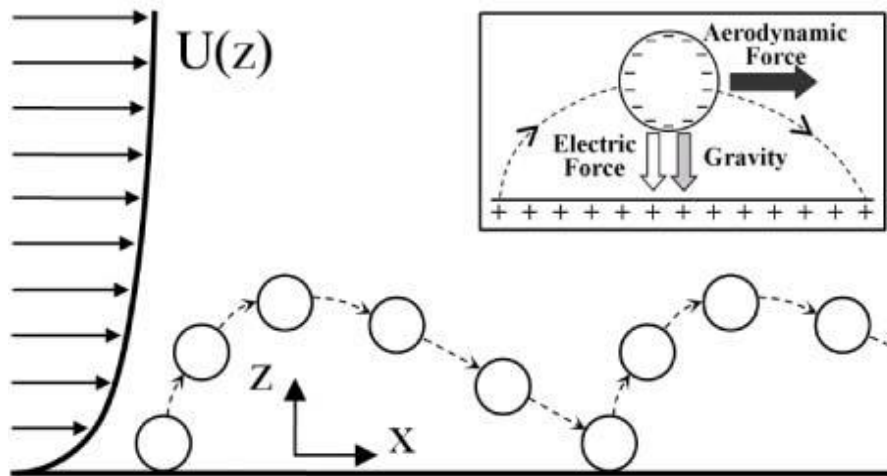
Фотография и принципиальная схема положительного лидера со стримерной короной (лабораторный эксперимент)

[Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Механизм притяжения молнии и проблема лазерного управления молнией // УФН. – 2000. – Т. 170. – № 7. – С. 753-769.]



Распределение молниевых вспышек по поверхности Земли. Результат оптических наблюдений со спутников OTD и LIS [Planetary Atmospheric Electricity // *Leblanc F. et al.* (eds.) – Space Science Rev. 2008. – V. 137. – Iss. 1-4. – 532 p.].

Формирование отрицательного заряженного слоя во время пыльных бурь в сахеле





Грязная гроза (Dirty thunderstorm).

Извержение вулкана Эйяфьядлайокюдль в Исландии, 2010г. Извержение превратило пар большое количество льда. Молнии освещают облако пепла от вулкана

[<http://www.astronet.ru/db/msg/1268425>]

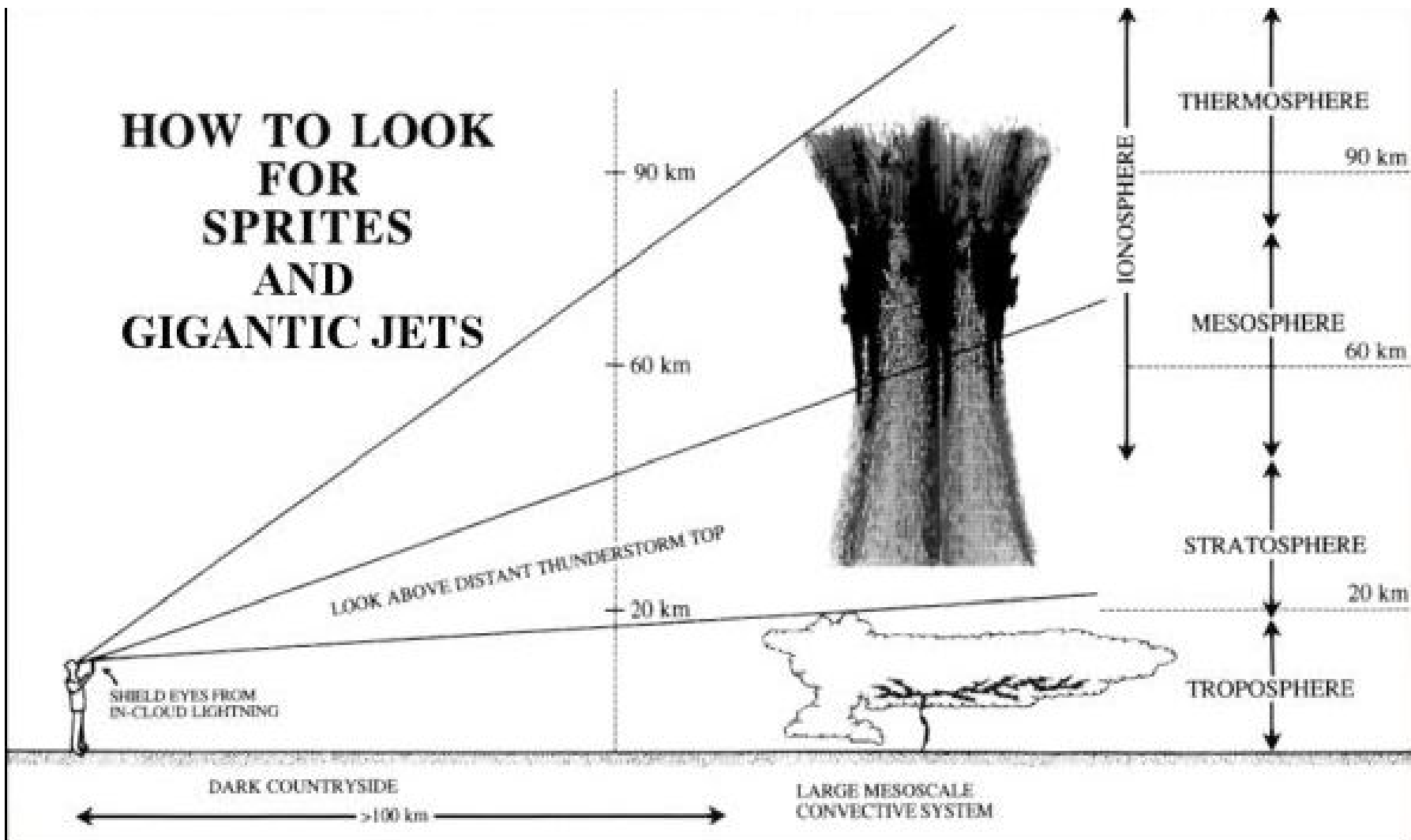
Спрайты, джеты, эльфы и другие виды молний *Кратковременные световые явления (TLE)*

30 лет назад, в ночь с 5 по 6 июля 1989 года, в истории изучения планеты Земля произошло важное событие.

Джон Рандольф Уинклер, отставной профессор, 73-летний ветеран NASA, направил на грозовые облака высокочувствительную видеокамеру, а потом, просматривая запись кадр за кадром, обнаружил две яркие вспышки, которые в отличие от молний шли не вниз, к земле, а вверх, к ионосфере.

Так были открыты спрайты — самые крупные из высотных разрядов в атмосфере Земли. Они наглядно подтвердили существование на нашей планете глобальной электрической цепи и дали новые возможности для ее исследования.

HOW TO LOOK FOR SPRITES AND GIGANTIC JETS



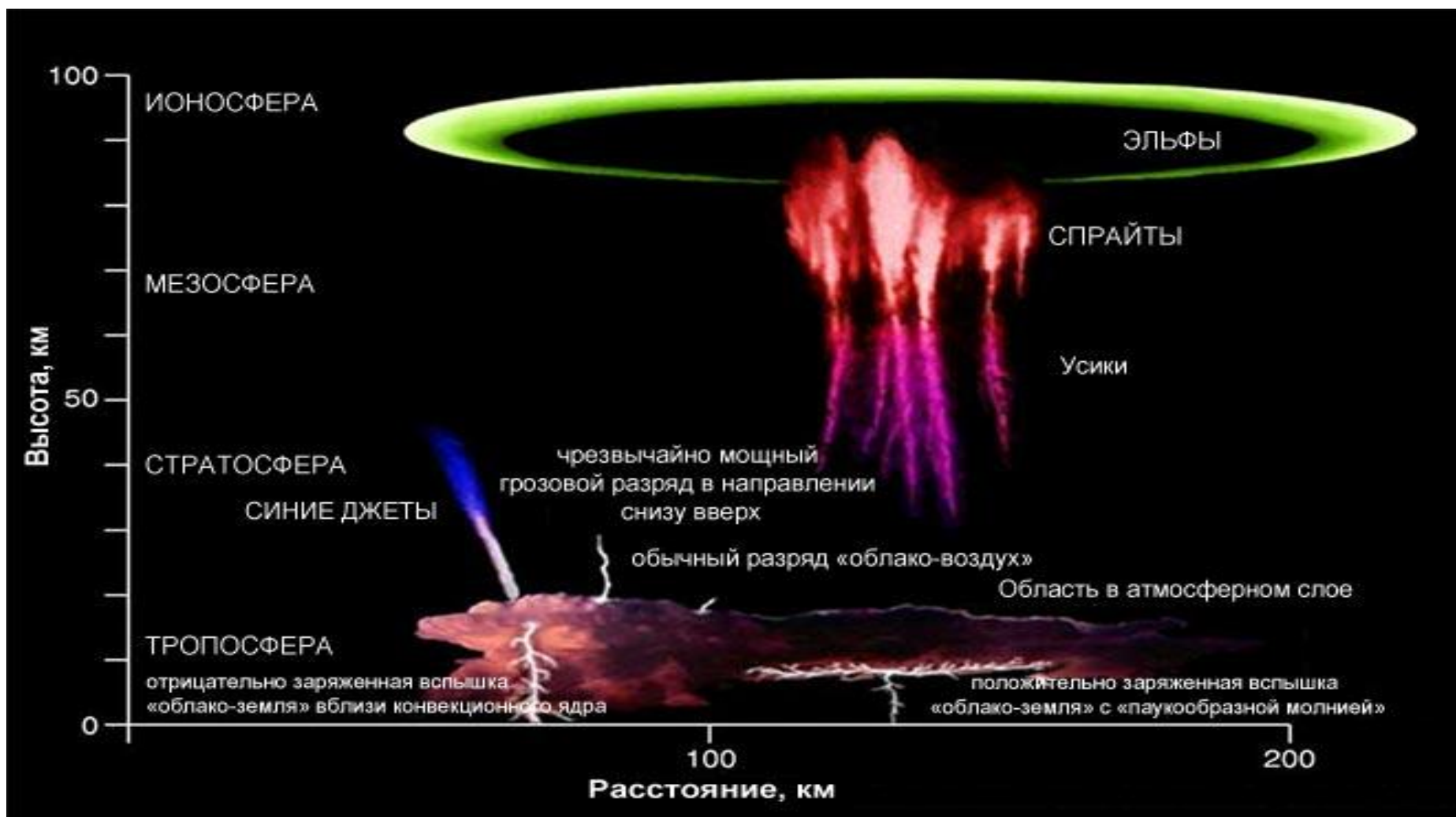
Спрайты, джетсы, эльфы и другие виды молний Кратковременные световые явления (TLE)

Разряды, зарегистрированные Джоном Уинклером, стартовали с высоты 14 километров, а их размеры составляли более 20 километров. Чтобы получить более убедительные доказательства, Уинклер дождался, когда Миннесоту накрыл ураган «Хьюго» и в ночь с 22 на 23 сентября снова записал на видеокамеру высотные разряды над грозовыми облаками.

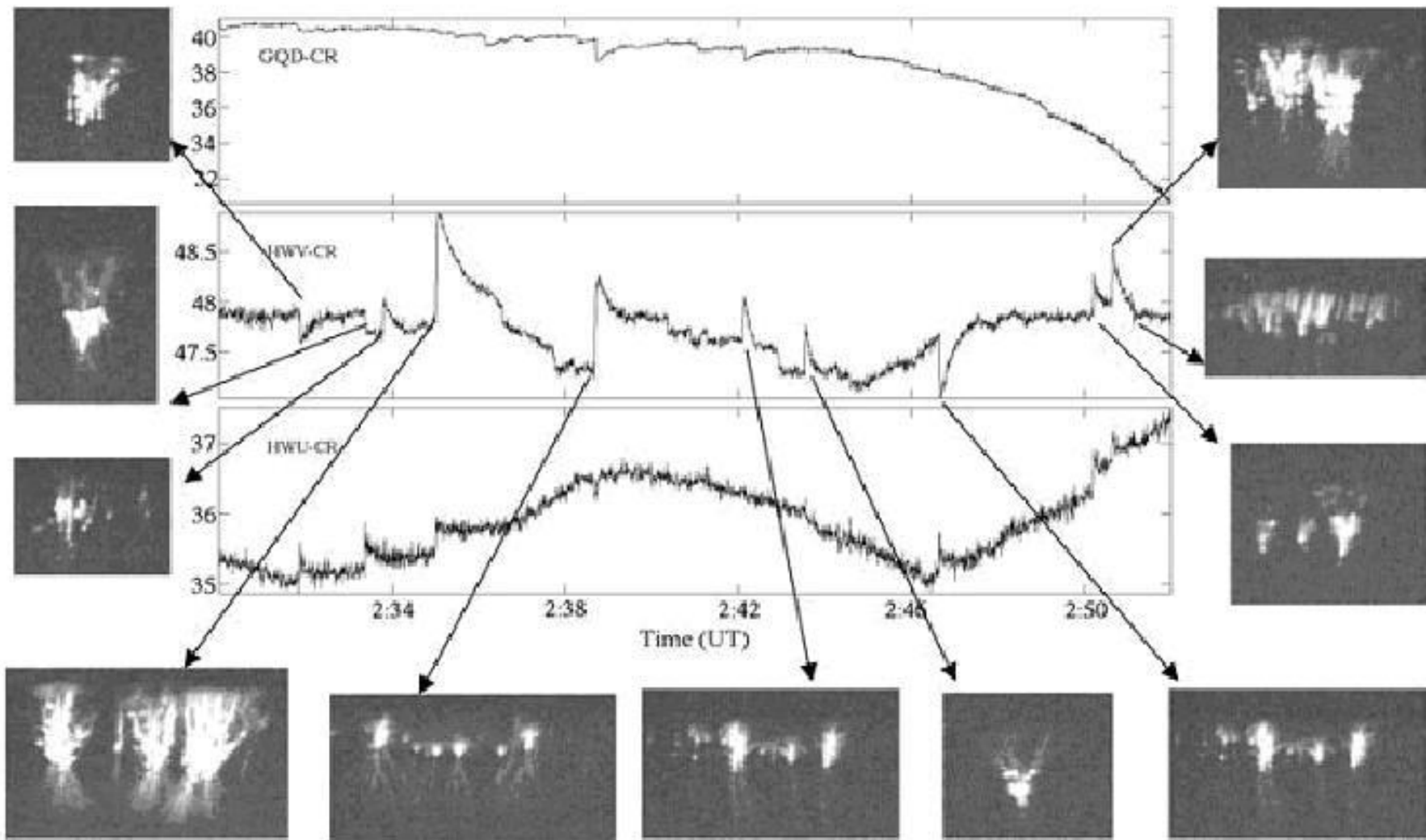
Уникальные кадры гигантских разрядов испугали Уинклера не меньше, чем обрадовали. А что если такой разряд ударит в летательный аппарат? Ученый обратился к коллегам из NASA. Те из уважения к прошлому Уинклера взялись просмотреть записи, сделанные во время полетов космических челноков, и не поверили своим глазам.

Вскоре было обнаружено целое световое шоу, разворачивающееся в верхних слоях атмосферы над грозовыми фронтами. Главные актеры в нем (в порядке снизу вверх): **голубые джетсы**, которых иногда называют **гномами** (раз уж они внизу), посередине **красно-фиолетовые спрайты и гало**, а над ними красноватые кольца — парящие в вышине **эльфы**.

Типы электрооптических явлений в страто и мезосфере



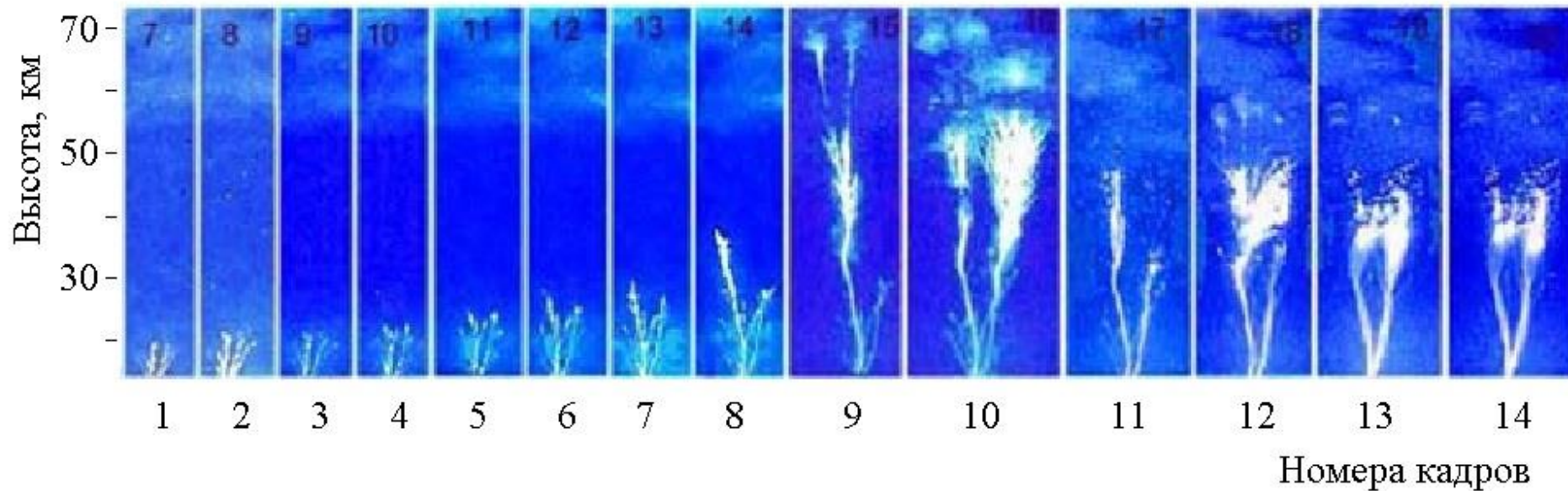
[Roussel-Dupré R., Colman J.J., Symbalisty E. et al // Space Science Rev. 2008. V. 137. Iss. 1-4. P. 51-82.]



Спрайты – источники электромагнитного излучения



Самые короткоживущие в семействе высотных разрядов. Эти светящиеся красно-фиолетовые кольца возникают на высотах 80-100 километров. Рождаются через 300 мс после разряда сильной молнии. Ствол молнии становится «передающей антенной», от которой стартует мощная сферическая электромагнитная волна очень низкой частоты, которая возбуждает красно-фиолетовое свечение молекул азота. Свечение, возникнув в центре, расширяется до 300-400 километров и угасает.



Голубые джеты, или гномы – редки и трудны для наблюдения в. Выглядит джет, как голубой узкий перевернутый конус (свечение молекул азота), стартующий с верхнего края грозового облака и достигающий иногда 40-километровой высоты. Скорость распространения голубых джетов — от 10 до 100 км/с. Между кадрами – 17 мкс.

Кроме обычных джетов регистрируются так называемые **голубые стартеры** (не выше 30 км). Самый интересный тип голубых джетов назван **гигантским джетом** (до высоты 90км).

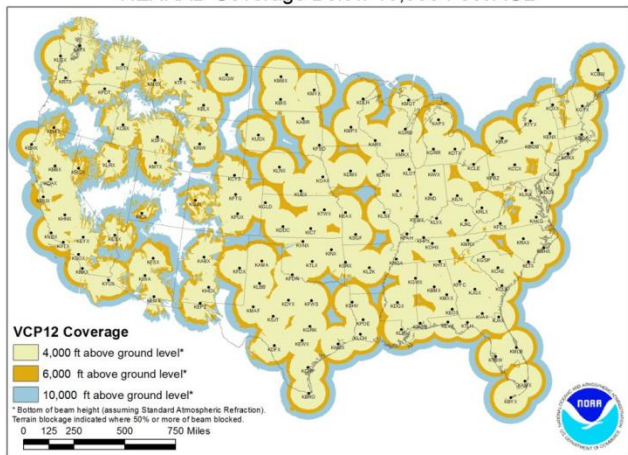


Спрайты – очень яркие объемные вспышки, возникающие на высоте 70-90 километров и спускающиеся вниз на 30—40 километров, а иногда и больше. В верхней части их ширина достигает десятков километров. Это самые объемные из высотных разрядов.

Характеристика	Спрайт	Эльф	Синий джет	Гигантский джет
Цвет	Красный верх, синий низ	Красно- оранжевый	Розовый низ, синий верх	Синий
Вел-на пикового тока разряда молнии	>50 кА	>100 кА	-	-
Переносимый заряд	огромный	большой	большой	~140 Кл
Радиоизлучение	низкочастотное	среднечастотная	?	низкая частота
Продолжительность	1 – 150 мс	0,5 – 1 мс	100 – 200 мс	200 – 400 мс
Диапазон высот	30 – 95 км	75 – 105 км	облако – 40 км	облако – 95 км
Задержка после разряда молнии	1 – 100 мс	325 мкс	-	-
Яркость	50 – 600 kR	1000 kR	1000 kR	~2000 kR
Горизонт. размеры	1 – 100 км	100 – 500 км	~2 км	40 км
Обл. возникновения	Ионосфера (слой D)	Ионосфера (слой E, ночь)	Стратосфера	Стратосфера- ионосфера
Год открытия	1989	1992	1989	2002

Автоматизированные сети МРЛ/ДМРЛ за рубежом

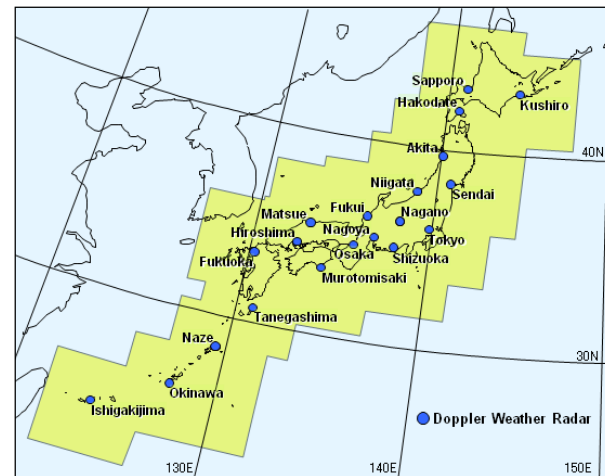
NEXRAD Coverage Below 10,000 Feet AGL



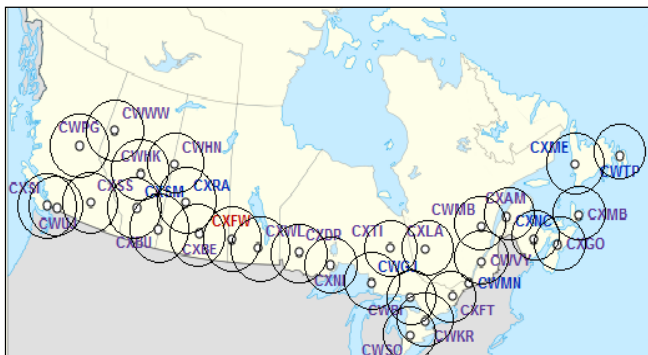
NEXRAD (США), 156 ДМРЛ



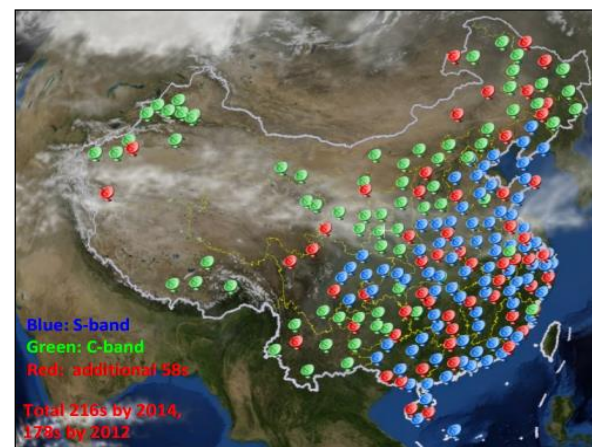
OPERA (Европа),
180 МРЛ/ДМРЛ



«Japan Weather Radar» (Япония),
20 ДМРЛ

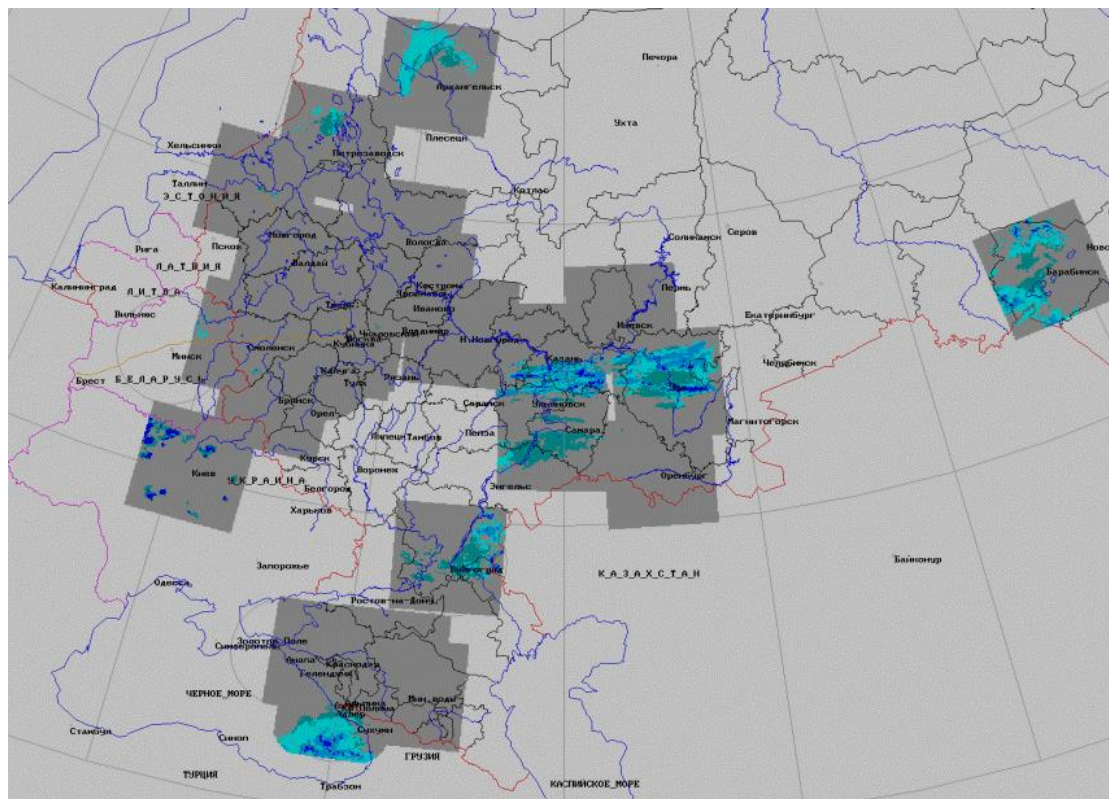


«Canadian weather radar network»
(Канада), 31 ДМРЛ



CINRAD (Китай), 216 ДМРЛ

Сеть метеорологических радиолокаторов (МРЛ/ДМРЛ) в РФ



Российская сеть автоматизированных МРЛ-5/ДМРЛ (1.09.2014)

- В России насчитывается (на 2014 г. [1]) метеорологических радиолокаторов: МРЛ-5 – 20, ДМРЛ – 11.
- На азиатскую территорию России приходилось только 3 локатора (МРЛ-5).
- Запланирована установка 140 ДМРЛ-С до 2020 года [2]

1. Временные методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике. М., Росгидромет, 2014. 110 с.

