



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
(бакалаврская работа)

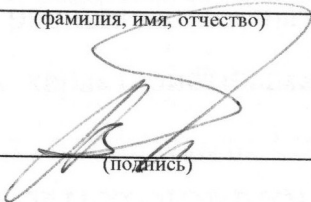
На тему «Исследование связей электрических и радиолокационных
характеристик грозоградового облака»

Исполнитель Кислицына Екатерина Романовна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физико-математических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Михайловский Юрий Павлович
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой


(подпись)

кандидат географических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

Абанников Виктор Николаевич

(фамилия, имя, отчество)

«11» 06 2019 г.

Санкт-Петербург
2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. ХАРАКТЕРИСТИКА ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ И ГОРОДА САНКТ-ПЕТЕРБУРГ	6
1.1 Физико-географическое описание Ленинградской области	6
1.2 Климатические характеристики	9
ГЛАВА 2. РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГРОЗОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ	17
2.1 ДМРЛ-С	17
2.1.1 Характеристики облачности получаемые с помощью ДМРЛ-С	25
2.2 ГПС «Blitzortung»	30
2.3 ГПС «Алвес»	32
ГЛАВА 3. КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРОЗОГРАДОВОГО ОБЛАКА	35
3.1 Аэросиноптический анализ 22.07.2017 г.	35
3.2 Анализ электрических и радиолокационных характеристик.....	37
3.3 Связь частоты разрядов с характеристиками облака	44
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	47
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	49

ВВЕДЕНИЕ

На нашей планете в каждый момент времени одновременно действует около полутора тысяч гроз и происходит около ста грозовых разрядов в секунду. Несмотря на столь впечатляющую распространенность и историю исследования, насчитывающую более двух веков, грозовые процессы остаются изученными не достаточно полно и являются объектом живого интереса ученых-метеорологов.

Помимо чисто научного интереса, исследования гроз имеют и высокую практическую значимость. Прогноз и диагноз опасных явлений погоды, связанных с развитием кучево-дождевой облачности, является обязательным условием для осуществления подавляющего большинства видов хозяйственной деятельности человека. Без точного и своевременного их прогноза сегодня не обходится ни один рейс гражданской и военной авиации, а также невозможна эффективная работа ремонтных и спасательных служб. В электроэнергетической отрасли, обладая информацией о местах возникновения грозовых разрядов, можно достаточно быстро находить повреждения, вызванные прямым попаданием молнии в элементы воздушных линий электропередачи. Накапливая статистику о пространственном распределении молний за значительный период, можно дополнительно усиливать молниезащиту объектов, находящихся в районах с высокой плотностью распределения молний.

Грозовая активность зачастую сопровождается ливневыми осадками, градом, штормовым и ураганным ветрами. Грозовая ячейка формируется в результате атмосферных процессов, обуславливающих появление и развитие мощной конвективной облачности. Водность облака непрерывно возобновляется восходящими потоками в течение всего периода осадкообразования. Поэтому при интенсивных ливнях с градом на отдельных участках земной поверхности может образоваться слой воды более 50 – 100 мм. Такое количество воды не может впитаться почвой, большая ее часть стекает в

русла рек низины, повышает уровень воды и приводит к формированию паводков и селей. [1]

В задачи прогноза грозовой активности входят предсказание зарождения грозовой ячейки, определения ее параметров и физических характеристик, а также дальнейшей динамики. Значительные успехи в изучении молниевых ячеек были достигнуты благодаря развитию сетей метеорологических радиолокаторов, позволивших проводить оценку, как параметров самих разрядов, так и метеорологической обстановки, характерной для их возникновения [5]. На сегодняшний день немаловажным источником информации для составления надежного прогноза гроз, помимо радиолокационной, является и грозопеленгационная информация.

Актуальность и практическая значимость работы. Явления погоды, связанные с образованием грозоградовой облачности, такие как грозы, град, шквал и другие, являются опасными. Для минимизации материального ущерба и обеспечения безопасных авиаперевозок необходимо совершенствовать диагноз и прогноз таких явлений. Одним из путей к этому является выявление связей электрических и радиолокационных характеристик грозоградового облака.

Цель работы: Исследование связей электрических и радиолокационных характеристик грозоградового облака в условиях Северо-Запада России.

