



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра метеорологии, климатологии, и охраны атмосферы

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
(магистерская диссертация)

На тему: «Исследование процесса электризации гидрометеоров в  
результате столкновения с переохлажденными облачными  
каплями»

Исследователь ст. гр. ПМ-М20-1-1

Офори Максвелл Квадро

Руководитель кандидат физико-математических наук, доцент

Кашлева Лариса Владимировна

«к защите допускаю»  
Заведующий Кафедрой

кандидат физико-математических наук, доцент

Сероухова Ольга Станиславовна

«11», Июня, 2022 г.

Санкт-Петербург

2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	1
1. Электрическое строение кучево-дождевого облака .....	4
1.1 Электрическая структура кучево-дождевого облака .....	6
1.2 Основные процессы электризации облачных частиц и частиц осадков в кучево- дождевом облаке .....	10
1.3 Процесса электризации гидрометеоров в результате столкновения с переохлажденными облачными каплями .....	27
2 Экспериментальные постановки электризации гидрометеоров в результате столкновения с переохлажденными облачными каплями .....	31
2.1 Общее описание экспериментальные постановки и численное моделирование .	31
2.2 Общие формирования и описание модели облака .....	32
2.3 Процессы микро-электризации и разделения зарядов при столкновении крупинки и переохлажденного капля .....	44
2.4 Особенности электризации при столкновении с каплями растворов.....	47
3 Анализы результатов эксперимента и численного моделирования.....	49
3.1 Анализ свойств параметров облачной модели .....	49
3.2 Анализ свойств параметров облачных гидрометеоров .....	50
3.3 Анализ свойств процесса организованной микро-электризации облачных гидрометеоров .....	55
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	64
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....	65
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	70

## ВВЕДЕНИЕ

Молния возникает в результате внезапных электрических разрядов между системами конвективных облаков или, и атмосферой или, и земной поверхностью. Молниевый разряд всегда представляет реально поразительные впечатления человечеству и эти впечатления чаще бывают очень разрушительны: от огромного экономического ущерба до нанесения на человеческую жизнь. Это основной источник повреждения энергосистем, где изоляция оборудования может разрушиться из-за перенапряжения и последующего разряда высокой энергии. А когда, например, самолёт попадает под ударом молнии, последующие ущерба - огромны. Помимо своего поразительного разрушения, она на взгляд представляет собой источник чудес для человечества.

Кучево-дождевые облака являются основным конвективным облаком, которое обслуживает местом и фабрикой для грозовых явлений. Сложная физическая структура, а также ряд сложных термодимических процессов, постоянно протекающих внутри кучево-дождевых облаках, делают эти облачные системы более благоприятной средой для роста заряда до величины, могучей поддерживает грозовую деятельность.

Предложено несколько механизмов о микро-электрификации и разделении зарядов в кучево-дождевых облаках: большинство из них проанализировано экспериментально, но существуют некоторые разногласия относительно того, какой из них лучше описывает эти процессы. Это неоднократно вызывало ряд аргументов и опровержение некоторых предположений. Наш вклад к этому будет нацелен на проверку и оценку того или иного механизма микро-электризации внутри кучево-дождевом облаке.

Наше исследование направлено на изучение таких вопросов:

- 1) качественная и количественная роль переохлажденных капель в разделении зарядов облаков;
- 2) пространственно-временная скорость вклада электрической активности переохлажденных капель в разделении зарядов облаков;
- 3) вклад переохлажденных капель в формирование малой положительной ячейки на более нижней части кучево-дождевых облаков;
- 4) сдвиг от взаимодействия чистых капель-крупинок к взаимодействию раствора капля-крупинки и на зависимость от жидкой водности и количественной концентрации частиц внутри грозового облака.

Результаты этой исследовательской модели помогут студентам и исследователям, которые решают различные вопросы, связанные с грозовой активностью в области физики облаков и атмосферного электричества, а также отдельным компаниям и частным лицам, на чью деятельность может повлиять грозовая активность. Они так же помогли бы протестировать и оценить и уже оформленные модели.

На ходу исследования будет:

- 1) рассмотрена основная постановка электрического строения кучево-дождевого облака;
- 2) описана общая постановка для экспериментов и их результатов при столкновении крупинок с переохлажденными каплями;
- 3) рассмотрена особенность электризации при столкновении крупинок с чистыми и растворенными переохлажденными каплями;
- 4) сформулировано и проверено численное моделирование процесса электризации гидрометеоров в результате столкновения с переохлажденными облачными каплями.

Работа протекает по трем основным главам:

В главе 1 охвачена общая теория об электрическом строении в кучево-дождевом облаке. Она имеет три подраздела, в которых рассматриваются как расположены заряды в облаке, как это распределение зарядов меняется в течение жизни облака – то есть описание процессов макро-электризации облака; основные гипотезы о процессах, приводящих к созданию электрической структуры облака. Так и рассматриваются какие происходят взаимодействия частиц осадков – крупы и града, с облачными частицами, какие приобретаются заряды – знак и величина приобретаемого градиной заряда.

В главе 2 изложены экспериментальные постановки и численное моделирование процесса электризации гидрометеоров в результате столкновения с переохлажденными облачными каплями. Здесь описываются модели облака: формулировка модели, основные уравнения для расчетов, начальные и граничные условия. Сначала эксперимент базируется на столкновении крупинки с переохлажденным каплю дистиллированной воды, а затем расширяется на рассмотрение особенности электризации при столкновении с каплю раствора.

Глава 3 содержит основные результаты численного моделирования, схемы и ряды анализов.

## 1. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ КУЧЕВО-ДОЖДЕВОГО ОБЛАКА.

Прежде чем поступим к главным заданиям нашей темы, сделаем краткий обзор о кучево-дождевых облаках, внутри которых сосредоточено это исследование.

В связи с избытком влаги и неустойчивостью в атмосфере образованию кучево-дождевых облаков способствует активный восходящий поток влажного и теплого воздуха (конвективное ядро). При очень интенсивной грозовой деятельности кучево-дождевые облака имеют весьма значительную вертикальную мощность, нередко в более теплых и умеренных зонах, имея высоту своих верхних границ, касающуюся тропопаузы, тогда как высоты нижней границы облаков над окружающим уровнем земли могут опускаться ниже 1000 м. Восходящий поток уносит с собой в облака все частицы в любом состоянии — твердые или иначе, влажные или сухие, заряженные или нейтральные, тяжелые или легкие, которые падают на его пути — настолько глубже, насколько они могут быть унесены этим восходящим движением воздуха.

В пределах полностью созревших кучево-дождевых облаков в зависимости от температуры и термодинамических процессов вода могла встречаться во всех трех агрегатных состояниях. Опыты доказывают, что вода замерзает при  $0^{\circ}\text{C}$ , но это условие не всегда полностью соблюдается в кучево-дождевых облаках. Вода по ряду сложных причин при температуре значительно ниже нуля еще могла существовать в своей жидкой фазе. Следовательно, в этом контексте может быть более удобным и точным принять, что точка таяния льда равна  $0^{\circ}\text{C}$ , чем сказать, что точка замерзания воды равна  $0^{\circ}\text{C}$ . Существует переохлажденная вода, и ее можно найти в равновесии с другими гидрометеорами, поскольку имеющихся условий может быть недостаточно для завершения процесса зародышеобразования кристаллов: с учетом наличия ядер замерзания (обычно кристаллов льда) и

скрытого тепла, которое выделяется, когда заморозят другие частицы воды. В пустых пространствах между частицами, где частицы не удерживаются компактно, заполняют пар и сухой воздух.

Таким образом, образовавшиеся кристаллы льда и переохлажденные капли сосуществуют в равновесии, а взаимодействующие парообразные пространства достигают насыщения по отношению к переохлажденным каплям и перенасыщения по отношению к кристаллам льда. Эта парообразная фаза потом приспособит к более быстрому росту кристаллов льда по сравнению с переохлажденными каплями. Поскольку последним нужно будет преобразовывать через другие более слабые аморфные кристаллические формы: крупы, градины, снежинки, снежные шарики и т. д. Наблюдения показывают, что большинство облаков, и кучево-дождевых облаков в этом смысле, в основном полностью состоят из капель переохлажденной воды при температуре от  $0^{\circ}\text{C}$  до  $-15^{\circ}\text{C}$ ; от  $-15^{\circ}\text{C}$  до  $-40^{\circ}\text{C}$  — смесь капель переохлажденной воды и рыхло скопившихся зернистых кристаллов; ниже  $-40^{\circ}\text{C}$  — полностью из кристаллов льда.

В зрелой стадии кучево-дождевых облаков температура изменяется примерно от около  $0^{\circ}\text{C}$  до около температур тропопаузы, где активность наковальни и выступающей вершины замедляется. Внутри хорошо развитого кучево-дождевого облака на верхних частях, где имеются очень низкие температуры, состоят в основном из кристаллов льда; на средних уровнях — смесь переохлажденных капель, пара, более мелких кристаллов льда и слабых кристаллов (снега, крупы, градины, и т.д.); смесь дождя и тающего града занимают нижние слои. Такое структурированное распределение частиц способствует эффективному распределению электрических зарядов, последующему формированию электрических полей, переносу зарядов и проявлению эпизодического явления — молнии и грома.

Кроме того, такое микроструктурное распределение облачных гидрометеоров очень неоднородно по размеру, концентрации и плотности. Частицы могут быть плотно или разреженно распределены неравномерно. Пространственно-временное распределение изучено недостаточно; следовательно, в этой работе будут пересмотрены некоторые из предыдущих предположений и формулировок, предложенных ранними исследователями. Кроме того, полный спектр частиц (размер и концентрация) будет ограничен: сосредоточимся на наиболее продуктивных параметрах разделения заряда.

### **1.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА КУЧЕВО-ДОЖДЕВОГО ОБЛАКА**

В серии экспериментов (включая теорию разделения зарядов Уилсона) было постулировано, что заряды постоянно образуются и (или) выбрасываются в атмосферу в результате различных процессов ионизации частиц атмосферного воздуха. В тропосфере при хорошей погоде существует устойчивая система ионного равновесия, поддерживаемая постоянным притоком ионов с земной поверхности и верхних слоев атмосферы. Поэтому любое вещество (в том числе облака и другие гидрометеоры), тем или иным образом помещенное в такую среду, постепенно начинает приобретать заряды одним из нескольких способов электростатического заряжания — трением, контактом или индукцией.

Молекула воды в силу своего биполярного химического свойства не может быть считаться электрически нейтральной — она всегда подвергается автоионизации, особенно в жидком состоянии, а наличие в атмосфере гигроскопических ядер конденсации ускоряет скорость этого процесса. Убедившись в этом, все облака можно считать в той или иной степени наэлектризованными, но сильная электризация облаков, таким образом, эффективное разделение зарядов и

возникновение электрического поля соответствует развитию кристаллов льда внутри облаков в присутствии переохлажденных капель и/или крупинки. Появление кристаллов льда или (и) граупелей (снежных круп) считается очень необходимым в процессах электрификации и последующей молниеносной деятельности в кучево-дождевых облаках (Illingworth and Lees, 1992).

Более ясная картина в физике облаков и атмосферном электричестве показывает, что в чисто безоблачной атмосфере существует понятие глобальной цепи, которое объясняется теорией электростатического потенциала. Конденсатор Кельвина также моделирует Землю и верхние слои атмосферы как гигантский сферический конденсатор. При этом Земля представляет собой концентрическую отрицательно заряженную пластину, а верхние слои атмосферы — положительную пластину конденсатора. Диэлектрической средой выступает промежуточная воздушная оболочка, нижние атмосферы. Поэтому в ясные дни электрическое поле направлено к поверхности Земли из верхних слоев атмосферы.

В такой диэлектрической среде мы могли бы легко понять, что любой объект, помещенный под влияние электрического поля, будет индуцироваться на противоположных полюсах: положительно по направлению к Земле и отрицательно вблизи верхней поверхности. Из этого обзора ясно, что кучево-дождевые облака, образовавшиеся в этой среде и под влиянием этого сильного электрического поля, имеют на своей верхней поверхности отрицательные заряды, а под нижней — положительные заряды. Поэтому у грозового облака такая внешняя дипольная электрическая структура — отрицательный заряд вверху и положительный внизу.

Уилсон продолжает в своей теории формулировать, что грозовое облако действует как батарея — диэлектрическая среда конденсатора, которая управляет зарядами внутри этого концентрического конденсатора, чтобы поддерживать глобальную цепь через молнии и осадки.

Как предполагает микроструктура кучево-дождевых облаков, неоднородность гидрометеоров существует в огромном количестве. Это приводит к очень сложной внутренней электрической структуре, механизм формирования которой стал центральной темой физики облаков. Мы не можем дать точного объяснения макро-электрической структуре кучево-дождевых облаков без ясного понимания их микро-электризации.

Рост типичного кучево-дождевого облака происходит поэтапно: стадия развития, стадия зрелости и значительной электрификации (эффективного разделения зарядов) и стадия рассеивания. Из обычного кучевого облака дальнейшая конвекция приводит к образованию башнеобразного кучевого облака: стадии, возглавляемой мощным восходящим потоком теплой и влажной воздушной массы, характеризующимся скоростью, которая нередко превышает 15 м/с, и способствует быстрому росту гидрометеоров. Стадия зрелости отмечена как активным восходящим, так и нисходящим потоком масс гидрометеоров, приводящим к образованию наковальни и выбросу вершины. Осадки из нижних областей, прекращение грозовой деятельности, прорыв верхних уровней в перистые облака характеризуют завершающую стадию диссипации.

Зарядка конвективного облака начинается с начала конденсации, что и объясняет механизмом конвективной зарядки. Процессу способствуют ядра конденсации и переносимые воздушными массами избыточные легкие ионы, а также диполярность молекулы воды. Поскольку во всем процессе конденсации участвуют разные ядра с разными зарядами, полярность (знак заряда) конвективной ячейки будет определяться суммой знаков всех вовлеченных зарядов. Поскольку, у поверхности земли в вышележащих слоях преобладают положительные ионы в соотношении примерно 6:5 к отрицательным ионам, Уилсоном было предположено, что сформировавшееся на ранней стадии развития кучевое облако

приобретет чистый положительный заряд за счет конвекции, т. е. большинство ядер, всосавшихся в систему, обладают положительным зарядом.

Дальнейшие турбулентные и вертикальные потоки, последующие столкновения между различными типами частиц, температурный градиент внутри облака, влияние атмосферно-земного электрического поля, действие гравитации на различные гидрометеоры и другие факторы катализируют разделение зарядов среди отдельных гидрометеоров и облака в целом, вызывая дальнейшую динамику в упорядоченно-зарядовой системе. По мере роста облака до стадии более развитой вертикальной структуры оно обычно приобретает биполярную структуру: вверху накапливается положительный заряд, а внизу — отрицательный. Эта структура сохраняется и при переходе облака в кучево-дождевое. Положительно заряженный внутренний полюс в верхней части кучево-дождевых облаков, как это было предложено в нескольких экспериментах, обусловлен более легкими кристаллами льда, которые отрывают положительный заряд от более тяжелых градин и капель и уносятся вверх в верхнюю часть облака восходящим движением воздуха. Более тяжелые гидрометеоры (частицы крупы или града), будучи отрицательно заряженными, либо падают под действием силы тяжести в нижние части облака, либо удерживаются во взвешенном состоянии восходящими движениями воздуха.

Когда внутри облака начинаются интенсивные осадки и кучево-дождевые облака переходят в стадию рассеивания, в нижней части облака обычно образуется небольшая область положительного заряда. Этот механизм, более применимый к нижней и средней части облака, проверен и принят в лабораторных условиях электрического заряда, когда мягкий град или частицы крупы сталкиваются с кристаллами льда в присутствии переохлажденных капель. Установлено, что количество и полярность зарядов граупелей зависят от разности в температуры частиц облака и содержащейся жидкой воды в облаке, а также от размера кристаллов льда, относительной скорости столкновения и др.

В целом, верхняя часть облака становится положительно заряженной, в то время как средняя и нижняя части облака, где температура окружающего воздуха составляет от  $-5$  до  $-25$  °С, становятся отрицательно заряженными. Кроме того, небольшое количество положительного заряда накапливается вблизи дна облака. Этот механизм приводит к классическому три-полярному (положительный - отрицательный - положительный) вертикальному (сверху - посередине - снизу) распределению заряда внутри кучево-дождевых облаков. Отрицательный заряд в срединной части заставляет землю под ним становиться положительно заряженной, а положительно заряженная наковальня заставляет землю под ней приобретать отрицательные заряды. Результатом является разделение заряда по пространству, что создает высокое электрическое поле и возможность значительной электрической активности — молнии.

## **1.2. ОСНОВНЫЕ ПРОЦЕССЫ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ ОБЛАЧНЫХ ЧАСТИЦ И ЧАСТИЦ ОСАДКОВ В КУЧЕВО-ДОЖДЕВОМ ОБЛАКЕ**

Методы микро-электризации облачных частиц по-прежнему остаются важнейшей темой исследований в физике облаков. Что касается того, какая из многочисленных теорий, предложенных в качестве основных механизмов разделения зарядов, верна и дает точное отображение реальности внутри грозовых облаков. Наблюдения из серии экспериментов показывают, что достаточное разделение зарядов достигается только в кучево-дождевых облаках, в которых за развитием граупелей и (или) кристаллов льда следует сильная электризация.

Пространственный анализ кучево-дождевых облаков с интенсивной грозовой активностью при учете сезонных и географических факторов показывает, что средняя вертикальная мощность составляет около 7–10 км; основные заряженные

ячейки, которые активно вспыхивают молниями, сосредоточены в нижней половине облака и могут опускаться на глубину до 1–3 км, но обнаружено что это явление более связано с температурой чем высотой; максимальный заряд облака составляет порядка десятки кулонов, который экспоненциально нарастает в течение, возможно, многих секунд или даже минут; максимальный потенциал примерно в пределах 10 мегавольт – 100 мегавольт; средняя максимальная напряженность поля в порядке нескольких единиц около 100 киловольт на метре; средний ток около 0,1 мегампере; энергия удара молнии может быть порядка 250 киловатт. Поэтому, прежде чем какая-либо модель станет практически приемлемой для описания эффективного разделения зарядов, она не должна давать результаты, которые бы сильно отклонялись от этих данных.

Согласно рекомендациям из работ Мейсона, Мура, Воннегута, Латама, Дая и др., любая теория электрификации облаков должна быть способна качественно объяснить электрические характеристики среднего грозового облака, а также соответствовать количественным требованиям, таким образом, быть в состоянии заблаговременно создать достаточное разделение зарядов в пределах типичных временных рамок. Следовательно, они подвергли свое моделирование следующим постулатам, что:

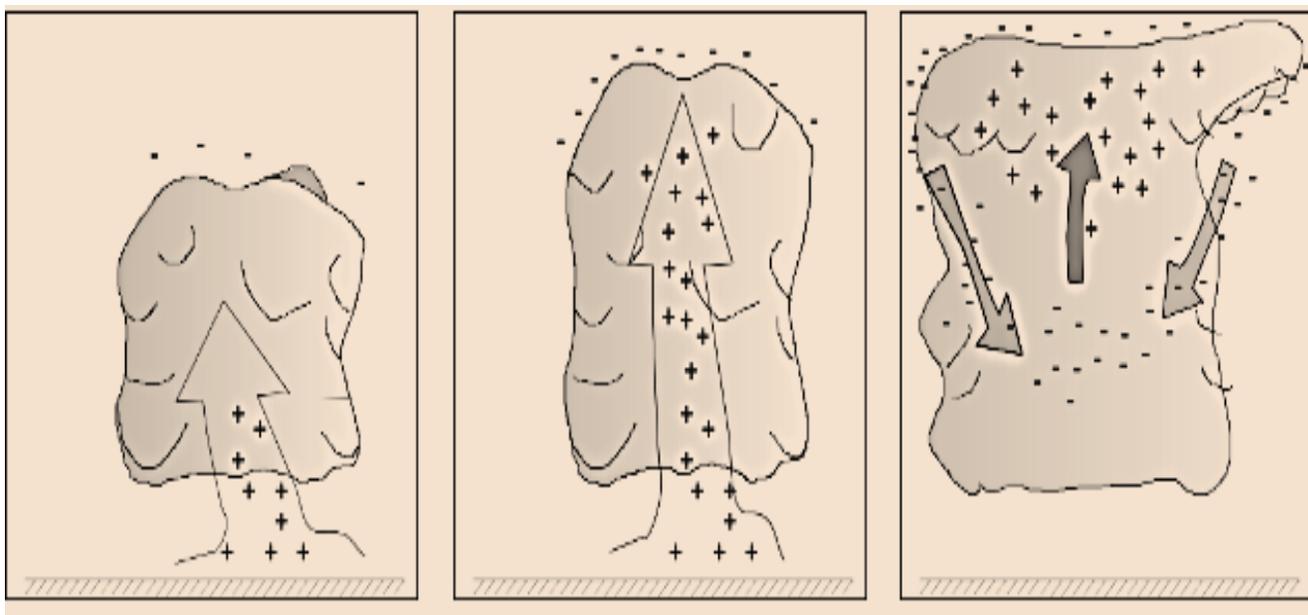
- 1) любой эффективный механизм должен уметь создавать трехполярную структуру заряда — верхний положительный при температуре ниже  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , центральный отрицательный около  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , нижний положительный выше  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В противном случае необходимо объяснить трехполярную структуру, а центры заряда скорее связаны с температурами;
- 2) для достижения значительной электризации облако должно простираться намного выше уровня замерзания и должны быть твердые частицы осадков;
- 3) области сильного электрического поля с плотностью заряда около  $1\text{--}10\text{ Кл/км}^3$  состоят из кристаллов льда и градин в среде переохлажденных капель;

- 4) механизм должен суметь генерировать и отделять достаточный электрический заряд поля 100 – 400 киловольт на метре, и поддерживать молнию облако-землю ударным током около 1Ампера в течение времени около 25 минут.

Эти рекомендации более согласованы с различными наблюдениями, которые дали данные о грозовом облаке, перечисленные выше. Следовательно, мы никоим образом не можем изучать микроструктуру электризации облаков без пересмотра основных особенностей отдельных гидрометеоров, их осажденных форм и того, как они взаимодействуют друг с другом внутри облака. Особенности составляющих любого облака имеют тесную взаимосвязь с микро-, и следовательно, с макро-электрической структурой этого облака. Существует несколько концепций разделения зарядов, но есть две основные категории, которые хорошо интерпретируются и, до нынешних дней, широко рассматриваются большинством исследователей. Конвективный механизм (предполагающий, что заряды возникают в основном на более ранней стадии развития облака за счет притока свободных ионов) и столкновительный механизм зарядки, причем последний подразделяется на индуктивный и неиндуктивный. Индуктивный и неиндуктивный механизмы предполагают общий обзор процессов и процедур, приводящих к разделению зарядов, основывающих трехполярную структуру кучево-дождевых облаков и чрезвычайно большую напряжённость электрического поля, позже проявляющаяся в молнии.

### 1.2.1. Конвективный механизм зарядки

Теория конвективной зарядки, предложенная Ч. Т. Р. Уилсоном в 1920-х годах, стала свидетелем ряда достижений некоторых других физиков облаков, таких как Воннегут, Гренет, Мур (1940–50-х годов). Этот механизм лучше всего объясняет разделение зарядов на ранних стадиях формирования невыпадающих кучевых облаков. Он заключается в том, что у поверхности Земли преобладают положительно заряженные легкие ионы, примерно в соотношении 6:5 к противоположным знакам. Это связано с тем, что направленное вниз электрическое поле хорошей погоды побуждает отрицательно заряженные легкие ионы подниматься вверх навстречу к положительным ионам, поступающим из космоса, чтобы нейтрализовать их, оставляя дыры и избыточные чистые положительные заряды у поверхности Земли.



Рисинок 1.2.1. – Иллюстрации зарядки конвективной облачной ячейки при конвекции. Как описано в статье Сандерса, 2008.

По мере нарастания конвекции восходящие течения воздушных масс уносят с собой преобладающие вблизи Земли положительные заряды в новообразованную конвективную ячейку, что и входит в качестве фундаментальной стадии электризации в облаке. Следовательно, образовавшееся кучевое облако на этой стадии несет чистый положительный заряд. Облако, как материя, помещенная в сильное электрическое поле, направленное к Земле, поляризуется отрицательно над верхней поверхностью и положительно под ней. Другие гипотезы объясняют, что отрицательные заряды, возникающие над верхней поверхностью этой новообразованной конвективной ячейки, вызваны не внешним электрическим полем, а притяжением свободных ионов из окружающего воздуха к поверхности облаков.

Так, как кучевое облако растет и переходит в более плотные формы, увеличивается восходящий поток, следовательно, увеличивается концентрация всасываемых вместе положительных ионов, так и отрицательные заряды наверху увеличиваются и начинают распространяться к боковым сторонам облака. По мере увеличения конвективного восходящего потока чистые положительные заряды в конечном итоге переносятся вверх, в самую верхнюю часть облака. В обратный эффект создается нисходящий поток, который приносит противоположные заряды к боковым границам и постепенно увлекает их в облако, чтобы заполнить центральные области вблизи основания.

Эта теория объясняет дипольную природу с положительным зарядом вверху и отрицательным зарядом внизу на ранних стадиях кучево-дождевых облаков. Хотя многие исследователи предполагают, что существуют качественные и количественные недостатки между этой теорией и наблюдениями (Chiu and Klett, 1976; Latham, 1981; Williams et al., 1989), но она широко воспринимается и дает логически исчерпывающее объяснение электризации облаков на ранней стадии.

Также предполагается, что эта структура могла бы принять абсолютно обратную форму, когда суммарные заряды, хлынувшие в облако на самых ранних стадиях, окажутся противоположными. Это предположение исходит из того факта, что вблизи земной поверхности могут быть области, где в суммарном заряде преобладают отрицательные ионы. Следовательно, конвекция на этой периферии переносит чистые отрицательные ионы вверх в конвективную ячейку. Хотя несколько теорий вроде бы подтверждают возможность о существовании такой макро-электрической структуры кучево-дождевых облаков, вероятность незначительна. В этом случае образовавшееся кучевое облако несет чистый отрицательный заряд; диполярность будет принимать форму отрицательную сверху и положительную снизу; три-полярность будет — отрицательной сверху — положительной в середине — отрицательной внизу.