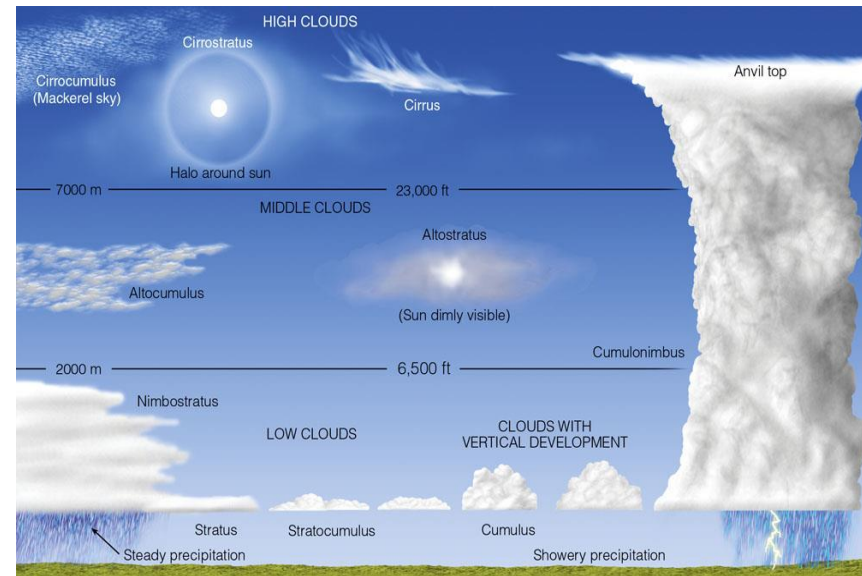
2. Методическое письмо об итогах работы в 2012 году функционирующей сети «МРЛ-штурмооповещения» и сети доплеровских метеорологических радиолокаторов s-диапазона (ДМРЛ-С), создаваемой в рамках ФЦП. 2013

Условия отбора данных $\nabla\varphi$ во время слоистообразной, волнистообразной и кучевой облачности

Отобраны метеорологические сроки (апрель–сентябрь), которые характеризуются:

- наличием облаков C_M-C_H (среднего или верхнего яруса), кучевых (Cu), слоисто-кучевых (Sc), слоистых (St) и слоисто-дождевых (Ns) соответственно;
- наличием морозящего дождя в случае St и обложного дождя в случае Ns ;
- отсутствием Cb , ливневых осадков и гроз.
- отсутствием тумана, дымки, мглы и дыма.

Из данных градиента потенциала ($\nabla\varphi$) в отобранные метеорологические сроки выделялись участки данных $\nabla\varphi$ в интервалах времени ± 30 минут относительно срока.



Морфологическая классификация облаков

Количество отобранных событий и значений $\nabla\varphi$ во время во время облаков C_M-C_H , Cu , Sc , St и Ns

Формы облаков	C_M-C_H	Cu	Sc	St	Ns
Количество событий	2736	448	714	65	61
Количество значений $\nabla\varphi$	163664	26674	42821	3897	3649

Условия отбора данных $\nabla\varphi$ во время кучево-дождевой облаков

Отобраны метеорологические сроки (апрель–сентябрь), характеризующиеся:

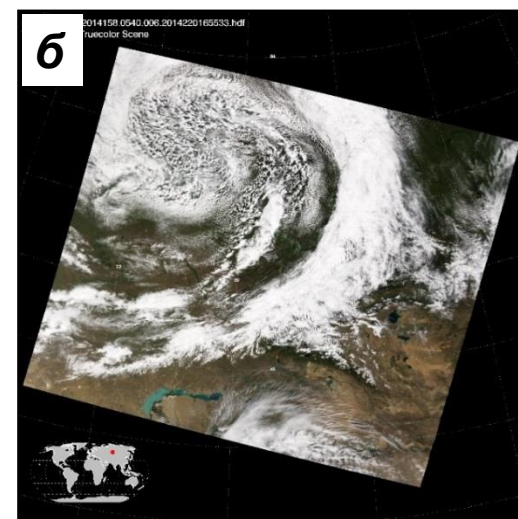
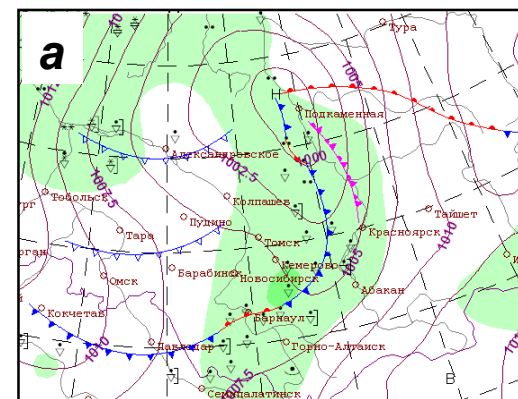
- наличием кучево-дождевых облаков (*Cb*) различного происхождения и конфигурации;
- отсутствием облаков *Ns*, *As* и *St*;
- отсутствием обложных и морозящих осадков;
- отсутствием тумана, дымки и дыма лесных пожаров.

Допускалось наличие *Cu*, *Sc*, *Ac*, *Cc*, *Ci* и *Cs*.

Отдельно на основе синоптических карт и данных MODIS отобраны сроки, в которые отмечались изолированные внутримассовые *Cb*.

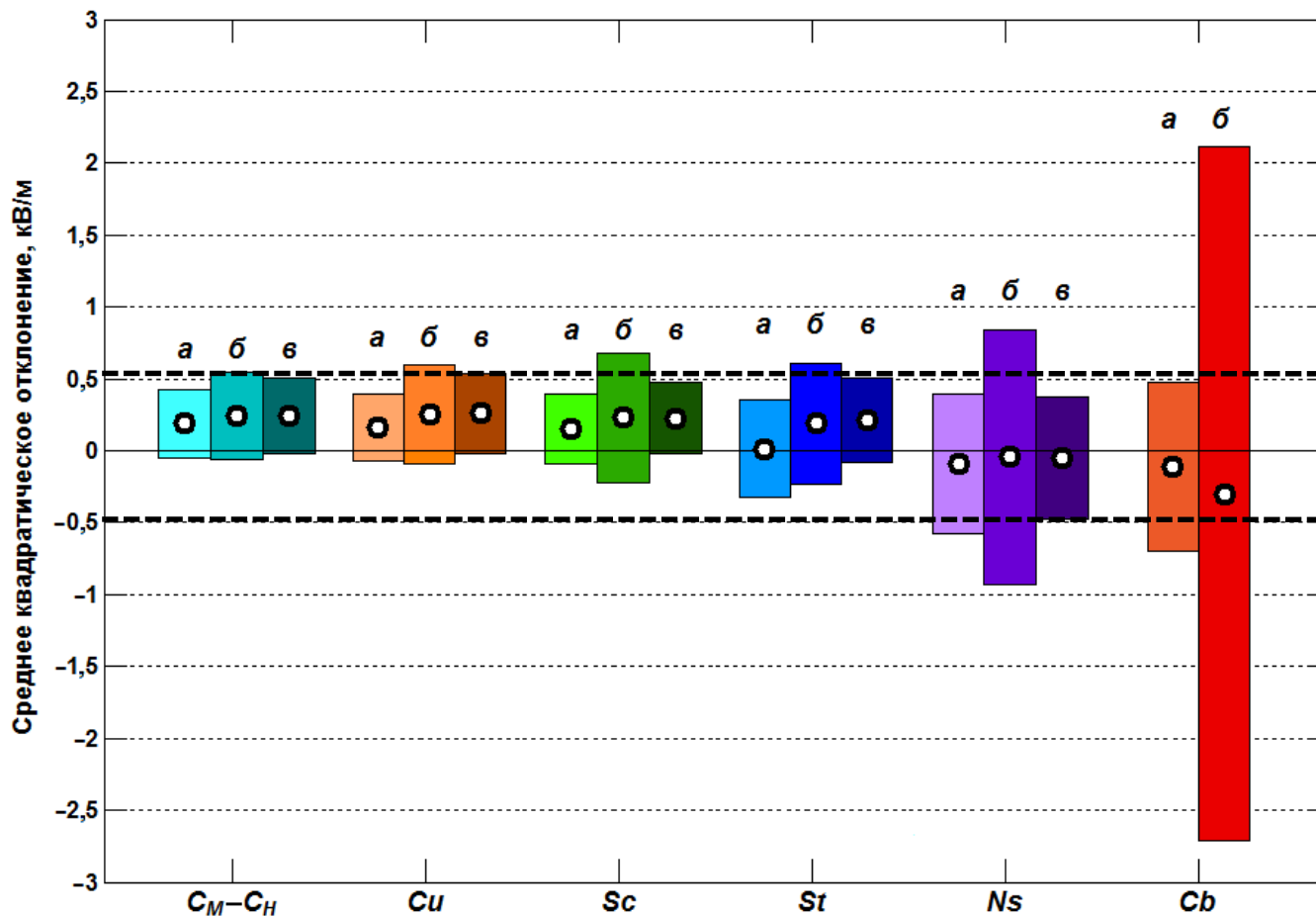
Из данных $\nabla\varphi$ в отобранные метеорологические сроки выделены участки с интенсивными изменениями $\nabla\varphi$, обусловленными *Cb* при условии, что интервал времени между событиями ≥ 30 минут.

Всего отобрано 463 случая вариаций $\nabla\varphi$ во время *Cb*, из которых 173 случая – при изолированных внутримассовых *Cb*.



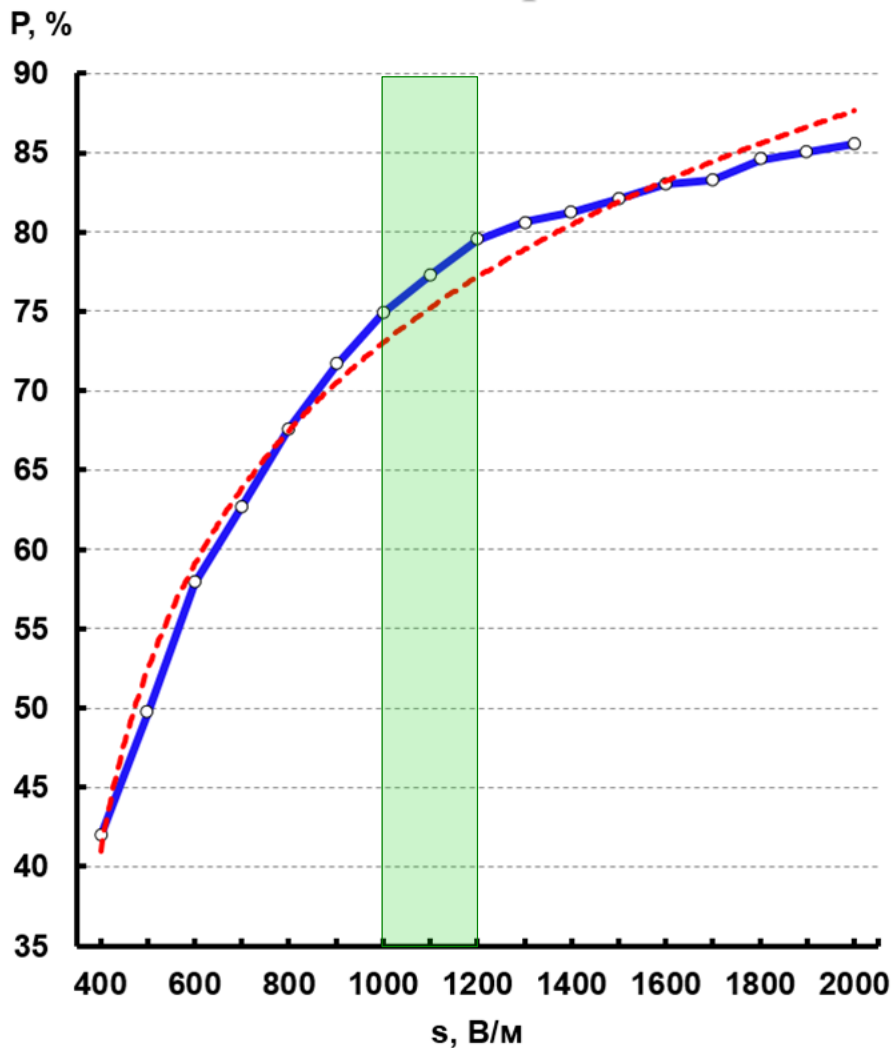
Примеры синоптических карт (а) и изображений MODIS (б)

Распределение значений $\nabla\phi$ во время различных форм облачности

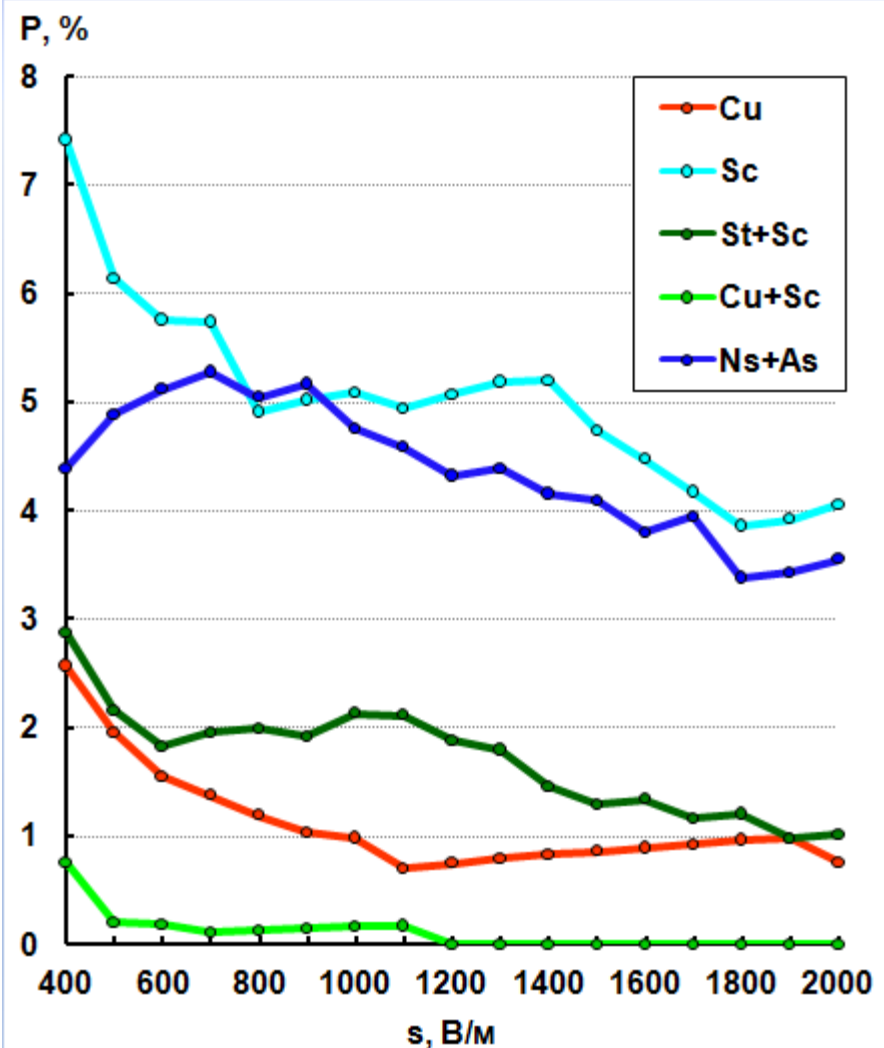


Средние значения (кружки) и размах ($\pm\sigma$) значений $\nabla\phi$ (прямоугольники) во время различных форм облаков, полученные на основе среднечасовых (*а*, [1]), среднeminутных (*б*) и среднeminутных просеянных (*в*; СКО случая <1000) значений $\nabla\phi$

Валидация метода выявления C_b при различных s по данным стандартных метеонаблюдений (ГМС Томск)

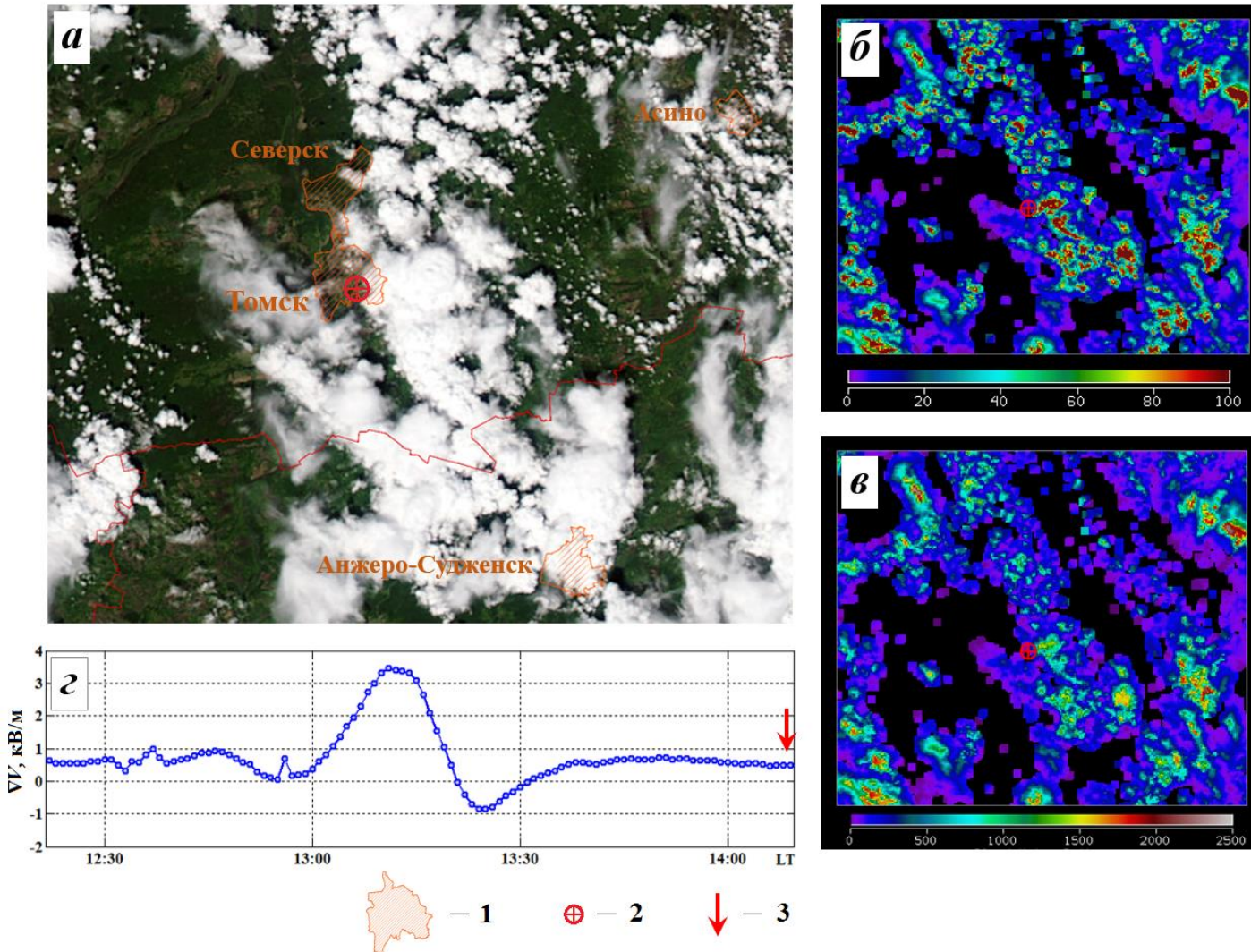


Оправдываемость методики выделения C_b при различных пороговых значениях s



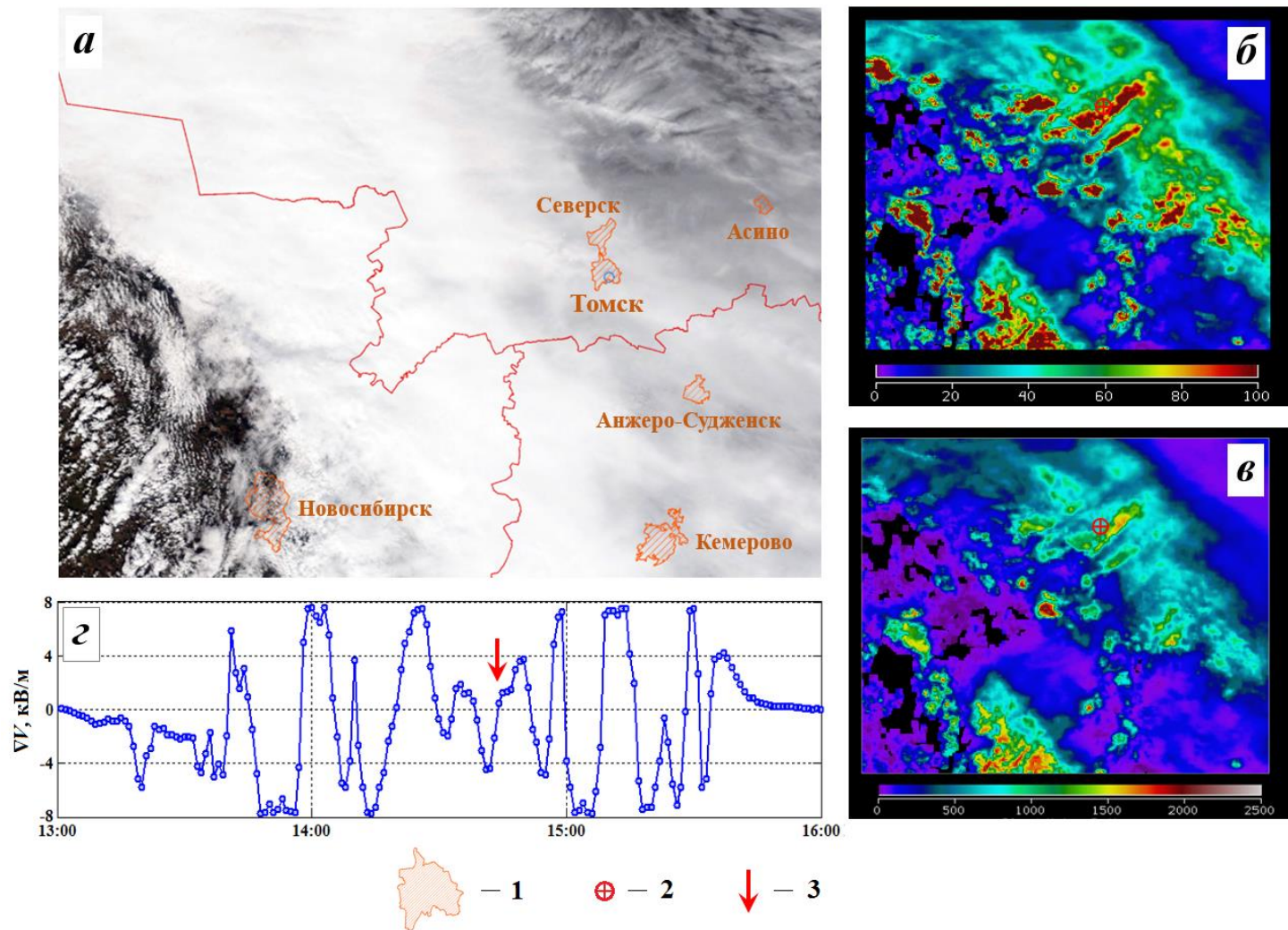
Повторяемость регистрации на ГМС других форм облачности (не C_b) при различных значениях s