Задачи ВКР формулируются, исходя из поставленной цели:

- кратко исследовать физико-географические и климатические характеристики района исследования – Ленинградской области и Санкт-Петербурга;
- ознакомиться с особенностями радиотехнических средств исследования грозовой деятельности, таких как: ДМРЛ-С, ГПС «Blitzortung»; ГПС «Алвес»;
- провести анализ связей электрических и радиолокационных характеристик мощного грозоградового облака, развивавшего в районе Санкт-Петербурга 22.07.2017;
- сделать выводы по проделанной работе.

Структура работы. Выпускная квалификационная работа состоит из введения, 3 глав, состоящих из подглав, заключения и списка использованных источников, включает в себя 50 страниц.

ГЛАВА 1. ХАРАКТЕРИСТИКА ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ И ГОРОДА САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

1.1 Физико-географическое описание Ленинградской области

Ленинградская область находится в северо-западной части России и входит в Северо-Западный федеральный округ и Северо-западный экономический район. Областной центр – город Санкт-Петербург с населением немногим более 5,38 млн человек (данные 2019 г.). Территория области составляет 83 908 км². В широтном направлении она протягивается примерно на 500 км, а в меридиональном направлении – около 320 км. В Ленинградской области проживает почти 1,85 млн человек (данные 2019 г.).

В городе можно выделить три основных района: северный (правобережный), южный (левобережный) и дельтовый. Правобережье – наиболее возвышенная часть города – отличается обилием зелени, озер, прудов, пересеченностью рельефа, общей живописностью ландшафта. В левобережном районе преобладает плоская однообразная равнина. Здесь мало водотоков и почти отсутствует зелень. Исключение представляют лишь некоторые участки уступа приморской террасы в зоне южного побережья Финского залива. Острова невской дельты – район старого освоения, на большей части площади уже застроенный или занятый парками. Остались неосвоенными здесь лишь заболоченные участки прибрежных низин. Значительная часть территории Санкт-Петербурга расположена на высотах, не превышающих 2 – 3 м. над уровнем моря. Эти районы города подвержены угрозе наводнения. К местности с преобладанием отметок до 2,5 м. над уровнем моря относятся: левобережье Невы до реки Фонтанки, острова невской дельты и широкая полоса вдоль побережья Финского залива, вплоть до указанного выше уступа приморской террасы. Наиболее низкие места в Санкт-Петербурге – это северные острова дельты Невы – Елагин, Каменный, Крестовский и северо-западная часть Васильевского острова. В районах правобережья Невы высоты менее 3,5 м.

имеются узкая приречная полоса, несколько более широкая Новодеревенская терраса и Лахтинская низина на северо-западном берегу невской губы. Преобладающая же часть правобережья приподнята на 5 – 10 м. над уровнем моря и относится к наиболее возвышенным районам города. Высота здесь возрастает в направлении на север и северо-восток, и на Лесновской и Сосновской террасах достигают 27 – 42 м.

На западе Ленинградской области находится более чем 500-километровое побережье Финского залива Балтийского моря (рисунок 1.1).