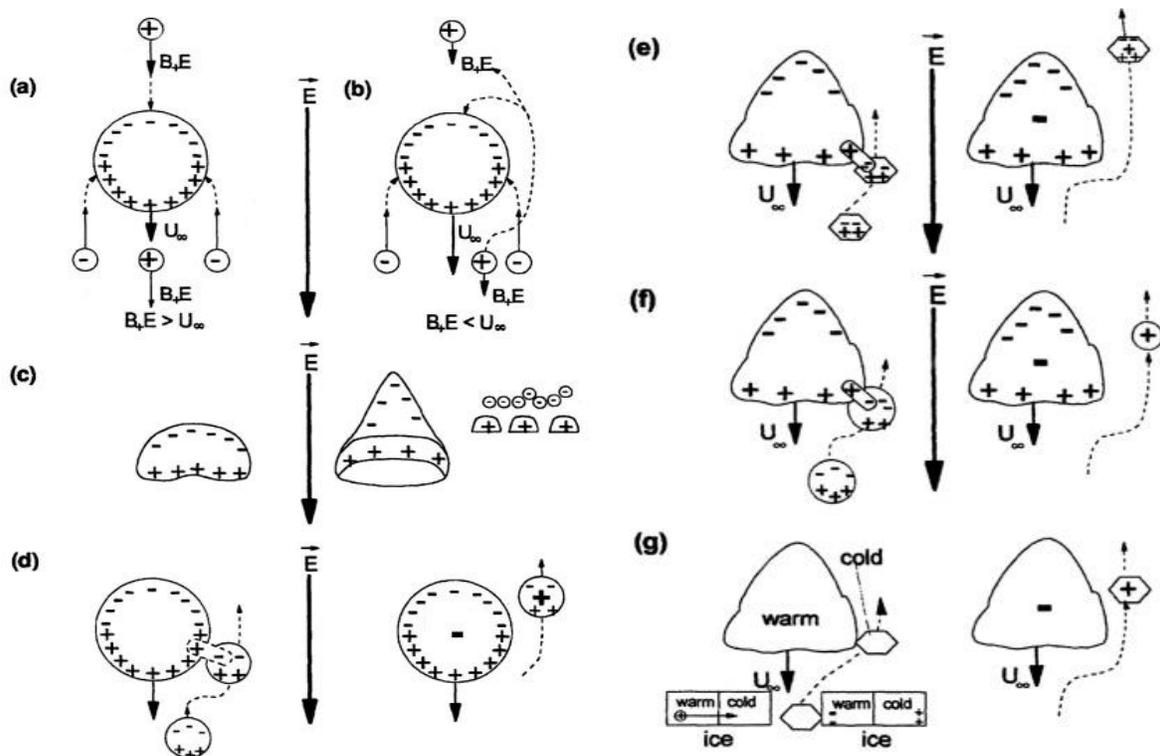
Аналогичная схема этого динамизма, предложенная Симпсоном и Скарсом, основана на колебаниях температуры в различных областях облака и гласит, что капли воды разбиваются под действием воздушных потоков, капли приобретают положительный заряд, а воздух — отрицательный. Также, когда кристаллы льда ударяются о воздухе, воздух заряжается положительно, а кристаллы — отрицательно. Лично, у меня есть проблема с этими формулировками: не в возможности их существования, но двусмысленность их толкований и требует очень тщательного изучения.

### **1.2.2. Индуктивный механизм зарядки**

В простом мысли, этот механизм зарядки представляет собой поляризацию различных гидрометеоров под действием сильного электрического поля, будь то внутреннего или внешнего, и последующее разделение зарядов либо посредством

интерактивной терминальной нейтрализации, либо путем расщепления поляризованных частиц в мелкие дробы, т. е., разделение может быть бесконтактным или интерактивным путем по отношению к другим гидрометеорам. Механизм характерен для поздних стадий цикла развития облаков, в основном этот механизм имеет сильную начальную зависимость от осаждающих форм гидрометеоров. Поляризация и разделение зарядов происходят в присутствии и под влиянием индукционного электрического поля, как это утверждается при электростатической индукции — как только электрическое поле прекращается, индуцированный заряд нейтрализуется. Следовательно, для поддержания индуцированного заряда очень необходимы другие важные факторы.

Направленное вниз электрическое поле хорошей погоды индуцирует одинаковое количество отрицательного и положительного заряда на верхней и нижней части частиц осадков разного размера. Поскольку частицы движутся с разными скоростями (в разных направлениях или с разной скоростью), они сталкиваются. При столкновении часть заряда каждой частицы нейтрализуется. Каждая частица остается с чистым зарядом после столкновения.

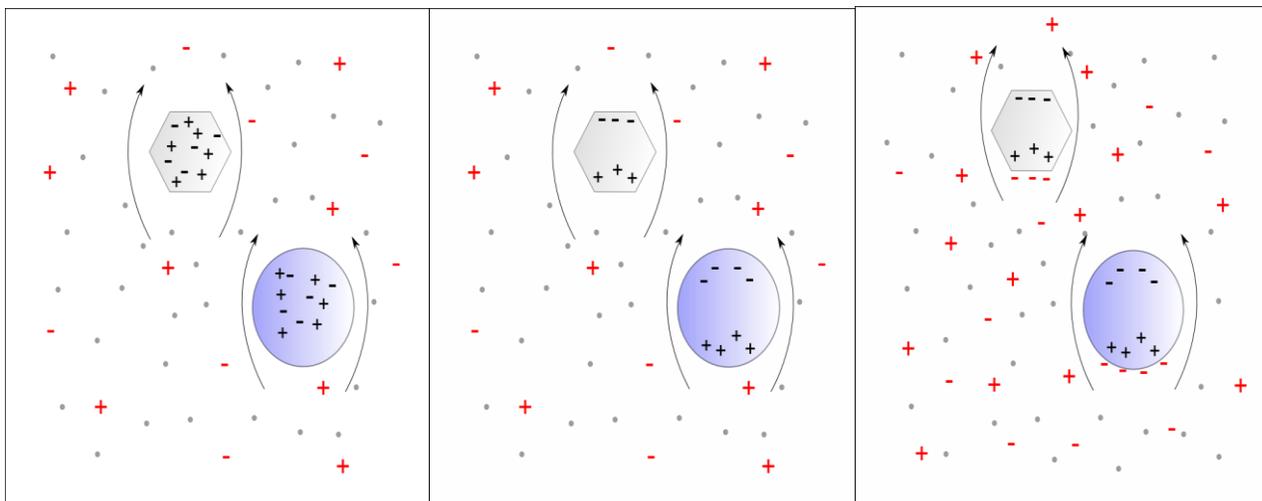


Рисинк 1.2.2. – Схематическое изображение основного механизма зарядки облака, описанного в работах Прупахера и Клетта, (а, б) селективный захват ионов, (с) расщепление капель в электрическом поле, (д) отскок капель при столкновении капель в электрическом поле, (е) отскок ледяных частиц при столкновении ледяных частиц в электрическом поле, (ф) отскок капель при столкновении капель с ледяной частицей.

### 1.2.2.1. Селективный захват ионов в электрическом поле

Этот механизм считается эффективным при условии того, что терминальная скорость падения капли заметно больше, чем подвижность положительно заряженных ионов, так как в противном случае быстрые положительные ионы, движущиеся вниз, могут прилипнуть к поверхности задней части капли и вызвать

параллельную нейтрализацию зарядов или минимизировать суммарную плотность поверхностного отрицательного заряда.



Рисинок 1.2.2.1. – Иллюстрации механизма зарядки путем индуктивного захвата свободных зарядов в облачной ячейке по описанию Сандерса, 2008.

- 1) Под влиянием космическо-земного электрического поля вызывает разделение зарядов внутри отдельных более крупных гидрометеоров, обычно капель или градин, свободно падающих под действием силы тяжести — наверху отрицательный и положительный заряд внизу: эта картина может быть перевёрнута под другим условием в нижних частях облака;
- 2) когда эти поляризованные гидрометеоры падают сквозь всего объема облака, они взаимодействуют с мельчайшими ионами. Эти ионы притягиваются к нижней поверхности и тем самым нейтрализуют имеющийся здесь противоположный заряд;
- 3) на больших высотах свободные отрицательные ионы притягиваются к нижней поверхности, но из-за особенностей аэродинамики внутри облака выхватить ионы из потока, огибающего падающую каплю сверху, труднее,

чем из набегающего потока. Следовательно, положительные ионы не могут быть подхвачены к верхним поверхностям, чтобы нейтрализовать имеющиеся здесь заряды;

- 4) мелкая частица, благодаря своему движению в противоположном направлении, дрейфуя вверх среди восходящего потока, притягивает свободные ионы или сталкивается с более крупной частицей и, следовательно, нейтрализует заряды наверху и становится положительно заряженной;
- 5) крупные капли заряжаются отрицательно и постепенно оседают, а мелкие, оставшиеся с положительным зарядом, по закону сохранения движутся восходящим потоком к верхней области облака.

Эти механизмы электризации приводят к тому, что чистые отрицательно заряженные составляющие гидрометеоров мигрируют в более нижнюю область облака, удаляя присоединенные отрицательные ионы из более высокой области облака, оставляя чистый положительный заряд вблизи верхней части облака.

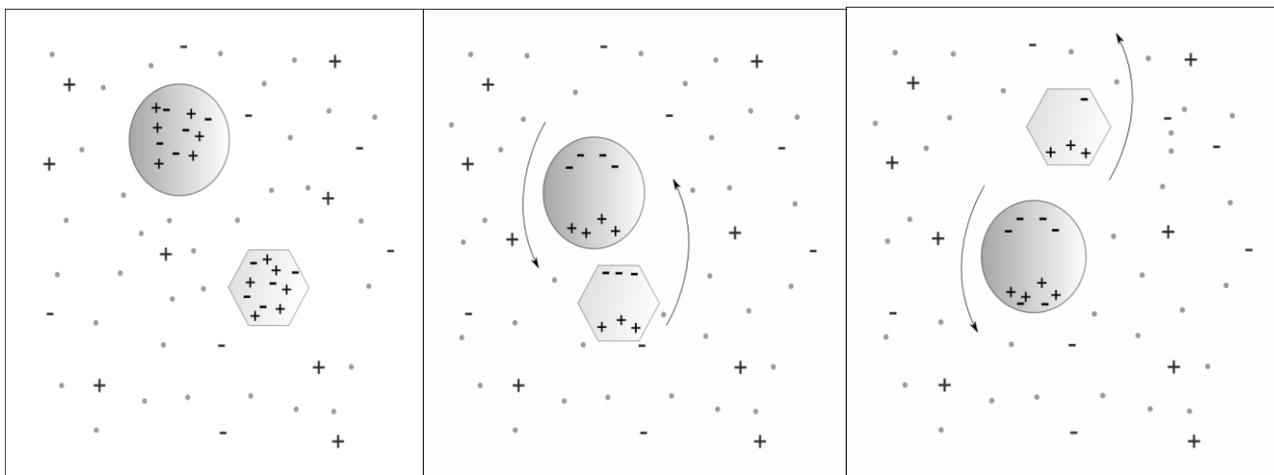
Так формируется основная биполярная структура с положительным зарядом наверху. Механизм также способствует формированию третьего маленького положительного поля внизу. Причём с помощью другой обратной составляющей напряжённости.

#### **1.2.2.2. Зарядка отскоком частиц в электрическом поле**

- 1) Космическо-земное электрическое поле вызывает разделение зарядов внутри отдельных гидрометеоров, обычно капель или градин, свободно падающих под действием силы тяжести или движутся с разными скоростями: —

отрицательный сверху и положительный внизу: эта картина переворачивается в нижних частях облака;

- 2) более крупная и быстро падающая капля или крупинка упруго сталкивается с мельчайшими кристалликами льда, которые дрейфуют вверх благодаря вертикальному восходящему движению массы;
- 3) мелкий кристалл льда, столкнувшийся к нижней части крупнейшей частицы, при отскоке приобретает чистый положительный заряд, оставляя эту более крупную частицу с чистым отрицательным знаком;
- 4) эта более крупная частица с чистым отрицательным зарядом падает ко дню облака, в то время как мельчайший, более легкий положительно заряженный лед уносится вверх к верхним слоям облака.



Рисинок 1.2.2.2. – Иллюстрации механизма зарядки путем отскока частиц после столкновения в электрическом поле, по описанию Сандерса, 2008.

Существует предположение, что угол столкновения частиц таков, что фактически сталкиваются положительные и отрицательные участки поверхности соответствующих гидрометеоров. И пренебрежение хаотической природой движения частиц внутри облака делает теорию более субъективной.

Учитывая широкий характер спектра гидрометеоров в кучево-дождевых облаках, мы пришли бы к пониманию того, что существуют разновидности частиц и типы столкновений частиц, которые могут происходить. Две капли воды столкнутся не-упруго или возникнут сильные деформации, и все это будет функцией их относительных скоростей и, возможно, температуры. Если они совершат просто скользящее столкновение, не будет никакой нейтрализации заряда, потому что на их экваторе либо не индуцируется заряд, либо он пренебрежимо мал, чтобы иметь какой-либо эффект. Таким образом, при неупругом столкновении капель воды разделения зарядов несущественно.

Столкновения между чистыми частицами льда не нейтрализуют большой заряд, потому что частицы не остаются в контакте очень долго, также заряд не течёт через лед так легко, как и происходит через воду. Столкновения частиц капли-льда и частиц льда-градины (граупеля) могут сработать, но общая спекуляция вся еще состоит в том, что электрическое поле хорошей погоды слишком мало на высоте чтобы не провоцировать индуктивный процесс и не превратить его в масштаб силового поля молнии.

Индукционные механизмы отскока частиц и захвата ионов в электрическом поле на этой стадии электризации хорошо сформулированы и четко описаны математически. По мнению ряда авторов, эти же механизмы играют специальную роль и на протяжении всей эволюции облака. Запас ионов в воздухе, который быстро исчерпывается, восполняется в результате локальных коронных разрядов, возникающих у поверхности капель и кристаллов под действием мегавольтовой напряжённости космос-земного электрического поля. Однако эта гипотеза не была проверена, и возникли другие корреспонденции, в которых говорится, что эта теория количественно нереалистична, поскольку оказывается эффективной только в слабых электрических полях.

### 1.2.2.3. Распад или расщепление капли в электрическом поле

Когда внешние силы воздействуют на капли значительного размера, они заставляют их деформироваться различным образом. Гравитация заставляет эти капли удлиняться и становиться нестабильными по мере того, как они приближаются к определенному предельному диаметру, и в конечном итоге разрываются, если этот критический диаметр будет превышен, точно так же как эластичность в эластичных материалах. Это и гипотеза о том, что капли поляризуются под действием электрических полей, являются основой этого механизма.

- 1) Электрическое поле хорошей погоды вызывает разделение зарядов внутри отдельных более крупных гидрометеоров, обычно капель или более жидких граупелей, свободно падающих под действием силы тяжести — отрицательных вверху и положительных внизу: эта схема больше присуща слоям с более высокими температурами, вблизи более низкой части облака.
- 2) поляризованная капля деформируется при падении и в конце концов расщепляется. Этот разрыв чаще бывает неравномерным, крупная его часть опускается вниз, а мелкая остается наверху.
- 3) мелкая масса несет чистый отрицательный заряд и переносится вверх на усиления центральной ячейки отрицательного заряда, тогда как большая масса с чистым положительным зарядом падает на дно, внося свой вклад в меньшую положительную область.

Этот механизм был предложен Мэйсоном что он играет очень важную роль, особенно в облаке с более высоким содержанием жидкой воды и при разделении зарядов в нижних частях кучево-дождевого облака. Теория столкнулась несколькими критическими замечаниями, но, к сожалению, на неё не проводятся активные эксперименты, чтобы дать более четкие интерпретации.

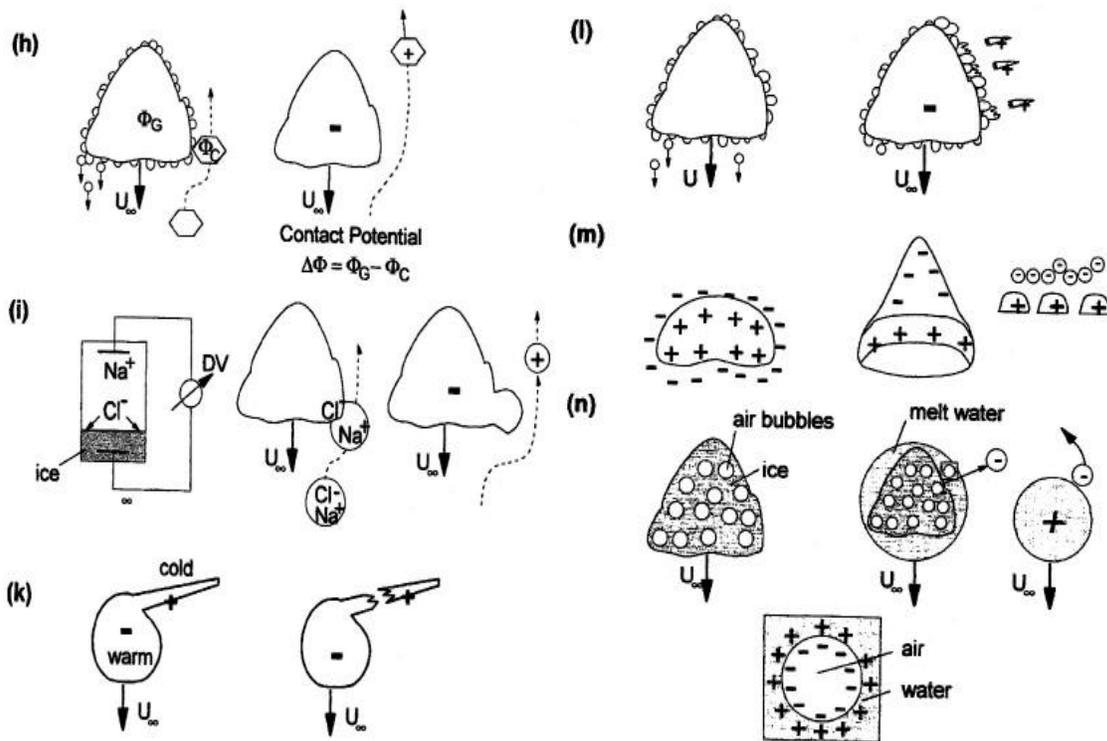
### 1.2.3. Неиндукционные механизмы заряжения облачных гидрометеоров

Неиндуктивный механизм, частично основанный на понятии упругого столкновения различных гидрометеоров в облаке без вмешательства какого-либо внешнего электрического поля, был хорошо сформирован и подтвержден различными экспериментами, проведенными в работе S. E. Reynolds, M. Brook и Mary Foulks Gourley, ("Thunderstorm Charge Separation", J. Meteorology, 14. 426-436, 1957). Также, эти механизмы описывают процесса заряжения частиц, когда разрушаются существующие между ними контакты, или когда возникает фазовый переход. Как правило, это считается и принимается большинством исследователей как наиболее целесообразный механизм для объяснения возникновения и разделения заряда в самой начальной стадии электрификации в грозового облака. Для этого не требуется существующее поле.

Столкновение, здесь более сосредоточено в основном на взаимодействии между твердыми частицами, как столкновении крупинки со льдом в присутствии переохлажденных капель воды или подобное. В зависимости от температуры окружающей среды происходит разделение заряда, при котором крупинка окажется отрицательным или положительным зарядом, а кристаллик льда — с противоположной полярностью. При температурах ниже  $-20$  —  $-15^{\circ}\text{C}$  кристалл льда имеет положительный заряд, а крупинка — отрицательный. Разные размеры и скорости падения этих двух типов частиц способствуют им разделяться после столкновения. Отрицательно заряженная крупа обладает тенденцией накапливаться в середине облака, а кристалл льда поднимается к более высоким частям облака. При температурах выше  $-15^{\circ}\text{C}$  полярности меняются на противоположную.

Также существует концепция так называемого квази-жидкого слоя, основанная на формулировках Майкла Фарадея, которая объясняет роль и вклад кристаллов льда в формирование микро- и макро-электрической, так и физической

структуры кучево-дождевых облаков. Граница между льдом и воздухом, где происходит сублимация или конденсация, не всегда является простой границей, и вблизи точки плавления эта поверхность претерпевает переход «поверхностного плавления», образуя жидко-подобный слой. Толщина слоя невелика при более низких температурах, всего несколько молекулярных слоев при  $-10^{\circ}\text{C}$ , и становится толще при более высоких температурах. Толщина слоя очень быстро растет вблизи температуры плавления, пока не охватит все твердое тело в точке плавления. Согласно формулировкам Фарадея, ионизация внутри этого слоя способствует переходу или обмену заряда при столкновениях с другими частицами.



Рисинок 1.2.3. – Схематическое изображение основных неиндукционных механизмов зарядки в облаках, как описанных в работах Прупахера и Клетта: (рис.1.2.2. (g)) термоэлектрический эффект, (h) эффект контактного потенциала, (i) эффект Уоркмана Рейнольдса, (k) расщепление при замерзании отдельной частицы капли, (l) расщепление при замораживании (иней), (m) распад капли, (n) таяние частицы льда.

### 1.2.3.1. Заряжание механизмом термоэлектрического эффекта

Когда этот механизм действует, мы стремимся ответить на вопросы о носителях заряда, источнике электродвижущей силы и других жизненно важных факторах, которые могут обеспечить эффективную передачу заряда (Бакер и Дэш), поскольку мы предполагаем, что имеем дело с электрически нейтральными частицами. Различные объяснения этих вопросов должны прежде всего анализировать ионизирующие свойства молекул воды и температурные градиенты вовлеченных частиц, и Сондерс резюмировал этот механизм следующим образом:

- 1) когда падающая крупа сталкивается с кристаллом льда, причём, крупа, по-видимому, оказывается теплее кристалла, происходит перенос заряда.
- 2) это обусловлено температурным градиентом между этими двумя частицами и феноменальным квази-жидким слоем.
- 3) ионы водорода ( $H^+$ ) или гидроксония ( $H_3O^+$ ) убегают к более холодному кристаллу льда, тогда и крупа приобретает отрицательные ионы гидроксида ( $HO^-$ ).
- 4) более лёгкий и холодный положительно заряженный кристалл льда поднимается вверх, а крупинка, более плотная остается подвешенной или падает к нижним слоям, чтобы обеспечить разделение зарядов.

Величина переносимой плотности поверхностного заряда является функцией от температуры и времени взаимодействия. Мейсон и Латам объясняют, что более короткое время контакта приводит к меньшей плотности, поскольку времени для перезарядки недостаточно, так и более длительное время контакта имеет тенденцию сводить к нулю температурный градиент, что приводит к аналогичному эффекту. Поддержанный различными приближениями, перенос заряда при столкновении мельчайшего кристалла льда с более низкой температурой и

радиусом  $(T_i, r_i)$  с более крупной более теплой крупой температуры  $(T_g)$  определяется следующим образом:

$$\Delta Q = 3 \times 10^{-3} \cdot (T_g - T_i) \times \text{contact area}$$

Для ледяного кристалла радиус  $10 \mu\text{m}$ ,  $\text{contact area} \approx 0.1\pi r_i^2$ ,

и  $\Delta Q_{max}$ , для  $\Delta T \approx 5 \text{ }^\circ\text{C}$  во время связи  $t_c \approx 10^{-2}$  сек.

### 1.2.3.2. Заряжание механизмом замораживания инея (римминг)

Значительный электрический заряд может быть отложен на замораживающий иней при столкновении с кристаллом льда в облаке в присутствии переохлажденного водяного пара. Величина и знак электрификации зависят от температуры и содержания воды в облаках. Столкновение крупы и кристаллов льда при температуре ниже  $-20^\circ\text{C}$  приводит к передаче отрицательного заряда крупе, которая падает в нижние области облака. Более легкие, положительно заряженные кристаллы льда остаются в верхних слоях облака. В более теплых условиях (средняя высота облаков) столкновение крупы и кристаллов льда приводит к передаче положительного заряда крупе, которая в конечном итоге падает на более низкие уровни в облаке.

Отрицательно заряженные кристаллы льда остаются на средней высоте облака, усиливая общий отрицательный заряд облака в этой области. Нижняя часть облака населена как положительно, так и отрицательно заряженной крупой, что объясняет триполярный узор, наблюдаемый во многих наэлектризованных облаках. Величина переноса заряда уменьшается в средах с более высокой влажностью. Это объясняет, почему более насыщенные влагой океанические облака производят

меньше ударов молнии. Рассматривается многими исследователями как основной механизм зарядки.

Этот механизм имеет похожее физическое описание так и термоэлектрического эффекта, но толкуют с различных точек зрения. Рейнольдс *и др.* толковали с точки зрения различий в потенциале электрической поверхности между сталкивающимися частицами. Их толкование было основано на то, что поверхность льда приобретает положительный заряд во время диффузионного роста и отрицательный заряд во время испарения, за исключением температур от -3 до 0°C. Обнаружены заряды противоположного знака для конденсирующихся и испаряющихся поверхностей жидкой воды. Конечно, теория многообещающая как она обещает заряд, переносимый при столкновении кристалла с крупой в порядке  $10^{-14}$ , но не всеобъемлющая, потому что она не качественно и количественно описывает характеристики поведения заряжения.

### **1.3. ПРОЦЕСС ЭЛЕКТРИЗАЦИИ ГИДРОМЕТЕОРОВ В РЕЗУЛЬТАТЕ СТОЛКНОВЕНИЯ С ПЕРЕОХЛАЖДЕННЫМИ ОБЛАЧНЫМИ КАПЛЯМИ**

Многие исследователи сосредоточили свои исследования в основном на том, как инициируется разделение зарядов на более ранней стадии, предшествующей инициированию первого удара молнии. Механизм, столкновение ледяной крупы, рассматривается в основном в верхних областях, которые приводят к образованию двух основных эффективных верхних полюсов заряда большей величиной. И очевидно, что большинство вышеописанных теорий не поддерживают эффективное разделение зарядов на протяжении жизни грозы, особенно на стадиях рассеяния, и это может быть истолковано нашей неспособностью построить сложную модель,

которая проецировала бы правильные атмосферные условия, влияющие на полный жизненный цикл грозы.