Пример вариаций $\nabla\varphi$ при прохождении одиночного внутримассового Сь



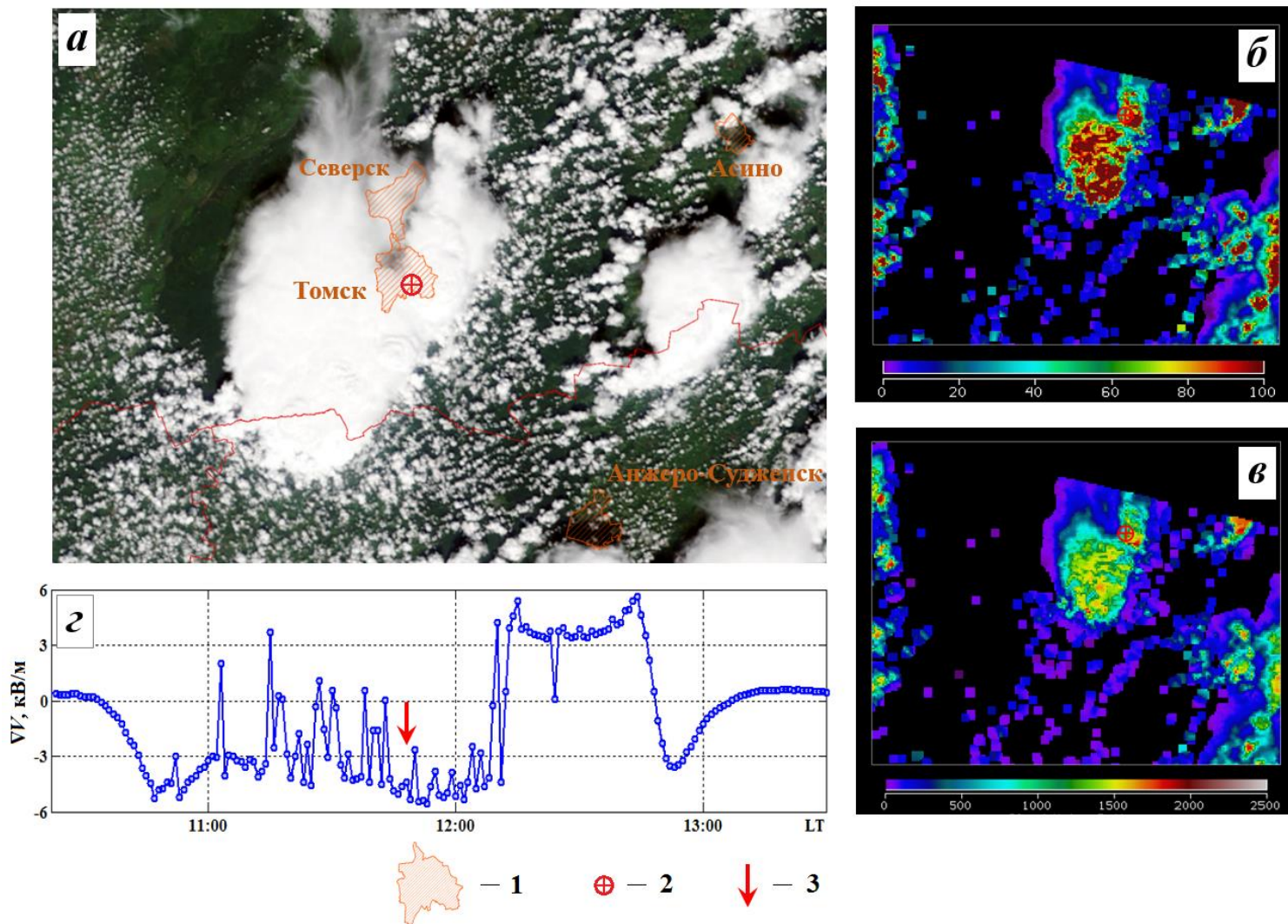
RGB-изображение (a), оптическая толщина (б) и влажность (в) облаков за 7:10 UT 15.06.2007 (Aqua MODIS), а также динамика $\nabla\varphi$ (з) в соответствующий временной промежуток

Пример вариаций $\nabla\phi$ при прохождении фронтального конгломерата Сб



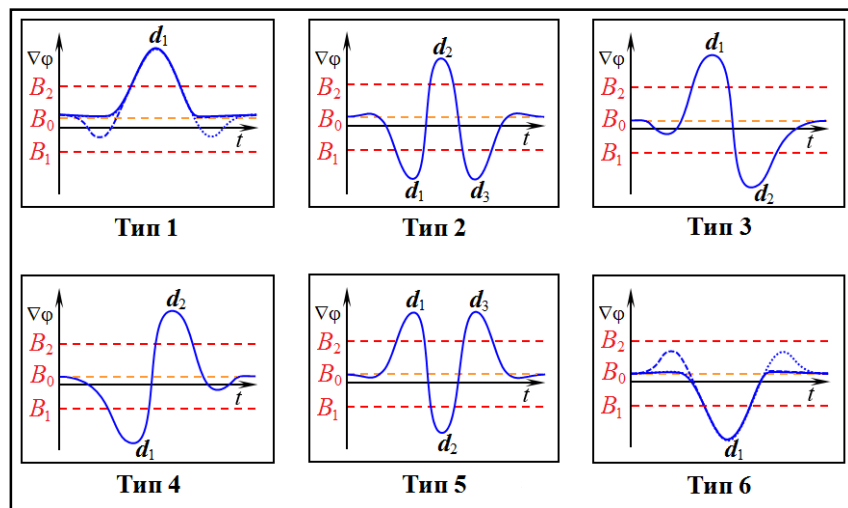
RGB-изображение (a), оптическая толщина (б) и водность (в) облаков за 7:45 UT 8.05.2007 (Terra MODIS), а также динамика $\nabla\phi$ (z) в соответствующий временной промежуток

Пример вариаций $\nabla\phi$ при прохождении мезомасштабного конвективного комплекса (МКК)

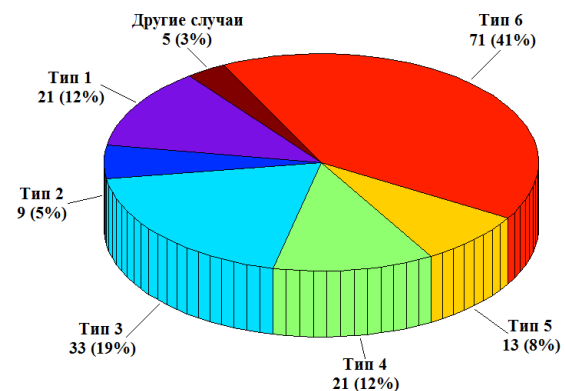


RGB-изображение (a), оптическая толщина (б) и влажность (в) облаков за 7:45 UT 20.07.2009 (Terra MODIS), а также динамика $\nabla\phi$ (г) в соответствующий временной промежуток

Форма «медленных» вариаций $\nabla\varphi$ при изолированном C_b



Идеализированные формы временной $\nabla\varphi$ основных типов при прохождении кучево-дождевых облаков



Типы вариаций $\nabla\varphi$ при прохождении кучево-дождевых облаков

Повторяемость (%) различных атмосферных явлений во время основных типов «медленных» вариаций $\nabla\varphi$

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

1. Гальперин С.М., Кашлева Л.В., Михайловский Ю.П./ Вопросы атмосферного электричества. Л: Гидрометеиздат, 1990. С.76-102
2. Михайловский Ю.П., Кашлева Л.В. / Радиолокационная метеорология и активные воздействия. С-Пб: ГГО, 2012. С.98–114

Классификация отклика в $\nabla\varphi$ изолированных кучево-дождевых облаках

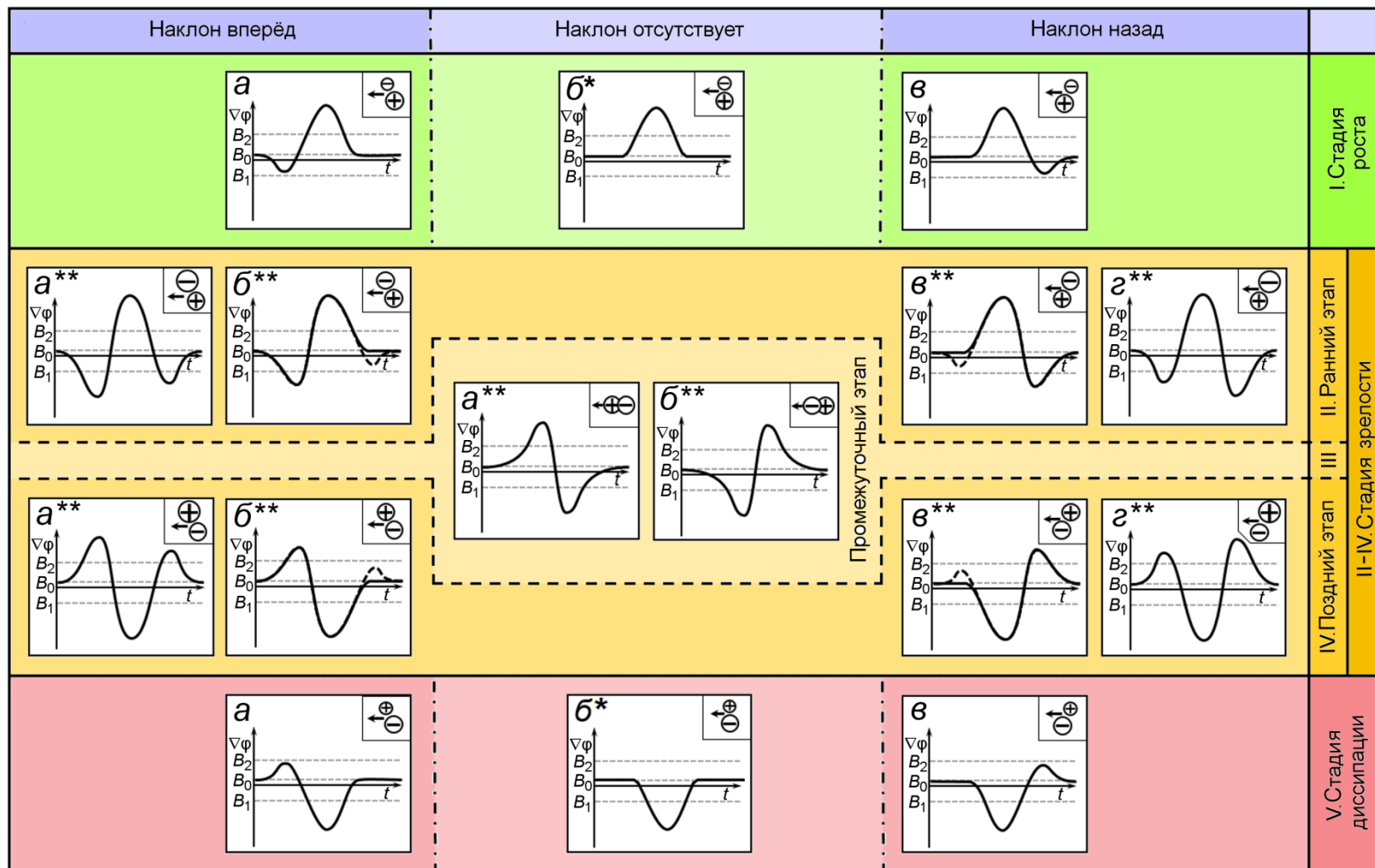


Схема эволюции отклика в приземном электрическом поле в ходе жизненного цикла изолированного внутримассового *Cb* и при различном наклоне облачного диполя относительно направления движения

На схеме: "б*" – данная форма вариаций $\nabla\varphi$ выделялась другими авторами, а "а**" – эта форма динамики $\nabla\varphi$ качественно напоминает форму выделенную другими авторами, однако имеет специфические особенности, не отмечаемые ранее.

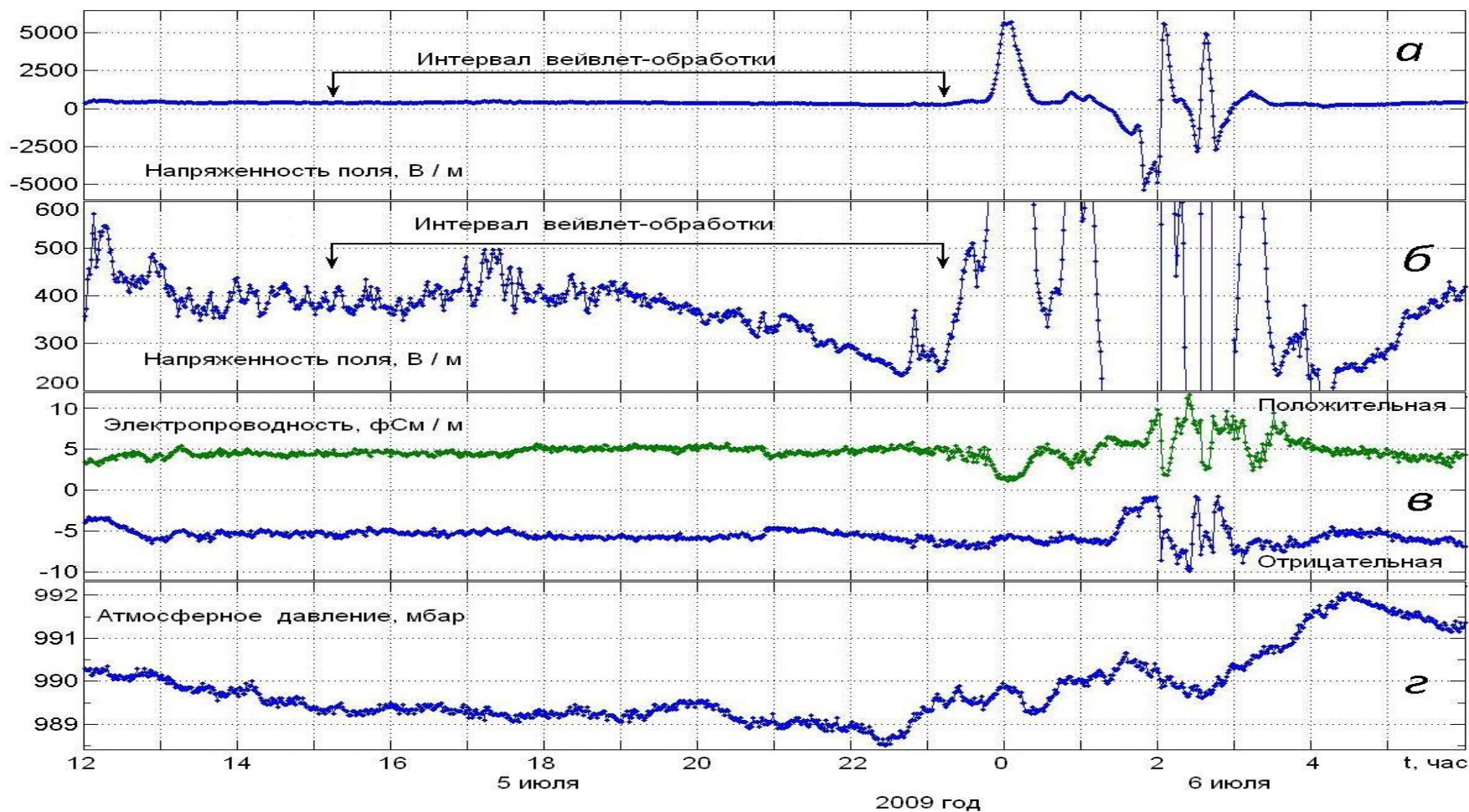
Результаты

При прохождении кучево-дождевых облаков различного генезиса форма «медленных» вариаций $\nabla\varphi$ в 2/3 случаев относятся к 10 основным типам, обусловленными наиболее часто встречающимися формами отклика.

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

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

Мезомасштабные конвективные системы



Вариации атмосферных величин в предгрозовой и грозовой атмосфере

Мезомасштабные конвективные системы

Из данных за 2006–2008 г.г. отобрано 75 сеансов, длительностью 8 часов. Грозовой интервал из анализа был исключён. Затем проводилась обработка отобранных сеансов комплексным вейвлетом Морле. Перед обработкой из данных были удалены линейные тренды. Полученные матрицы усреднялись методом наложения эпох в двух вариантах:

- коэффициенты усреднялись без предварительной обработки:

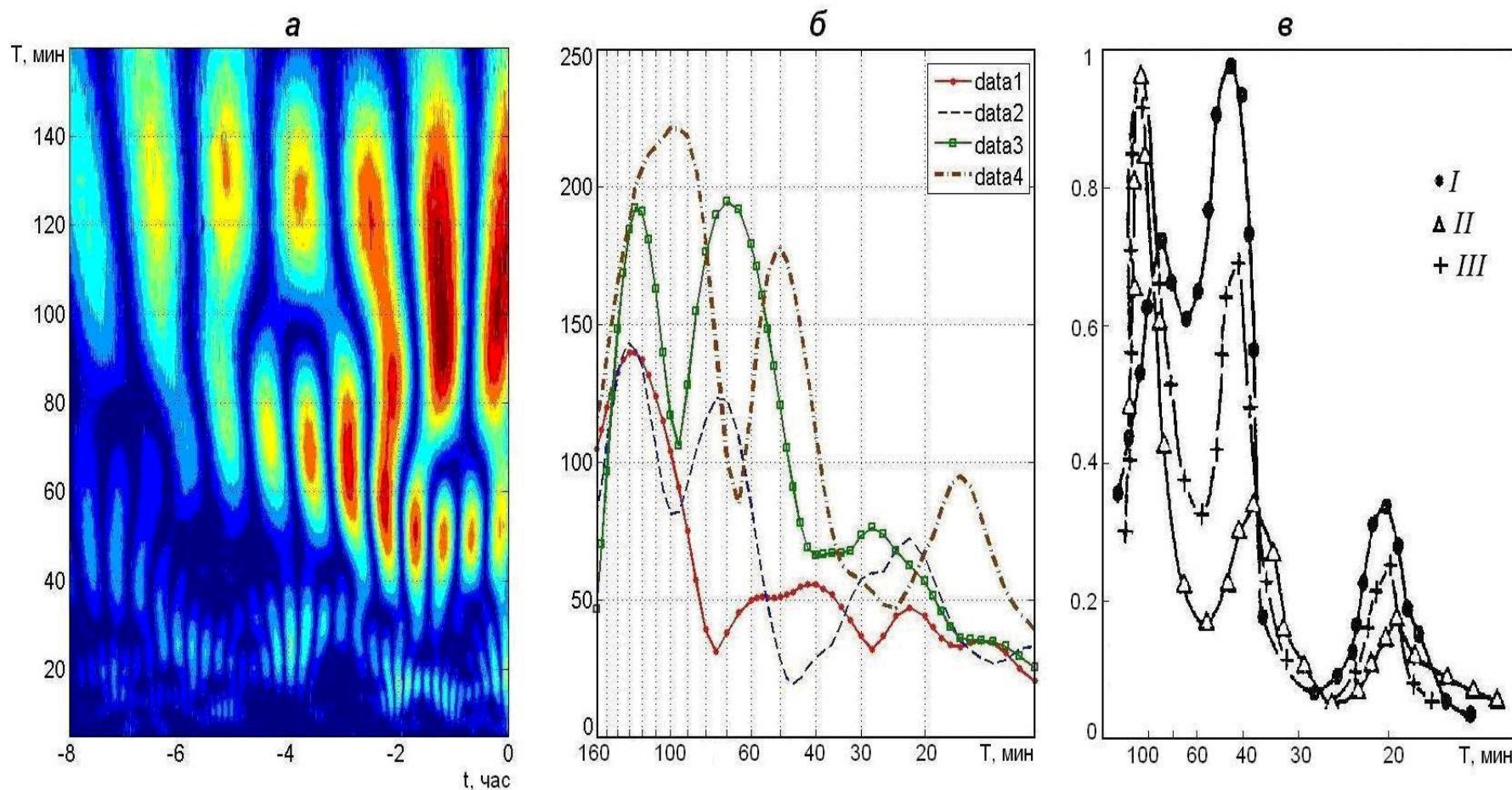
$$\bar{M}(i, j) = \frac{1}{k} \sum_k M_k(i, j);$$

- коэффициенты нормировались на максимальный размах значений вейвлет-коэффициентов в каждом конкретном случае :

$$\bar{M}(i, j) = \frac{1}{k} \sum_k M_k(i, j) / M_{\text{кр}}.$$

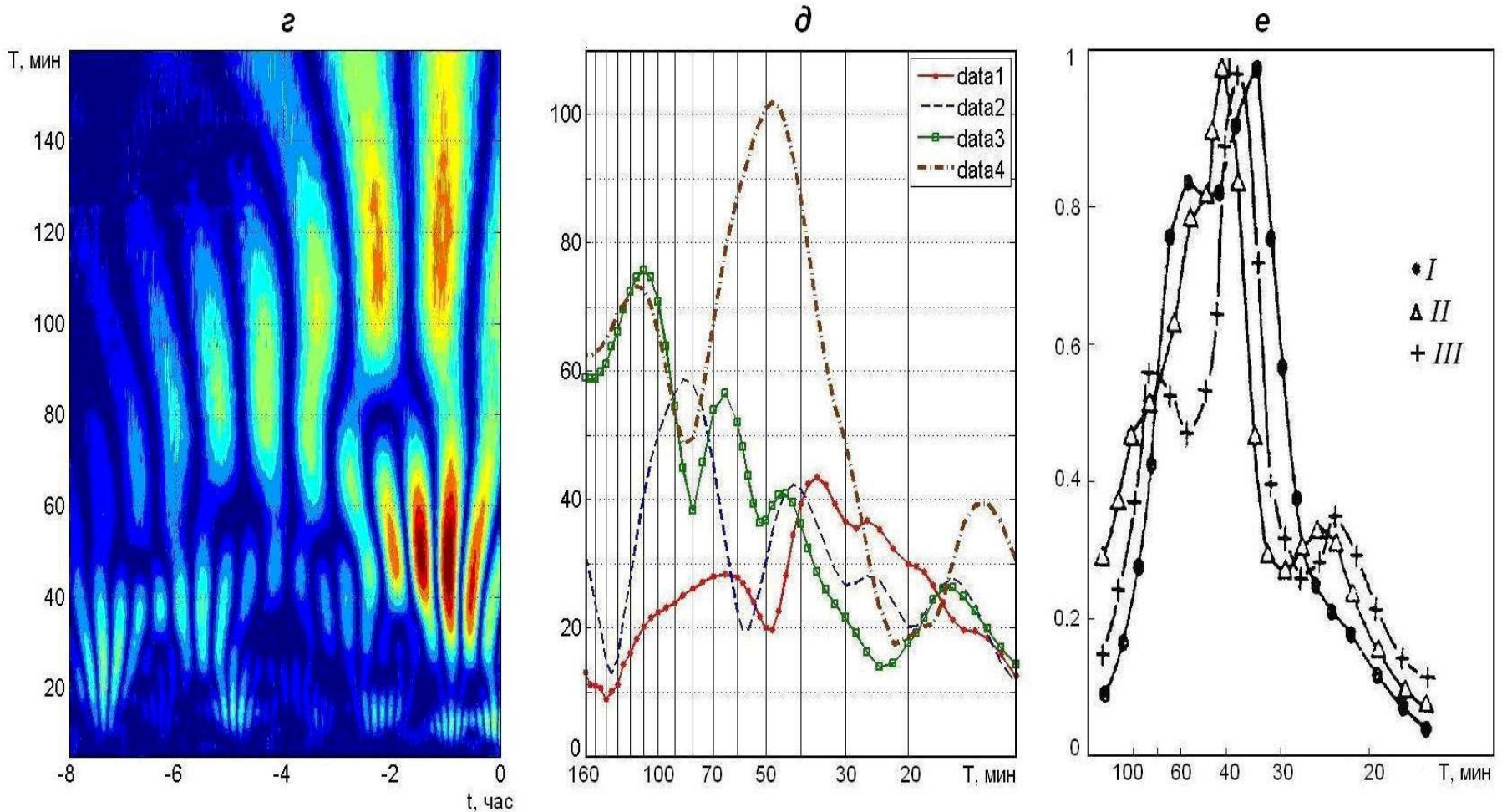
Нормировка минимизирует влияние интенсивных возмущений от отдельных сеансов на вейвлет-спектр в целом.