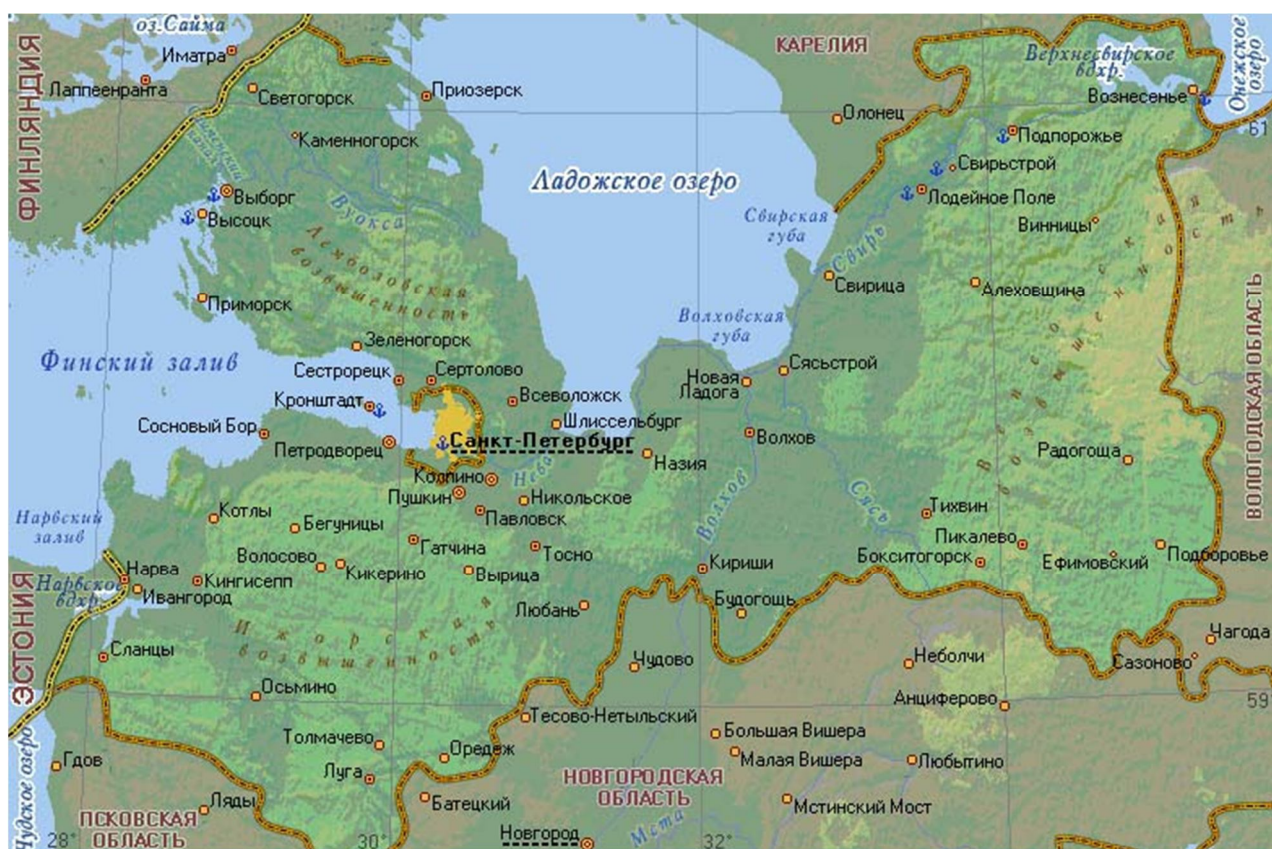


Рисунок. 1.1 Схематическая физическая карта Ленинградской области

В восточной части области расположены два крупнейших озера Европы – Ладожское и Онежское (рисунок 1.1). Озера имеют искусственные и естественные водные соединения с Балтийским и Белым морями, а через бассейн Волги – с Каспийским, Азовским и Черным морями. Таким образом, Санкт-Петербург – порт пяти морей.

Главная водная артерия города – река Нева. Этот водный объект воздействует на формирование климатических особенностей района Санкт-Петербурга. По обилию вод Санкт-Петербургу принадлежит одно из первых мест в мире: водная поверхность занимает 1/10 часть площади города (включая прибрежную зону Финского залива), в его пределах насчитывается 86 рек и каналов протяженностью около 300 км. Нева – важнейший участок двух водных путей страны – Волго-Балтийского и Беломорско-Балтийского, в дельте ее расположено несколько портов, она – неиссякаемый источник водоснабжения Санкт-Петербурга, часть водной системы, являющейся регулятором климата. В черте города Нева течет на протяжении 32 км, образуя ниже Литейного моста обширную дельту, состоящую из 42 островов, около 40 рек и каналов. Северной границей дельты является река Большая Невка, южной – Обводной канал и река Екатеринговка. В пределах города река принимает большое число притоков, имеющих малую водность по сравнению с водностью самой Невы и практически не влияющих на ее режим. В устье все воды Невы собираются в 5 крупных потоков, которыми Нева вливается в восточную часть Финского залива, называемую Невской губой. Нева – глубокая и широкая река, судоходная на всем протяжении. Преобладающая глубина реки 8 – 11 м., наибольшая 24 м. (у Литейного моста). В дельте ширина реки достигает 1000 – 1250 м. Скорость течения реки от 0,8 до 3 м/с. Нева имеет большую площадь водосбора – 281 тыс. км² при общей сравнительно малой длине (74 км.). В силу особенностей климата (зона избыточного увлажнения) и гидрографии бассейна (большая озерность бассейна и значительная протяженность его с севера на юг) Нева получает не только обильное, но и равномерное питание в течение всего года

Рельеф территории, где находятся Санкт-Петербург и Ленинградская область, неоднороден, и в пределах высоты до 200 метров встречаются как возвышенности, так и низины. Северо-западная часть области – это всхолмённая равнина с высотой до 80 метров над уровнем моря. В этой части области расположены Кавголовские и Лемболовские высоты.