Осадки, наличие которых опираются различные гипотезы, возникают в самом начале перехода в стадию рассеивания грозового облака. Кроме того, из различных наблюдений мы можем подтвердить, что образование кристаллов в облаке является функцией других параметров (относительная скорость, относительная влажность, температура и т. д.), которые, в свою очередь, зависят от других факторов и резко колеблются во времени и пространстве. По мере увеличения количества осадков восходящий поток уменьшается, поэтому уменьшается скорость кристаллизации в самых верхних слоях, и, следовательно, скорость, с которой положительные заряды переносятся вверх, уменьшается несмотря на то, что грозовая активность продолжается. Так возникает необходимость теоретизировать и смоделировать механизм, восполняющий заряды величиной  $\geq 20$  кулонов, уносимых через каждый молниевый удар, и поддерживать или регенерировать другие зарядовые ядра такой большой величины, которые могли бы субсидировать грозовую деятельность с подходящей средой для нейтрализации зарядов.

Было обнаружено, что вода в переохлажденной жидкой форме находится в запасе, пусть и не в большом количестве, практически при любом слое кучево-дождевого облака, вплоть до температуры вблизи  $-40$  °C. Это было подтверждено различными наблюдениями переохлажденных капель при температурах до  $-35$  °C (Германия, Weickmann, 1949 г.),  $-36$  °C (Россия, Боровиков *и др.*, 1963),  $-40,7$  °C (в волновых облаках над Скалистыми горами, Heumsfield, Miloshevich, 1993). И есть случаи, когда капли регистрируются внутри перистых облаков при  $-38$  °C. Установлено, что в верхней части конвективных облаков часто наблюдается переохлажденная жидкая вода глубиной около 30 м с температурой  $-31$  °C: а при  $-20$  °C конвективные облака содержат около 10% переохлажденных капель.

Мы знаем, что отложение в значительной степени способствует скорости кристаллизации, но намерзание капли на кристалл (иней или изморози) впоследствии не меньше, и благодаря этому механизму материализуется разделение зарядов внутри облаков. Известно было, что крупа, образующаяся при замораживании (римминге), имеет различную плотность в зависимости от стадии ее роста: белая, непрозрачная и рыхлая крупа имеет массовую плотность  $\leq 0,8$  г/см<sup>3</sup>; полупрозрачные имеют насыпную плотность между 0,8–0,99 г/см<sup>3</sup> (Лист, 1958; 1965). Концентрация переохлажденных капель, особенно мельчайших капель, относительно выше, чем у других гидрометеоров. Хотя они имеют сравнительно более высокую массовую плотность, чем крупа, их мелкая природа заставляет их достигать более высокой подъемной скорости.

Вышеприведенные выдержки сводятся к поддержке цели, которая обрисовывает в общих чертах эту исследовательскую модель. Теперь, раз известно, что переохлажденная капля воды, которая является основным параметром исследования, действительно существует в более широком спектре, мы можем перейти к исследованию ее вклада во при зарядании и разделения заряда в кучево-дождевом облаке.

Для решения поставленных задач будем придерживаться основных предположений, изложенных в механизме разбрызгивания переохлажденных капель на крупных твердых облачных частицах. Из ряда экспериментов было выяснилось, что столкновение или разбрызгивание и частичное намерзание переохлажденного капля на крупной ледяной частице, приводят к разделению зарядов.

Как мы знаем, капля воды из-за своей физической структуры вряд ли будет иметь упругое столкновение с какой-то другой твердой частицей без разбрызгивания или намокания на частицу. Когда сталкиваются капли и крупа, возникает слияние капля с крупой, т.е. коагуляция, или непринужденно приводит к

разделению возникшего контакта. По данным, предложенным различными авторами, которые дали огромный вклад в это исследование, разделение зарядов осуществляется за счет кристаллизации воды на поверхности крупы или льда и за счет дробления капель или разрушения контакта.

При столкновении двух частиц — крупная крупа радиусом  $r_1$ , плотностью  $\rho_1$ , и скоростью падения  $v_1$ , с переохлажденным каплем радиусом  $r_2$ , плотностью  $\rho_2$ , и скоростью падения  $v_2$  при условии того, что  $r_1 \gg r_2$ ,  $v_1 \gg v_2$ , тогда заряд, разделившегося на каждую из частиц, при разрушении контакта описывается:

$$|\Delta Q_{\text{раз-к}}| = k \cdot d^{1,7}$$

где:  $d = 2 \cdot r_2$  — Диаметр капли

$$k = 5 \times 10^{-9} \text{ Кл/м}^{1,7}$$

Отсюда понимаем, что приобретаемый заряд имеет прямую пропорциональность с размером капли. Из ряда экспериментов было выяснилось, что крупа приобретает положительный заряд, а капля переохлажденной воды — отрицательный. Крупа в свою очередь подает вниз, а капля останется внутри облака с приобретенным зарядом.

Шевчук и Ирибарне в своем эксперименте обнаружили что полярность и величина приобретаемого заряда зависят так и от химических составов капли. Присутствие сульфата аммония ведет себя как чистая вода по полярности, но отличается по величине, а хлорид натрия приводит к приобретению противоположного знака заряда частиц, так и немного по величине.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ПОСТАНОВКИ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ ГИДРОМЕТЕОРОВ В РЕЗУЛЬТАТЕ СТОЛКНОВЕНИЯ С ПЕРЕОХЛАЖДЕННЫМИ ОБЛАЧНЫМИ КАПЛЯМИ.

### 2.1. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ПОСТАНОВКИ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Основание нашего исследования аналогично эксперименту, как проведенному в работе Шевчука и Ирибарне (*Electrification associated with droplet accretion on ice, 1973*). Как описано в работе была использована лабораторная установка на основе исследования разделения зарядов, связанного с аккрецией переохлажденных капель воды на поверхности кристалла льда или граупеля. Капли диаметром от 40 до 120 мкм ускорялись в небольшой аэродинамической трубе и накапливались на ледяной мишени, подключенной к электрометру, который измерял эффект зарядка. Эксперименты повторно проводились при температурах окружающей среды от  $-6$  до  $-14^{\circ}\text{C}$  и скоростях удара от 1 до  $30 \text{ м/с}^{-1}$ , как в отсутствие внешнего поля, так и под влиянием полями до  $250 \text{ кВ/м}$ .

В результате эксперимента была выявлена четкая зависимость заряжения от скорости столкновения, температуры и размера переохлажденных капель. Также было отмечено, что отрыв капель от кристалла и электризация наблюдаются, если скорость столкновения превосходит некоторое пороговое значение ( $V_{\text{пор}}$ ), которое имеет обратную пропорциональность с диаметром частиц.

Была установлена связь между зарядом  $(\Delta q_{\text{в-л}})_p$ , полученным каждой из взаимодействующих частиц от диаметра капель  $d$  и относительной скорости столкновения  $V_{\text{от}}$ .

$$|\Delta q_{в-л}|_p = 5 \times 10^{-9} \cdot d^{1,7} = [\text{Кл}]$$

где:  $d$  – диаметр капли

При чем, скорость зарядки за единицу времени является функцией от размеров частиц, относительной скорости, численной концентрации, эффективности столкновения.

Знак заряда, приобретаемого ледяной мишенью (кристаллом или крупой), зависит от химических составов (наличия примесей) капли. В результате разбрызгивания переохлажденных капель чистой воды ледяная мишень, т.е. кристалл или крупа заряжается положительно. Присутствие сульфата аммония в капле вело себя как чистая вода по полярности, но отличилось по величине, а присутствие хлорида натрия приводило к приобретению противоположного знака заряда частиц в отличии от капли чистой воды, так и немного по величине.

## **2.2. ОБЩИЕ ФОРМИРОВКИ И ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ ОБЛАКА**

### **2.2.1. Формулировка модели**

Среди основных черт моделирования облака заключается наша способность, с помощью доступных данных, иметь четкое представление как о внешних, так и о внутренних процессах, что обеспечивает нам открытую наглядную картину о присущих изменениях, при помощи которых сможем придавать наше мнение о возможных будущих изменениях. Аэрологическая диаграмма – наиболее

ориентировочная и существенная двумерная модель, имеющая описывать не только характер атмосфера, но и само кучево-дождевое облако. Она нам представляет вертикальные профили свойств поднимающейся воздушной массы.

Для ее рассмотрения мы полагаемся на данные по аэрологическим зондирования с помощью радиозонда. Полученные данные были осредненные по высоте на стометровых слоях. Построив вертикальные профили температур атмосферы и облачного ядра, мы получили исходные данные для вычислений микроструктуры облака и последующего процесса электризации этих структур.

Все вычислительные и аналитические процессы протекли, с помощью программных пакет Python и Excel, по следующей порядке:

- ✓ интерполяция по высоте данных о радиозондирования - температура и давление;
- ✓ расчет свойств воздушных масс - температура, влажность, плотность;
- ✓ построение вертикальной профиль температур воздушных масс - кривые стратификации и состояния;
- ✓ расчет свойств размера и вертикальных движений воздушных масс и частиц;
- ✓ расчет свойств содержащей влаги воздушных масс и частиц в облаке;
- ✓ расчет концентрации гидрометеоров в облаке;
- ✓ расчет свойств заряда частицы в облаке;
- ✓ расчет скорости заряжения частиц в облаке;
- ✓ расчет скорости переноса зарядов частицами в облаке;
- ✓ расчет плотности зарядов и напряжении.

В качестве исходных данных были взяты данные радиозонда на станции 03354 Ноттингем, наблюдения за 12 часов в 17 июня 2020 года и нашему интересу к таким данным обусловлен тот факт о том что по архиву данным метеорологическое управление выпустило желтое предупреждение о непогоде в

связи с грозами по этой территории за этот день. За тот же день выпали сильные ливневые осадки выше 20 мм по местам, приводившие к затоплению некоторых районов.

### 2.2.2. Начальные и граничные условия

В качестве начальных условий входят наши исходные данные. Полученные данные о температуре воздуха и точке росы, атмосферном давлении, относительной влажности и скорости ветра были интерполированы, по ста метрам по высоте, и поправлены в соответствии с полученной моделью.

На уровне конденсации скорость и радиус восходящего потока воздушных масс приняли за константы и равняли  $\omega_0 = 5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$  и  $R_0 = 5 \text{ км}$ , соответственно. В таблицах 1. и 2., содержатся основные константы для расчетов в модели облака и свойства примеси в модели заряжения в облаке. Все расчеты характерны ограничены к размеру частиц, времени и уровню большего содержания переохлажденных облачных капель, т.е. анализы расчетов будут рассмотрены ниже уровня интенсивной кристаллизации.

Также мы будем рассматривать процесс электризации в двух разных средах: в одноячеечном тропическом кучево-дождевом облаке и в аналогичном облаке в средних широтах. В каждом случае будем параллельно рассматривать вклад переохлаждённых капель как чистую (дистиллированную) воду, так и как разбавленный раствор натрия хлора.

$g, m/s^2$	$R_c, J/kgK$	$\gamma_a, ^\circ C/m$	$E_o$	$a$	$b$	$C_p, J/kgK$	$R_n, J/kgK$
9,81	287,05	0,01	6,107 8	7,6 3	241, 9	1005	461,51

Таблица 1. – основные константы для расчетов в модели облака.

<i>nuclei</i>	$M,$ $g/mol$	$\rho_s,$ $g/cm^3$	$\rho_{раст},$ $g/cm^3$	$\rho_{разб(1\%)},$ $g/cm^3$	$S,$ $g/ml$	$c_p$	$r_{разб(1\%)},$ $мкм$
<i>NaCl</i>	58.44	2.17	1.21	1.007	0.357	0.22	50

Таблица 2. – Свойства выбранной примеси для модели заряжения в облаке.

### 2.2.3. Основные уравнения

A. *Свойства температуры*

---

$$t_z = t_{z-1} + \gamma \cdot \Delta z = [^{\circ}\text{C}]$$

$$\gamma = \gamma_i, \gamma_a, \gamma_w \dots$$

$$\gamma = -\frac{\Delta t}{\Delta z} = [^{\circ}\text{C}/\text{м}]$$

где:  $\Delta z$  – Разность высоты

$\gamma$  – Вертикальный градиент температуры

$\gamma_i$  – для для данного слоя интерполяции

$\gamma_a$  – сухоадиабатический

$\gamma_w$  – влажноадиабатический

$t_z$  – Температура на высоте  $z$

$t_{z-1}$  – Температура на предыдущей высоте

**В.            *Профиль давления***

---

$$P = P_o \cdot 10^{\left(\frac{-g \cdot \Delta z}{R_c \cdot T}\right)} = [hPa]$$

где:  $R_c$  – Удельная газовая постоянная

$g$  – Ускорение под силы тяжести

$T$  – Температура воздуха

$P$  – Давление на высоте  $z$

$P_o$  – Давление на станции

**С.            *Свойства влажности в атмосфере***

---

$$E = E_o \cdot 10^{\left(\frac{7,63 \cdot t}{241,9+t}\right)} = [hPa]$$

где:  $t$  – температура на высоте  $z$

$E$  – Давление (упругость) насыщения при температуре  $t$

$E_o$  – упругость насыщения при  $t = 0$  °С

$$e = E \cdot f / 100 = [hPa]$$

где:  $e$  – Парциальное давление (упругость водяного пара) воздуха

$f$  – Относительная влажность

D. *Свойства поднимающегося объема воздушных масс*

---

$$S_m = 0,622 \cdot \frac{E}{P} = \left[ \frac{\Gamma}{\Gamma} \right]$$

$$S_f = 0,622 \cdot \frac{e}{P} = \left[ \frac{\Gamma}{\Gamma} \right]$$

$$RH = 100 \cdot \frac{S_f}{S_m} = 100 \cdot \frac{e}{E} = [\%]$$

$$\rho = \frac{P}{R_c \cdot T} = \left[ \frac{\Gamma}{\text{см}^3} \right]$$

$$\rho_w = \frac{P}{R_c \cdot T} + \frac{e}{R_w \cdot T} = \left[ \frac{\Gamma}{\text{см}^3} \right]$$

$$L = 1000 \cdot (2500,8 - 2.372 \cdot t) = \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right]$$

$$\delta_{ad} = \rho_w \cdot (S_{cond} - S_{m_z}) = \left[ \frac{\Gamma}{\text{м}^3} \right]$$

где:  $t$  – температура на высоте  $z$

$S_m$	Удельная влажность
$S_f$	Фактическая удельная влажность
$S_{cond}$	Удельная влажность на уровне конденсации
$S_{m_z}$	Удельная влажность на высоте $z$
$S_f$	Удельная влажность
$\rho_w$	Плотность влажного воздуха (облака)
$\rho$	Плотность сухого воздуха (атмосферы)
$\delta_{ad}$	Адиабатическая водность в облаке
$RH$	– Относительная влажности
$L$	– Скрытая теплота парообразования

Е. *Характер скорости восходящего потока в облаке*

---

При  $z_{cond} \leq z \leq z_{max} \rightarrow$

$$W_z = W_{max} + (W_0 - W_{max}) \cdot \left( \frac{z_{max} - z}{z_{max} - z_{cond}} \right) = \left[ \frac{m}{s} \right]$$

При  $z_{max} \leq z \leq z_{inv} \rightarrow$

---

$$W_z = W_{max} \cdot \left(1 - \frac{z - z_{max}}{z_{inv} - z_{max}}\right) = \left[\frac{m}{s}\right]$$

На  $z_{max} \rightarrow$

$$W_{max} = 2,5 \cdot \Delta Z_{conv} - 3,2 = \left[\frac{m}{s}\right]$$

$$z_{max} = \frac{2}{3} \cdot \Delta Z_{conv}$$

$$\Delta Z_{conv} = z_{inv} - z_{cond} = [km]$$

- где:
- $W_z$  – Скорость восходящего потока на высоте  $z$  в облаке
  - $W_0$  – Скорость восходящего потока на уровне конденсации
  - $W_{max}$  – Максимальная скорость восходящего потока в облаке
  - $z$  – Данная высота в облаке
  - $z_{cond}$  – Высота уровня конденсации
  - $z_{max}$  – Высота максимальной скорости восходящего потока в облаке
  - $z_{inv}$  – Высота восходящего потока на уровне конвекции
  - $\Delta Z_{conv}$  – Вертикальная мощность конвекции

Ф.

### *Структура облака*

---

$$\frac{2}{R_o} \cdot \frac{dR_o}{dz} = \frac{c}{R_o} \cdot \frac{T'}{T} - \frac{1}{W} \cdot \frac{dW}{dz} + \frac{1}{T'} \cdot \frac{dT'}{dz} + \frac{M \cdot g}{k \cdot N_a \cdot T}$$

- $R_o$  – Радиус облака, [м]
- $T'$  – Температура в облаке (поднимающихся воздушных масс), [K]
- $T$  – Температура в атмосфере, [K]
- $c$  – Характерная постоянная для вовлечения, равная = 0,2
- $k$  – Постоянная Больцмана, равная =  $1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$
- $W$  – Скорость восходящего потока в  $\left[ \frac{\text{м}}{\text{с}} \right]$
- $M$  – Молярная масса воздуха, равная =  $0,0289 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$
- $g$  – Ускорение силы тяжести, равное  $9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$
- $N_a$  – Постоянная Авогадро, равная  $6,02 \cdot 10^{23} \frac{\text{частиц}}{\text{моль}}$

G.

*Свойства облачных гидрометеоров*

---

$$\delta_{ж} = A \cdot \delta_{ад} = \left[ \frac{\Gamma}{M^3} \right]$$

$$\delta_{ж,у} = 0,08 \cdot \delta_{ад} = \left[ \frac{\Gamma}{M^3} \right]$$

$$\delta_{ж,т} = 0,15 \cdot \delta_{ад} = \left[ \frac{\Gamma}{M^3} \right]$$

$$A = 10^{-5} \cdot (T - 240) \cdot [-1,45 \cdot (T - 251) \cdot (T - 254,5) \cdot (T - 258) + 10,71 \cdot (T - 246,5) \cdot (T - 254,5) \cdot (T - 258) - 61,92 \cdot (T - 246,5) \cdot (T - 251) \cdot (T - 258) + 19,71 \cdot (T - 246,5) \cdot (T - 251) \cdot (T - 254,5)]$$

$$T \geq 258K \quad \rightarrow \quad A = 1$$

$$T \leq 240K \quad \rightarrow \quad A = 0$$

где:  $\delta_{ад}$  – Адиабатическая водность в облаке

$\delta_{ж}$  Жидко-капельная водность в облаке

$\delta_{ж,у}$  Водность для выбранного капля в облаке умеренной широты

$\delta_{ж,т}$  Водность для выбранного капля в облаке тропической широты

$T$  – температура в облаке для данного уровня

$A$  – Множительная функция, зависящая от температуры в облаке

$$V_g = \sqrt{\frac{8 \cdot \rho_g \cdot R_g}{3 \cdot c_x \cdot \rho_w}} = \sqrt{\frac{20 \cdot \rho_g \cdot R_g}{3 \cdot \rho_w}} = \left[ \frac{\text{м}}{\text{с}} \right]$$

$$v_d = (-0,193 + 4,96 \cdot d - 0,904 \cdot d^2 + 0,0566 \cdot d^3) \cdot \exp\left(\frac{z}{20}\right)$$

где:  $V_g$  – Скорость падения облачного крупы

$v_d$  – Скорость падения облачного капля в м/с

$\rho_g$  – Плотность крупы

$R_g$  – Радиус крупы

$c_x$  – Постоянная равная 0,4

$\rho_w$  – Плотность воздуха в облаке

$d$  – Диаметр облачного капли, мм

$z$  – Данная высота

$$N_g = 1 \text{ м}^{-3}$$

$$n_d = \frac{\delta_{ж\_d}}{V_d \rho_d} = \frac{3 \cdot \delta_{ж\_d}}{4 \cdot \pi \cdot r^3 \cdot \rho_d}$$

где:  $N_g$  – Концентрация крупы, принятая неизменной в нашем случае

$n_d$  – Концентрация капли в  $\text{м}^{-3}$

$V_d$  – Объем капли

$\delta_{ж\_d}$  – Водность капли

$\rho_d$  – Плотность капли

$r_d$  – Радиус капли в метре

### **2.3. ПРОЦЕССЫ ГЕНЕРАЦИИ И РАЗДЕЛЕНИЯ ЗАРЯДОВ ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ КРУПИНКИ И ПЕРЕОХЛАЖДЕННОГО КАПЛЯ**

Для двух взаимодействующих гидрометеоров – крупная крупа и переохлажденная капля, обладающих разными скоростью падения и температурой под

условием того, что капля разбрызгивается на поверхность крупы при столкновении и частично замерзает то возникает разделение зарядов. Величина разделяющегося заряда описывается:

$$|\Delta q| = \alpha \cdot d^{1,7}$$

где:  $\alpha$  –  $5 \cdot 10^{-9}$  Кл/м<sup>1,7</sup>

$d$  – Диаметр облачного капли в м

Коэффициент,  $\alpha$  характеризует относительную разницу температуры и других факторов между частицами. При событии того, что разрушается контакт после столкновения то капля и крупа получают  $|\Delta q|$ , равный по величине, но противоположным знаком.

Скорость заряджения одной крупы при столкновении с каплей, отличающейся по размеру и скорости падения, в единице объема за единицу времени можно описывать уравнением:

$$\frac{dQ}{dt} = \pi \cdot (R_g + r_d)^2 \cdot (V_g - v_d) \cdot P_{ст} \cdot P_{отск} \cdot n_d \cdot N_g \cdot \Delta q$$

где:  $V_g$  – Скорость падения облачного града

$v_d$  – Скорость падения облачной капли в м/с

$\rho_g$  – Плотность крупы

$R_g$  – Радиус крупы

$\rho_w$  – Плотность воздуха в облаке

$d$  – Диаметр облачного капли, мм

$N_g$  – Концентрация крупы, принятая неизменной в нашем случае

$n_d$  – Концентрация капли в  $\text{м}^{-3}$

$r_d$  – Радиус капли в метре

$P_{\text{ст}}, P_{\text{от}}$  – Вероятность столкновения и отскока: мы их приняли за 100 % и 5%, соответственно.

В объеме облачного слоя содержащей известное количество града заряд который приобретают все эти грады за единицу времени будет:

$$Q_{\text{lay}} = \frac{dQ}{dt} \cdot N_g \cdot V_{\text{lay}}$$

где:  $V_{\text{lay}}$  – Объем слоя облака

$N_g$  – Концентрация града

Поскольку крупа выросла, ее размер по сравнению с каплей существен, и приобрела скорости падения, превышающей величину восходящего потока, она продолжит падать через объемы нижних слоев, пока не покинула пределы облака и не выпала в виде осадки к земной поверхности. Перемещаясь через слои, крупа перенесет с собой заряды, которые она приобрела, причем она же продолжает

заряжаться, поскольку столкновение с другими переохлажденными каплями все равно будет происходить из одного в другой слой. Заряд, переносимый крупой за данное время за счет ее последующего падения через слои и параллельных столкновения и электризации можно выразить формулой:

$$Q_{z,t+1} = Q_{z,t} + \frac{dQ}{dt}_z \cdot V_z \cdot dt + \left( \rho_{\sigma_{z+1,t}} \cdot R_{o_{z+1}}^2 \cdot (V_g - W)_{z+1} \cdot dt \right) - \left( \rho_{\sigma_{z,t}} \cdot R_{o_z}^2 \cdot (V_g - W)_z \cdot dt \right)$$

$$\rho_{\sigma_{lay}} = \frac{Q_{lay}}{V_{lay}} = \left( \frac{dQ}{dt} \cdot N_g \right)_{lay}$$

$$N_g = 1 \text{ м}^{-3} \quad \therefore \quad \rho_{\sigma_{lay}} = \frac{dQ}{dt}_{lay}$$

$$Q_{z,t+1} = Q_{z,t} + Q_{z,t} \cdot dt + \left( \frac{dQ}{dt}_{z+1,t} \cdot R_{o_{z+1}}^2 \cdot (V_g - W)_{z+1} \cdot dt \right) - \left( \frac{dQ}{dt}_{z,t} \cdot R_{o_z}^2 \cdot (V_g - W)_z \cdot dt \right)$$

где: Q – Общий заряд в объеме слоя

dt, t – Длительность и момент времени

$z, lay$	–	Данный слой
$z + 1$	–	вышележащий слой
$W$	–	Скорость восходящего потока облака в указанном слое, м/с
$V_g$	–	Скорость падения облачного града в указанном слое, м/с
$R_o$	–	Радиус слоя облака
$\rho_\sigma$	–	Плотность объемного заряда
$N_g$	–	Числовая концентрация града

#### 2.4. ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЗАЦИИ ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ С КАПЛЯМИ РАСТВОРОВ

Как работа положена мы рассмотрим переохлажденные капли как чистую (дистиллированную) воду, так и как разбавленный раствор натрия хлора. По отчетам, вложенным в работе Шевчука и Ирибарне вклад примеси в облачной капле существен на величину и знак заряд разделяющийся на град. Для рассмотрения эффекта примеси при генерации заряда мы положились на весьма разбавленный раствор 1% натрия хлора, концентрации и плотность которого приблизительно не отделимы от плотности чистой воды. Поэтому нам особенно важен его эффект на знак разделяющегося на град заряда.

При расчетах размер, числовая плотность и водность на переохлажденные капли дистиллированной воды так и капли разбавленного раствора натрия хлора приняли равными для данного облака.