Мезомасштабные конвективные системы (день)



Спектр вариаций поля (а, б) и давления (в) днем; data1-data4 - -8÷-6 ч, -6÷-4 ч, -4÷-2 ч и -2÷0 ч до прохождения конвективных ячеек. Реализации I, II, III (в) получены 12-13.07.1979 г. в ИФА РАН.

Мезомасштабные конвективные системы (ночь)



Спектр вариаций поля (а, б) и давления (в) ночью; data1-data4 - -8÷-6 ч, -6÷-4 ч, -4÷-2 ч и -2÷0 ч до прохождения конвективных ячеек. Реализации I, II, III (в) получены 12-13.07.1979 г. в ИФА РАН.

Мезомасштабные конвективные системы

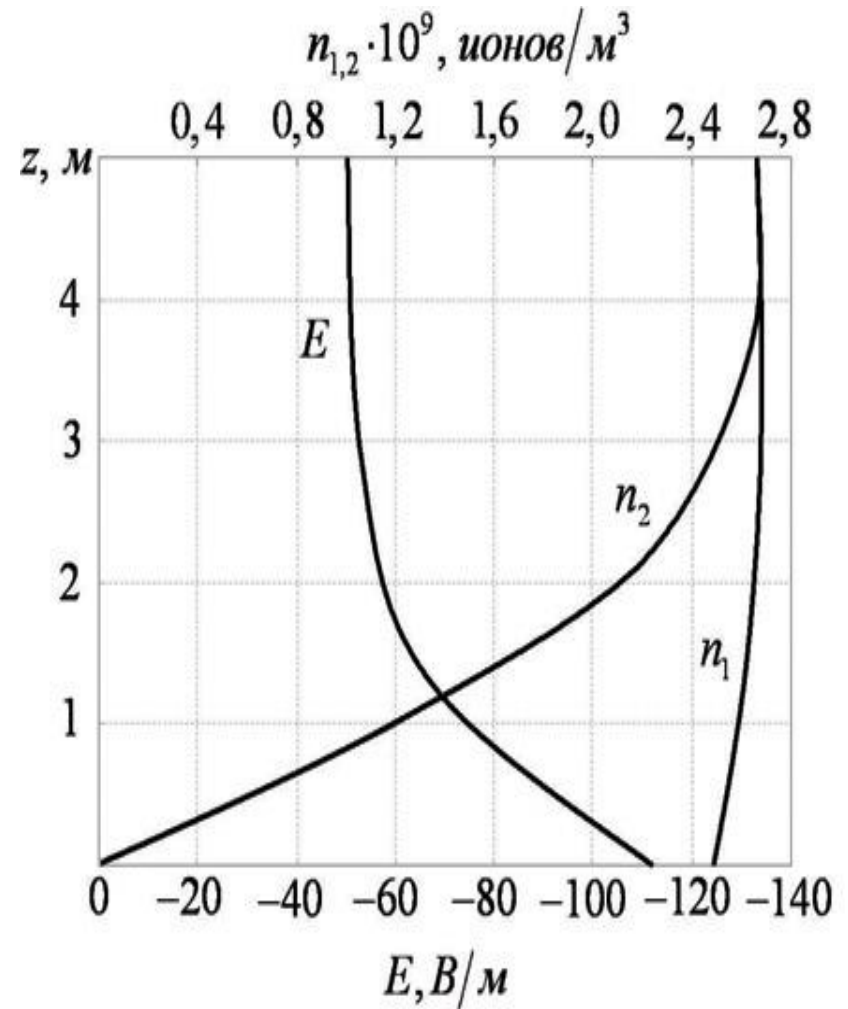
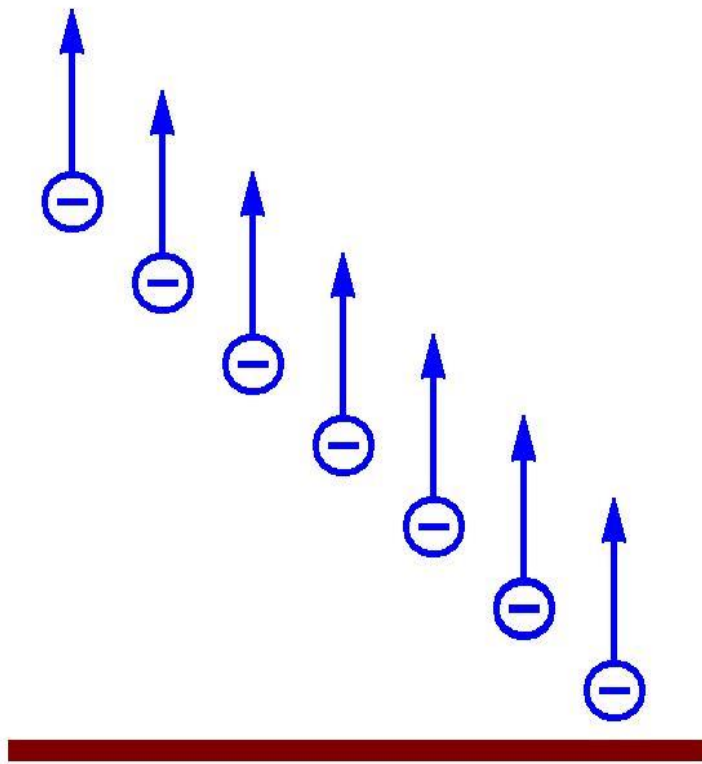
Интенсивность конвекции подвержена вариациям. Она связана с появлением и исчезновением конвективных ячеек (20-30 мин), грозových штормов (1 ч) и их скоплений (3 ч).

На генерацию АГВ перечисленными явлениями указывает совпадение интервалов интенсивности конвекции (20-30 мин, 1 ч и 3 ч) и положения соответствующих максимумов в спектре периодов (15-25 мин, 50-75 мин и 95-135 мин). Для выявленных максимумов в спектре периодов вариаций поля (16, 50 и 120 мин) получим масштабы возмущений, равные 24, 75 и 180 км. Или 0.8, 0.75, 0.6 от горизонтальных масштабов областей развития (~ 30 и ~ 100 км) и масштаба МКС в целом (~ 300 км).

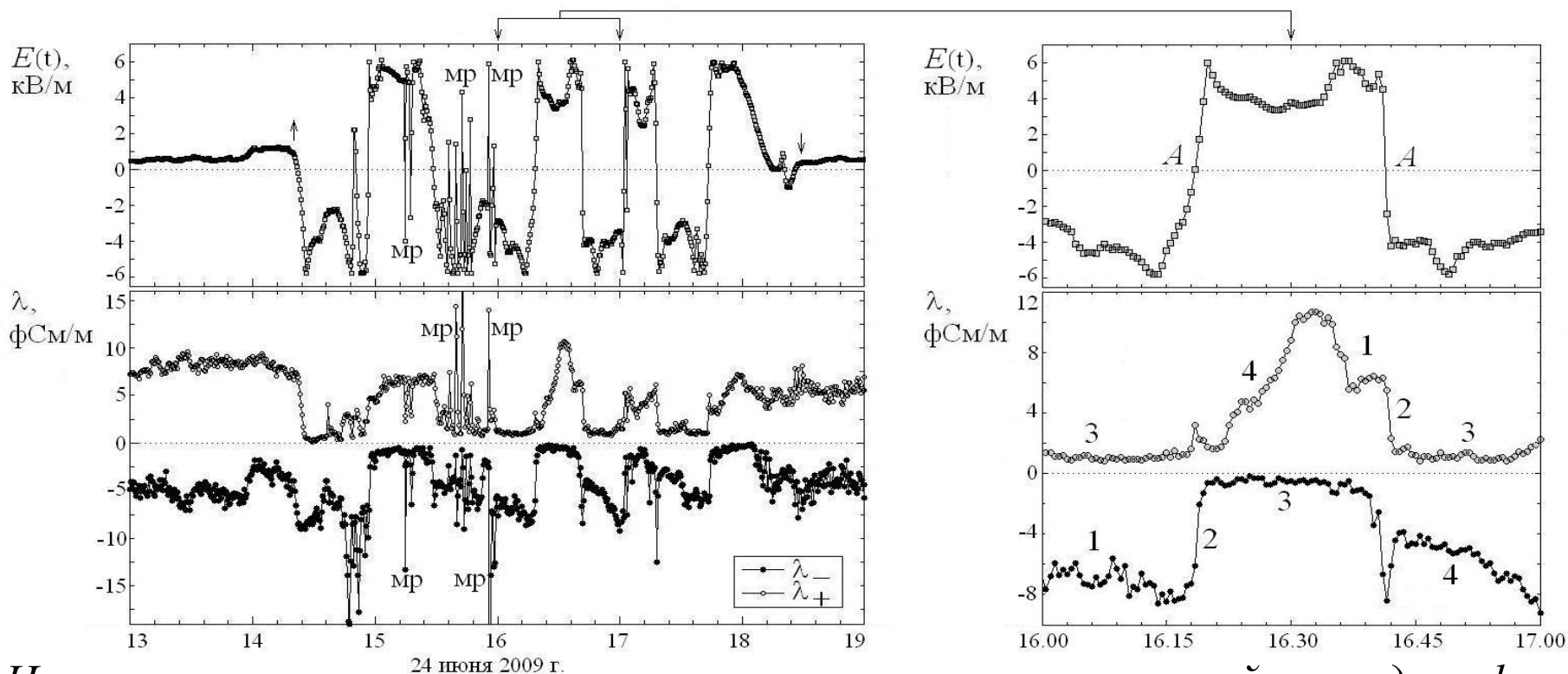
Таким образом, близость средних пространственных и временных масштабов позволяет предположить: волновые возмущения в спектрах периодов поля вызваны АГВ, источниками которых являются иерархически соподчиненные скопления областей развития и МКС в целом.

[Ипполитов И.И., Кабанов М.В., Нагорский П.М., Смирнов С.В. // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25, № 2. С. 132-136.]

Структура электродного слоя



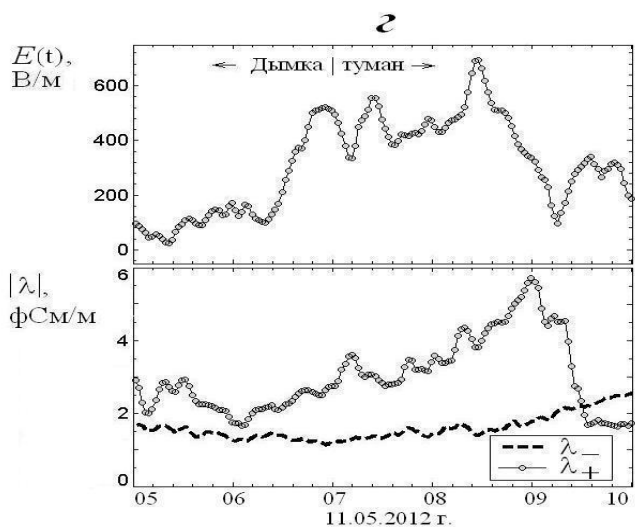
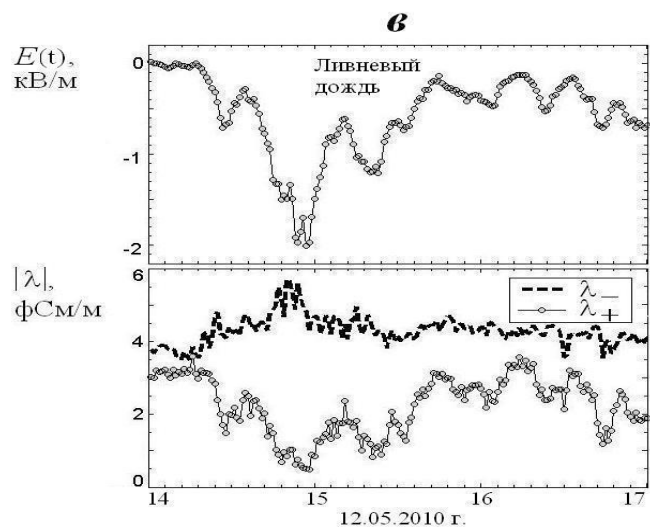
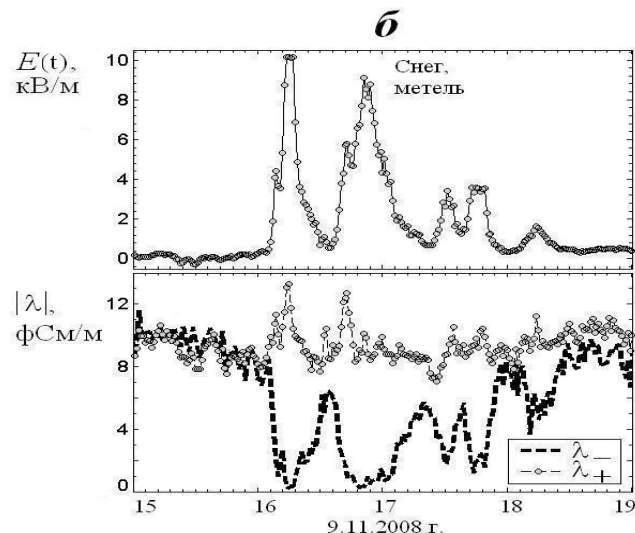
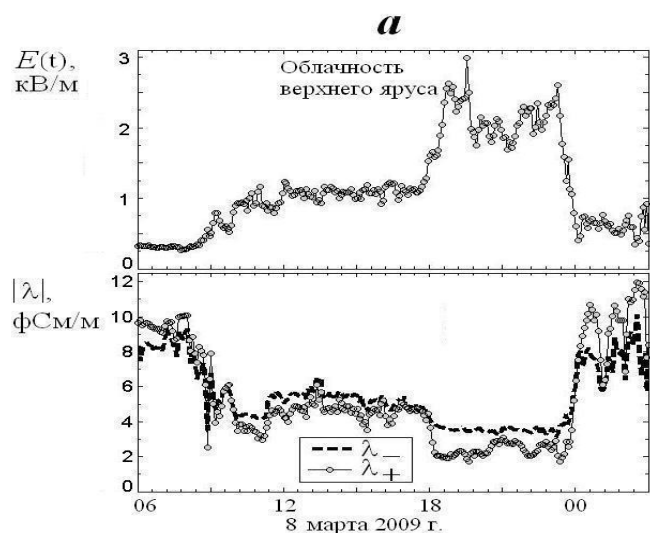
Напряжённость электрического поля E и полярных электропроводностей λ_{\pm} во время грозы.



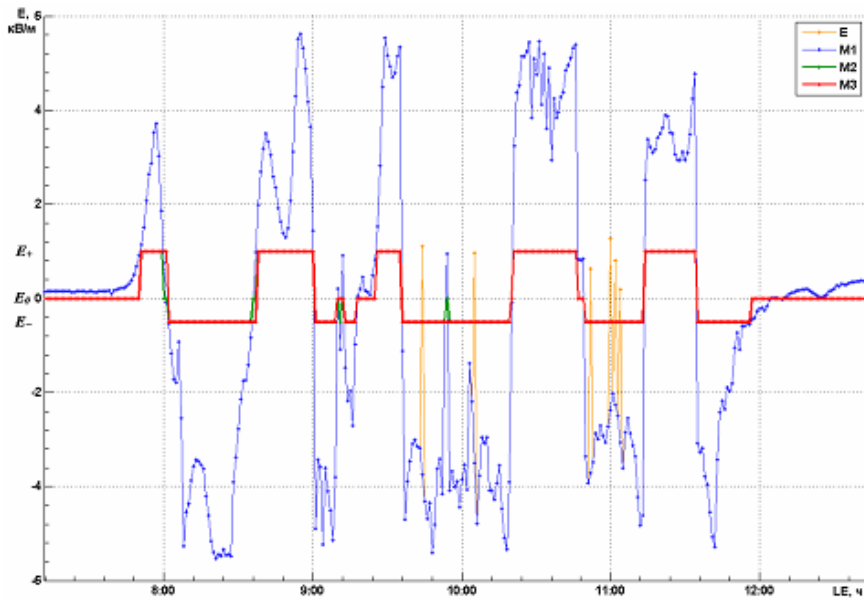
Начало и окончание грозы указано стрелками; мр – молниевый разряд; цифры – основные фазы поведения электропроводности; А – моменты смены знака напряженности поля

Нагорский П.М., Морозов В.Н., Смирнов С.В., Пустовалов К.Н. // Изв. ВУЗов Радиофизика, 2013, Т. LVI, № 11–12. С. 853-863.

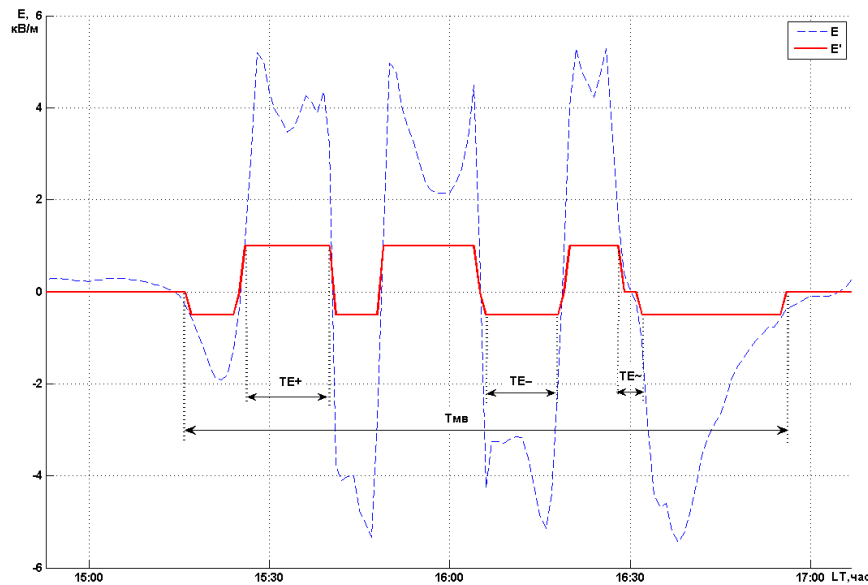
Согласованные изменения напряжённости поля и полярных электропроводностей



Нагорский П.М.,
Морозов В.Н.,
Смирнов С.В.,
Пустовалов К.Н. //
Изв. ВУЗов
Радиофизика, 2013,
Т. LVI, № 11–12.
С. 853-863.



Графическое представление методики обработки данных



Параметры вариаций электрического поля

В ходе обработки реальные значения напряжённости поля (E) заменялись значениями из 3-х категорий (E') (рис.10):

1. Невозмущенное электрическое поле (E_0);
2. Положительное возмущение (E_+);
3. Отрицательное возмущение (E_-);

Обработка данных позволила определить основные характеристики этого явления и провести анализ распределений исследуемых параметров (рис. 11):

$T_{мв}$ – общая длительность мощных вариаций;

TE_+ – длительность положительных возмущений поля (E_+);

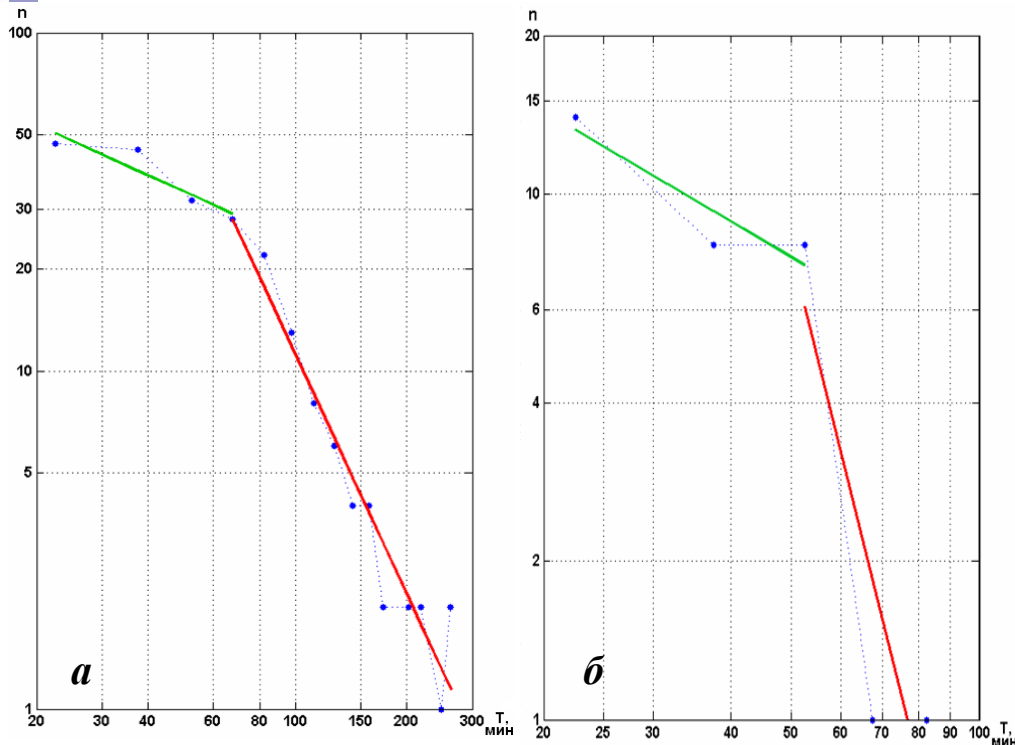
TE_- – длительность отрицательных возмущений поля (E_-);

TE_{\sim} – длительность перехода (ширина фронта) от E_+ к E_- и в обратном направлении;

NE_+ – число появления положительных возмущений (E_+);

NE_- – число появления отрицательных возмущений (E_-);

NE_{\sim} – число переходов от E_+ к E_- и в обратном направлении.



Распределения Леви-Парето для общей длительности мощных вариаций за тёплый и холодный период.

Параметры распределений тёплого и холодного периодов

Период	Параметры распределения		
	C_0^* мин	α	
		$20 \leq x \leq c_0^*$	$x \geq c_0^*$
Тёплый период	67	-0,496	-2,356
Холодный период	52	-0,696	-4,753

Анализ распределений общей длительности мощных вариаций (T_{mv}) для тёплого и холодного периодов показал, что исходные распределения близки к составному распределению Леви-Парето. Это распределение с «тяжелым хвостом» при оценке маловероятных событий дает вероятность наступления события, намного превышающую оценку, следующую из нормального закона распределения

$$F_{\xi}(x) = P\{\xi < x\} = 1 - \left(\frac{c_0}{x}\right)^{\alpha}$$

$$f_{\xi}(x) = \frac{\alpha}{c_0} \left(\frac{c_0}{x}\right)^{\alpha+1}$$

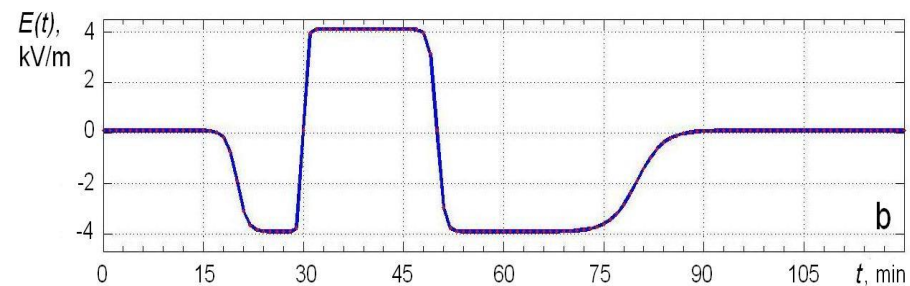
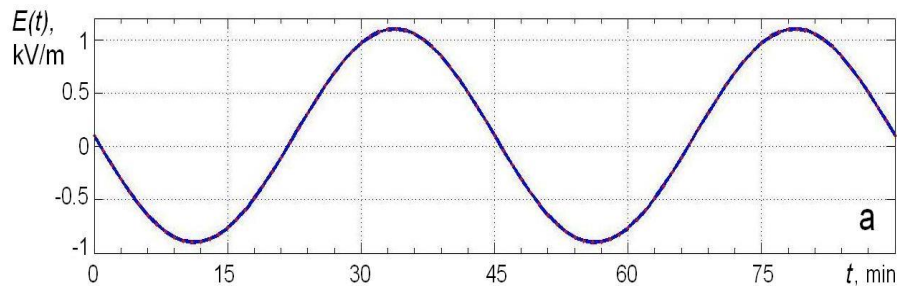
Анализ распределений Леви-Парето показывает (табл.3), что в распределении T_{mv} как тёплого так и холодного периодов наблюдаются два различных тренда, связанные с различными процессами.

При этом перелом распределения в тёплый период происходит при длительности ~ 67 мин, а в холодный период – при длительности ~ 52 мин.