### **3. АНАЛИЗЫ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА И ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.**

#### **3.1. АНАЛИЗ СВОЙСТВА ПАРАМЕТРОВ ОБЛАЧНОЙ МОДЕЛИ**

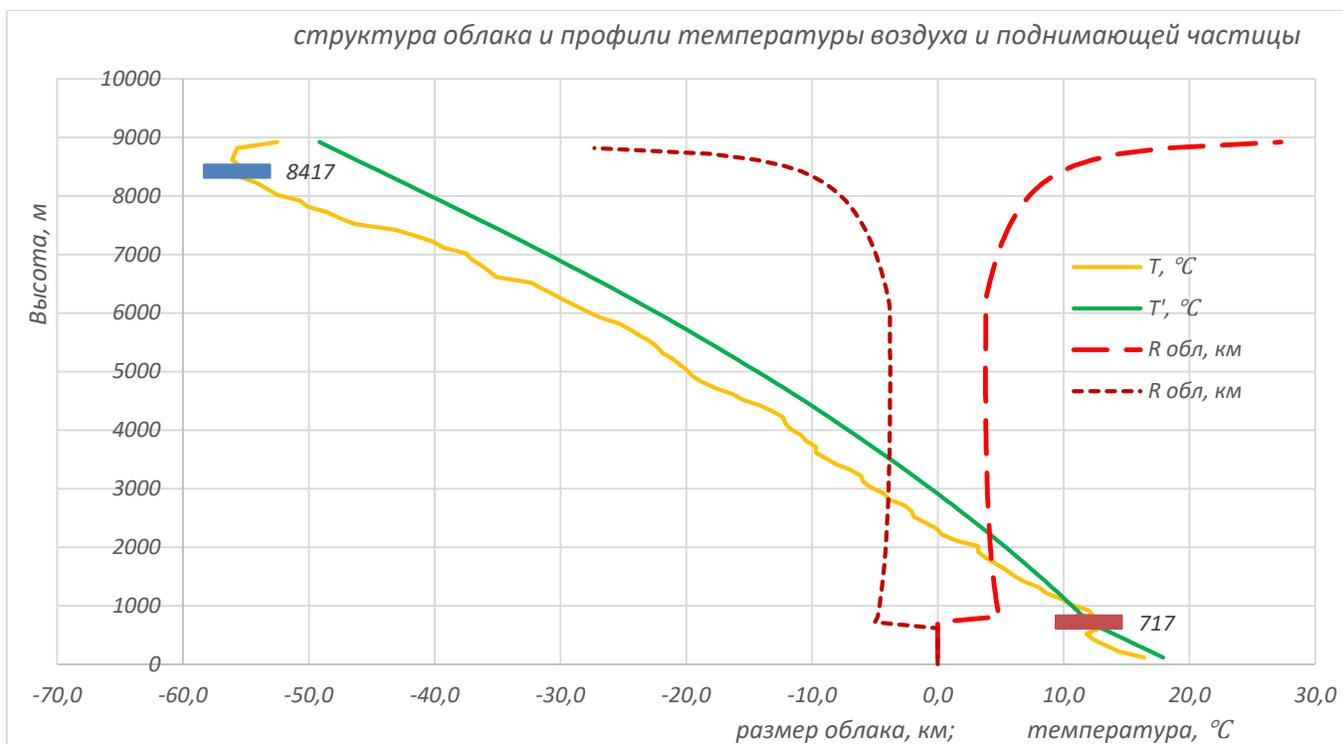


Рисунок 3.1.1. – Макроструктура модельного моно-ячеечного кучево-дождевого облака и вертикальные профили температур. Зеленый (кривая состояния), оранжевый (кривая стратификации) и красные пунктированные (диаметр облака).

Анализируя кривые на рисунке 3.1.1. мы понимаем, что все условия в атмосфере благополучно приспособлялись развитию конвекции. Замечаем неустойчивость через все слои атмосфере кроме маленького слоя несколько метров вблизи уровня конденсации. Уровень конденсации, с помощью которого определяется нижней границы облака, расположен на высоте 0,717 км с температурой 12 °C а высота верхней границы облака стремилась к 8,9 км на температуру около -49 °C. Мощность конвекции рассчитывалась на 8,2 км – это предполагается очень мощное кучево-дождевое облако.

Наше предположение подтверждается кривой размера облака. Облако имеет огромную форму по вертикали и горизонтали с диаметром около 10 км для нижних слоев, а на районе наковальни около 50 км.

### 3.2. АНАЛИЗ СВОЙСТВ ПАРАМЕТРОВ ОБЛАЧНЫХ ГИДРОМЕТЕОРОВ

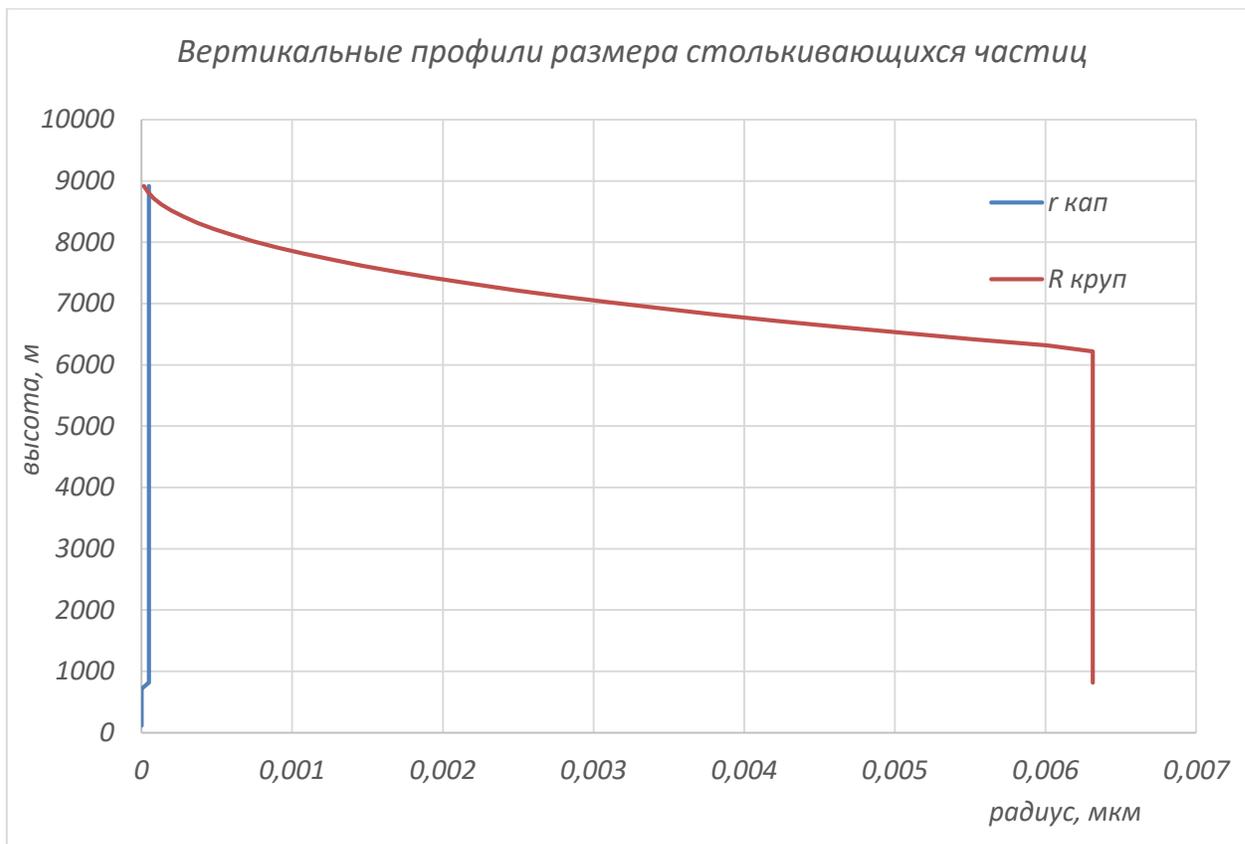


Рисунок 3.2.1. – Вертикальные профили размеров взаимодействующих частиц. Синий цвет для радиуса капли, красный – для града.

По данным о размерах интересующихся нам гидрометеоров видно, что частицы града имели практически постоянный радиус равный 6,313мм от слоя высотой 6217м к слою нижней границы облака. Слой высотой 6217м отмечен как слой интенсивного фазового перехода жидких частиц в твердые. Выше этот слоя

интенсивно уменьшается размер града, а размер нашей капельки как положено принятый за постоянную величину равную 50мкм.

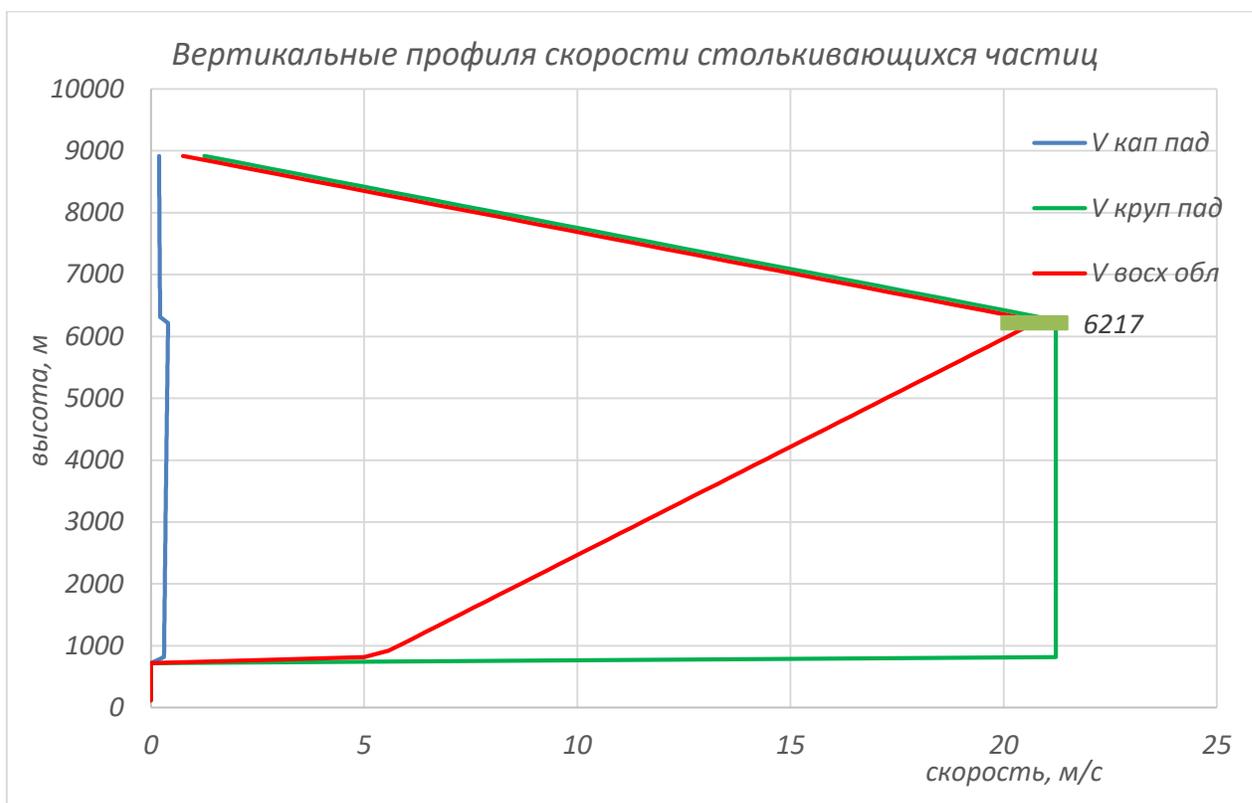


Рисунок 3.2.2. – Вертикальные профили скорости восходящего движения облака и взаимодействующих частиц. Зеленый (скорость падения града), синий (скорость падения капли) и красный (скорость восходящего потока в облаке).

На рисунке 3.2.2. поставлены кривые вертикального профиля скорости падения частиц и восходящего потока воздушных масс в облаке. Скорость восходящего потока в облаке увеличивается с высотой, достигает максимального значения на высоте 6217м, а затем понизится по таким же темпам к верхнему слоям облака. Это объясняется тем, что выше высоты 6217м увеличивается нисходящее движение частиц, которое приводит к убавлению скорости восходящего потока.

Скорость падения капли практически постоянна ниже уровня 6217м и составляет приблизительно 0,31 – 0,40 м/с. Скорость падения града выше уровня интенсивной фазового перехода (кристаллизации) уменьшается с высотой, а ниже она практически постоянна и составляет около 21м/с. Выше высоты 6217м скорость падения града и скорость восходящего потока облака приравняются, но ниже этот уровня скорость падения града намного больше скорости восходящего потока облака более заметно к дню облака.

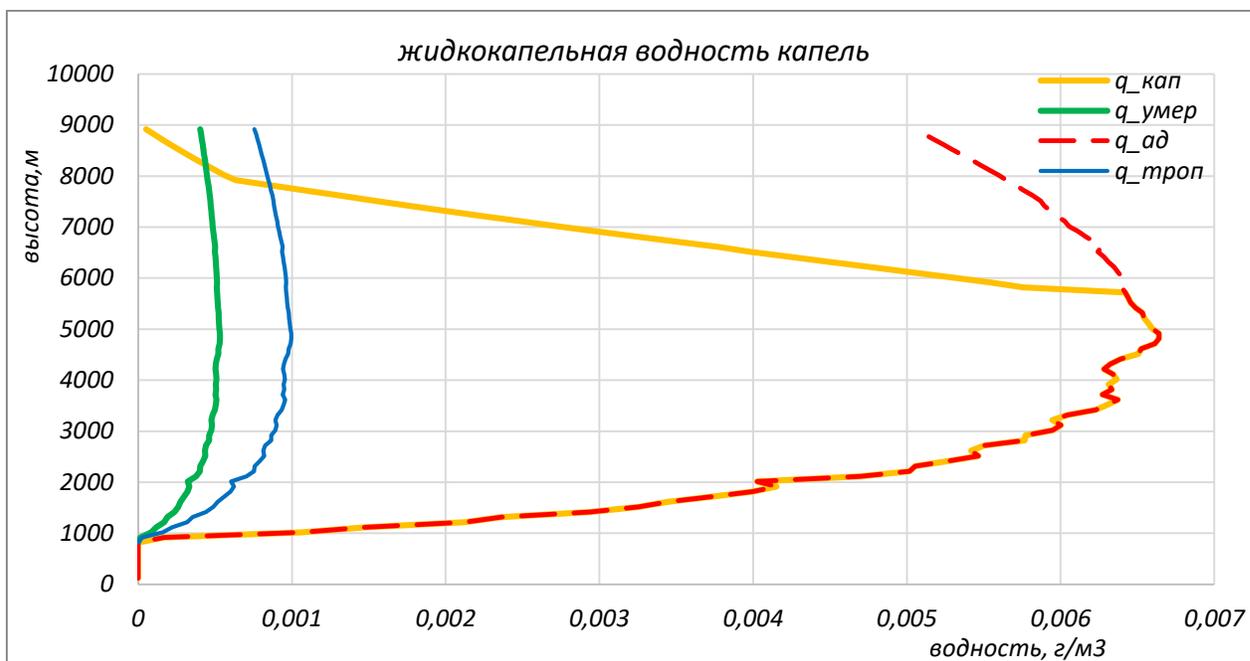


Рисунок 3.2.3. – Жидко-капельная водность на капли размера 100мкм в разных формах кучево-дождевого облака. Зеленый (водность на 50мкм капель в облаке умеренной широты), синий (водность на 50мкм-капельки в тропическом облаке), оранжевый (общая жидко-капельная водность) и красный пунктированный (адиабатическая водность).

Кривыми на рисунке 3.2.3. изображаются вертикальные профили влаги в облаке. Их анализ показывает, что водность в облаке с высотой увеличивается, после достижения своего максимального значения на какой-то высоте, она начинает

убивать. Из наших кривых видно, что для данной модели облака, пороговое значение водности осуществляется на слоях между 4000 и 6000 метров. Максимальная величина адиабатической водности равна  $0,006640 \text{ г/м}^3$  на высоте 4817 м, жидко-капельной водности имела такое же значение, как и для адиабатической водности на той же высоте. Они равны от нижней границы облака до высоты около 6000 м, а затем кривая жидко-капельной водности сильно изгибается от адиабатической, уменьшаясь.

Для наших двух сравнимых форм облака ход кривых имеет аналоговую форму, но сильно различен по величине. Максимальная величина водности на 50-мкм-капле тропического облака равна  $0,000996 \text{ г/м}^3$  а для облака умеренных широт —  $0,000531 \text{ г/м}^3$ : всё на той же высоте, как и адиабатической водности.

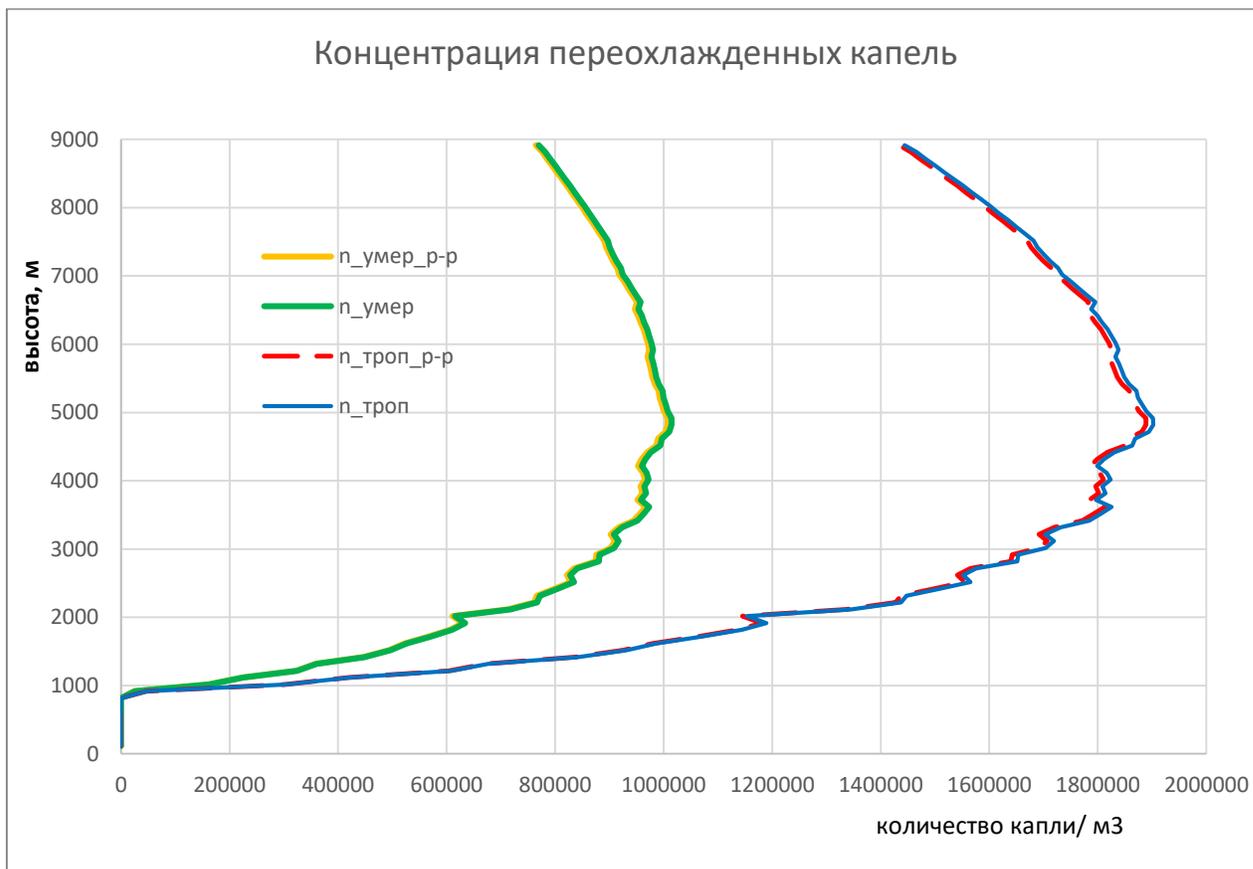


Рисунок 3.2.4. – Числовая концентрация облачного капля в разных формах кучево-дождевого облака для выбранного радиуса (50мкм). Зеленый (капель в облаке умеренной широты), синий (капельки в тропическом облаке), оранжевый (капель раствора в облаке умеренной широты) и красный пунктированный (капельки раствора в тропическом облаке).

Числовая плотность для четырёх характерно выбранных переохлажденных капелек воды такова: концентрация частиц с высотой увеличивается, изменение однозначно и параллельно кривой адиабатической влажности и достигают максимального значения на высоте 4817 м. Для капельки воды в тропическом облаке, дистиллированной — 1901923 капельки/м<sup>3</sup>, раствор натрия хлора — 1888702 капельки/м<sup>3</sup>. Для капельки воды в облаке умеренных широт: дистиллированной — 1014359 капель/м<sup>3</sup>, раствор натрия хлора — 1007308 капелек/м<sup>3</sup>.

### 3.3. АНАЛИЗ СВОЙСТВ ПРОЦЕССА ОРГАНИЗОВАННОЙ МИКРО-ЭЛЕКТРИЗАЦИИ ОБЛАЧНЫХ ГИДРОМЕТЕОРОВ

Величина разделяющегося заряда при разбрызгивании переохлажденной капли на поверхности града имеет тесную связь с размером капли. Маленькое значение связано со маленьким размером, а с большим размером разделяются большую величину. При разбрызгивании 50 мкм переохлажденной капельки на град разделяется  $|\Delta q| \cong 7,924 \cdot 10^{-16}$  Кл. Это значение соответствует с экспериментальным данным. Знак модули обусловлено тем, что каплей раствора 1% натрия хлора одинаковым размером разделится такой же заряд, но с отрицательным знаком.

#### 3.3.1. Скорость заряжения

Скорость заряжения града  $\frac{dQ}{dt}$  для наших данных — практически постоянные размеры и относительная скорость падения гидрометеоров на нижних слоях, прямо пропорциональна числовой концентрации переохлажденных облачных капель, которые в свою очередь являются функцией от жидко-капельной водности. Из рисунка 3.3.1. скорость заряжения града в единице объема за единицу времени увеличивается с высотой так как числовая концентрация переохлажденных облачных капель увеличивается с высотой. Этот черт характерен для всех четырех характеристик капли: чистой, растворенной, умеренной и тропической.

Высота максимального значения совпадает с высотой максимального значения водности и концентрации капель, которая равна 4817 м. Максимум  $\frac{dQ}{dt}$  для переохлажденной капли:

- дистиллированной воды тропического облака = 1,99867E-13
- дистиллированной воды облака умеренной широты = 1,06596E-13
- раствора натрия хлора тропического облака = -1,98478E-13
- растворенной воды в облаке умеренной широты = -1,05855E-13

Скорость заряжения града каплей чистой воды в тропическом облаке выше, чем скорость заряжения в облаке умеренной широты. Аналогичный тренд имеет и капля раствора 1 натрия хлора в них.

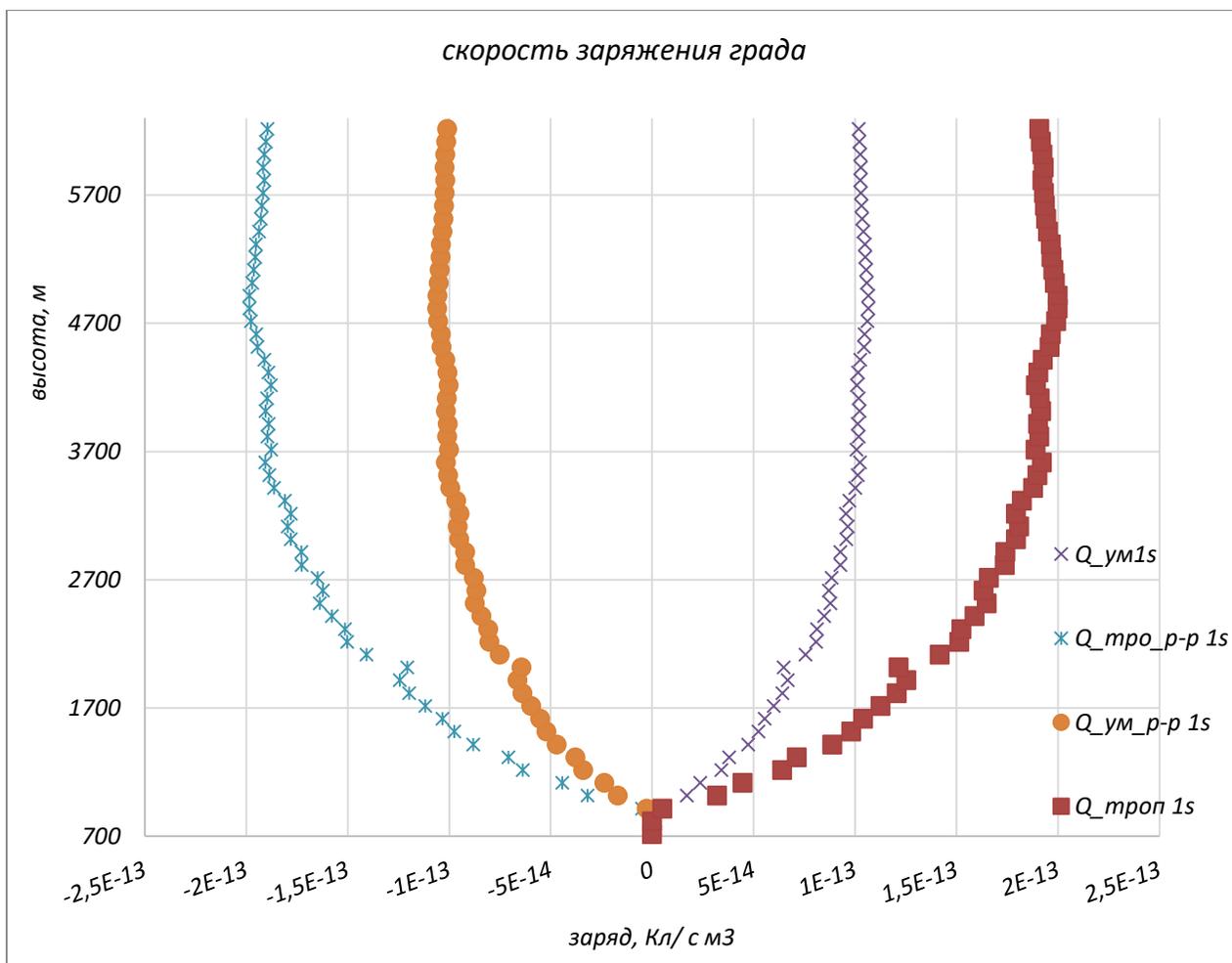
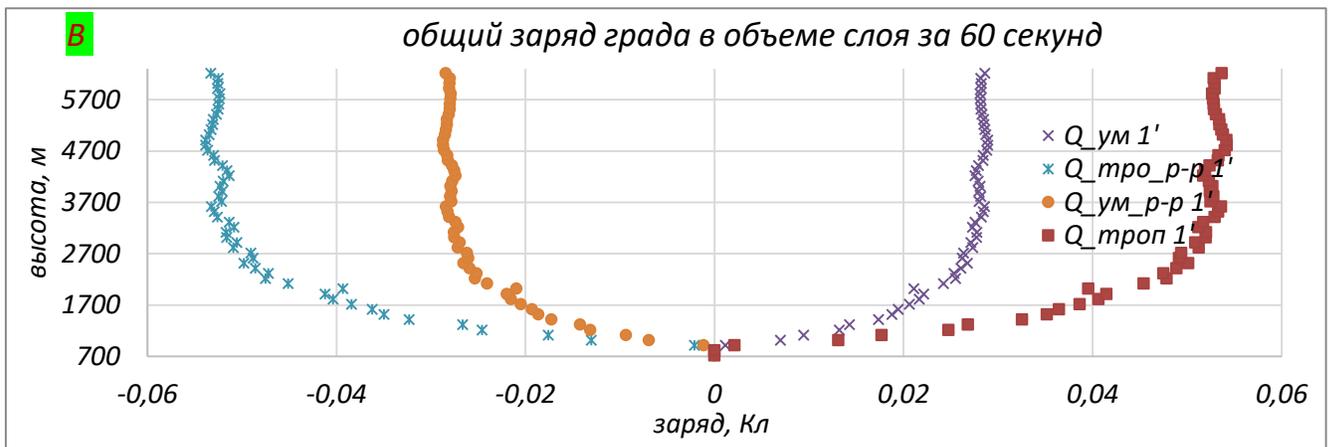
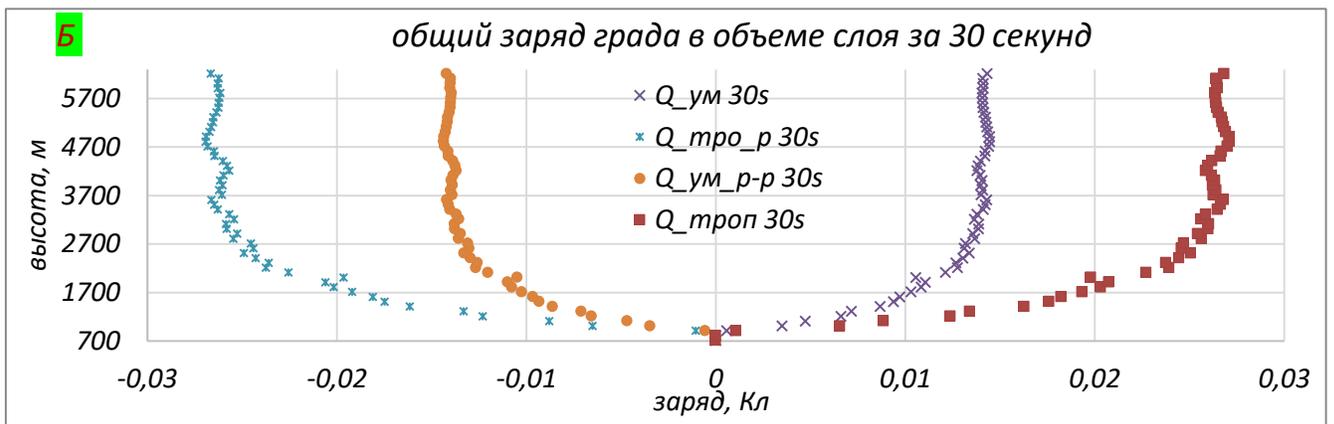
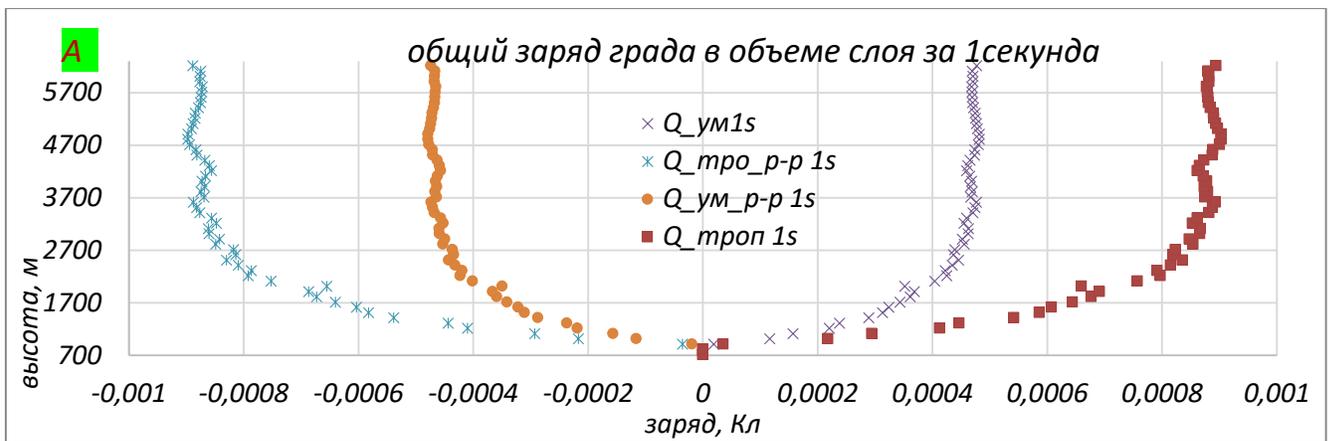


Рисунок 3.3.1. – Скорость заряжения града в единице объема за единицу времени

### 3.3.2. Зависимость величины общего заряда на град в объеме слоя от времени



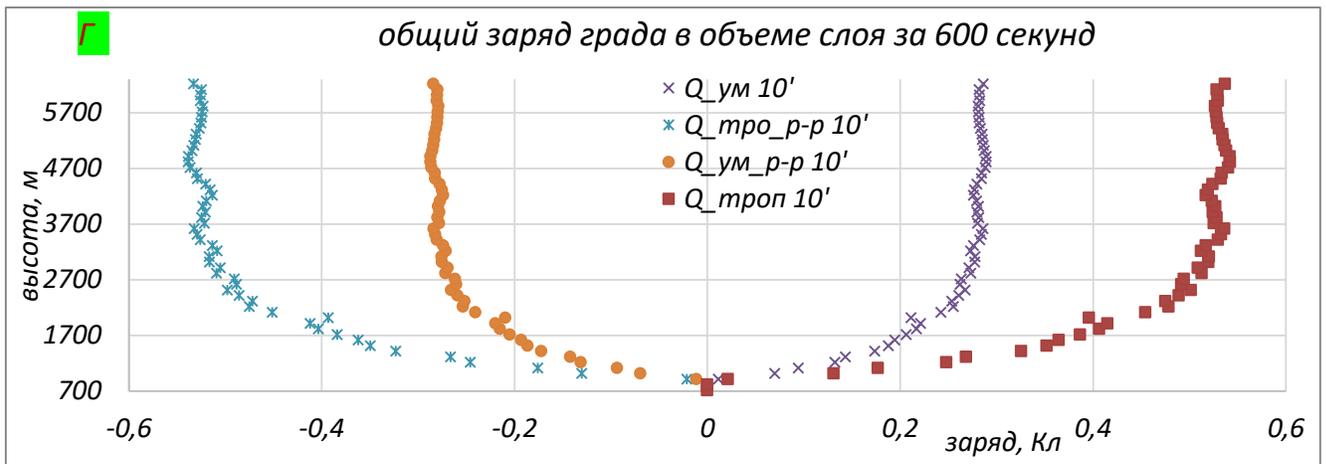
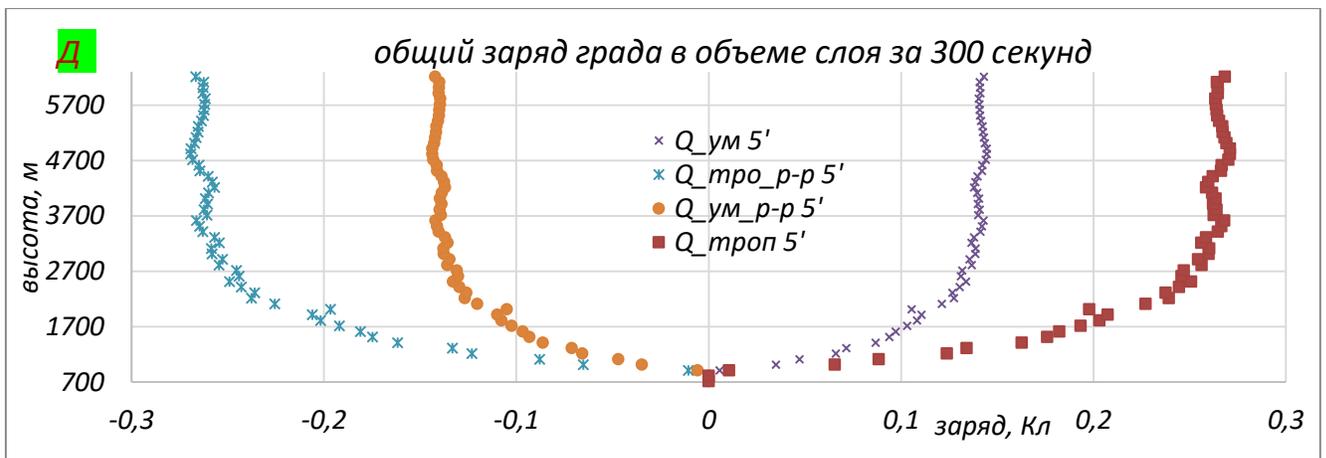


Рисунок 3.3.2.а. – Накопленный заряд в объеме слоя за данный промежуток времени: А — 1 секунда; Б — 30 секунд; В — 1 минута; Д — 5 минут; Г — 10 минут

Накопленный заряд в объеме слоя зависит от заблаговременности заряжения. Чем больше время заряжения, тем больше величина накопленного заряда в данном объеме слоя:  $Q_{lay} = \frac{dQ}{dt} \cdot V_{lay} \cdot \Delta t$ .

Максимальный заряд  $Q_{\text{макс}}$  в объеме слоя

время	умеренная	Раствор умеренной	тропик	Раствор тропика
1 сек	0,000482	-0,00048	0,000904	-0,0009
30 сек	0,014457	-0,01436	0,027107	-0,02692
1 мин	0,028914	-0,02871	0,054215	-0,05384
5мин	0,144572	-0,14357	0,271073	-0,26919
10 мин	0,289145	-0,28713	0,542147	-0,53838

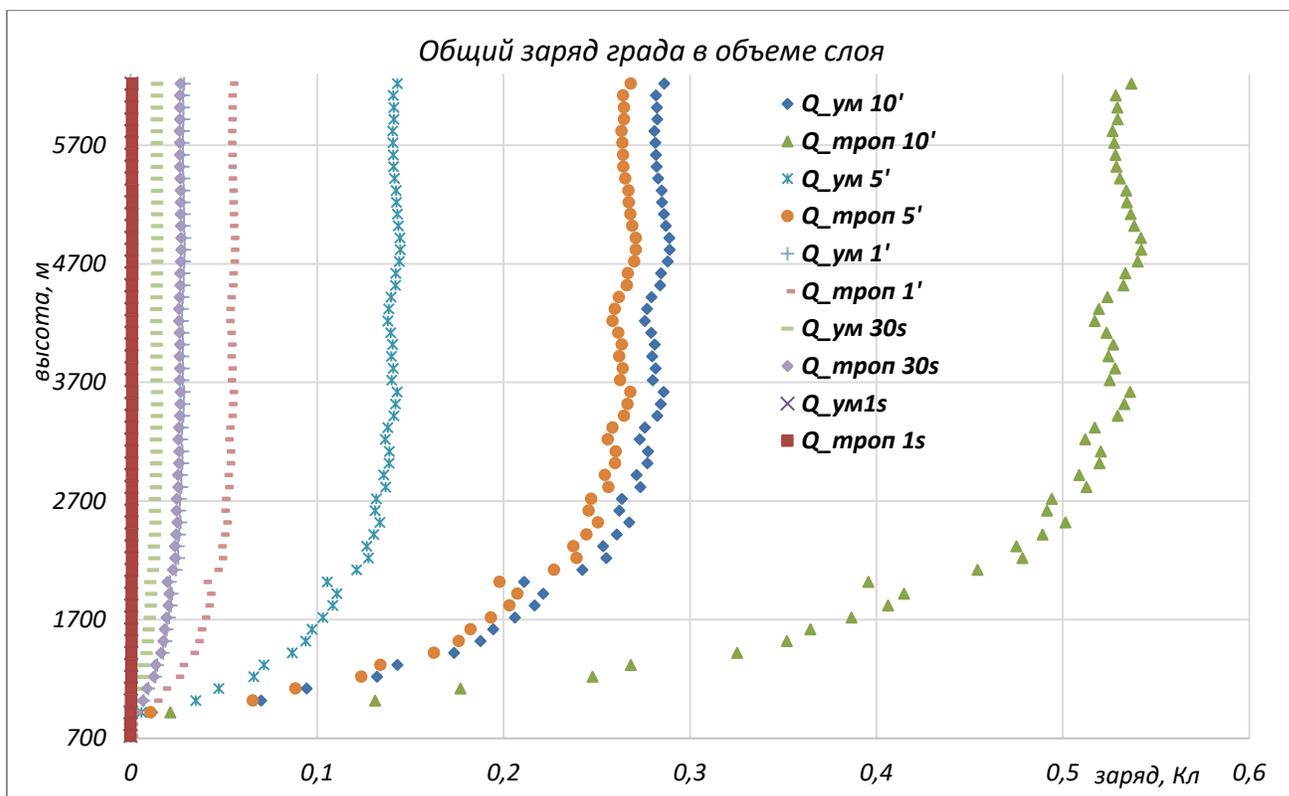
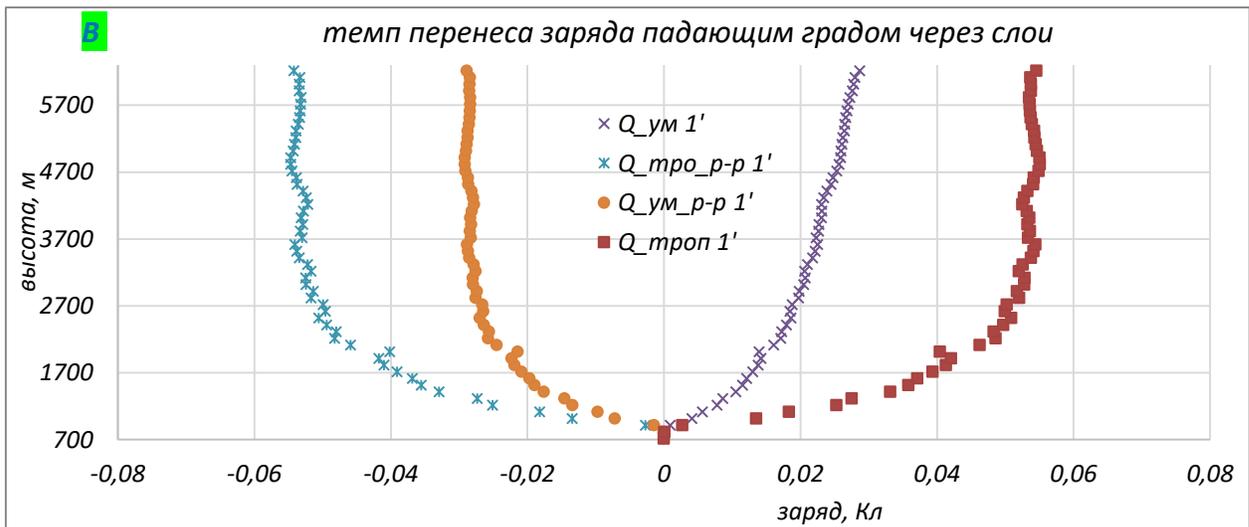
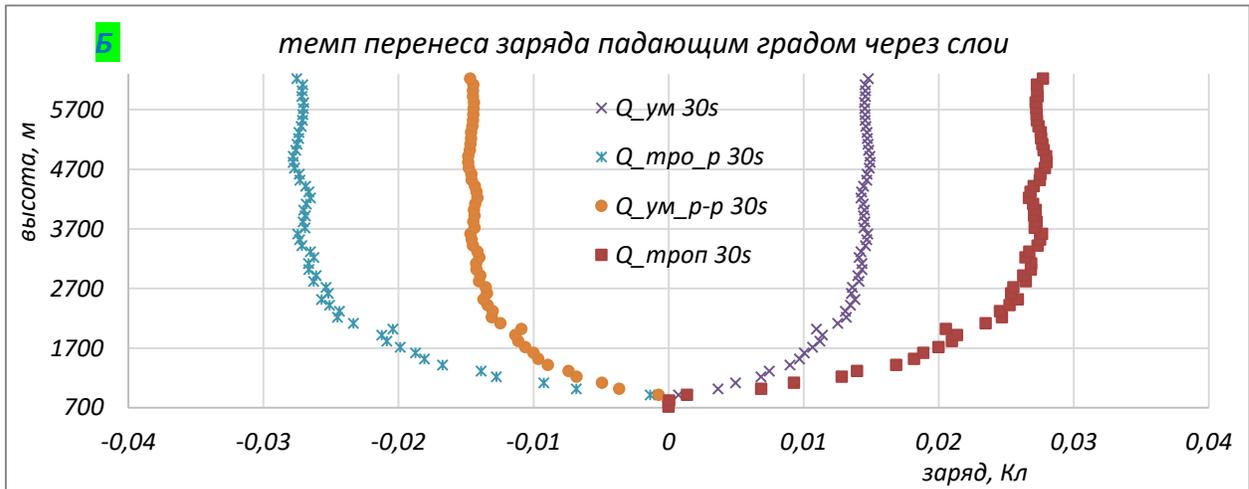
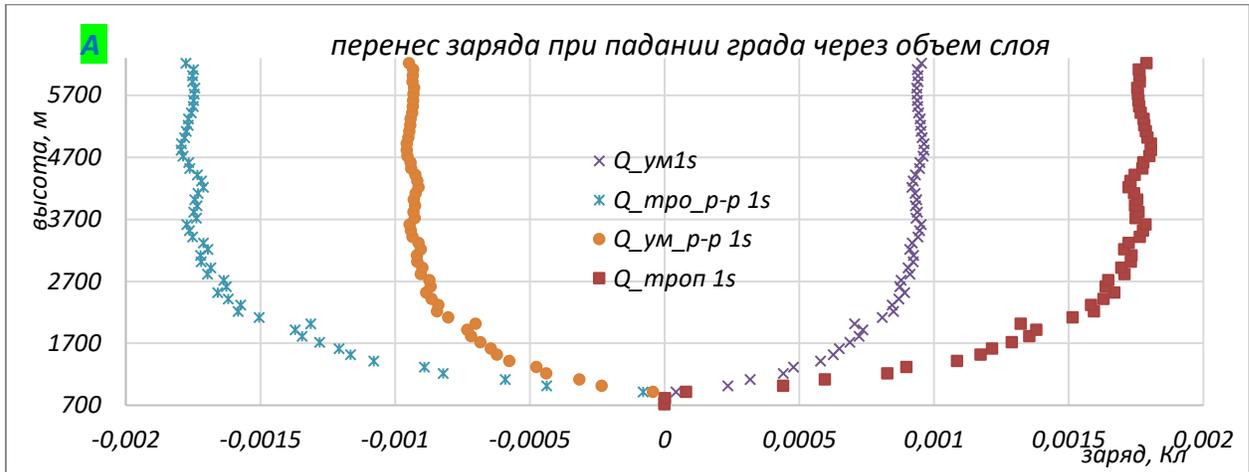


Рисунок 3.3.2.б. – Накопленный заряд в объеме слоя за данный промежуток времени для чистой воды в умеренном и тропическом облаках.

### 3.3.3. Перенос заряда градом при падении через слой



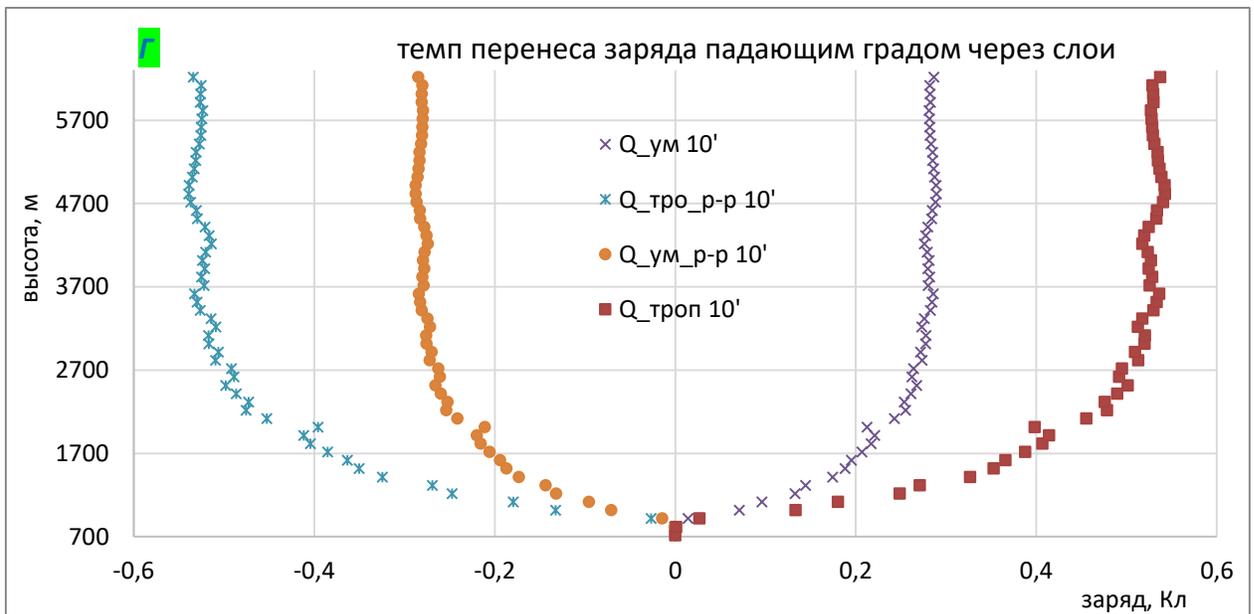
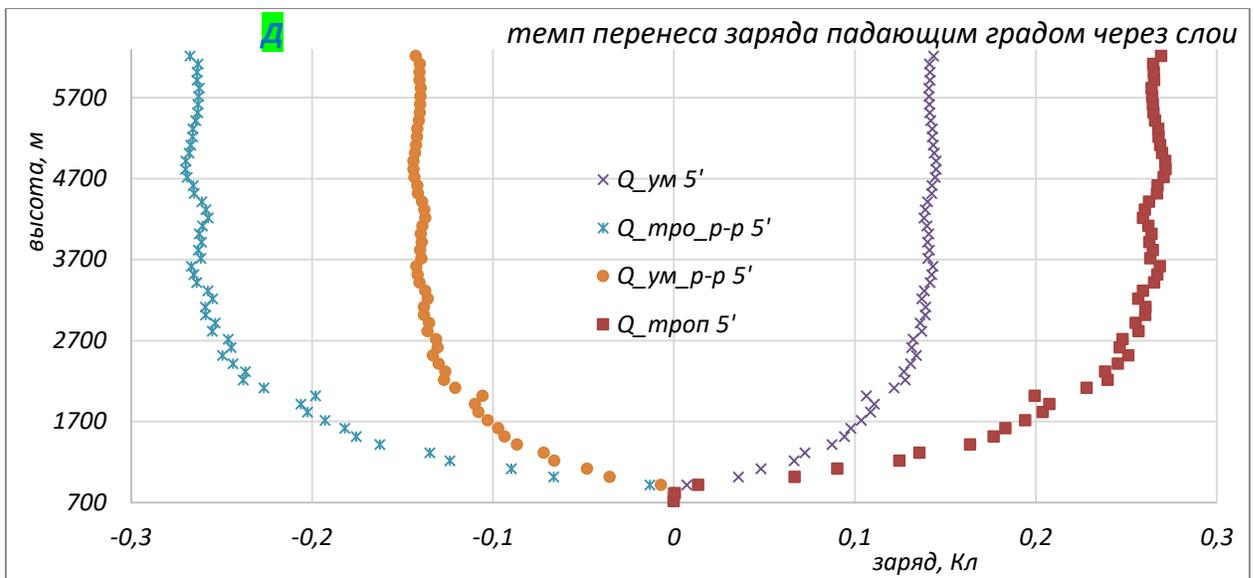


Рисунок 3.3.3.а. – Перенос заряда градами при падении через объемы слоев за данный промежуток времени. А — 1 секунда; Б — 30 секунд; В — 1 минута; Д — 5 минут; Г — 10 минут

Когда град падает ко дню облака через слои он переносит собой уже приобретенный из прежнего слоя заряд и по мере того, как он продолжает падать,

он сталкивается с другими переохлажденными облачными каплями в этих слоях. За счет разбрызгивания, замораживания и отскока этих взаимодействующих частиц, последовательно возрождается процесс электризации в этих объемах слоев.

Понимаем, что потребуется много времени, прежде чем этот град сможет, наконец, выпасть из-за предела нижней границы облака. Чем дольше град задержится в объеме, тем больше число столкновения и последующего возрождения заряда на него. По графикам из рисунка 3.3.3., переносимый заряд градами при падании через объемы слоев больше при больших промежутках времени и наоборот.