Мезомасштабные конвективные системы

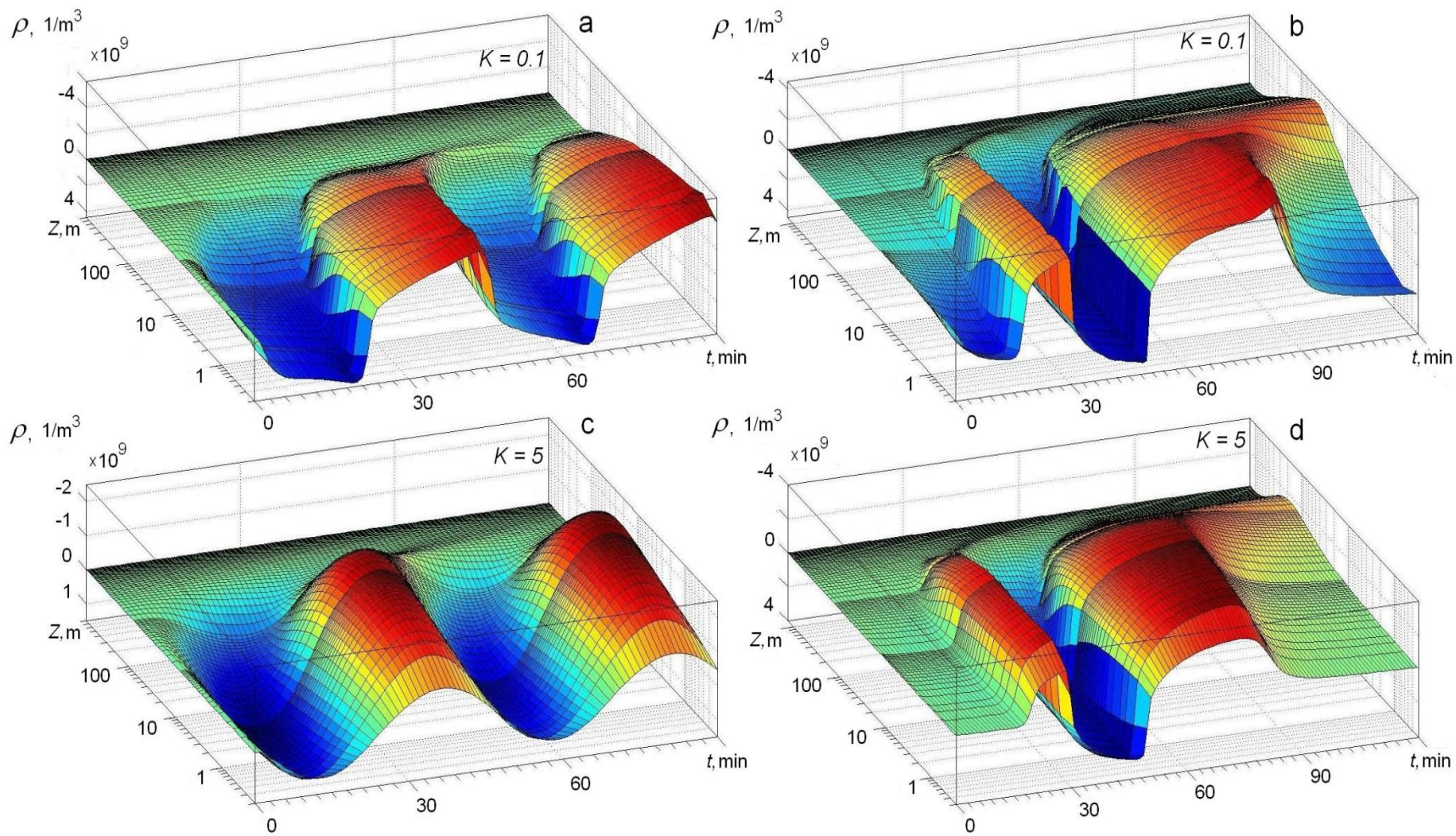
В нестационарной постановке электродного эффекта перенос аэроионов в атмосфере осуществляется, наряду с турбулентными потоками воздуха, электрическими силами, причем последние играют основную роль. Система уравнений, описывающая нестационарный турбулентный электродный эффект, была представлена в следующей форме:

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



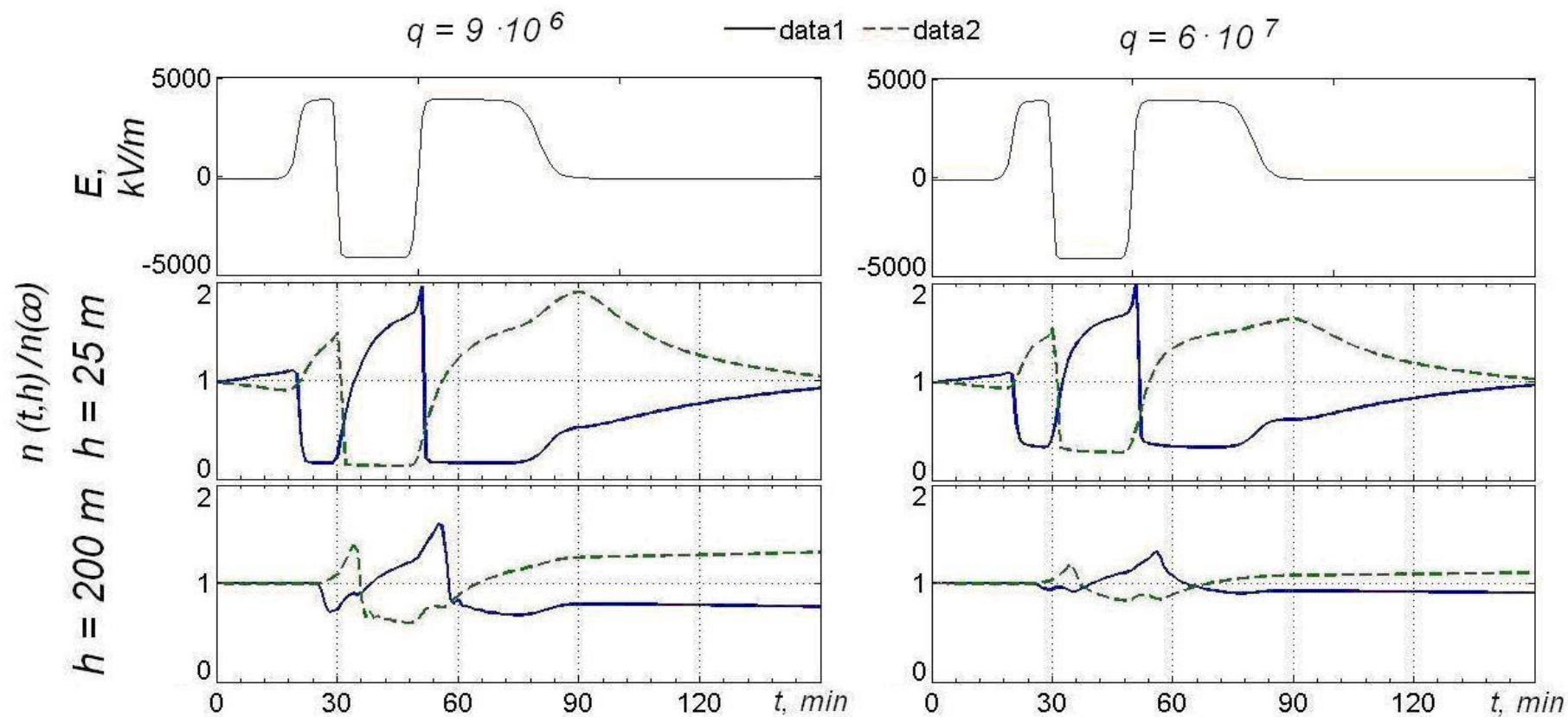
Временной ход модельной напряженности поля в грозовой атмосфере

Мезомасштабные конвективные системы

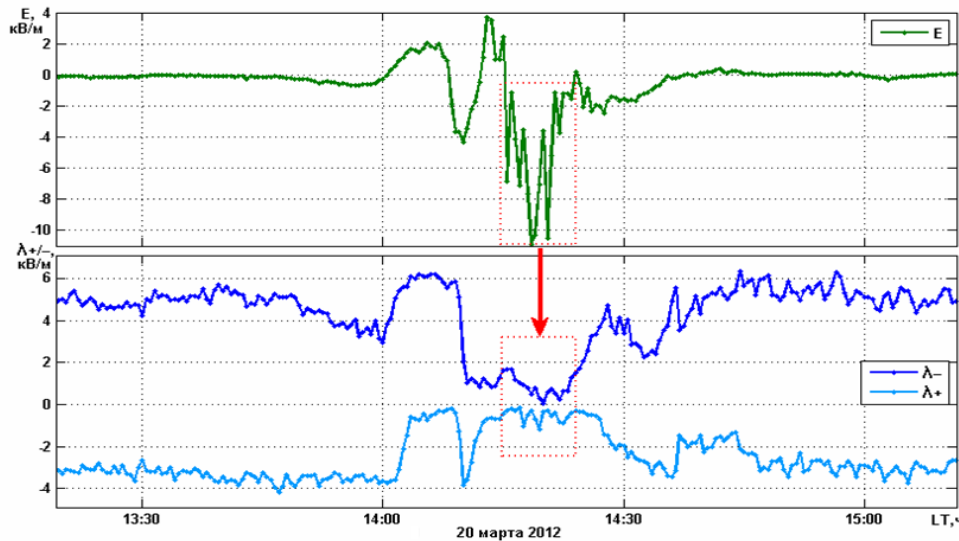


Динамика объемной плотности заряда ρ в электродном слое.

Временные вариации нормированной плотности положительных (data1) и отрицательных (data2) ионов для двух значений интенсивности ионообразования



Моделирование электродного слоя под влиянием вариаций электрического поля и выпадения ливневого снега



Вариации E и λ_{\pm} во время прохождения зимней конвективной с выпадением ливневого снега

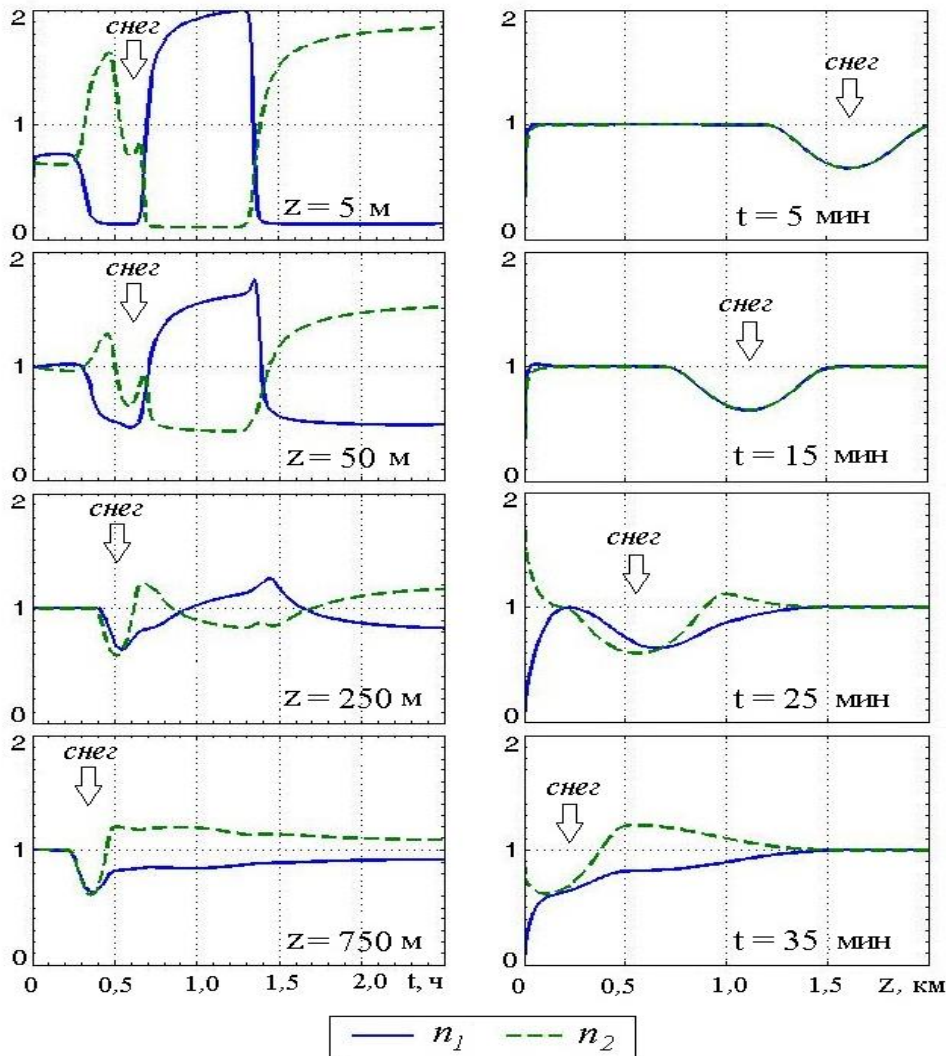
$$\frac{\partial n_{1,2}}{\partial t} \pm b_{1,2} \frac{\partial (E(t)n_{1,2})}{\partial z} - \frac{\partial}{\partial z} \left(D_T(z) \frac{\partial n_{1,2}}{\partial z} \right) = q(z) - \alpha n_1 n_2 - \alpha n_1 n_2 - \eta n_{1,2} N_0$$

$$\frac{\partial E}{\partial z} = 4\pi e(n_1 + N_1 - n_2 - N_2)$$

$n_{1,2}$, $b_{1,2}$ – концентрация и подвижность аэроионов;
 $q(z)$ – интенсивность ионообразования;
 $\alpha(z)$ – коэффициент рекомбинации легких ионов;
 DT – коэффициент турбулентной диффузии;
 $N_0(z, t)$ – концентрация гидрометеоров.
 η – коэффициент взаимодействия легких ионов с гидрометеорами.

Анализ данных λ_{\pm} за холодное период показал, что колебания этих величин под воздействие мощной конвективной облачности в зимних условиях отличаются от вариаций в тёплый период. Одним из выявленных видов является согласованное падение числа легких ионов обеих полярностей зимой. Предположено, что причиной уменьшения λ_{\pm} является выпадение ливневого снега.

Для моделирования была уточнена система уравнений электродного слоя. В правую часть уравнения для концентраций добавлено слагаемое $-\eta \cdot n_{1,2} \cdot N_0$, описывающее этот процесс.



Нормированное пространственно-временное распределение концентрации положительных (n_1) и отрицательных (n_2) под влиянием вариаций E и выпадения атмосферных осадков в холодный период

Результаты моделирования позволили выявить следующее:

- При прохождении мощной конвективной облачности помимо мощного внешнего поля E , появляется второй внешний управляющий фактор – выпадение осадков в виде ливневого снега.
- выпадение осадков в виде ливневого снега приводит к эффективному нестационарному стоку легких ионов обеих полярностей на гидрометеоры;
- при вымывании осадками легких ионов основную роль играет эффект зацепления.
- На рис. изображён сток легких ионов обеих полярностей под влиянием вариаций электрического поля и выпадения атмосферных осадков в холодный период.

Мезомасштабные конвективные системы

Увеличение напряженности поля до единиц кВ/м ведет к увеличению толщины электродного слоя до сотен метров. Для слабой турбулентности изменение полярности объемного заряда происходит скачком. В случае сильной турбулентности плотность объемного заряда изменяется плавно, а её максимальные значения меньше, чем в предыдущем случае.

Воздействие переменного электрического поля приводит к появлению облаков объемного заряда на высоте десятки – сотни метров, оторванных от приземного слоя. Знак объемного заряда облаков противоположен знаку заряда в электродном слое в непосредственной близости от земли.

После окончания воздействия импульсной составляющей электрического поля плотность заряда в облаке может быть в несколько раз больше, чем у земной поверхности. Время существования таких облаков составляет десятки минут.

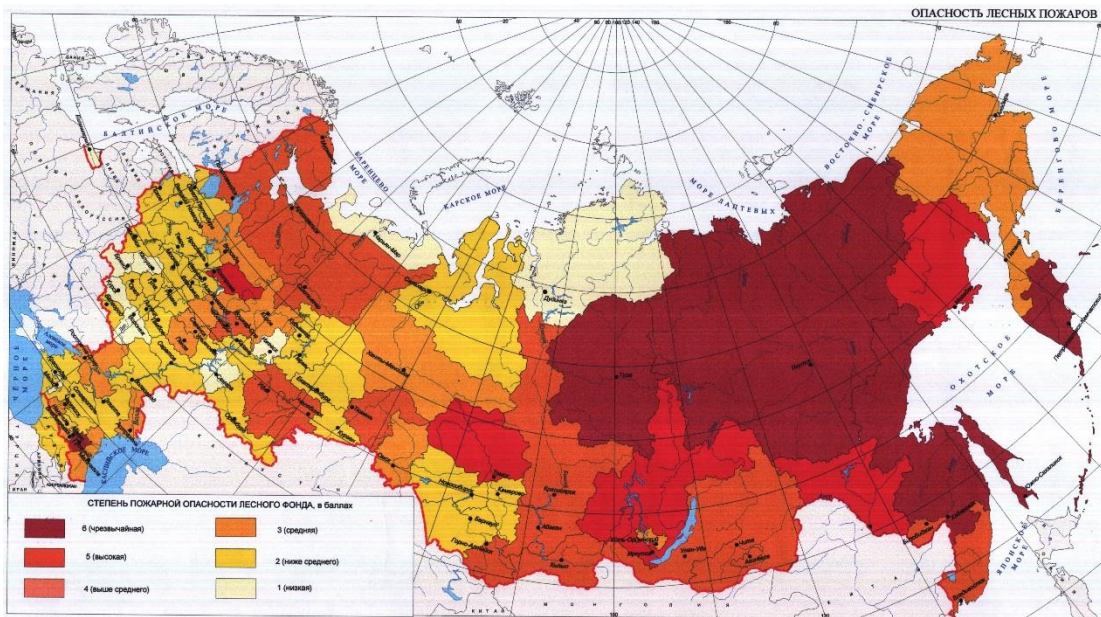
Нагорский П.М., Морозов В.Н., Смирнов С.В., Пустовалов К.Н. // Изв. ВУЗов Радиофизика, 2013, Т. LVI, № 11–12. С. 853-863.

Дым от летних лесных пожаров и электрическое поле атмосферы

- 1. В условиях летнего дымового смога средней плотности (дальность видимости ~ 7-8 км) исследования были начаты в 2004 г [Ипполитов, Пхалагов].*
- 2. Обнаружено (2004 г.), что ростом задымленности атмосферы регистрируется значительное падение среднесуточной напряженности электрического поля.*
- 3. Исследования динамики напряженности электрического поля атмосферы E , метеопараметров, спектральных коэффициентов аэрозольного ослабления и рассеяния оптического излучения $\beta(\lambda)$ были продолжены в условиях очень сильного задымления атмосферы от удаленных лесных пожаров, охвативших территорию Западной Сибири летом 2012 года.*

[И.И.Ипполитов, М.В.Кабанов, П.М.Нагорский, Ю.А.Пхалагов, С.В.Смирнов ДАН, 2013, т.453, № 2, с. 207–210].

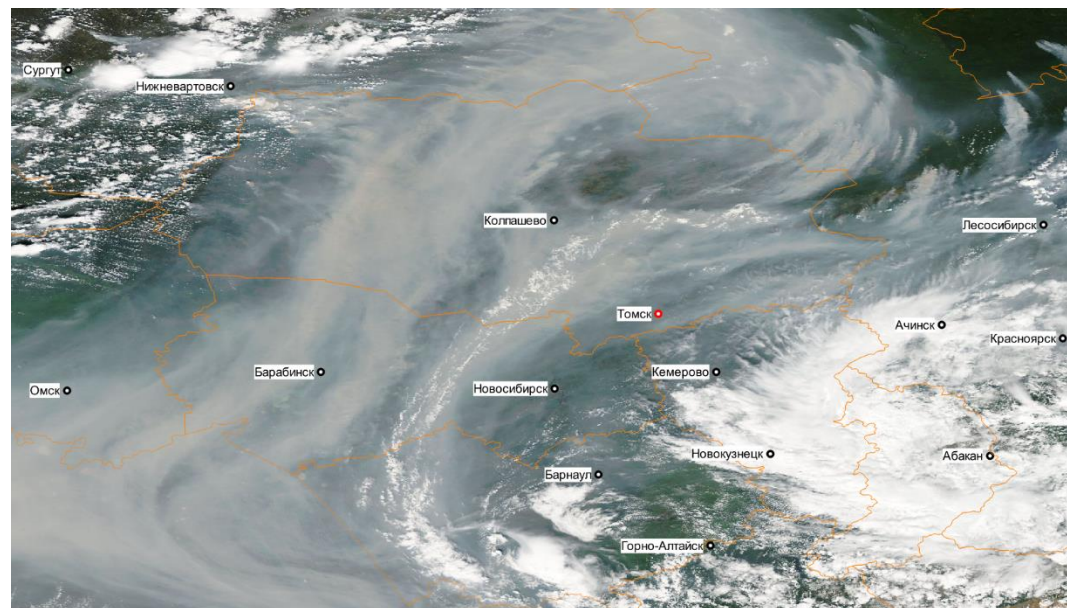
Дымовые шлейфы от лесных пожаров в Сибири



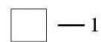
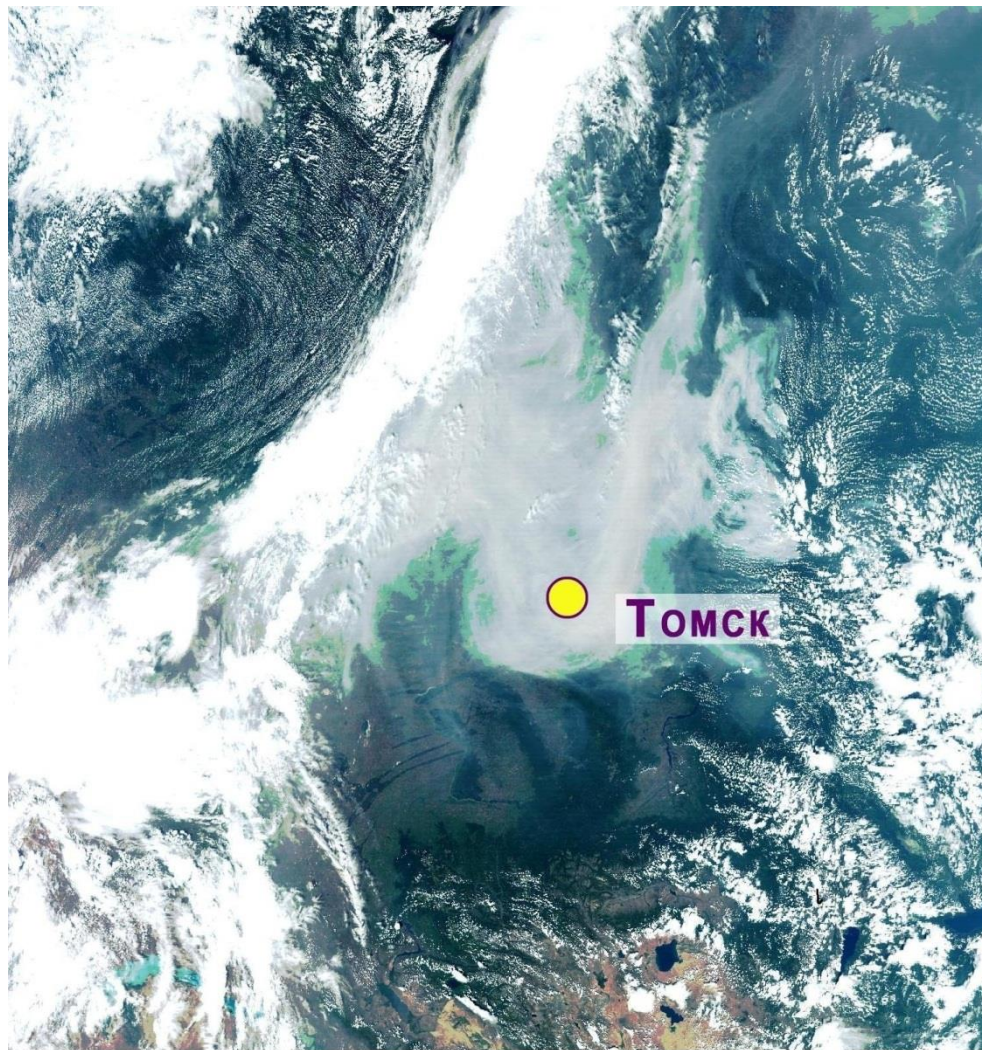
Карта степени пожарной опасности лесного фонда на территории Российской Федерации, в балах.

Авторы: В.В. Горбачёв, Ю.В. Подрезов (ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ)) [<https://regnum.ru/news/innovatio/2307799.html>]

RGB-изображение дымовых шлейфов, переносимых посредством антициклональной циркуляции на юг Западной Сибири, по данным Aqua MODIS за 07:20 UTC 5.07.2012 г.