Высота максимального значения совпадает с высотой максимального значения для скорости заряжения, которая равна 4817 м. Максимум переносимого заряда  $Q$  для разных промежутков времени:

Максимальный заряд  $Q_{\text{макс}}$  переносимые через объем слоя

Время	Умеренная	Раствор умеренной	Тропик	Раствор тропика
1 сек	0,000963	-0,00096	0,001806	-0,00179
30 сек	0,014926	-0,01482	0,027986	-0,02779
1 мин	0,027806	-0,02847	0,053763	-0,05339
5мин	0,144922	-0,14391	0,271728	-0,26984
10 мин	0,289362	-0,28735	0,542553	-0,53878

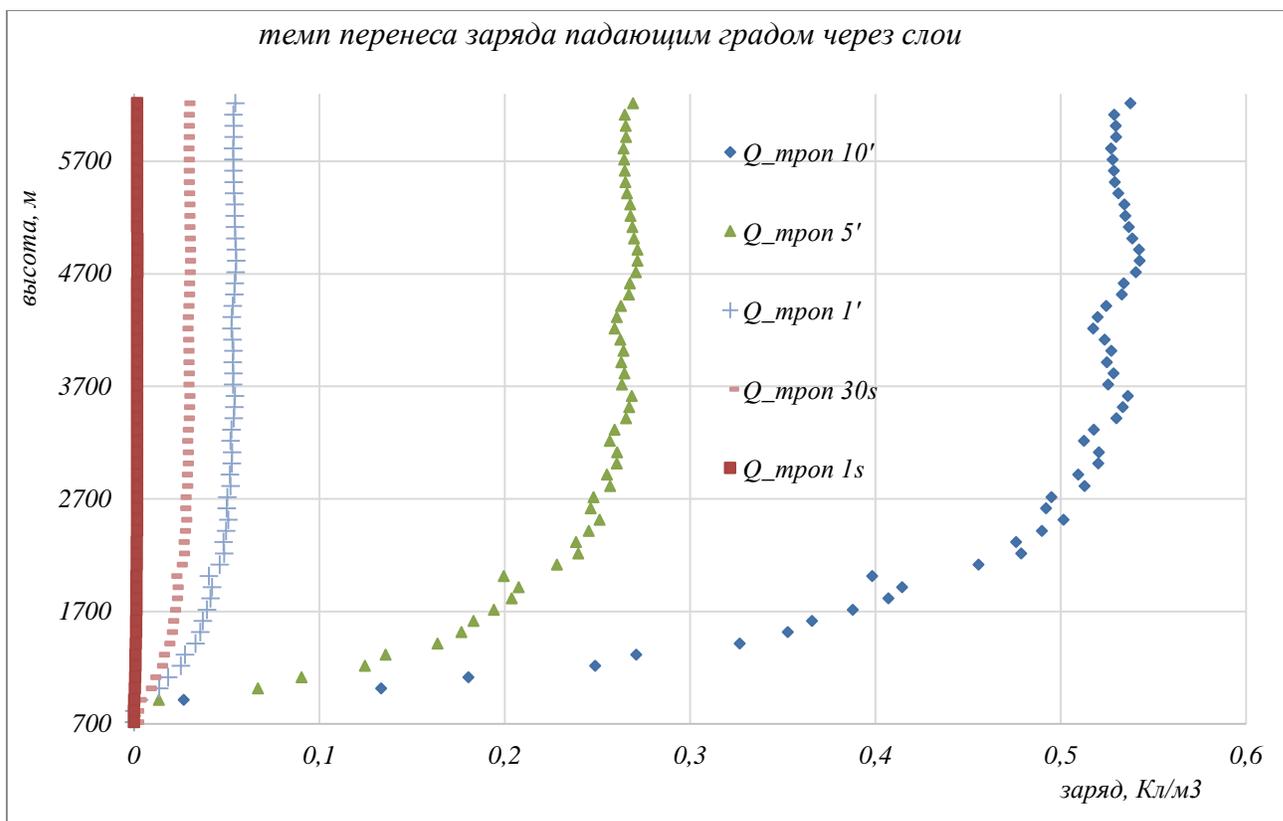


Рисунок 3.3.3.б. – Перенос заряда градами при падении через объемы слоев за данный промежуток времени для переохлажденных капель чистой воды в тропическом кучево-дождевом облаке.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы основные задачи были рассмотрены и поставленные цель достигнуты. На основе предположения о контактном механизме генерации зарядов в облаке мы узнали, что роль переохлажденных облачных капель при разделении зарядов очень велика; существенное значение имеют и размеры, числовая плотность и водность на нее. Высокие значения выделенных параметров приводят к высоким значениям разделяющегося заряда.

Также были рассмотрены эффекта переохлажденных капель на пространственно-временную скорость генерации электрической структуры в облаке; при этом нам удалось понять, что присутствие примеси в составе капель способственно повернуть классическое представление картинки электрической структуры в облаке.

Результатами работы четко выявлены: структуры микро- и макро-электризации в кучево-дождевых облаках; вклады отдельных облачных капель в этих процессах их зависимости. По графикам и приложениям выражены все вклады переохлажденных облачных капель на общее электрическое строение кучево-дождевое облаке.

Мы успели проверять модели облака и электризации, написанные в других работах. Результаты расчетов из моделей являются качественные и имеют естественные объяснения. Их можно оценивать в качестве рассмотрения механизма микро-электризации внутри кучево-дождевом облаке. Однако при расчетах были востребовано слишком много предположений которые мне кажется необходимо нужно будет пересматриваться для того, чтобы модель стала более надежным.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Головина Е.Г., Абанников В.Н., Ааед Мханна И.Н., Подгайский Э.В. Учебное пособие «Основы термодинамики атмосферы» по дисциплине «Физика атмосферы». – Санкт-Петербург: Изд-во «Ниц Арт». 2022. – 61 с.
2. Морачевский В. Г. (редактор) — Задачник по общей метеорологии. / Задачник– Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 312 с.
3. Доуголи В. — Исследование особенностей электризации облачных гидрометеоров в грозовых облаках. ВКР магистерская диссертация. – СПб.: РГГМУ, 2021. – 79 с.
4. Кашлева Л.В., Михайловский Ю.П. — Атмосферное электричество. // Учебное пособие. – СПб.: РГГМУ, 2019. – 226 с.
5. Мазин И. П., Хргиан А. Х. — Облака и облачная атмосфера. / Справочник– Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 648 с.
6. Матвеев Л.Т. — Динамические факторы образования облаков и осадков. / Сб. «Вопросы физики облаков». – СПб.: Гидрометеиздат, 2004, с. 51–70.
7. Матвеев Ю.Л. — Об уравнениях притока тепла и водяного пара. Ученые записки, № 2. – СПб.: РГГМУ, 2006, с. 70–78.
8. Матвеев Л.Т. — Динамика облаков. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 311 с.
9. Матвеев Л.Т. — Основы общей метеорологии. Физика атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1965. – 875 с.
10. Матвеев Л.Т. — Физика атмосферы. – СПб.: Гидрометеиздат, 2000. – 777 с.
11. Матвеев Л. Т., Матвеев Ю. Л. — Новые результаты в теории облаков земли. Ученые Записки №7, 2006

12. Матвеев Л.Т., Матвеев Ю.Л. — Поля температуры, влажности и облачности в тропическом циклоне. Доклады РАН, 2000, т. 374, № 5, с. 688–691.
13. Хргиан А.Х. — Физика атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 646 с.
14. Шишкин А.М. — Облака, осадки и грозовое электричество. – Л.: Гидрометеиздат, 1964. – 403 с.
15. Mikhailovsky Yu.P., Toropova M.L., Veremey N.E. *et al.*, Dynamics of the Electrical Structure of Cumulonimbus Clouds. *Radiophys Quantum El* 64, 309–320 (2021). <https://doi.org/10.1007/s11141-022-10133-y>
16. Avila E.E., Caranti G.M. — Charge transfer during individual collisions in ice growing by riming. // NASA. Kennedy Space Center, The 1991 International Aerospace and Ground Conference on Lightning and Static Electricity, Vol.2;15p.
17. Baker M.B., Dash J.G., Mechanism of charge transfer between colliding ice particles in thunderstorms. // J. Geophys. Res. 99, 10621-10626, (1994).
18. Baker M., Nelson J. — A new model of charge transfer during ice–ice collisions. // C. R. Physique 3 (2002) 1293–1303
19. Bari S.A. and Hallett J. Nucleation and growth of bubbles at an ice-water interface. // Journal of Glaciology, Vol.13, No.69,1974.
20. Berdeklis P. and List R. — The Ice Crystal–Graupel Collision Charging Mechanism of Thunderstorm Electrification. // Dep. of Physics, University of Toronto, Toronto, Ontario, Canada, 2001.
21. Brooks I.M. *et al.* — The effect on thunderstorm charging of the rate of rime accretion by graupel. // Atmospheric Research 43 (1997) 277-295.
22. Brooks I.M., Saunders C.P.R. — Thunderstorm charging: Laboratory experiments clarified. // Atmospheric Research 39 (1995) 263-273.

23. Chen J. et al. – Research on Efficiency of Contactless Charging System based on Electromagnetic Induction. // MATEC Web of Conferences 40, 07005 (2016).
24. Cloud Electrification (Charge Separation): Science 123, Spring 2020: [4/23/22,11:53PM]:—[www.faculty.luther.edu/~bernatzr/Courses/Sci123/Chapter12/chargeSeparation.html](http://www.faculty.luther.edu/~bernatzr/Courses/Sci123/Chapter12/chargeSeparation.html).
25. Kundt W., Thuma G. — Geoelectricity: atmospheric charging and thunderstorms. // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 61 (1999) 955-963.
26. Latham J., Warwicker R. — Charge transfer accompanying the splashing of supercooled raindrops on hailstones. // Quart. J. R. Met. Soc. (1980), 106, pp. 559-568.
27. Levin J. et al., Zev - Thunderstorm Electrification—Inductive or Non-Inductive? // Journal of Atmospheric Sciences 38(11):2470-2484: DOI:10.1175/1520-0469(1981)038<2470:TEONI>2.0.CO;2.
28. Liu D. *et al.*, Observation of the density minimum in deeply supercooled confined water, *PNAS* June 5, 2007, vol.104-no.23:9570–9574; <https://doi.org/10.1073/PNAS.0701352104>
29. Nelson, J. and Baker, M.: Charging of ice-vapor interfaces: applications to thunderstorms, *Atmos. Chem. Phys.*, 3, 1237–1252, <https://doi.org/10.5194/acp-3-1237-2003>, 2003.
30. Pruppacher H.R., Klett J.D., *Microphysics of clouds and precipitation*, p.954, 2004©Kluwer Academic Publishers.
31. Prof. Loeb L.B. — The Basic Mechanisms of Static Electrification:// *SCIENCE* VOL.102, No. 2658, (DEC. 7,1945), p. 573-576.

32. Saunders C.P.R. — Charge Separation Mechanisms in Clouds. // *Space Sci Rev* (2008) 137: 335–353: DOI 10.1007/s11214-008-9345-0.
33. Saunders C.P.R. *et al.*, — Laboratory studies of the effect of cloud conditions on graupel/crystal charge transfer in thunderstorm electrification. // *Q. J. R. Meteorol. Soc.* (2006), 132, pp. 2653–2673, doi: 10.1256/qj.05.218.
34. Simion A.I. *et. al.*, Mathematical modeling of density and viscosity of NaCl aqueous solutions. // *Journal of Agroalimentary Processes and Technologies* 2015, 21(1).
35. Shewchuk S.R., Iribarne J.V. — Charge separation during splashing of large drops on ice. // *Quart. 1. R. Met. SOC.* (1971), 97, pp. 272-282.
36. Shewchuk S.R., Iribarne J.V. — Electrification Associated with Droplet Accretion on Ice. // *J. Atmos. Sci.* (1974), 31, pp. 777-786.
37. Spangler J. D, and Rosenkilde C. E. — Infinite cloud model of electrification by the precipitation mechanism in the presence of high rates of ion generation (1978).
38. Williams E.R. — *The Electrification of Thunderstorms.* // ©SCIENTIFIC AMERICAN, 1988.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Исходные данные о радиозонде на станции 03354 Ноттингем, наблюдения за 12 часов в 17 июня 2020 года

03354 Nottingham Observations at 12Z 17 Jun 2020										
PRES	HGHT	TEMP	DWPT	RELH	MIXR	DRCT	SKNT	THTA	THTE	THTV
hPa	m	C	C	%	g/kg	deg	knot	K	K	K
1001	117	16,4	13,3	82	9,67	340	4	289,5	316,9	291,1
1000	121	16,4	13,7	84	9,94	15	4	289,6	317,7	291,3
997	147	15,8	14,3	91	10,38	19	4	289,2	318,5	291
978	310	13,8	13,3	97	9,9	42	5	288,8	316,7	290,5
967	406	12,8	12,8	100	9,69	56	5	288,7	316	290,4
945	599	11,8	11,8	100	9,28	84	6	289,6	315,9	291,2
932	716	11,2	9,2	87	7,89	101	7	290,1	312,7	291,5
926	770	12	9	82	7,84	109	7	291,5	314	292,9
925	779	12	9,2	83	7,95	110	7	291,6	314,4	293
924	788	12,2	9,9	86	8,35	110	7	291,9	315,9	293,3
921	815	12	10,2	89	8,55	110	7	291,9	316,5	293,4
911	907	11,8	8,9	82	7,91	110	7	292,6	315,5	294
908	935	11,6	9,1	85	8,05	110	7	292,7	316	294,1
906	953	11,4	7,7	78	7,33	110	7	292,7	313,9	294
905	962	11,4	7,7	78	7,33	110	7	292,8	314,1	294,1
885	1149	10	7,4	84	7,35	110	6	293,2	314,6	294,5
873	1262	9,2	6,1	81	6,81	110	6	293,5	313,4	294,7
857	1415	8	5,6	85	6,7	110	6	293,8	313,4	295
851	1473	7,8	4,5	80	6,24	110	6	294,2	312,5	295,3
850	1483	7,6	4,4	80	6,2	110	6	294,1	312,3	295,2
846	1522	7,4	4,7	83	6,37	110	6	294,3	313	295,4
827	1709	6,2	2,2	76	5,45	112	6	294,9	311,1	295,9
819	1788	5,4	2,6	82	5,67	112	6	294,9	311,7	295,9

811	1869	4,8	1,6	80	5,33	113	6	295,1	310,9	296
795	2031	4	1,2	82	5,28	114	6	295,9	311,7	296,9
783	2155	3,2	-1,1	73	4,53	115	6	296,4	310	297,2
768	2312	2,6	-1	77	4,65	124	7	297,4	311,4	298,2
765	2343	2,6	-1,1	77	4,64	126	8	297,7	311,7	298,5
743	2578	0,8	-2,4	80	4,35	140	10	298,2	311,4	299
730	2720	-0,3	-3,1	81	4,19	140	14	298,5	311,3	299,3
724	2786	-0,7	-3,9	79	3,98	140	17	298,8	310,9	299,5
714	2897	-1,6	-3,6	86	4,11	140	20	299	311,6	299,7
704	3010	-2,5	-3,4	94	4,25	136	19	299,2	312,2	300
700	3055	-2,7	-3,8	92	4,14	135	18	299,5	312,1	300,2
696	3101	-2,7	-5,4	82	3,69	132	18	299,9	311,4	300,6
692	3146	-2,9	-5	85	3,83	129	18	300,2	312	300,9
686	3215	-3,3	-6	82	3,58	125	18	300,5	311,6	301,2
683	3250	-3,5	-6,5	80	3,46	125	18	300,7	311,4	301,3
674	3355	-4,5	-6,8	84	3,42	127	17	300,7	311,4	301,3
669	3413	-4,9	-7,5	82	3,27	127	17	300,9	311,1	301,5
659	3532	-5,9	-7,1	91	3,42	129	16	301,1	311,7	301,7
658	3544	-5,9	-7,1	91	3,43	129	16	301,2	311,9	301,8
656	3568	-6,1	-8,4	84	3,11	129	15	301,2	311	301,8
655	3580	-5,9	-10,9	68	2,55	130	15	301,6	309,7	302,1
652	3616	-6	-12	63	2,35	130	15	301,9	309,4	302,3
649	3652	-6,1	-13,1	58	2,16	128	15	302,2	309,1	302,6
643	3724	-6,5	-10,7	72	2,64	125	16	302,5	310,9	303
640	3761	-6,5	-11,5	68	2,49	123	16	302,9	310,9	303,4
635	3822	-6,7	-13,7	57	2,1	120	16	303,4	310,1	303,8
631	3872	-7,1	-14,1	57	2,05	118	16	303,5	310,1	303,8
628	3909	-7,5	-11,6	72	2,52	116	16	303,4	311,5	303,9
626	3934	-7,5	-12	70	2,45	115	16	303,7	311,5	304,1
617	4046	-8,4	-11,9	76	2,5	110	17	303,9	311,9	304,4
614	4084	-8,7	-11,9	78	2,51	110	17	304	312,1	304,5
612	4109	-8,7	-12,4	75	2,43	110	17	304,3	312,1	304,7
611	4122	-8,7	-12,6	73	2,39	112	17	304,4	312,1	304,9
604	4211	-9,5	-13	76	2,34	125	17	304,5	312	304,9
599	4276	-10,1	-13,3	77	2,3	126	18	304,5	311,9	305
596	4314	-10,3	-14,1	74	2,17	127	19	304,7	311,8	305,1
594	4340	-10,3	-16,3	61	1,81	127	19	305	311	305,4

589	4405	-10,3	-23,3	34	1	129	20	305,8	309,2	305,9
583	4484	-10,9	-21,6	41	1,17	130	21	306	309,9	306,2
581	4511	-11,1	-21,1	44	1,23	129	21	306	310,2	306,3
575	4590	-11,5	-23,5	36	1,01	126	21	306,5	309,9	306,7
565	4725	-12,3	-25	34	0,9	120	20	307,1	310,2	307,2
560	4793	-12,7	-25,7	33	0,85	121	20	307,4	310,3	307,5
558	4820	-12,7	-27,7	27	0,71	122	20	307,7	310,2	307,8
555	4861	-12,7	-26,7	30	0,78	122	21	308,2	310,9	308,3
549	4944	-12,9	-30,9	21	0,53	124	21	308,9	310,8	309
545	5000	-13,2	-32,8	18	0,45	125	21	309,1	310,8	309,2
539	5084	-13,7	-35,7	14	0,34	123	22	309,6	310,8	309,6
538	5098	-13,7	-35,7	14	0,34	122	22	309,7	311	309,8
528	5240	-14,7	-35,7	15	0,35	119	23	310,2	311,5	310,2
518	5385	-16,1	-30,1	29	0,61	115	24	310,2	312,4	310,3
511	5487	-16,9	-29,9	31	0,63	119	24	310,4	312,7	310,6
500	5650	-18,3	-36,3	19	0,35	125	25	310,7	311,9	310,7
499	5665	-18,3	-36,3	19	0,35	126	25	310,8	312,1	310,9
498	5680	-18,5	-32,5	28	0,5	126	25	310,8	312,6	310,9
497	5695	-18,5	-25,5	54	0,97	127	25	311	314,3	311,1
496	5710	-18,7	-23,6	65	1,16	127	25	310,9	314,9	311,1
492	5770	-19,3	-22,8	74	1,25	129	25	310,9	315,2	311,1
486	5861	-20,1	-23,2	76	1,22	133	26	311	315,2	311,2
483	5907	-20,5	-24,3	72	1,11	134	26	311	314,9	311,2
482	5923	-20,5	-26,4	59	0,92	135	26	311,2	314,4	311,4
481	5938	-20,5	-28,5	49	0,76	135	26	311,4	314,1	311,6
480	5953	-20,5	-29,5	44	0,7	135	26	311,6	314,1	311,7
478	5984	-20,7	-28,7	49	0,75	134	27	311,7	314,4	311,9
474	6046	-21,1	-31,1	40	0,61	133	27	312	314,1	312,1
473	6062	-21,3	-29,3	49	0,72	133	27	311,9	314,5	312,1
470	6109	-21,5	-28,5	53	0,78	133	28	312,2	315	312,4
467	6156	-21,7	-29,7	48	0,7	132	28	312,6	315,1	312,7
465	6188	-21,9	-33,9	33	0,47	132	29	312,7	314,4	312,8
459	6283	-22,5	-32,5	40	0,55	131	30	313,1	315,1	313,2
456	6331	-22,8	-33,5	37	0,5	130	30	313,3	315,1	313,4
455	6347	-22,9	-33,9	36	0,48	131	30	313,4	315,1	313,5
454	6364	-22,7	-37,7	24	0,33	132	30	313,8	315,1	313,9
452	6396	-22,9	-34,9	33	0,44	134	30	314	315,6	314,1

446	6494	-23,5	-34,3	36	0,47	140	29	314,4	316,2	314,5
442	6560	-23,9	-33,9	39	0,5	140	29	314,7	316,6	314,8
439	6609	-24,3	-35,3	35	0,43	140	29	314,8	316,4	314,9
433	6709	-25,1	-35,1	39	0,45	140	30	315,1	316,7	315,1
429	6777	-25,7	-33,7	47	0,52	140	30	315,1	317	315,2
427	6811	-25,9	-34,9	43	0,46	140	30	315,3	317	315,4
423	6879	-26,5	-35,5	42	0,44	140	30	315,4	317,1	315,5
417	6982	-27,3	-36,3	42	0,41	131	30	315,6	317,2	315,7
416	6999	-27,4	-36,1	44	0,42	130	30	315,7	317,3	315,8
414	7034	-27,7	-35,7	46	0,44	128	31	315,8	317,4	315,9

## *ПРИЛОЖЕНИЕ 2*

Интерполированные данные, по 100 м с уровня станции, о вертикальном профиле температуры атмосферы и поднимающихся воздушных масс.

H, m	T, °C	P, hPa	E, hPa	$\rho$ , g/cm <sup>3</sup>	S, g/g	T', °C	RH, %	L, J/kg	$\rho$ , g/cm <sup>3</sup>	wet ad $\gamma$	dry ad $\gamma$
117	16,4	1001,0	18,67	1,20	0,01160	17,9	82	0	0	0	0
217	14,4	989,2	16,42	1,20	0,01033	16,9	92	0	1,19	-0,979	0
317	13,4	977,5	15,39	1,19	0,00979	15,9	97	0	1,18	-0,983	0
417	12,4	965,9	14,41	1,18	0,00928	15,0	102	0	1,17	-0,983	0
517	11,8	954,4	13,86	1,17	0,00903	14,0	105	0	1,16	-0,983	0
617	12,8	943,1	14,80	1,15	0,00976	13,0	97	0	1,15	-0,982	0
717	12,6	931,9	14,61	1,14	0,00975	12,0	98	0	1,14	-0,975	0
817	12,4	920,8	14,41	1,12	0,00974	11,5	98	2468185	1,13		-0,476
917	12	909,8	14,04	1,11	0,00960	11,1	99	2469134	1,12		-0,478
1017	10,6	899,0	12,80	1,10	0,00885	10,6	107	2472455	1,10		-0,490
1117	9,8	888,2	12,13	1,09	0,00849	10,1		2474352	1,09		-0,496
1217	8,6	877,5	11,19	1,09	0,00793	9,6		2477199	1,08		-0,506

1317	8	866,9	10,74	1,07	0,00771	9,1		2478622	1,07		-0,510
1417	6,8	856,4	9,89	1,07	0,00719	8,5		2481468	1,06		-0,521
1517	6	846,0	9,36	1,06	0,00688	8,0		2483366	1,05		-0,528
1617	5,4	835,7	8,98	1,05	0,00668	7,5		2484789	1,04		-0,532
1717	4,6	825,5	8,49	1,04	0,00640	6,9		2486687	1,03		-0,539
1817	3,8	815,4	8,03	1,03	0,00613	6,4		2488584	1,02		-0,545
1917	3,2	805,4	7,70	1,02	0,00594	5,8		2490007	1,01		-0,550
2017	3,2	795,5	7,70	1,00	0,00602	5,3		2490007	1,00		-0,548
2117	1,4	785,7	6,77	1,00	0,00536	4,7		2494277	0,99		-0,566
2217	0,3	776,0	6,25	0,99	0,00501	4,2		2496886	0,98		-0,577
2317	-0,1	766,3	6,08	0,98	0,00493	3,6		2497835	0,97		-0,580
2417	-1	756,8	5,69	0,97	0,00468	3,0		2499970	0,96		-0,588
2517	-1,9	747,3	5,33	0,96	0,00443	2,4		2502105	0,95		-0,597
2617	-2,1	738,0	5,25	0,95	0,00442	1,8		2502579	0,94		-0,597
2717	-2,7	728,7	5,02	0,94	0,00428	1,2		2504002	0,93		-0,602
2817	-3,9	719,5	4,59	0,93	0,00397	0,6		2506849	0,92		-0,614
2917	-4,3	710,5	4,45	0,92	0,00390	0,0		2507797	0,91		-0,617
3017	-5,3	701,5	4,13	0,91	0,00366	-0,7		2510169	0,90		-0,627
3117	-5,9	692,6	3,94	0,90	0,00354	-1,3		2511593	0,89		-0,632
3217	-6,1	683,8	3,88	0,89	0,00353	-1,9		2512067	0,88		-0,632
3317	-6,9	675,1	3,65	0,88	0,00337	-2,6		2513965	0,87		-0,640
3417	-8,1	666,4	3,33	0,88	0,00311	-3,2		2516811	0,86		-0,653
3517	-8,9	657,9	3,13	0,87	0,00296	-3,9		2518709	0,85		-0,661
3617	-9,7	649,4	2,94	0,86	0,00281	-4,6		2520606	0,84		-0,668
3717	-9,7	641,1	2,94	0,85	0,00285	-5,2		2520606	0,83		-0,666
3817	-10,5	632,8	2,76	0,84	0,00271	-5,9		2522504	0,83		-0,674
3917	-10,9	624,6	2,67	0,83	0,00266	-6,6		2523453	0,82		-0,676
4017	-11,7	616,5	2,51	0,82	0,00253	-7,3		2525350	0,81		-0,684
4117	-12,1	608,5	2,43	0,81	0,00248	-7,9		2526299	0,80		-0,687
4217	-12,3	600,6	2,39	0,80	0,00247	-8,6		2526773	0,79		-0,687
4317	-13,1	592,7	2,24	0,79	0,00235	-9,3		2528671	0,78		-0,695
4417	-14,1	585,0	2,06	0,79	0,00219	-10,0		2531043	0,78		-0,705
4517	-15,5	577,3	1,84	0,78	0,00198	-10,7		2534364	0,77		-0,721

4617	-16,3	569,7	1,72	0,77	0,00188	-11,5		2536261	0,76		-0,728
4717	-17,7	562,1	1,53	0,77	0,00169	-12,2		2539582	0,75		-0,743
4817	-18,7	554,7	1,40	0,76	0,00157	-13,0		2541954	0,74		-0,753
4917	-19,5	547,3	1,31	0,75	0,00149	-13,7		2543852	0,74		-0,761
5017	-19,9	539,9	1,27	0,74	0,00146	-14,5		2544801	0,73		-0,763
5117	-20,5	532,7	1,20	0,73	0,00140	-15,3		2546224	0,72		-0,768
5217	-21,1	525,5	1,14	0,73	0,00135	-16,0		2547647	0,71		-0,773
5317	-21,9	518,4	1,06	0,72	0,00128	-16,8		2549545	0,71		-0,780
5417	-22,3	511,4	1,03	0,71	0,00125	-17,6		2550493	0,70		-0,783
5517	-22,9	504,5	0,97	0,70	0,00120	-18,4		2551917	0,69		-0,787
5617	-23,7	497,6	0,91	0,70	0,00113	-19,2		2553814	0,68		-0,794
5717	-24,5	490,9	0,85	0,69	0,00107	-20,0		2555712	0,68		-0,801
5817	-25,3	484,2	0,79	0,68	0,00101	-20,8		2557609	0,67		-0,808
5917	-26,8	477,5	0,69	0,68	0,00089	-21,6		2561167	0,66		-0,822
6017	-27,8	470,9	0,63	0,67	0,00083	-22,4		2563539	0,65		-0,830
6117	-28,7	464,4	0,57	0,66	0,00077	-23,3		2565674	0,65		-0,837
6217	-29,7	457,9	0,52	0,66	0,00071	-24,1		2568046	0,64		-0,845
6317	-30,5	451,5	0,49	0,65	0,00067	-25,0		2569944	0,63		-0,851
6417	-31,5	445,2	0,44	0,64	0,00062	-25,8		2572316	0,63		-0,858

### ПРИЛОЖЕНИЕ 3

#### Данные о размерах и скоростях облака и гидрометеоров

Высота, м	Радиус облака, м	Скорость восх- потока, м/с	Радиус града, м	Скорость пад- града, м/с	Радиус капли, мкм	Скорость пад- капли, м/с	Радиус капли Раст., мкм	Скорость пад- раст., м/с	объем слоя облака
617									
717	0	0		0	0	0	0	0	0
817	5000,00	5,00	0,00631	21,22	50	0,3063	50	0,3063	7,51E+09
917	4780,21	5,57	0,00631	21,22	50	0,3078	50	0,3078	7,06E+09
1017	4699,23	5,86	0,00631	21,22	50	0,3094	50	0,3094	6,83E+09
1117	4625,18	6,14	0,00631	21,22	50	0,3109	50	0,3109	6,62E+09
1217	4557,31	6,43	0,00631	21,22	50	0,3125	50	0,3125	6,44E+09
1317	4494,93	6,72	0,00631	21,22	50	0,3140	50	0,3140	6,27E+09
1417	4437,51	7,00	0,00631	21,22	50	0,3156	50	0,3156	6,11E+09
1517	4384,55	7,29	0,00631	21,22	50	0,3172	50	0,3172	5,97E+09
1617	4335,62	7,57	0,00631	21,22	50	0,3188	50	0,3188	5,84E+09
1717	4290,36	7,86	0,00631	21,22	50	0,3204	50	0,3204	5,73E+09
1817	4248,46	8,14	0,00631	21,22	50	0,3220	50	0,3220	5,62E+09
1917	4209,62	8,43	0,00631	21,22	50	0,3236	50	0,3236	5,52E+09
2017	4173,56	8,72	0,00631	21,22	50	0,3252	50	0,3252	5,43E+09
2117	4140,15	9,00	0,00631	21,22	50	0,3268	50	0,3268	5,34E+09
2217	4109,16	9,29	0,00631	21,22	50	0,3285	50	0,3285	5,27E+09
2317	4080,37	9,57	0,00631	21,22	50	0,3301	50	0,3301	5,2E+09
2417	4053,65	9,86	0,00631	21,22	50	0,3318	50	0,3318	5,13E+09
2517	4028,87	10,15	0,00631	21,22	50	0,3334	50	0,3334	5,07E+09
2617	4005,85	10,43	0,00631	21,22	50	0,3351	50	0,3351	5,01E+09
2717	3984,50	10,72	0,00631	21,22	50	0,3368	50	0,3368	4,96E+09
2817	3964,74	11,00	0,00631	21,22	50	0,3385	50	0,3385	4,92E+09
2917	3946,44	11,29	0,00631	21,22	50	0,3402	50	0,3402	4,87E+09
3017	3929,53	11,57	0,00631	21,22	50	0,3419	50	0,3419	4,83E+09
3117	3913,92	11,86	0,00631	21,22	50	0,3436	50	0,3436	4,79E+09

3217	3899,52	12,15	0,00631	21,22	50	0,3453	50	0,3453	4,76E+09
3317	3886,28	12,43	0,00631	21,22	50	0,3471	50	0,3471	4,73E+09
3417	3874,17	12,72	0,00631	21,22	50	0,3488	50	0,3488	4,7E+09
3517	3863,09	13,00	0,00631	21,22	50	0,3505	50	0,3505	4,68E+09
3617	3853,01	13,29	0,00631	21,22	50	0,3523	50	0,3523	4,65E+09
3717	3843,83	13,58	0,00631	21,22	50	0,3541	50	0,3541	4,63E+09
3817	3835,56	13,86	0,00631	21,22	50	0,3558	50	0,3558	4,61E+09
3917	3828,11	14,15	0,00631	21,22	50	0,3576	50	0,3576	4,6E+09
4017	3821,48	14,43	0,00631	21,22	50	0,3594	50	0,3594	4,58E+09
4117	3815,62	14,72	0,00631	21,22	50	0,3612	50	0,3612	4,57E+09
4217	3810,47	15,00	0,00631	21,22	50	0,3630	50	0,3630	4,56E+09
4317	3806,03	15,29	0,00631	21,22	50	0,3648	50	0,3648	4,55E+09
4417	3802,28	15,58	0,00631	21,22	50	0,3667	50	0,3667	4,54E+09
4517	3799,22	15,86	0,00631	21,22	50	0,3685	50	0,3685	4,53E+09
4617	3796,79	16,15	0,00631	21,22	50	0,3704	50	0,3704	4,53E+09
4717	3794,99	16,43	0,00631	21,22	50	0,3722	50	0,3722	4,52E+09
4817	3793,79	16,72	0,00631	21,22	50	0,3741	50	0,3741	4,52E+09
4917	3793,15	17,01	0,00631	21,22	50	0,3760	50	0,3760	4,52E+09
5017	3793,03	17,29	0,00631	21,22	50	0,3778	50	0,3778	4,52E+09
5117	3793,42	17,58	0,00631	21,22	50	0,3797	50	0,3797	4,52E+09
5217	3794,31	17,86	0,00631	21,22	50	0,3816	50	0,3816	4,52E+09
5317	3795,68	18,15	0,00631	21,22	50	0,3836	50	0,3836	4,53E+09
5417	3797,50	18,43	0,00631	21,22	50	0,3855	50	0,3855	4,53E+09
5517	3799,77	18,72	0,00631	21,22	50	0,3874	50	0,3874	4,54E+09
5617	3802,48	19,01	0,00631	21,22	50	0,3894	50	0,3894	4,55E+09
5717	3805,62	19,29	0,00631	21,22	50	0,3913	50	0,3913	4,55E+09
5817	3809,18	19,58	0,00631	21,22	50	0,3933	50	0,3933	4,56E+09
5917	3813,21	19,86	0,00631	21,22	50	0,3952	50	0,3952	4,57E+09
6017	3817,64	20,15	0,00631	21,22	50	0,3972	50	0,3972	4,58E+09
6117	3822,47	20,44	0,00631	21,22	50	0,3992	50	0,3992	4,6E+09
6217	3827,70	20,72	0,00631	21,22	50	0,4012	50	0,4012	4,69E+09
6317	3897,63	20,32	0,00601	20,82	50	0,2144	50	0,2144	4,9E+09
6417	4004,64	19,56	0,00552	20,06	50	0,2133	50	0,2133	5,18E+09

## ПРИЛОЖЕНИЕ 4

### ДАННЫЕ О ВОДНОСТИ В ОБЛАКЕ И НА КАЛИ

Высота, м	Адиабати- ческая вод, г/м <sup>3</sup>	Жидко- капель вод,г/м <sup>3</sup>	Водность Капли умерен, г/м <sup>3</sup>	Конц. Кап- умер, л/м <sup>3</sup>	Конц. раст-умер, л/м <sup>3</sup>	водность Капли тропика, г/м <sup>3</sup>	Конц. Кап- троика, л/м <sup>3</sup>	Конц. раст- тропика, л/м <sup>3</sup>
617								
717	0	0	0	0	0	0	0	0
817	0	0	0	0	0	0	0	0
917	0,000167	0,000167	1,33E-05	25490,72	25313,53	2,5E-05	47795,11	47462,87
1017	0,00106	0,00106	8,48E-05	161863,2	160738,1	0,000159	303493,5	301383,9
1117	0,001475	0,001475	0,000118	225377,7	223811	0,000221	422583,2	419645,6
1217	0,002125	0,002125	0,00017	324625,6	322369	0,000319	608673	604441,9
1317	0,002363	0,002363	0,000189	360990,4	358481,1	0,000354	676857,1	672152
1417	0,002939	0,002939	0,000235	449045,6	445924,1	0,000441	841960,4	836107,7
1517	0,003254	0,003254	0,00026	497115,4	493659,8	0,000488	932091,3	925612
1617	0,003445	0,003445	0,000276	526336,3	522677,5	0,000517	986880,5	980020,4
1717	0,003728	0,003728	0,000298	569597,1	565637,6	0,000559	1067994	1060570
1817	0,003994	0,003994	0,00032	610224,9	605983	0,000599	1144172	1136218
1917	0,004152	0,004152	0,000332	634251,7	629842,8	0,000623	1189222	1180955
2017	0,004027	0,004027	0,000322	615212,4	610935,8	0,000604	1153523	1145505
2117	0,004696	0,004696	0,000376	717450,9	712463,7	0,000704	1345221	1335869
2217	0,005018	0,005018	0,000401	766619,4	761290,4	0,000753	1437411	1427420
2317	0,005053	0,005053	0,000404	771865,6	766500,1	0,000758	1447248	1437188
2417	0,005267	0,005267	0,000421	804687,4	799093,8	0,00079	1508789	1498301
2517	0,005466	0,005466	0,000437	834998,8	829194,5	0,00082	1565623	1554740
2617	0,005418	0,005418	0,000433	827734,6	821980,7	0,000813	1552002	1541214
2717	0,005503	0,005503	0,00044	840621	834777,6	0,000825	1576164	1565208
2817	0,005765	0,005765	0,000461	880724	874601,8	0,000865	1651357	1639878
2917	0,005773	0,005773	0,000462	881908,3	875777,8	0,000866	1653578	1642083
3017	0,005947	0,005947	0,000476	908590,4	902274,5	0,000892	1703607	1691765
3117	0,006001	0,006001	0,00048	916806,2	910433,1	0,0009	1719012	1707062

3217	0,005947	0,005947	0,000476	908484,8	902169,6	0,000892	1703409	1691568
3317	0,006045	0,006045	0,000484	923538	917118,1	0,000907	1731634	1719596
3417	0,006228	0,006228	0,000498	951479,5	944865,4	0,000934	1784024	1771623
3517	0,006304	0,006304	0,000504	963124,6	956429,6	0,000946	1805859	1793305
3617	0,006373	0,006373	0,00051	973562,5	966795	0,000956	1825430	1812741
3717	0,006272	0,006272	0,000502	958154,8	951494,4	0,000941	1796540	1784052
3817	0,006334	0,006334	0,000507	967651,1	960924,6	0,00095	1814346	1801734
3917	0,006313	0,006313	0,000505	964478,8	957774,4	0,000947	1808398	1795827
4017	0,006366	0,006366	0,000509	972453,8	965693,9	0,000955	1823351	1810676
4117	0,006341	0,006341	0,000507	968723,7	961989,7	0,000951	1816357	1803731
4217	0,006281	0,006281	0,000502	959553,8	952883,6	0,000942	1799163	1786657
4317	0,006323	0,006323	0,000506	966027,8	959312,6	0,000949	1811302	1798711
4417	0,006391	0,006391	0,000511	976343,3	969556,4	0,000959	1830644	1817918
4517	0,006506	0,006506	0,00052	993907,2	986998,2	0,000976	1863576	1850622
4617	0,006525	0,006525	0,000522	996765,9	989837	0,000979	1868936	1855944
4717	0,006612	0,006612	0,000529	1010138	1003116	0,000992	1894009	1880843
4817	0,00664	0,00664	0,000531	1014359	1007308	0,000996	1901923	1888702
4917	0,00664	0,00664	0,000531	1014310	1007260	0,000996	1901832	1888612
5017	0,006595	0,006595	0,000528	1007495	1000492	0,000989	1889054	1875922
5117	0,00657	0,00657	0,000526	1003679	996701,7	0,000985	1881897	1868816
5217	0,006543	0,006543	0,000523	999621,5	992672,8	0,000982	1874290	1861261
5317	0,006533	0,006533	0,000523	998071,6	991133,7	0,00098	1871384	1858376
5417	0,006486	0,006486	0,000519	990831,3	983943,6	0,000973	1857809	1844894
5517	0,006455	0,006455	0,000516	986125,1	979270,2	0,000968	1848985	1836132
5617	0,006439	0,006439	0,000515	983623,8	976786,3	0,000966	1844295	1831474
5717	0,006419	0,006419	0,000514	980692,1	973875	0,000963	1838798	1826016
5817	0,006398	0,005758	0,000512	977356,6	970562,6	0,00096	1832544	1819805
5917	0,006417	0,005535	0,000513	980392,1	973577	0,000963	1838235	1825457
6017	0,0064	0,00528	0,000512	977652,4	970856,4	0,00096	1833098	1820356
6117	0,006373	0,005019	0,00051	973556,3	966788,8	0,000956	1825418	1812729
6217	0,006348	0,004761	0,000508	969817,5	963076	0,000952	1818408	1805767
6317	0,006312	0,004497	0,000505	964218,2	957515,6	0,000947	1807909	1795342
6417	0,006282	0,00424	0,000503	959681,3	953010,2	0,000942	1799402	1786894

## ПРИЛОЖЕНИЕ 5

### Скорость заряжения града переохлажденными каплями

Н, м	$ \Delta q $	$  \Delta q $ раствор	dQ/dt умеренн	dQ/dt умер-раст	dQ/dt тропик	dQ/dt тропик-раст
117						
217						
317						
417						
517						
617						
717	0	0	0	0	0	0
817	7,92E-16	-7,9E-16	0	0	0	0
917	7,92E-16	-7,9E-16	2,69E-15	-2,7E-15	5,04E-15	-5E-15
1017	7,92E-16	-7,9E-16	1,71E-14	-1,7E-14	3,2E-14	-3,2E-14
1117	7,92E-16	-7,9E-16	2,38E-14	-2,4E-14	4,45E-14	-4,4E-14
1217	7,92E-16	-7,9E-16	3,42E-14	-3,4E-14	6,42E-14	-6,4E-14
1317	7,92E-16	-7,9E-16	3,8E-14	-3,8E-14	7,13E-14	-7,1E-14
1417	7,92E-16	-7,9E-16	4,73E-14	-4,7E-14	8,87E-14	-8,8E-14
1517	7,92E-16	-7,9E-16	5,24E-14	-5,2E-14	9,82E-14	-9,8E-14
1617	7,92E-16	-7,9E-16	5,55E-14	-5,5E-14	1,04E-13	-1E-13
1717	7,92E-16	-7,9E-16	6E-14	-6E-14	1,13E-13	-1,1E-13
1817	7,92E-16	-7,9E-16	6,43E-14	-6,4E-14	1,21E-13	-1,2E-13
1917	7,92E-16	-7,9E-16	6,68E-14	-6,6E-14	1,25E-13	-1,2E-13
2017	7,92E-16	-7,9E-16	6,48E-14	-6,4E-14	1,22E-13	-1,2E-13
2117	7,92E-16	-7,9E-16	7,56E-14	-7,5E-14	1,42E-13	-1,4E-13
2217	7,92E-16	-7,9E-16	8,07E-14	-8E-14	1,51E-13	-1,5E-13
2317	7,92E-16	-7,9E-16	8,13E-14	-8,1E-14	1,52E-13	-1,5E-13
2417	7,92E-16	-7,9E-16	8,47E-14	-8,4E-14	1,59E-13	-1,6E-13

2517	7,92E-16	-7,9E-16	8,79E-14	-8,7E-14	1,65E-13	-1,6E-13
2617	7,92E-16	-7,9E-16	8,71E-14	-8,7E-14	1,63E-13	-1,6E-13
2717	7,92E-16	-7,9E-16	8,85E-14	-8,8E-14	1,66E-13	-1,6E-13
2817	7,92E-16	-7,9E-16	9,27E-14	-9,2E-14	1,74E-13	-1,7E-13
2917	7,92E-16	-7,9E-16	9,28E-14	-9,2E-14	1,74E-13	-1,7E-13
3017	7,92E-16	-7,9E-16	9,56E-14	-9,5E-14	1,79E-13	-1,8E-13
3117	7,92E-16	-7,9E-16	9,65E-14	-9,6E-14	1,81E-13	-1,8E-13
3217	7,92E-16	-7,9E-16	9,56E-14	-9,5E-14	1,79E-13	-1,8E-13
3317	7,92E-16	-7,9E-16	9,72E-14	-9,7E-14	1,82E-13	-1,8E-13
3417	7,92E-16	-7,9E-16	1E-13	-9,9E-14	1,88E-13	-1,9E-13
3517	7,92E-16	-7,9E-16	1,01E-13	-1E-13	1,9E-13	-1,9E-13
3617	7,92E-16	-7,9E-16	1,02E-13	-1E-13	1,92E-13	-1,9E-13
3717	7,92E-16	-7,9E-16	1,01E-13	-1E-13	1,89E-13	-1,9E-13
3817	7,92E-16	-7,9E-16	1,02E-13	-1E-13	1,91E-13	-1,9E-13
3917	7,92E-16	-7,9E-16	1,01E-13	-1E-13	1,9E-13	-1,9E-13
4017	7,92E-16	-7,9E-16	1,02E-13	-1E-13	1,92E-13	-1,9E-13
4117	7,92E-16	-7,9E-16	1,02E-13	-1E-13	1,91E-13	-1,9E-13
4217	7,92E-16	-7,9E-16	1,01E-13	-1E-13	1,89E-13	-1,9E-13
4317	7,92E-16	-7,9E-16	1,02E-13	-1E-13	1,9E-13	-1,9E-13
4417	7,92E-16	-7,9E-16	1,03E-13	-1E-13	1,92E-13	-1,9E-13
4517	7,92E-16	-7,9E-16	1,04E-13	-1E-13	1,96E-13	-1,9E-13
4617	7,92E-16	-7,9E-16	1,05E-13	-1E-13	1,96E-13	-2E-13
4717	7,92E-16	-7,9E-16	1,06E-13	-1,1E-13	1,99E-13	-2E-13
4817	7,92E-16	-7,9E-16	1,07E-13	-1,1E-13	2E-13	-2E-13
4917	7,92E-16	-7,9E-16	1,07E-13	-1,1E-13	2E-13	-2E-13
5017	7,92E-16	-7,9E-16	1,06E-13	-1,1E-13	1,98E-13	-2E-13
5117	7,92E-16	-7,9E-16	1,05E-13	-1E-13	1,98E-13	-2E-13
5217	7,92E-16	-7,9E-16	1,05E-13	-1E-13	1,97E-13	-2E-13
5317	7,92E-16	-7,9E-16	1,05E-13	-1E-13	1,97E-13	-2E-13
5417	7,92E-16	-7,9E-16	1,04E-13	-1E-13	1,95E-13	-1,9E-13
5517	7,92E-16	-7,9E-16	1,04E-13	-1E-13	1,94E-13	-1,9E-13

5617	7,92E-16	-7,9E-16	1,03E-13	-1E-13	1,94E-13	-1,9E-13
5717	7,92E-16	-7,9E-16	1,03E-13	-1E-13	1,93E-13	-1,9E-13
5817	7,92E-16	-7,9E-16	1,03E-13	-1E-13	1,92E-13	-1,9E-13
5917	7,92E-16	-7,9E-16	1,03E-13	-1E-13	1,93E-13	-1,9E-13
6017	7,92E-16	-7,9E-16	1,03E-13	-1E-13	1,92E-13	-1,9E-13
6117	7,92E-16	-7,9E-16	1,02E-13	-1E-13	1,92E-13	-1,9E-13
6217	7,92E-16	-7,9E-16	1,02E-13	-1E-13	1,91E-13	-1,9E-13
6317	7,92E-16	-7,9E-16	9,08E-14	-9E-14	1,7E-13	-1,7E-13
6417	7,92E-16	-7,9E-16	7,37E-14	-7,3E-14	1,38E-13	-1,4E-13

## ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Накопленный заряд града в объеме слоя за промежутки времени

	1517	1417	1317	1217	1117	1017	917	817	717	Высота, м
0,00031	0,00029	0,00024	0,00022	0,00016	0,00012	0,00002	0,00000	0,00000	0,00000	Q_уумер. 1сек
-0,00031	-0,00029	-0,00024	-0,00022	-0,00016	-0,00012	-0,00002	0,00000	0,00000	0,00000	Q_уум-р-р. 1сек
0,00059	0,00054	0,00045	0,00041	0,00029	0,00022	0,00004	0,00000	0,00000	0,00000	Q_тропк 1 сек
-0,00058	-0,00054	-0,00044	-0,00041	-0,00029	-0,00022	-0,00004	0,00000	0,00000	0,00000	Q_тропк_р-р 1с
0,00094	0,00087	0,00072	0,00066	0,00047	0,00035	0,00006	0,00000	0,00000	0,00000	Q_уумер. 30 сек
-0,00093	-0,00086	-0,00071	-0,00066	-0,00047	-0,00035	-0,00006	0,00000	0,00000	0,00000	Q_уум-р-р. 30 сек
0,0176	0,0163	0,0134	0,0124	0,0088	0,0066	0,0011	0,00000	0,00000	0,00000	Q_троп 30 сек
-0,0175	-0,0162	-0,0133	-0,0123	-0,0088	-0,0065	-0,0011	0,00000	0,00000	0,00000	Q_тро_р_р сек
0,012	0,011	0,009	0,008	0,006	0,004	0,001	0,000	0,000	0,000	Q_уумер. 1 мин
-0,019	-0,018	-0,015	-0,013	-0,010	-0,007	-0,001	0,000	0,000	0,000	Q_уум-р-р. 1мин
0,036	0,033	0,028	0,025	0,018	0,014	0,003	0,000	0,000	0,000	Q_тропк 1 мин
-0,036	-0,033	-0,027	-0,025	-0,018	-0,013	-0,003	0,000	0,000	0,000	Q_тропк_р-р 1мин
0,094	0,087	0,072	0,066	0,047	0,035	0,006	0,000	0,000	0,000	Q_уумер. 5 мин
-0,093	-0,086	-0,071	-0,066	-0,047	-0,035	-0,006	0,000	0,000	0,000	Q_уум-р-р. 5 мин
0,176	0,163	0,134	0,124	0,088	0,066	0,011	0,000	0,000	0,000	Q_тропк 5 мин
-0,175	-0,162	-0,133	-0,123	-0,088	-0,065	-0,011	0,000	0,000	0,000	Q_тропк_р-р 5мин
0,188	0,174	0,143	0,132	0,094	0,070	0,011	0,000	0,000	0,000	Q_уумер. 10 мин
-0,186	-0,172	-0,142	-0,131	-0,094	-0,069	-0,011	0,000	0,000	0,000	Q_уум-р-р. 10 мин
0,352	0,325	0,268	0,248	0,177	0,131	0,021	0,000	0,000	0,000	Q_тропк 10 мин
-0,350	-0,323	-0,266	-0,246	-0,176	-0,130	-0,021	0,000	0,000	0,000	Q_тропк_р-р 10 мин

2817	2717	2617	2517	2417	2317	2217	2117	2017	1917	1817	1717	1617
0,00046	0,00044	0,00044	0,00045	0,00043	0,00042	0,00043	0,00040	0,00035	0,00037	0,00036	0,00034	0,00032
-0,00045	-0,00044	-0,00043	-0,00044	-0,00043	-0,00042	-0,00042	-0,00040	-0,00035	-0,00037	-0,00036	-0,00034	-0,00032
0,00085	0,00082	0,00082	0,00084	0,00082	0,00079	0,00080	0,00076	0,00066	0,00069	0,00068	0,00064	0,00061
-0,00085	-0,00082	-0,00081	-0,00083	-0,00081	-0,00079	-0,00079	-0,00075	-0,00066	-0,00069	-0,00067	-0,00064	-0,00060
0,0137	0,0132	0,0131	0,0134	0,0130	0,0127	0,0128	0,0121	0,0106	0,0111	0,0108	0,0103	0,0097
-0,0136	-0,0131	-0,0130	-0,0133	-0,0130	-0,0126	-0,0127	-0,0120	-0,0105	-0,0110	-0,0108	-0,0102	-0,0097
0,0256	0,0247	0,0246	0,0251	0,0245	0,0238	0,0239	0,0227	0,0198	0,0207	0,0203	0,0193	0,0182
-0,0255	-0,0245	-0,0244	-0,0249	-0,0243	-0,0236	-0,0238	-0,0226	-0,0197	-0,0206	-0,0202	-0,0192	-0,0181
0,020	0,019	0,018	0,019	0,018	0,017	0,017	0,016	0,014	0,014	0,014	0,013	0,012
-0,028	-0,027	-0,026	-0,027	-0,026	-0,026	-0,026	-0,024	-0,021	-0,022	-0,022	-0,021	-0,020
0,052	0,050	0,050	0,051	0,050	0,048	0,049	0,046	0,040	0,042	0,041	0,039	0,037
-0,052	-0,050	-0,050	-0,051	-0,049	-0,048	-0,048	-0,046	-0,040	-0,042	-0,041	-0,039	-0,037
0,137	0,132	0,131	0,134	0,130	0,127	0,128	0,121	0,106	0,111	0,108	0,103	0,097
-0,136	-0,131	-0,130	-0,133	-0,130	-0,126	-0,127	-0,120	-0,105	-0,110	-0,108	-0,102	-0,097
0,256	0,247	0,246	0,251	0,245	0,238	0,239	0,227	0,198	0,207	0,203	0,193	0,182
-0,255	-0,245	-0,244	-0,249	-0,243	-0,236	-0,238	-0,226	-0,197	-0,206	-0,202	-0,192	-0,181
0,273	0,264	0,262	0,267	0,261	0,253	0,255	0,242	0,211	0,221	0,217	0,206	0,194
-0,272	-0,262	-0,260	-0,266	-0,259	-0,252	-0,253	-0,241	-0,210	-0,220	-0,215	-0,205	-0,193
0,513	0,494	0,492	0,501	0,489	0,475	0,478	0,454	0,396	0,415	0,406	0,387	0,365
-0,509	-0,491	-0,488	-0,498	-0,486	-0,472	-0,475	-0,451	-0,393	-0,412	-0,404	-0,384	-0,362