*Дымовой шлейф над г. Томском от лесных пожаров 2012 г.
Слева – 26 июля, 10³⁶ LT, справа - 27 июля.*



— 1



— 2

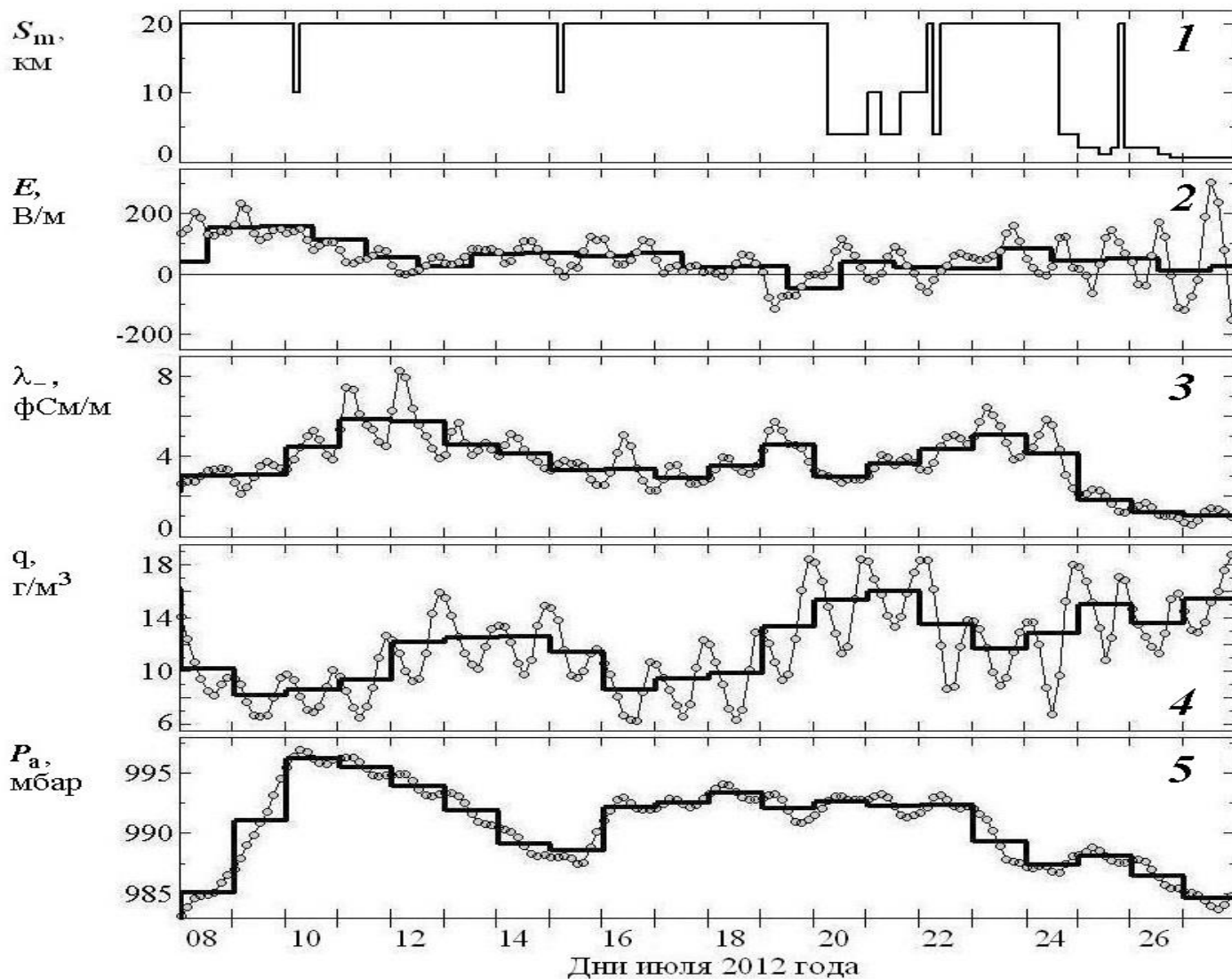


— 3

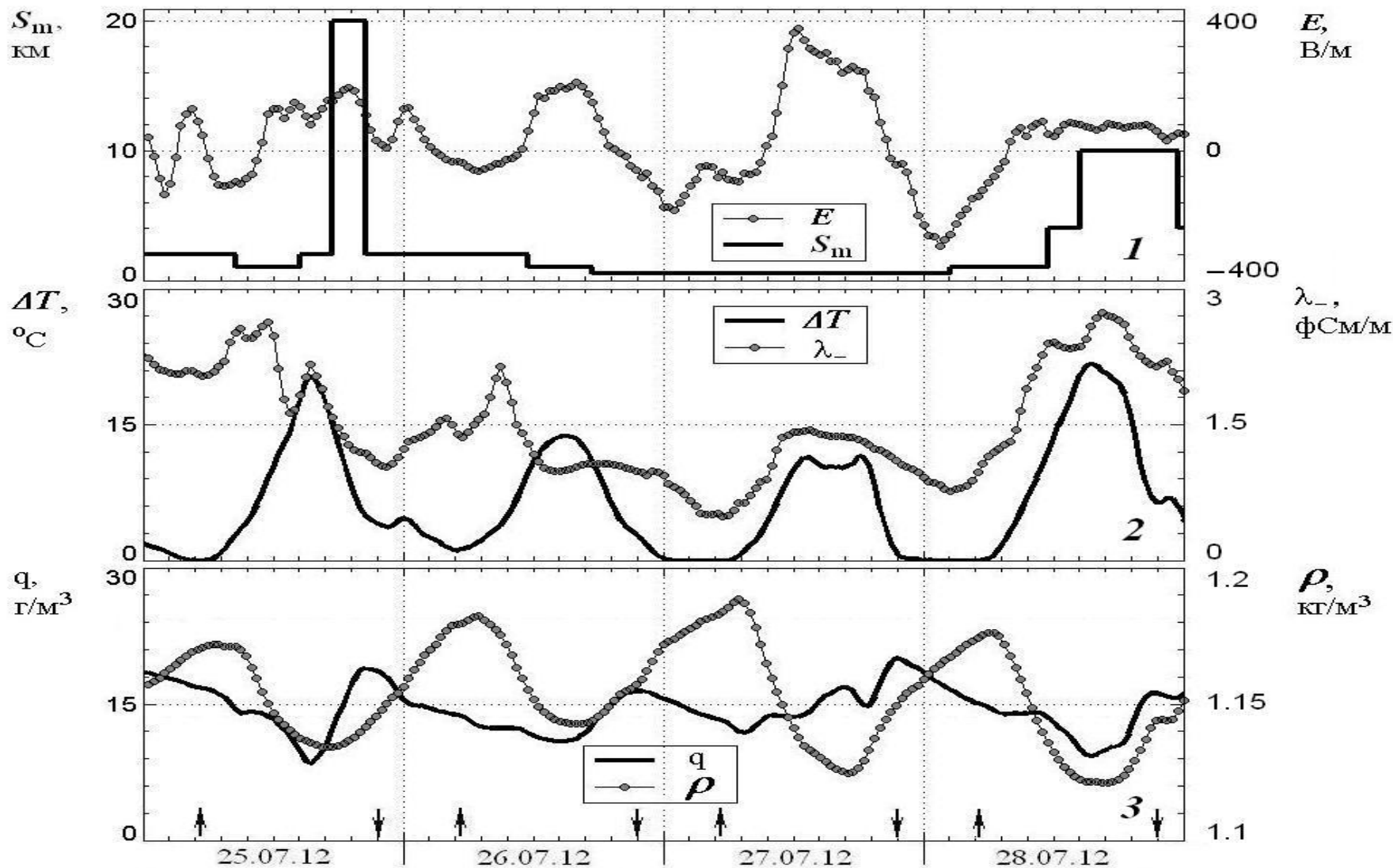
250 км



Вариации атмосферно-электрических и метеорологических величин в июле 2012 г.



Вариации электрических и метеорологических величин, соответствующий интервалу интенсивного задымления

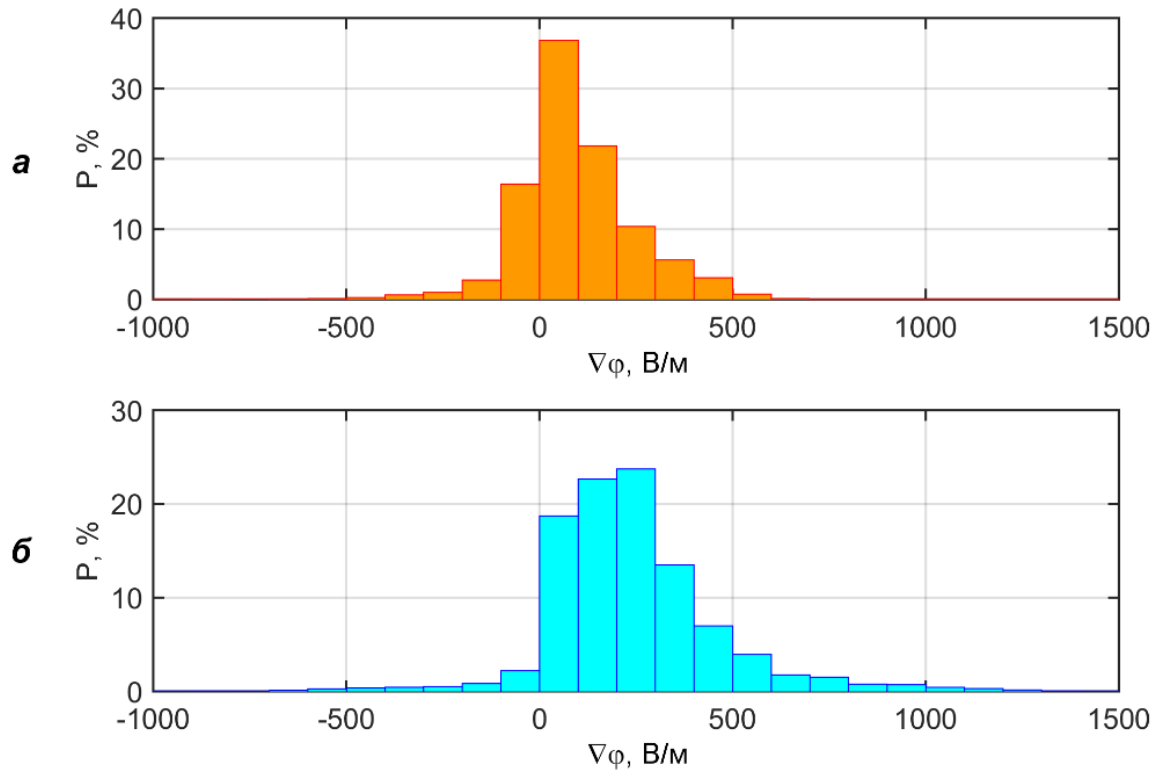


Интерпретация обнаруженного эффекта

После полудня с уменьшением инсоляции в однородной воздушной массе начинает падать температура T_a и одновременно начинается рост q и ρ при практически неизменном атмосферном давлении P_a . Падение T_a и рост ρ продолжаютя вплоть до восхода Солнца. Вместе с тем, увеличение плотности паров воды q продолжается только до захода Солнца.

После захода Солнца при $\Delta T \rightarrow 0$ начинается падение q , продолжающееся до восхода. В этот же промежуток времени происходит уменьшение электропроводности (числа легких ионов). После захода Солнца при температуре атмосферы, близкой к температуре точки росы, частицы дымового аэрозоля приземного слоя начинают аккумулировать на себя водяной пар.

Основные результаты



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

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 условиях.

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

Дымы от удаленных лесных пожаров приводят к троекратному понижению градиента потенциала электрического поля в приземном слое, а также к значительно уменьшению его дисперсии.

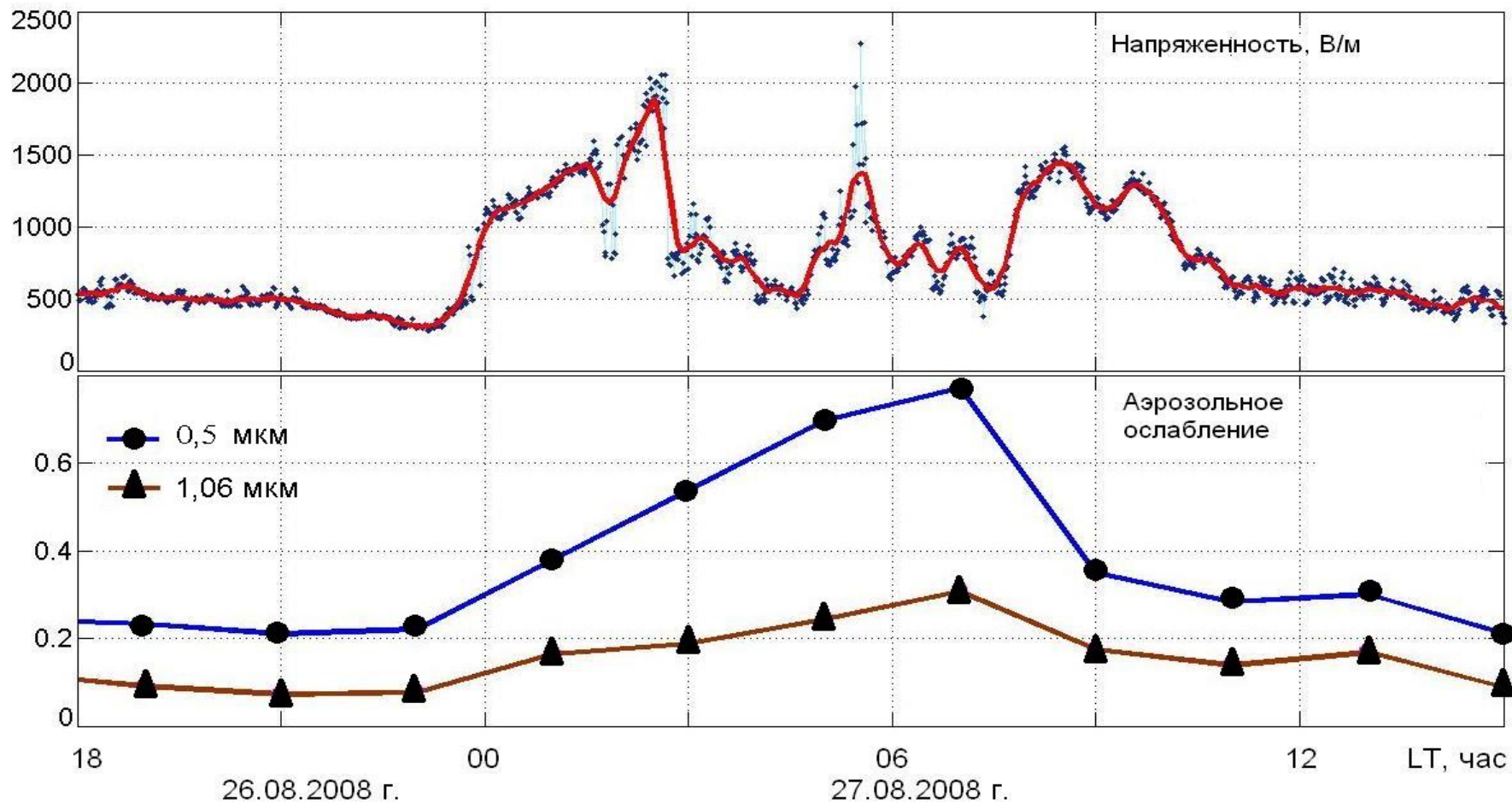
Отмеченный эффект, предположительно можно объяснить тем, что образуются приподнятые аэрозольные слои, нижняя часть которых имеет преимущественный отрицательный заряд.

Учёт этого фактора в современных моделях ГЭЦ видится весьма важным поскольку он может оказывать влияние на электрическое состояние приземного слоя одновременно над большими территориями, а также в связи со значительным учащением лесных пожаров в северной Евразии, наблюдаемым в начале XXI века.

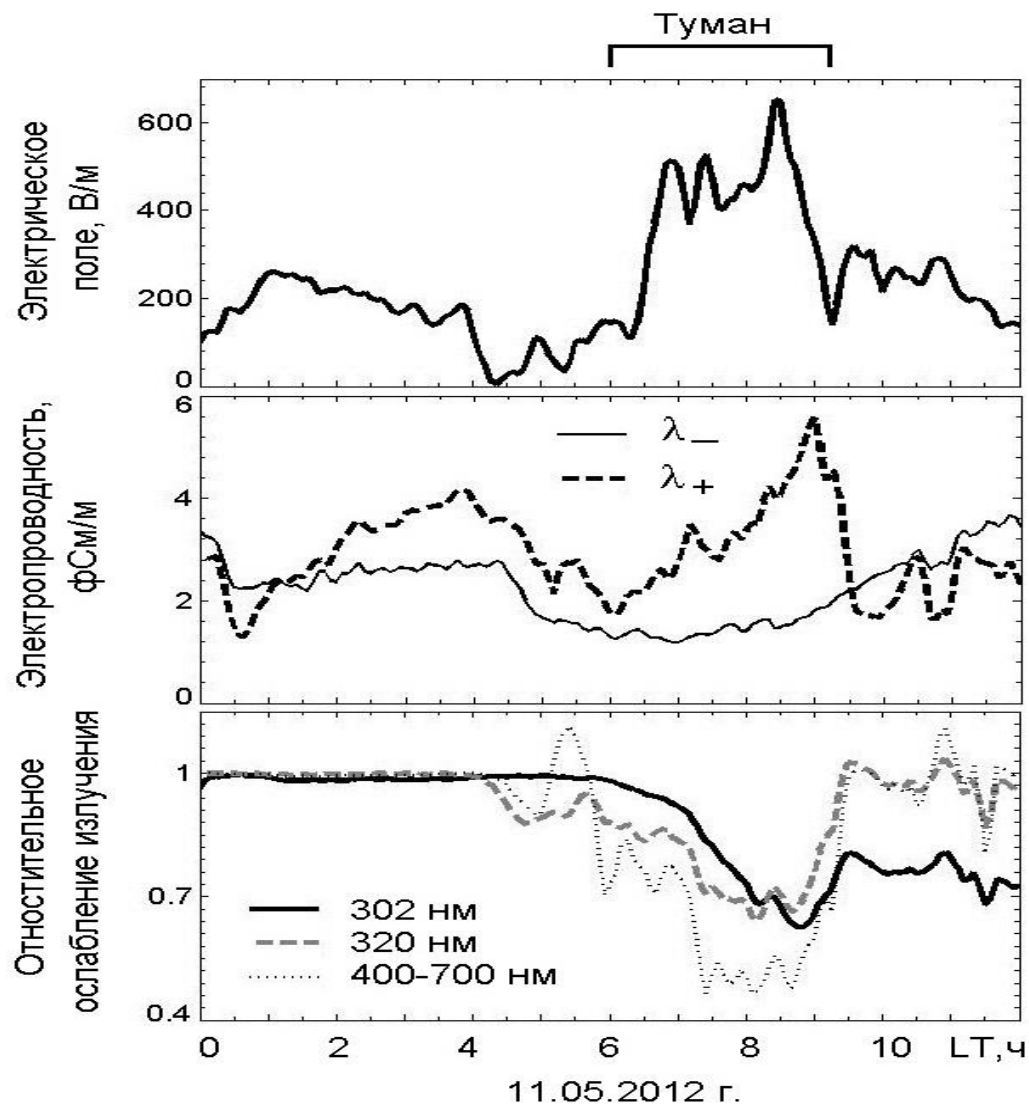
Одновременно, при взаимодействии легких ионов обеих полярностей с аэрозольными частицами более крупные из них становятся заряженными отрицательно и, вследствие оседания под действием силы тяжести, формируют вблизи поверхности отрицательный объемный заряд.

Именно этот слой частиц с отрицательным объемным зарядом и приводит к инверсии направления напряженности поля ночью ($E(t) < 0$).

Вариации напряженности атмосферного электрического поля E и коэффициентов аэрозольного ослабления β во время тумана

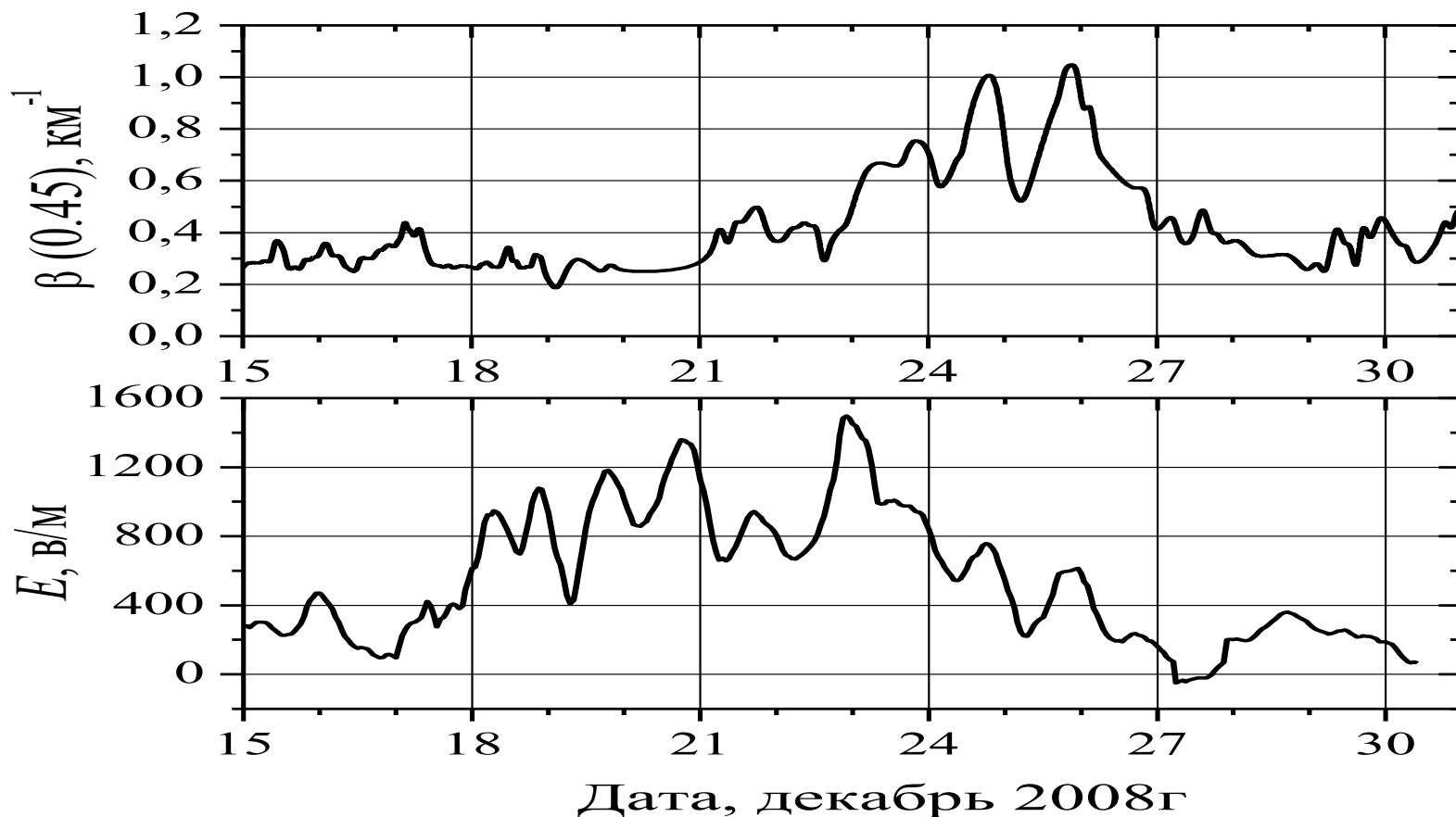


Вариации напряженности атмосферного электрического поля E во время тумана



Динамика атмосферно-электрических величин и нормированного уровня приходящего излучения в видимом и УФ диапазонах до, во время и после существования тумана