4117	4017	3917	3817	3717	3617	3517	3417	3317	3217	3117	3017	2917
0,00047	0,00047	0,00047	0,00047	0,00047	0,00048	0,00047	0,00047	0,00046	0,00046	0,00046	0,00046	0,00045
-0,00046	-0,00047	-0,00046	-0,00047	-0,00046	-0,00047	-0,00047	-0,00047	-0,00046	-0,00045	-0,00046	-0,00046	-0,00045
0,00087	0,00088	0,00087	0,00088	0,00088	0,00089	0,00089	0,00088	0,00086	0,00085	0,00087	0,00087	0,00085
-0,00087	-0,00087	-0,00087	-0,00087	-0,00087	-0,00089	-0,00088	-0,00088	-0,00086	-0,00085	-0,00086	-0,00086	-0,00084
0,0140	0,0141	0,0140	0,0141	0,0140	0,0143	0,0142	0,0141	0,0138	0,0137	0,0139	0,0139	0,0136
-0,0139	-0,0140	-0,0139	-0,0140	-0,0139	-0,0142	-0,0141	-0,0140	-0,0137	-0,0136	-0,0138	-0,0138	-0,0135
0,0262	0,0264	0,0262	0,0264	0,0263	0,0268	0,0267	0,0265	0,0259	0,0256	0,0260	0,0260	0,0254
-0,0260	-0,0262	-0,0260	-0,0262	-0,0261	-0,0266	-0,0265	-0,0263	-0,0257	-0,0254	-0,0258	-0,0258	-0,0253
0,023	0,023	0,023	0,023	0,022	0,023	0,022	0,022	0,021	0,021	0,021	0,020	0,020
-0,028	-0,028	-0,028	-0,028	-0,028	-0,029	-0,029	-0,028	-0,028	-0,028	-0,028	-0,028	-0,027
0,053	0,054	0,053	0,054	0,053	0,054	0,054	0,054	0,053	0,052	0,053	0,053	0,052
-0,053	-0,053	-0,053	-0,053	-0,053	-0,054	-0,054	-0,053	-0,052	-0,052	-0,052	-0,052	-0,051
0,140	0,141	0,140	0,141	0,140	0,143	0,142	0,141	0,138	0,137	0,139	0,139	0,136
-0,139	-0,140	-0,139	-0,140	-0,139	-0,142	-0,141	-0,140	-0,137	-0,136	-0,138	-0,138	-0,135
0,262	0,264	0,262	0,264	0,263	0,268	0,267	0,265	0,259	0,256	0,260	0,260	0,254
-0,260	-0,262	-0,260	-0,262	-0,261	-0,266	-0,265	-0,263	-0,257	-0,254	-0,258	-0,258	-0,253
0,279	0,281	0,280	0,282	0,280	0,286	0,284	0,282	0,276	0,273	0,278	0,277	0,271
-0,277	-0,279	-0,278	-0,280	-0,278	-0,284	-0,282	-0,280	-0,274	-0,271	-0,276	-0,275	-0,269
0,523	0,527	0,524	0,528	0,525	0,536	0,533	0,530	0,517	0,512	0,520	0,520	0,509
-0,520	-0,523	-0,521	-0,524	-0,522	-0,532	-0,529	-0,526	-0,514	-0,508	-0,517	-0,516	-0,505

5417	5317	5217	5117	5017	4917	4817	4717	4617	4517	4417	4317	4217
0,00047	0,00047	0,00048	0,00048	0,00048	0,00048	0,00048	0,00048	0,00047	0,00047	0,00047	0,00046	0,00046
-0,00047	-0,00047	-0,00047	-0,00047	-0,00048	-0,00048	-0,00048	-0,00048	-0,00047	-0,00047	-0,00046	-0,00046	-0,00046
0,00088	0,00089	0,00089	0,00089	0,00090	0,00090	0,00090	0,00090	0,00089	0,00089	0,00087	0,00087	0,00086
-0,00088	-0,00088	-0,00088	-0,00089	-0,00089	-0,00090	-0,00090	-0,00089	-0,00088	-0,00088	-0,00087	-0,00086	-0,00086
0,0142	0,0142	0,0143	0,0143	0,0144	0,0145	0,0145	0,0144	0,0142	0,0142	0,0140	0,0139	0,0138
-0,0141	-0,0141	-0,0142	-0,0142	-0,0143	-0,0144	-0,0144	-0,0143	-0,0141	-0,0141	-0,0139	-0,0138	-0,0137
0,0265	0,0267	0,0268	0,0268	0,0269	0,0271	0,0271	0,0270	0,0267	0,0266	0,0262	0,0260	0,0259
-0,0264	-0,0265	-0,0266	-0,0266	-0,0267	-0,0269	-0,0269	-0,0268	-0,0265	-0,0264	-0,0260	-0,0258	-0,0257
0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,026	0,025	0,025	0,024	0,024	0,023	0,023
-0,029	-0,029	-0,029	-0,029	-0,029	-0,029	-0,029	-0,029	-0,029	-0,029	-0,028	-0,028	-0,028
0,054	0,054	0,054	0,054	0,055	0,055	0,055	0,055	0,054	0,054	0,053	0,053	0,053
-0,054	-0,054	-0,054	-0,054	-0,054	-0,055	-0,055	-0,054	-0,054	-0,054	-0,053	-0,052	-0,052
0,142	0,142	0,143	0,143	0,144	0,145	0,145	0,144	0,142	0,142	0,140	0,139	0,138
-0,141	-0,141	-0,142	-0,142	-0,143	-0,144	-0,144	-0,143	-0,141	-0,141	-0,139	-0,138	-0,137
0,265	0,267	0,268	0,268	0,269	0,271	0,271	0,270	0,267	0,266	0,262	0,260	0,259
-0,264	-0,265	-0,266	-0,266	-0,267	-0,269	-0,269	-0,268	-0,265	-0,264	-0,260	-0,258	-0,257
0,283	0,285	0,285	0,286	0,287	0,289	0,289	0,288	0,285	0,284	0,279	0,277	0,276
-0,281	-0,283	-0,283	-0,284	-0,285	-0,287	-0,287	-0,286	-0,283	-0,282	-0,278	-0,275	-0,274
0,531	0,534	0,535	0,536	0,538	0,542	0,542	0,540	0,534	0,533	0,524	0,519	0,517
-0,527	-0,530	-0,531	-0,533	-0,535	-0,538	-0,538	-0,536	-0,530	-0,529	-0,520	-0,516	-0,514

6417	6317	6217	6117	6017	5917	5817	5717	5617	5517
0,00038	0,00045	0,00048	0,00047	0,00047	0,00047	0,00047	0,00047	0,00047	0,00047
-0,00038	-0,00044	-0,00047	-0,00047	-0,00047	-0,00047	-0,00046	-0,00047	-0,00047	-0,00047
0,00072	0,00084	0,00089	0,00088	0,00088	0,00088	0,00088	0,00088	0,00088	0,00088
-0,00071	-0,00083	-0,00089	-0,00087	-0,00088	-0,00088	-0,00087	-0,00087	-0,00087	-0,00088
0,0115	0,0134	0,0143	0,0141	0,0141	0,0141	0,0140	0,0141	0,0141	0,0141
-0,0114	-0,0133	-0,0142	-0,0140	-0,0140	-0,0140	-0,0139	-0,0140	-0,0140	-0,0140
0,0215	0,0251	0,0268	0,0264	0,0265	0,0265	0,0263	0,0264	0,0264	0,0264
-0,0213	-0,0249	-0,0267	-0,0262	-0,0263	-0,0263	-0,0262	-0,0262	-0,0262	-0,0263
0,023	0,027	0,029	0,028	0,028	0,028	0,027	0,027	0,027	0,027
-0,023	-0,027	-0,029	-0,028	-0,028	-0,028	-0,028	-0,028	-0,028	-0,028
0,044	0,051	0,055	0,054	0,054	0,054	0,054	0,054	0,054	0,054
-0,043	-0,051	-0,054	-0,053	-0,053	-0,053	-0,053	-0,053	-0,053	-0,053
0,115	0,134	0,143	0,141	0,141	0,141	0,140	0,141	0,141	0,141
-0,114	-0,133	-0,142	-0,140	-0,140	-0,140	-0,139	-0,140	-0,140	-0,140
0,215	0,251	0,268	0,264	0,265	0,265	0,263	0,264	0,264	0,264
-0,213	-0,249	-0,267	-0,262	-0,263	-0,263	-0,262	-0,262	-0,262	-0,263
0,229	0,267	0,286	0,282	0,282	0,282	0,281	0,281	0,282	0,282
-0,227	-0,265	-0,284	-0,280	-0,280	-0,280	-0,279	-0,279	-0,280	-0,280
0,429	0,501	0,537	0,528	0,529	0,530	0,527	0,528	0,528	0,529
-0,426	-0,498	-0,533	-0,525	-0,526	-0,526	-0,523	-0,524	-0,525	-0,525

## ПРИЛОЖЕНИЕ 7

Перенос заряда градами при падании через объемы слоев за промежуток времени

	1517	1417	1317	1217	1117	1017	917	817	717	Высота, м
0,00063	0,00058	0,00048	0,00044	0,00032	0,00023	0,00004	0,00000	0,00000	0,00000	Q_уумер. 1сек
-0,00062	-0,00058	-0,00048	-0,00044	-0,00032	-0,00023	-0,00004	0,00000	0,00000	0,00000	Q_уум-р-р. 1сек
0,00117	0,00109	0,00090	0,00083	0,00060	0,00044	0,00008	0,00000	0,00000	0,00000	Q_тропк 1 сек
-0,00117	-0,00108	-0,00089	-0,00082	-0,00059	-0,00044	-0,00008	0,00000	0,00000	0,00000	Q_тропк_р-р 1сек
0,00097	0,00090	0,00075	0,00068	0,00050	0,00037	0,00007	0,00000	0,00000	0,00000	Q_уумер. 30 сек
-0,00096	-0,00089	-0,00074	-0,00068	-0,00049	-0,00036	-0,00007	0,00000	0,00000	0,00000	Q_уум-р-р. 30 сек
0,0182	0,0169	0,0140	0,0128	0,0093	0,0069	0,0014	0,00001	0,00000	0,00000	Q_троп 30 сек
-0,0181	-0,0167	-0,0139	-0,0127	-0,0092	-0,0068	-0,0014	0,00000	-0,00001	0,00000	Q_тро_р -р 30сек
0,0188	0,0174	0,0143	0,0132	0,0094	0,0070	0,0011	0,00000	0,00000	0,00000	Q_уумер. 1 мин
-0,0186	-0,0172	-0,0142	-0,0131	-0,0094	-0,0069	-0,0011	0,00000	0,00000	0,00000	Q_уум-р-р. 1мин
0,0352	0,0325	0,0268	0,0248	0,0177	0,0131	0,0021	0,00000	0,00000	0,00000	Q_тропк 1 мин
-0,0350	-0,0323	-0,0266	-0,0246	-0,0176	-0,0130	-0,0021	0,00000	0,00000	0,00000	Q_тропк_р-р 1мин
0,0942	0,0873	0,0724	0,0665	0,0482	0,0356	0,0072	0,00003	0,00000	0,00000	Q_уумер. 5 мин
-0,0936	-0,0867	-0,0719	-0,0660	-0,0479	-0,0354	-0,0071	-0,00003	0,00000	0,00000	Q_уум-р-р. 5 мин
0,1767	0,1637	0,1357	0,1246	0,0904	0,0668	0,0134	0,00005	0,00000	0,00000	Q_тропк 5 мин
-0,1754	-0,1626	-0,1348	-0,1238	-0,0898	-0,0663	-0,0133	-0,00005	0,00000	0,00000	Q_тропк_р-р 5мин
0,1881	0,1743	0,1445	0,1327	0,0963	0,0712	0,0143	0,00006	0,00000	0,00000	Q_уумер. 10 мин
-0,1868	-0,1731	-0,1435	-0,1318	-0,0956	-0,0707	-0,0142	-0,00006	0,00000	0,00000	Q_уум-р-р. 10 мин
0,3528	0,3268	0,2710	0,2489	0,1805	0,1334	0,0268	0,0011	0,00000	0,00000	Q_тропк 10 мин
-0,3503	-0,3246	-0,2691	-0,2471	-0,1792	-0,1325	-0,0266	-0,0011	0,00000	0,00000	Q_тропк_р-р 10 мин

2817	2717	2617	2517	2417	2317	2217	2117	2017	1917	1817	1717	1617
0,00091	0,00088	0,00087	0,00089	0,00087	0,00084	0,00085	0,00081	0,00071	0,00074	0,00072	0,00069	0,00065
-0,00090	-0,00087	-0,00087	-0,00088	-0,00086	-0,00084	-0,00084	-0,00080	-0,00070	-0,00073	-0,00072	-0,00068	-0,00064
0,00171	0,00165	0,00164	0,00167	0,00163	0,00158	0,00159	0,00152	0,00132	0,00138	0,00135	0,00129	0,00122
-0,00170	-0,00164	-0,00163	-0,00166	-0,00162	-0,00157	-0,00158	-0,00150	-0,00131	-0,00137	-0,00135	-0,00128	-0,00121
0,0141	0,0136	0,0135	0,0138	0,0135	0,0131	0,0132	0,0125	0,0110	0,0114	0,0112	0,0107	0,0101
-0,0140	-0,0135	-0,0134	-0,0137	-0,0134	-0,0130	-0,0131	-0,0124	-0,0109	-0,0113	-0,0111	-0,0106	-0,0100
0,0265	0,0255	0,0254	0,0259	0,0253	0,0246	0,0247	0,0235	0,0205	0,0214	0,0210	0,0200	0,0189
-0,0263	-0,0254	-0,0252	-0,0257	-0,0251	-0,0244	-0,0245	-0,0233	-0,0204	-0,0212	-0,0208	-0,0199	-0,0187
0,0273	0,0264	0,0262	0,0267	0,0261	0,0253	0,0255	0,0242	0,0211	0,0221	0,0217	0,0206	0,0194
-0,0272	-0,0262	-0,0260	-0,0266	-0,0259	-0,0252	-0,0253	-0,0241	-0,0210	-0,0220	-0,0215	-0,0205	-0,0193
0,0513	0,0494	0,0492	0,0501	0,0489	0,0475	0,0478	0,0454	0,0396	0,0415	0,0406	0,0387	0,0365
-0,0509	-0,0491	-0,0488	-0,0498	-0,0486	-0,0472	-0,0475	-0,0451	-0,0393	-0,0412	-0,0404	-0,0384	-0,0362
0,1370	0,1322	0,1314	0,1340	0,1309	0,1272	0,1279	0,1217	0,1064	0,1107	0,1087	0,1036	0,0977
-0,1361	-0,1313	-0,1305	-0,1330	-0,1299	-0,1263	-0,1270	-0,1209	-0,1057	-0,1099	-0,1080	-0,1028	-0,0970
0,2569	0,2480	0,2464	0,2512	0,2454	0,2384	0,2397	0,2282	0,1995	0,2076	0,2038	0,1942	0,1832
-0,2551	-0,2462	-0,2447	-0,2494	-0,2436	-0,2368	-0,2381	-0,2266	-0,1981	-0,2061	-0,2024	-0,1928	-0,1819
0,2736	0,2640	0,2624	0,2675	0,2613	0,2539	0,2553	0,2430	0,2124	0,2210	0,2171	0,2068	0,1951
-0,2717	-0,2622	-0,2606	-0,2656	-0,2595	-0,2521	-0,2535	-0,2413	-0,2110	-0,2195	-0,2156	-0,2053	-0,1937
0,5129	0,4951	0,4921	0,5015	0,4899	0,4760	0,4787	0,4556	0,3983	0,4144	0,4070	0,3877	0,3658
-0,5094	-0,4916	-0,4886	-0,4980	-0,4865	-0,4727	-0,4754	-0,4525	-0,3956	-0,4115	-0,4042	-0,3850	-0,3633

4117	4017	3917	3817	3717	3617	3517	3417	3317	3217	3117	3017	2917
0,00093	0,00094	0,00093	0,00094	0,00093	0,00095	0,00095	0,00094	0,00092	0,00091	0,00092	0,00092	0,00090
-0,00092	-0,00093	-0,00093	-0,00093	-0,00093	-0,00095	-0,00094	-0,00093	-0,00091	-0,00090	-0,00092	-0,00092	-0,00090
0,00174	0,00176	0,00175	0,00176	0,00175	0,00179	0,00178	0,00176	0,00172	0,00171	0,00173	0,00173	0,00170
-0,00173	-0,00174	-0,00174	-0,00175	-0,00174	-0,00177	-0,00176	-0,00175	-0,00171	-0,00169	-0,00172	-0,00172	-0,00168
0,0144	0,0145	0,0144	0,0145	0,0145	0,0148	0,0147	0,0146	0,0142	0,0141	0,0143	0,0143	0,0140
-0,0143	-0,0144	-0,0143	-0,0144	-0,0144	-0,0146	-0,0146	-0,0145	-0,0141	-0,0140	-0,0142	-0,0142	-0,0139
0,0270	0,0272	0,0271	0,0273	0,0271	0,0277	0,0275	0,0273	0,0267	0,0264	0,0269	0,0268	0,0263
-0,0268	-0,0270	-0,0269	-0,0271	-0,0269	-0,0275	-0,0273	-0,0271	-0,0265	-0,0263	-0,0267	-0,0266	-0,0261
0,0279	0,0281	0,0280	0,0282	0,0280	0,0286	0,0284	0,0282	0,0276	0,0273	0,0278	0,0277	0,0271
-0,0277	-0,0279	-0,0278	-0,0280	-0,0278	-0,0284	-0,0282	-0,0280	-0,0274	-0,0271	-0,0276	-0,0275	-0,0269
0,0523	0,0527	0,0524	0,0528	0,0525	0,0536	0,0533	0,0530	0,0517	0,0512	0,0520	0,0520	0,0509
-0,0520	-0,0523	-0,0521	-0,0524	-0,0522	-0,0532	-0,0529	-0,0526	-0,0514	-0,0508	-0,0517	-0,0516	-0,0505
0,1399	0,1409	0,1402	0,1412	0,1404	0,1432	0,1425	0,1416	0,1383	0,1369	0,1391	0,1390	0,1361
-0,1389	-0,1399	-0,1392	-0,1402	-0,1394	-0,1422	-0,1415	-0,1406	-0,1374	-0,1360	-0,1381	-0,1380	-0,1351
0,2623	0,2641	0,2629	0,2647	0,2633	0,2686	0,2672	0,2655	0,2593	0,2567	0,2607	0,2605	0,2552
-0,2605	-0,2623	-0,2611	-0,2628	-0,2614	-0,2667	-0,2653	-0,2636	-0,2575	-0,2549	-0,2589	-0,2587	-0,2534
0,2793	0,2812	0,2799	0,2819	0,2803	0,2860	0,2845	0,2827	0,2762	0,2734	0,2777	0,2774	0,2717
-0,2774	-0,2793	-0,2780	-0,2799	-0,2784	-0,2840	-0,2826	-0,2807	-0,2743	-0,2715	-0,2757	-0,2755	-0,2698
0,5237	0,5273	0,5249	0,5285	0,5256	0,5362	0,5335	0,5300	0,5178	0,5126	0,5206	0,5202	0,5095
-0,5201	-0,5237	-0,5213	-0,5248	-0,5220	-0,5325	-0,5298	-0,5263	-0,5142	-0,5090	-0,5170	-0,5166	-0,5060

5417	5317	5217	5117	5017	4917	4817	4717	4617	4517	4417	4317	4217
0,00094	0,00095	0,00095	0,00095	0,00096	0,00096	0,00096	0,00096	0,00095	0,00095	0,00093	0,00092	0,00092
-0,00094	-0,00094	-0,00094	-0,00095	-0,00095	-0,00096	-0,00096	-0,00095	-0,00094	-0,00094	-0,00092	-0,00092	-0,00091
0,00177	0,00178	0,00178	0,00179	0,00179	0,00181	0,00181	0,00180	0,00178	0,00177	0,00175	0,00173	0,00172
-0,00176	-0,00177	-0,00177	-0,00177	-0,00178	-0,00179	-0,00179	-0,00179	-0,00177	-0,00176	-0,00173	-0,00172	-0,00171
0,0146	0,0147	0,0147	0,0148	0,0148	0,0149	0,0149	0,0149	0,0147	0,0147	0,0144	0,0143	0,0142
-0,0145	-0,0146	-0,0146	-0,0147	-0,0147	-0,0148	-0,0148	-0,0148	-0,0146	-0,0146	-0,0143	-0,0142	-0,0141
0,0274	0,0276	0,0276	0,0277	0,0278	0,0280	0,0280	0,0279	0,0275	0,0275	0,0271	0,0268	0,0267
-0,0272	-0,0274	-0,0274	-0,0275	-0,0276	-0,0278	-0,0278	-0,0277	-0,0274	-0,0273	-0,0269	-0,0266	-0,0265
0,0283	0,0285	0,0285	0,0286	0,0287	0,0289	0,0289	0,0288	0,0285	0,0284	0,0279	0,0277	0,0276
-0,0281	-0,0283	-0,0283	-0,0284	-0,0285	-0,0287	-0,0287	-0,0286	-0,0283	-0,0282	-0,0278	-0,0275	-0,0274
0,0531	0,0534	0,0535	0,0536	0,0538	0,0542	0,0542	0,0540	0,0534	0,0533	0,0524	0,0519	0,0517
-0,0527	-0,0530	-0,0531	-0,0533	-0,0535	-0,0538	-0,0538	-0,0536	-0,0530	-0,0529	-0,0520	-0,0516	-0,0514
0,1419	0,1428	0,1429	0,1434	0,1439	0,1449	0,1449	0,1444	0,1426	0,1424	0,1401	0,1389	0,1382
-0,1409	-0,1418	-0,1419	-0,1424	-0,1429	-0,1439	-0,1439	-0,1434	-0,1417	-0,1414	-0,1391	-0,1379	-0,1373
0,2660	0,2677	0,2679	0,2688	0,2698	0,2716	0,2717	0,2708	0,2675	0,2670	0,2627	0,2604	0,2592
-0,2641	-0,2658	-0,2660	-0,2670	-0,2679	-0,2697	-0,2698	-0,2689	-0,2656	-0,2651	-0,2609	-0,2586	-0,2574
0,2833	0,2850	0,2853	0,2863	0,2873	0,2892	0,2894	0,2883	0,2848	0,2843	0,2798	0,2773	0,2760
-0,2813	-0,2831	-0,2833	-0,2843	-0,2853	-0,2872	-0,2874	-0,2863	-0,2828	-0,2823	-0,2778	-0,2754	-0,2741
0,5311	0,5344	0,5349	0,5368	0,5387	0,5423	0,5426	0,5406	0,5340	0,5330	0,5246	0,5199	0,5176
-0,5274	-0,5307	-0,5312	-0,5331	-0,5350	-0,5386	-0,5388	-0,5369	-0,5303	-0,5293	-0,5209	-0,5163	-0,5140

6417	6317	6217	6117	6017	5917	5817	5717	5617	5517
0,00076	0,00089	0,00095	0,00094	0,00094	0,00094	0,00094	0,00094	0,00094	0,00094
-0,00076	-0,00088	-0,00095	-0,00093	-0,00093	-0,00093	-0,00093	-0,00093	-0,00093	-0,00093
0,00143	0,00167	0,00179	0,00176	0,00176	0,00176	0,00176	0,00176	0,00176	0,00176
-0,00142	-0,00166	-0,00178	-0,00175	-0,00175	-0,00175	-0,00174	-0,00175	-0,00175	-0,00175
0,0118	0,0138	0,0148	0,0145	0,0146	0,0146	0,0145	0,0145	0,0145	0,0146
-0,0117	-0,0137	-0,0147	-0,0144	-0,0145	-0,0145	-0,0144	-0,0144	-0,0144	-0,0145
0,0222	0,0259	0,0277	0,0273	0,0273	0,0273	0,0272	0,0272	0,0273	0,0273
-0,0220	-0,0257	-0,0275	-0,0271	-0,0271	-0,0271	-0,0270	-0,0270	-0,0271	-0,0271
0,0229	0,0267	0,0286	0,0282	0,0282	0,0282	0,0281	0,0281	0,0282	0,0282
-0,0227	-0,0265	-0,0284	-0,0280	-0,0280	-0,0280	-0,0279	-0,0279	-0,0280	-0,0280
0,0429	0,0501	0,0537	0,0528	0,0529	0,0530	0,0527	0,0528	0,0528	0,0529
-0,0426	-0,0498	-0,0533	-0,0525	-0,0526	-0,0526	-0,0523	-0,0524	-0,0525	-0,0525
0,1149	0,1340	0,1436	0,1413	0,1415	0,1416	0,1408	0,1410	0,1412	0,1414
-0,1141	-0,1331	-0,1426	-0,1403	-0,1405	-0,1406	-0,1398	-0,1400	-0,1402	-0,1404
0,2154	0,2513	0,2692	0,2648	0,2653	0,2654	0,2640	0,2644	0,2648	0,2651
-0,2139	-0,2495	-0,2674	-0,2630	-0,2634	-0,2636	-0,2622	-0,2626	-0,2629	-0,2632
0,2294	0,2676	0,2867	0,2820	0,2825	0,2826	0,2812	0,2816	0,2820	0,2823
-0,2278	-0,2657	-0,2847	-0,2801	-0,2805	-0,2807	-0,2792	-0,2796	-0,2800	-0,2803
0,4301	0,5017	0,5376	0,5288	0,5297	0,5299	0,5272	0,5280	0,5287	0,5292
-0,4271	-0,4983	-0,5338	-0,5251	-0,5260	-0,5263	-0,5235	-0,5243	-0,5250	-0,5256