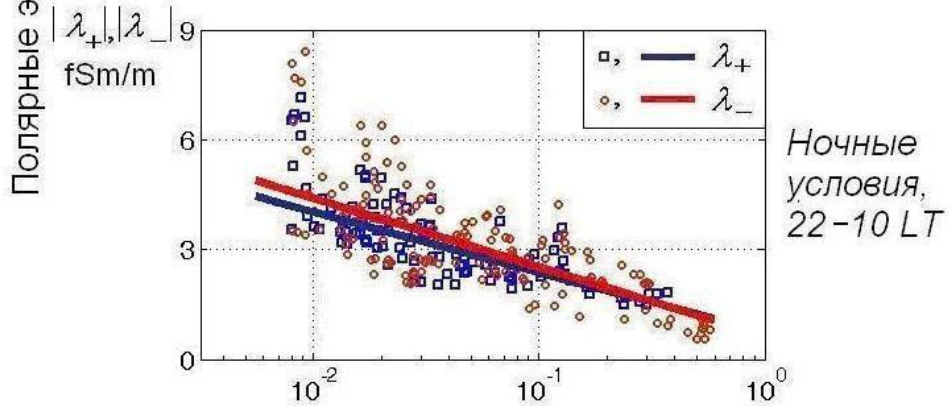
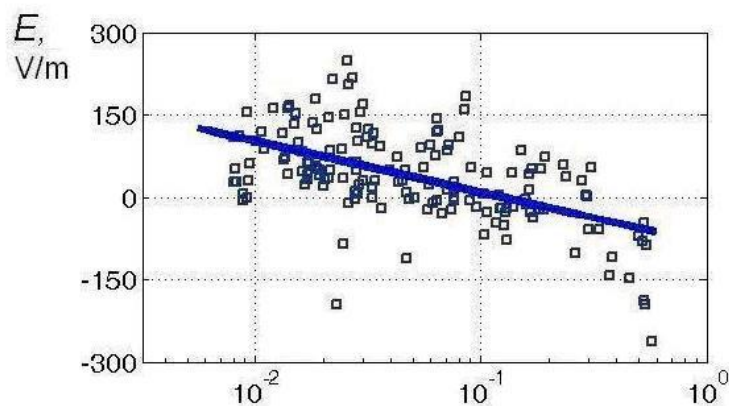
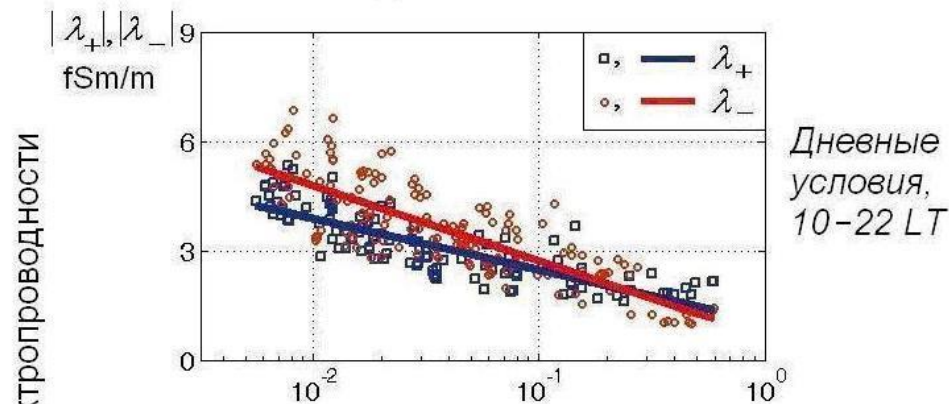
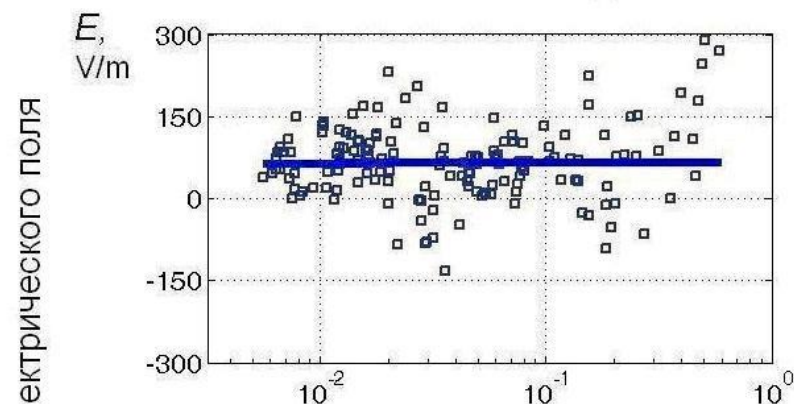
**Коэффициент аэрозольного ослабления β ($\lambda=0,45\text{мкм}$)
и напряженности атмосферного электрического
поля во время зимнего смога**



*Пхалагов Ю.А., Ужegov В.Н., Полькин В.В., Козлов В.С., Ипполитов И.И.,
Нагорский П.М. // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т.24, №4. С.269-274.*

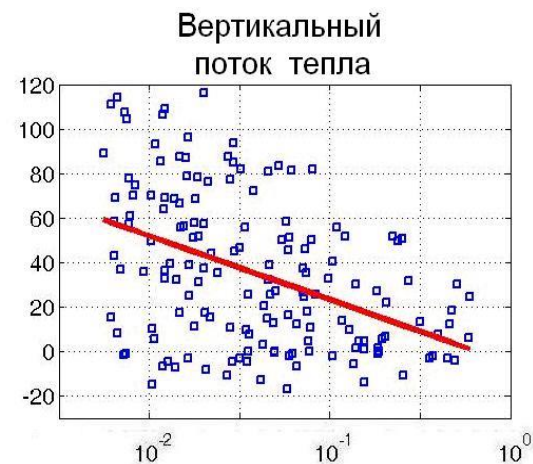
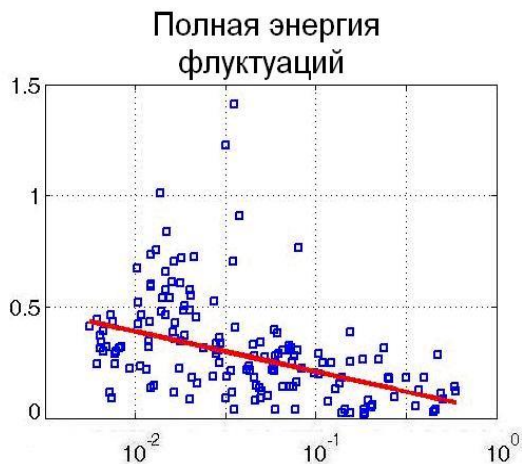
Зависимости напряженности поля и полярных электропроводностей от коэффициента рассеяния

Данные за 2-6 и 8-28 июля 2012 года

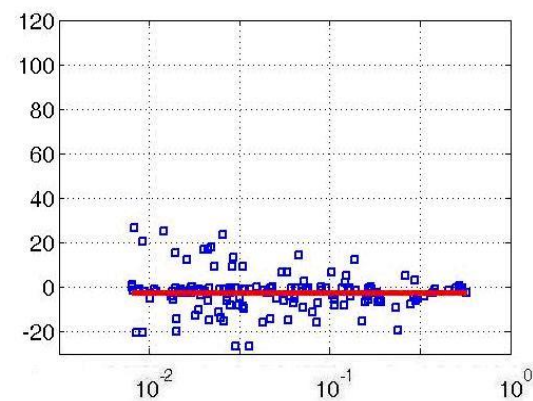
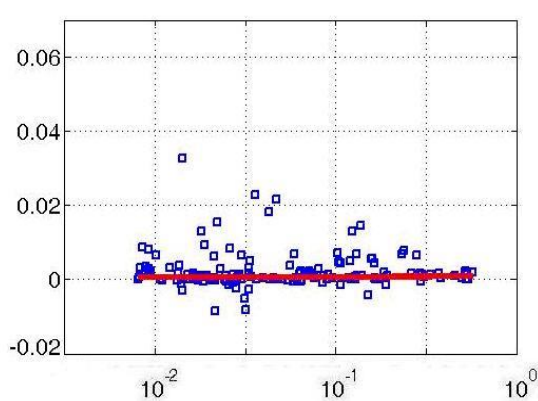
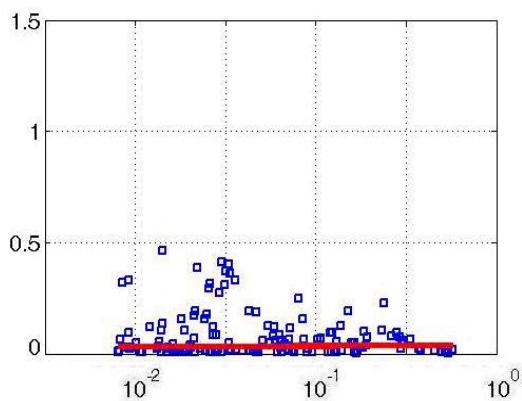


Коэффициент рассеяния под углом 45° $\beta_{SC\ 45^\circ}$

Зависимости и полной энергии флуктуаций, вертикального потока импульса и вертикального потока тепла от коэффициента рассеяния (слева - направо)



Дневные условия,
10-22 LT



Ночные условия,
22-10 LT

Коэффициент рассеяния под углом 45° $\beta_{SC\ 45^\circ}$

Зимние туманы, Западная Сибирь

Ординарный сценарий

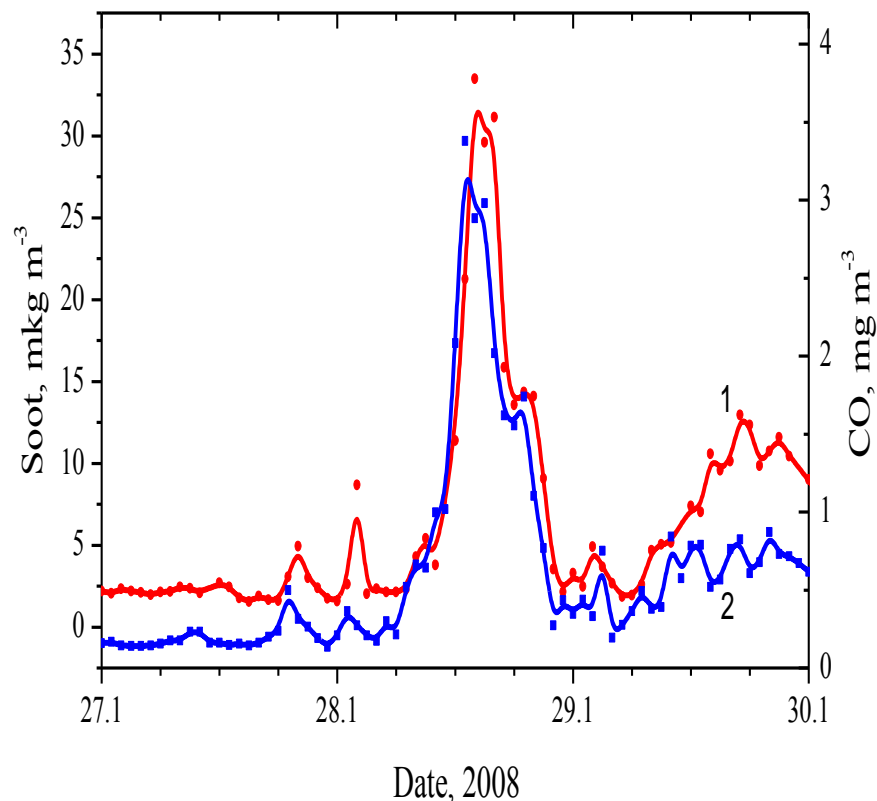
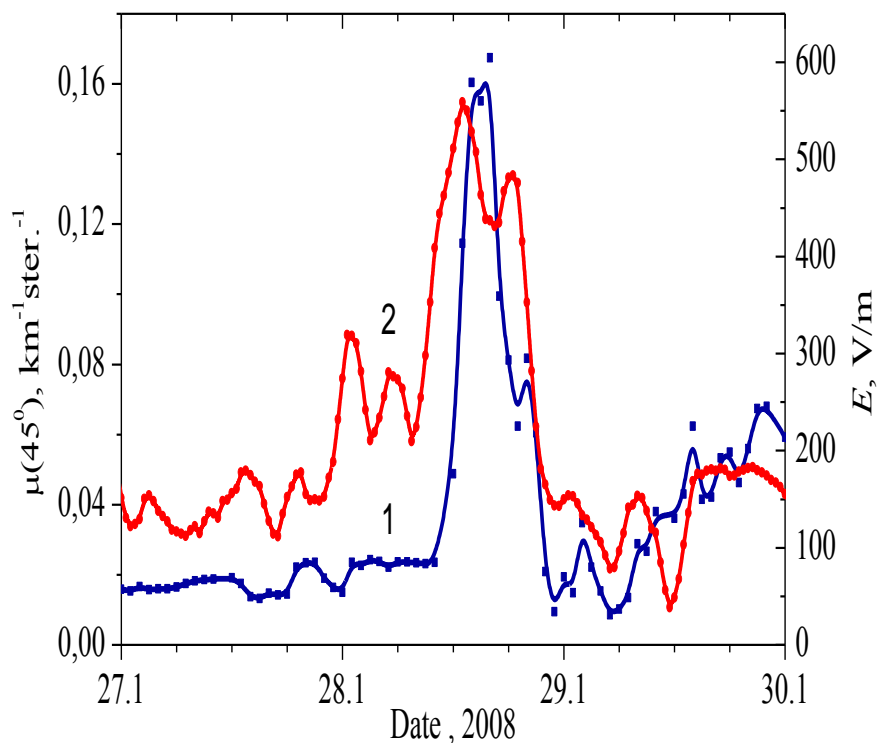
На территории Западной Сибири (Томск) были проведены подробные исследования в зимних дымках разной плотности.

Измерения напряженности атмосферного электрического поля осуществлялись на флюксметре «Поле-2» и дополнялись актиноматрическими данными, данными турбулентности приземной атмосферы, уровней α -, β -, γ - радиоактивности на серии высот, УФИ радиации. Все оптические и электрические измерения сопровождались стандартными метеонаблюдениями по данным Томской метеостанции.

Измерения проводятся в режиме мониторинга, начиная с 2006 года по настоящее время.

Зимние туманы, Западная Сибирь

Слева: Вариации углового коэффициента рассеяния (кривая 1) и напряженности электрического поля (2). Справа. Вариации концентрации аэрозольных частиц N (кривая 1) и CO (2).



Зимние туманы, Восточная Сибирь

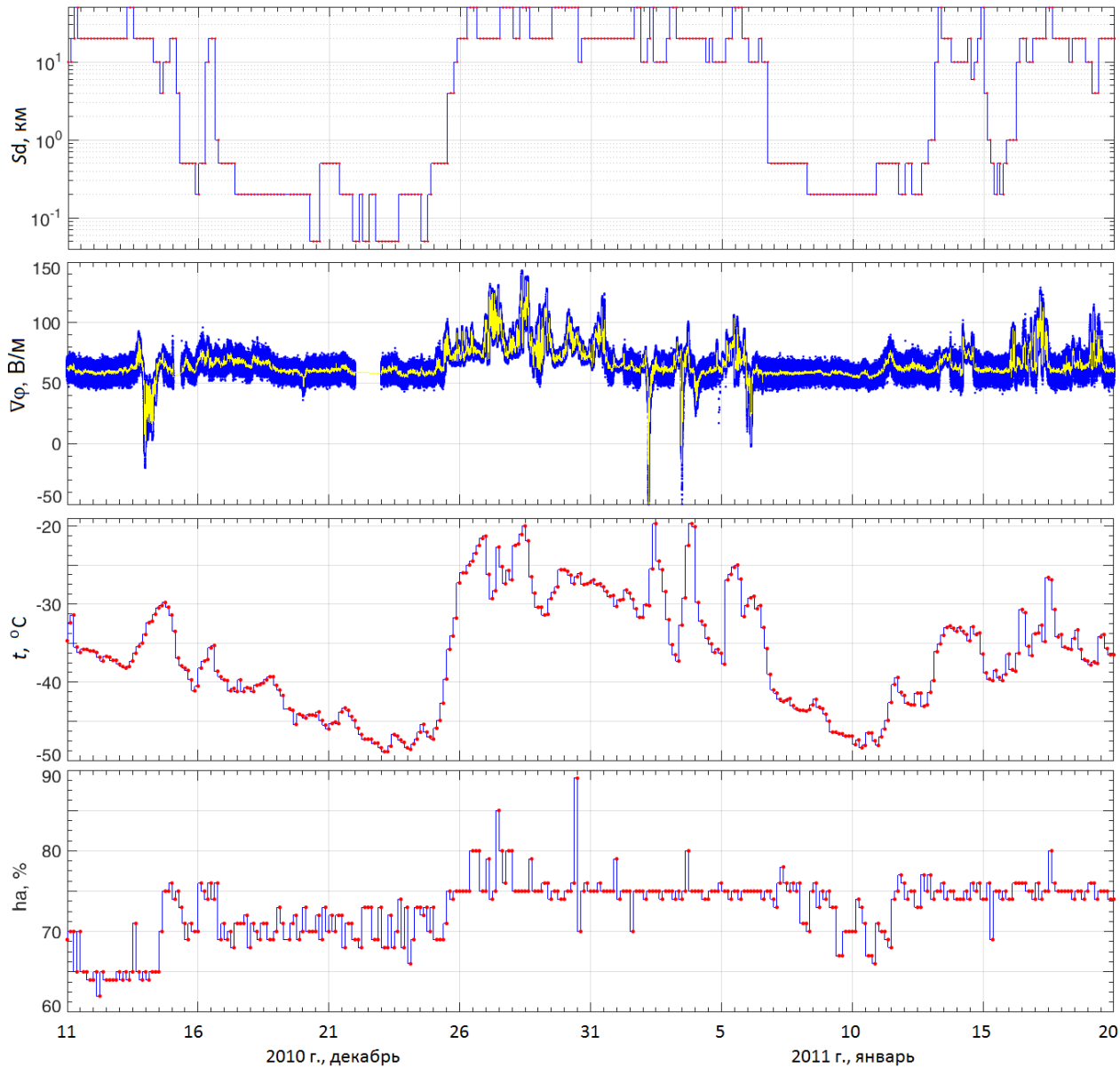
Необычный сценарий

Зимой в центральной Якутии при антициклоническом режиме погоды при практически полном отсутствии ветра, застою холодного воздуха, при низкой температуре образуются густые и длительные морозные (ледяные) туманы.

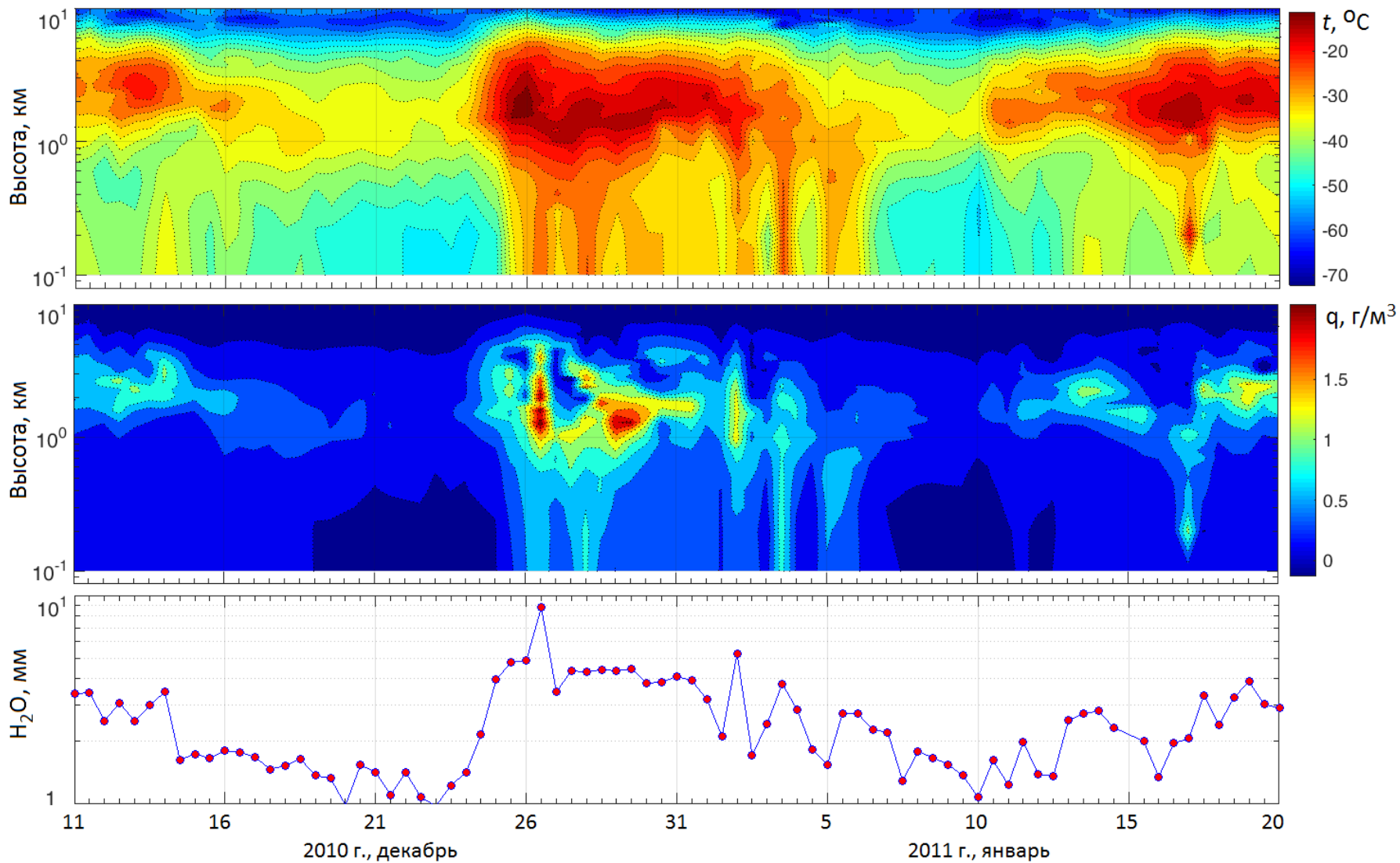
Зимние туманы наблюдаются в населенных пунктах. Они возникают из-за дополнительного поступления в воздух влаги в результате сжигания топлива автомобилями и отопительными системами.

Вне населенных пунктов туманы возникают, в основном, в низинах при более низких температурах. Годовое число дней с туманом в Якутске по долговременным наблюдениям колеблется в пределах 40-90. Максимум туманов приходится на декабрь-январь.

При дальности видимости менее 50 м туман характеризуется, как опасное гидрометеорологическое явление (ОЯ) и является серьезной угрозой для различных видов деятельности.




Временной ход
метеовеличин,
зарегистрированных в
Якутске с 11.12.2010 г. по
20.01.2011 г.
Сверху – вниз:
дальность видимости Sd ,
км;
градиент потенциала
 $\nabla\varphi = -E$, В/м;
температура t , $^\circ\text{C}$;
относительная влажность
 h_a , %.



Данные аэрологического зондирования (Якутск, 11.12.2010 – 20.01.2011 гг.).

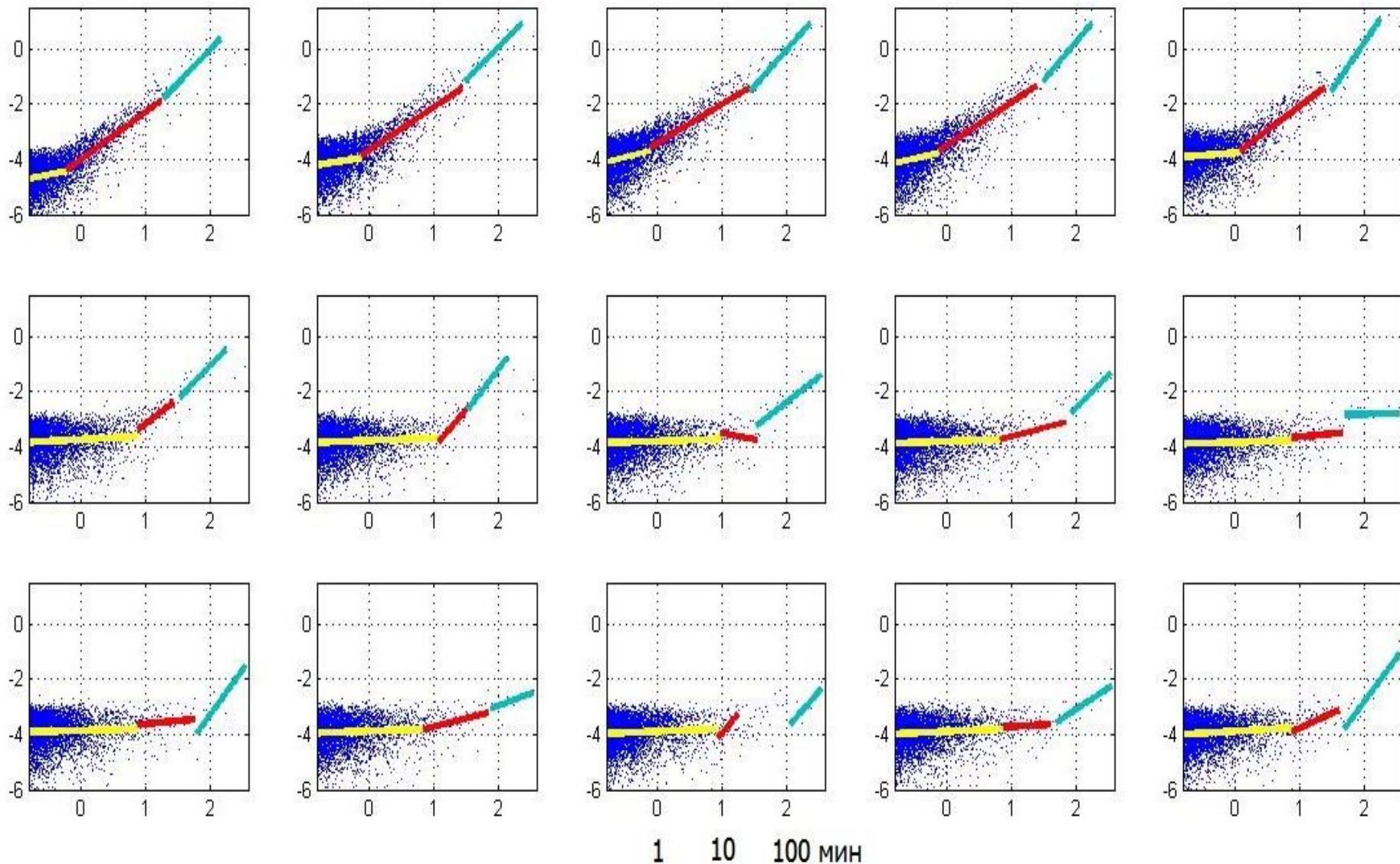
Сверху – вниз: температура, $^\circ\text{C}$; абсолютная влажность, г/м^3 ; интегральная влажность, мм.



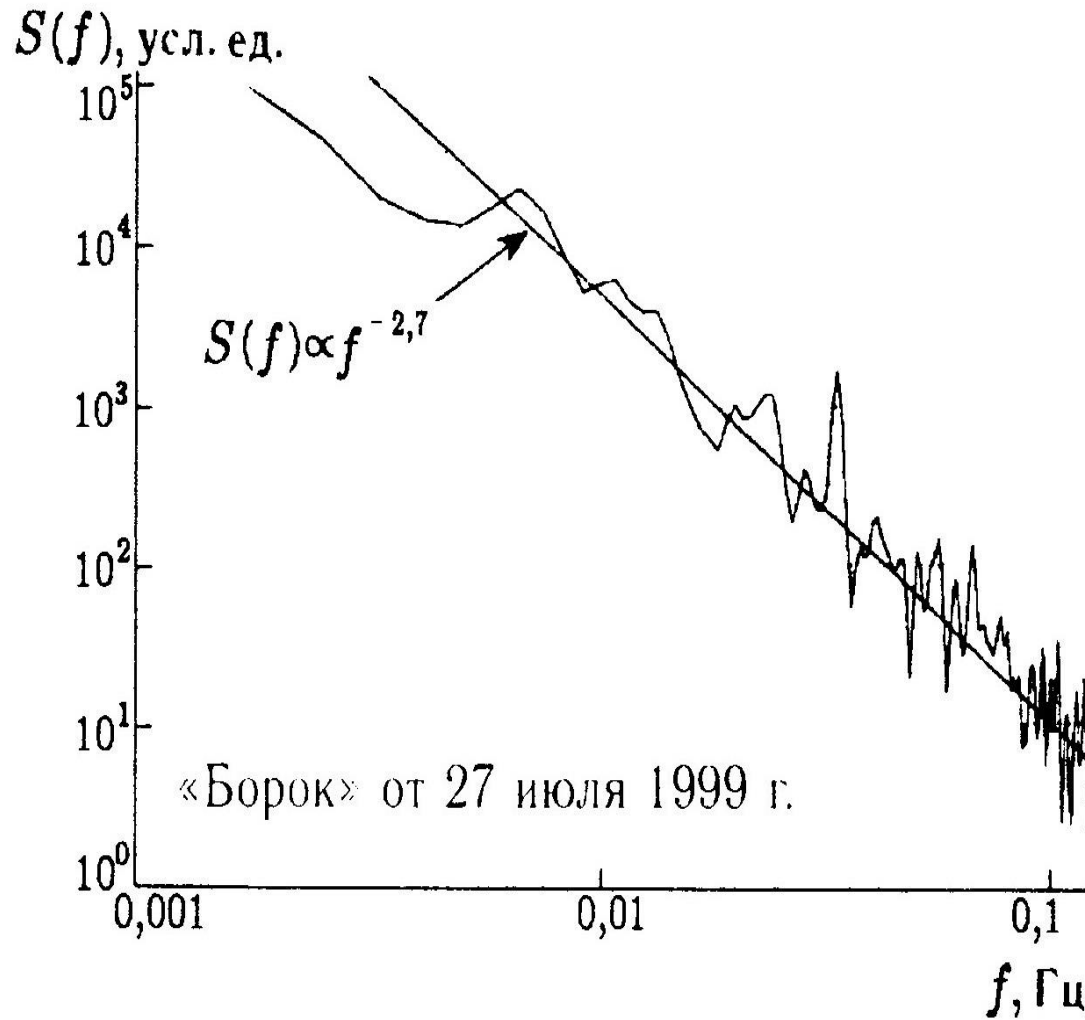
Величина напряженности электрического поля во время тумана уменьшается, что прослеживается во всех величинах: минимальном, максимальном, среднем, медианном и модальном значениях.

При отсутствии ледяного тумана спектр периодов колебаний электростатического поля атмосферы можно разделить по частотам (периодам) на три диапазона: горизонтальный участок спектра (верхняя граница периодов не превосходит десятков секунд); участок линейного роста амплитуд спектральных составляющих, обусловленный турбулентным перемешиванием (его характерные периоды ограничены внутренним и внешним масштабами турбулентности), и участок, связанный с насыщением, нижний граничный период которого, как правило, равен или превосходит 10-30 минут.

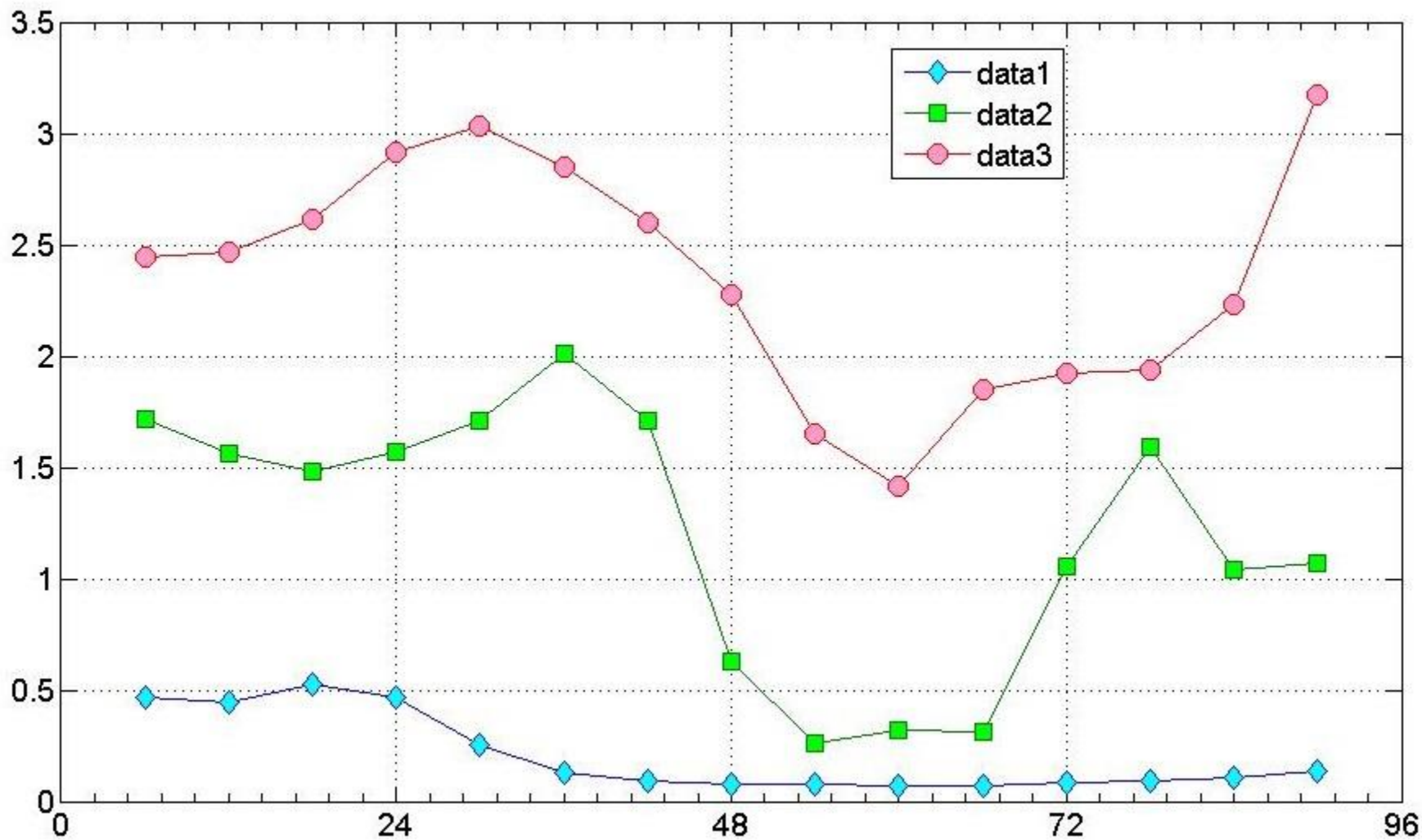
Эволюция спектра во время развития тумана

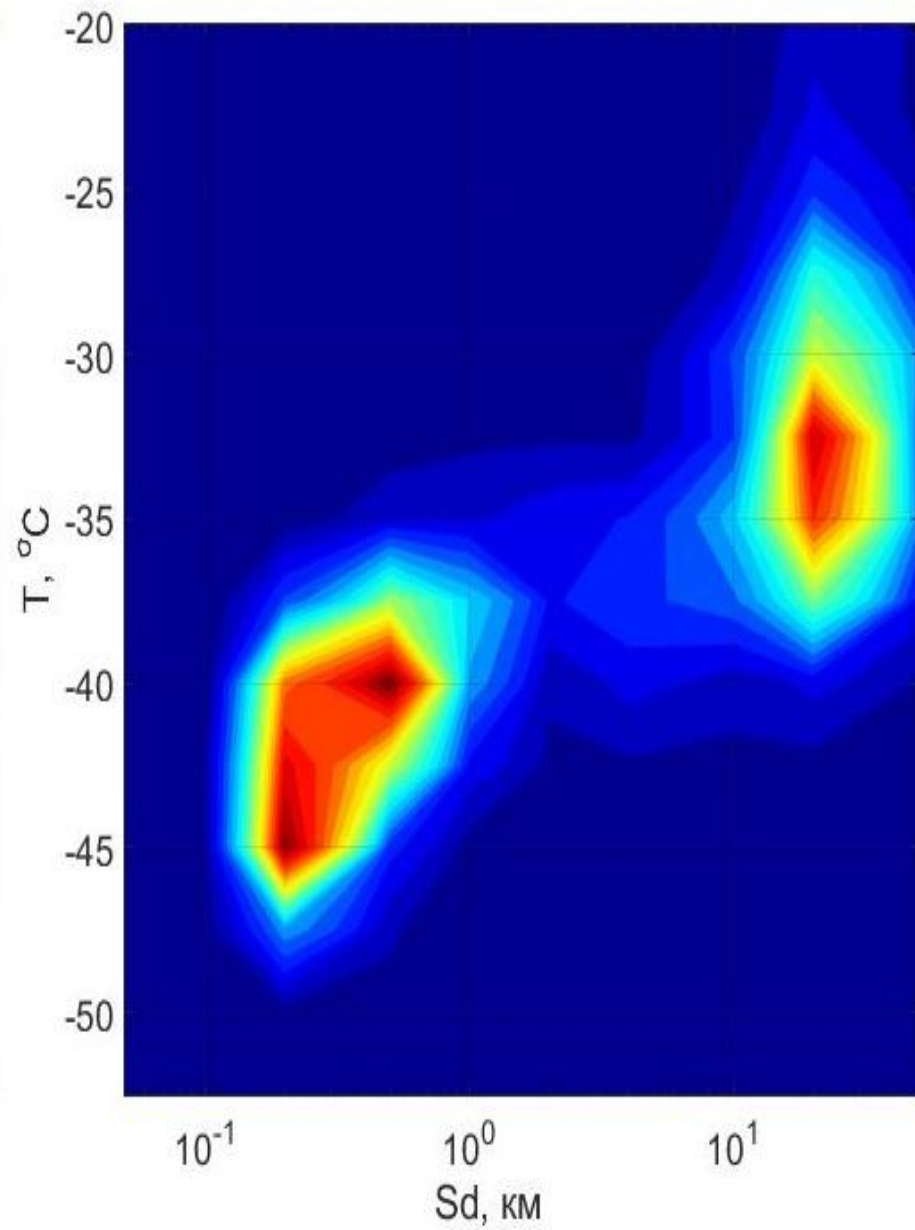
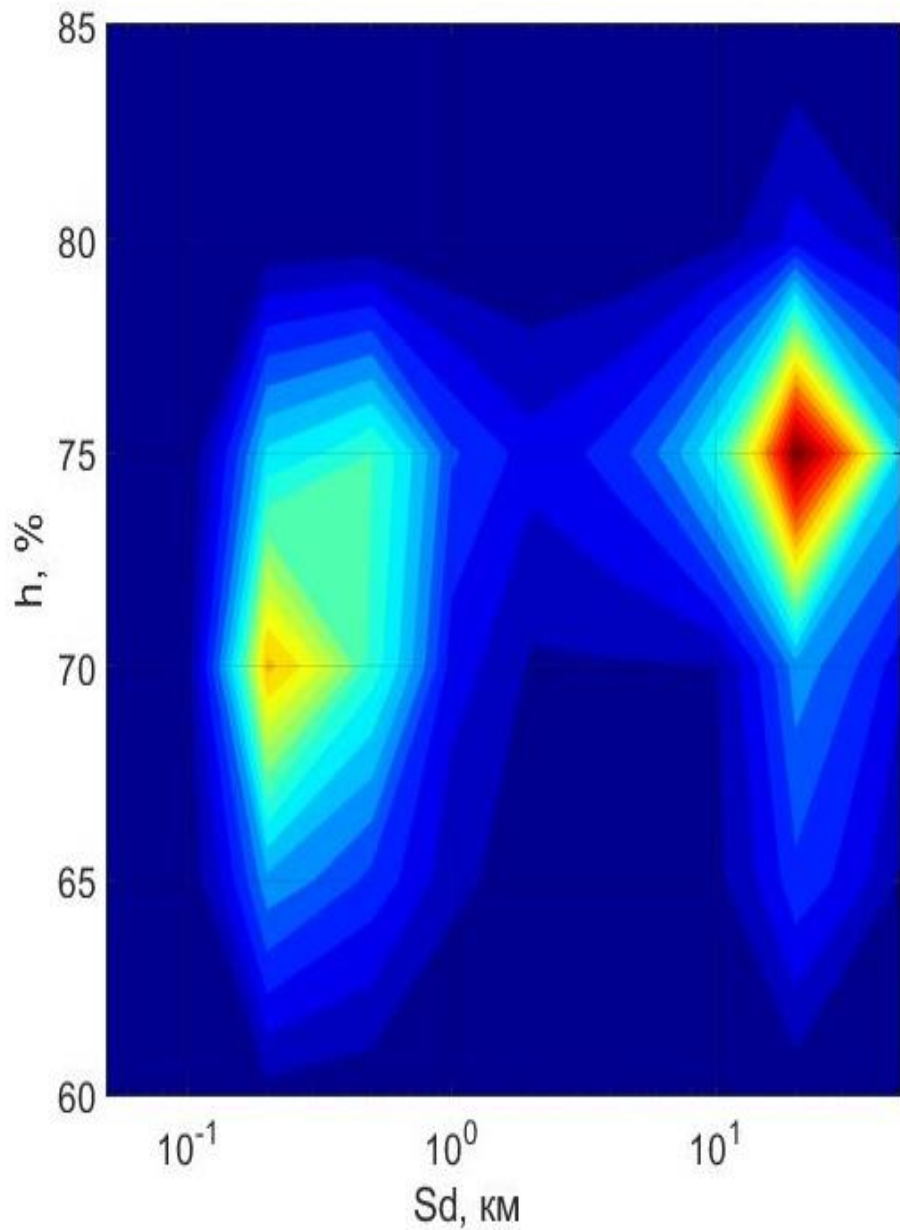


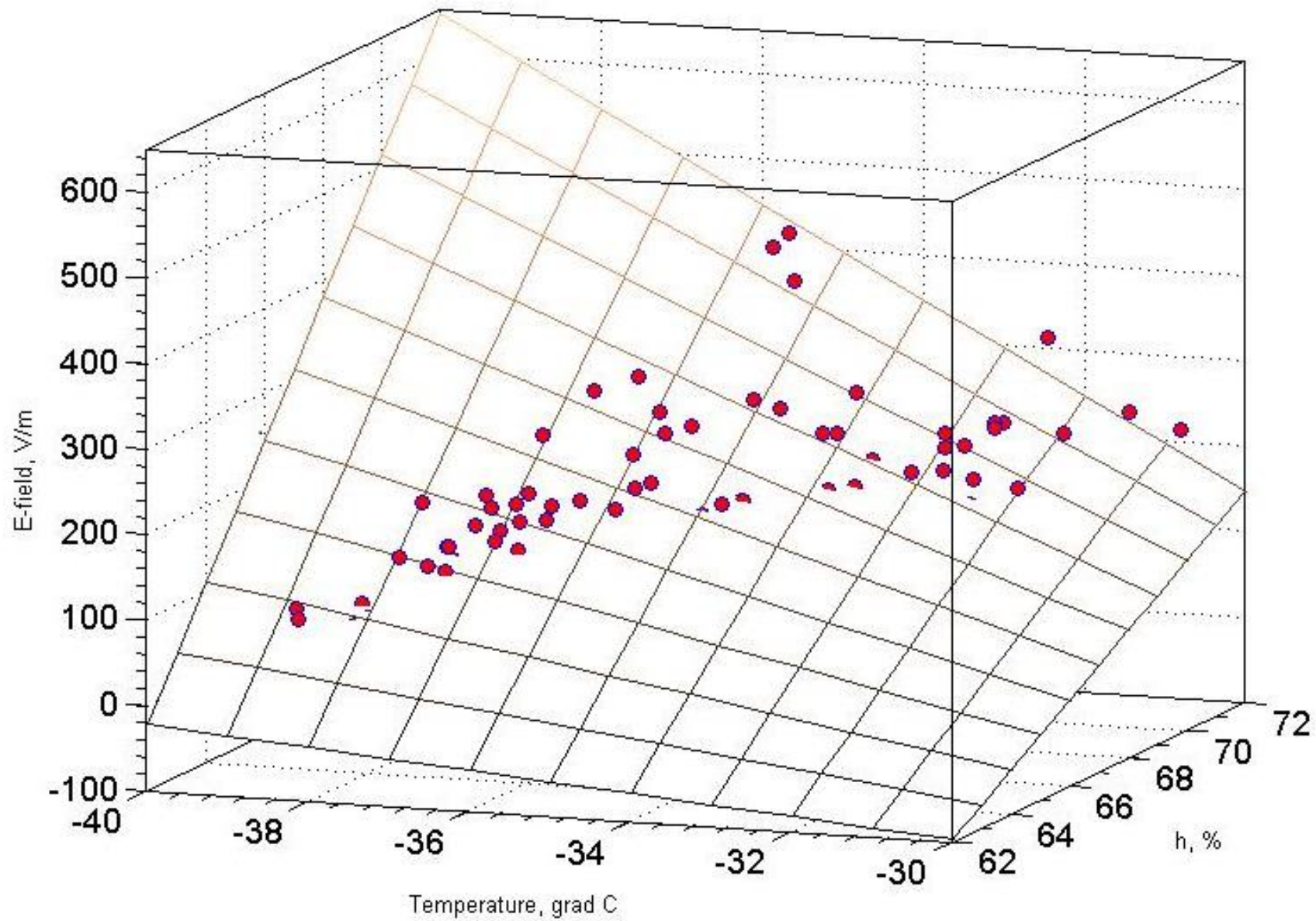
Условия «хорошей погоды»




Эволюция наклона участков спектра во время развития тумана







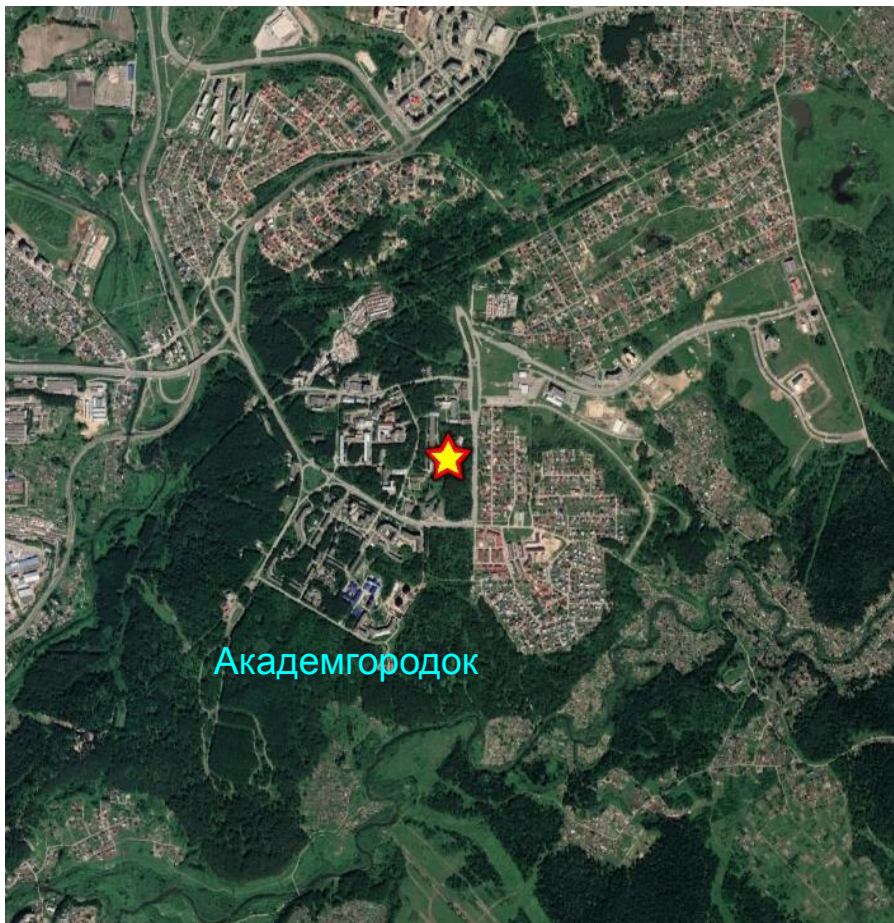


Выявленные изменения указывают на то, что основную роль в трансформации вариаций E играет обезвоживание тропосферы, а удаление влаги из атмосферы связано, по-видимому, со спонтанной кристаллизацией, аналогичной облачной, которая при $t \sim -39 \div -41^\circ\text{C}$ значительно ускоряется.

В обоих сценариях ключевая роль принадлежит процессам, регулирующим сток легких ионов на аэрозоль (гидрометеоры), что обеспечивает текущую электропроводность приземного слоя атмосферы и, следовательно, эволюцию напряженности электрического поля E .

Отличия в сценариях, по-видимому, определяются балансом концентраций в приземной атмосфере гидрометеоров микронного и субмикронного размеров, обеспечивающим разницу в скоростях исчезновения легких ионов.

Зависимость значений n_+ и n_- от направления ветра



Расположение пункта наблюдения

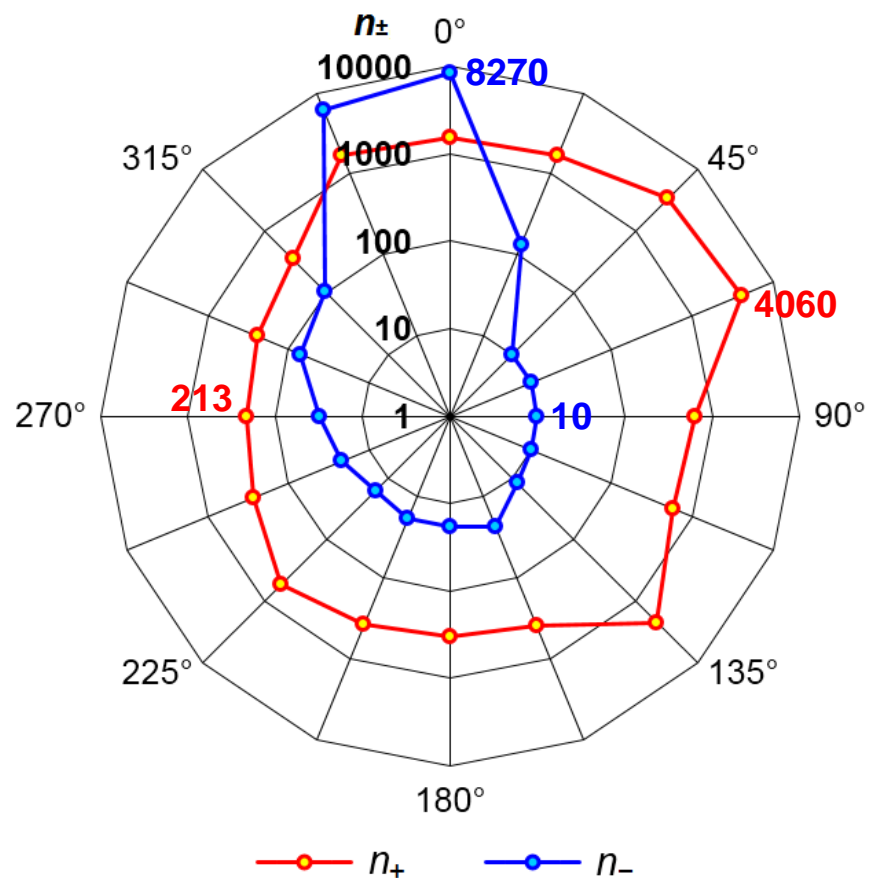


Диаграмма распределения медианных значений n_{\pm} (в см⁻³) в зависимости от направления ветра

Спасибо за внимание
Thank you for attention