Южнее этой холмистой равнины полосой протягиваются низины: Приморская на побережье Финского залива, Приладожская по берегам Ладожского озера и Приневская в долине Невы. В пределах Приневской низины – расположены Колтушские и Сойкинские высоты. Еще южнее располагаются Ижорская возвышенность (ее высота 168 м; рисунок 1.1) и Путиловское плато (между реками Мгой и Волховом). К северу они круто обрываются и образуют уступ высотой до 60 м, называемый Балтийско-Ладожским глинтом. Этот уступ интерпретируют как берег древнего моря, в котором современный Финский залив был соединен с Ладожским озером. К югу и востоку от Ижорской возвышенности и Путиловского плато лежит большая равнина, на которой выделяется Волховская низина. Самыми высокими в Ленинградской области являются Вепсовская возвышенность (рисунок 1.1) и Тихвинская гряда на востоке, которые входят в состав Валдайской возвышенности. [7]

1.2 Климатические характеристики

Климат Санкт-Петербурга формируется под влиянием многих факторов: с одной стороны, это влияние Северной Атлантики, с акватории которой происходит перенос тепла и влаги, с другой – вторжение холодных масс воздуха с севера. Засушливые условия связаны с формированием стационарных антициклонов и затоками воздуха с востока. Климат Санкт-Петербурга носит черты как морского, так и континентального.

Температурный режим Санкт-Петербурга формируется в основном под влиянием двух факторов: радиационного режима и циркуляции атмосферы. Во все сезоны года в Санкт-Петербурге преобладает ветер юго-западного и западного направлений, несущий влажный воздух с Атлантики. Вторжение атлантических воздушных масс сопровождается обычно ветреной пасмурной

погодой, а радиационный фактор больше проявляется при формировании антициклонов – в условиях ясной безветренной погоды.

К местным факторам, влияющим на температурный режим города, относятся, прежде всего, его близость к Финскому заливу и обилие рек. Влияние воздушных потоков атлантического происхождения, а также обширных водных бассейнов на температуру воздуха в Санкт-Петербурге проявляется в изменении ее суточного и годового хода, и в частности в сглаживании различий между температурой воздуха в январе и феврале, а также в уменьшении ее годовой амплитуды – разности между средней месячной температурой самого теплого и самого холодного месяца года. Последняя величина обычно используется для определения континентальности климата и по этому показателю климат Санкт-Петербурга нельзя в полной мере отнести к умеренно континентальному климату, который преобладает на европейской части России. Город расположен в переходной зоне между регионами с умеренно континентальным и морским климатом.

Атмосферные осадки характеризуются количеством, выпавшим за сутки, месяц или год (толщина слоя воды в миллиметрах), фазовым состоянием (Жидкие, твердые, смешанные), интенсивностью и продолжительностью выпадения.

Осадкообразование как результат взаимодействия макро- и микропроцессов в атмосфере относится к наиболее сложным метеорологическим процессам. Количество осадков на данной территории зависит от трех основных факторов: влагосодержания воздушной массы, ее температуры (или относительной влажности) и возможности подъема при встрече с препятствием или под влиянием термической конвекции. Эти факторы, в свою очередь, формируются под влиянием условий циркуляции и рельефа. Циклогенез и вынужденный подъем воздушной массы способствуют выпадению осадков, а антициклонический режим циркуляции и низкая температура воздуха приводят к уменьшению их количества.

В районе Санкт-Петербурга выпадение осадков определяется, главным образом, интенсивной циклонической деятельностью, связанной с влиянием Атлантики. Даже летом, когда такая деятельность несколько ослабевает, осадки, связанные с локальной циркуляцией, составляют незначительную долю. Влияние Финского залива на режим осадков связано с его термическим режимом и малой шероховатостью поверхности воды. Весной и летом водная поверхность холоднее окружающей суши. Это препятствует развитию конвективных движений воздуха над водоемом, а следовательно, и образованию осадков. Уменьшению количества осадков способствуют и малая шероховатость водной поверхности. Зимой температурные различия сглаживаются, и сохраняется лишь влияние пониженной шероховатости.

Влияние города на выпадение осадков также довольно разнообразно. Городская застройка вызывает торможение воздушного потока и формирование восходящих потоков воздуха. Избыточный нагрев нижних слоев атмосферы над городом также способствует формированию восходящих потоков, что теоретически должно приводить к увеличению количества осадков. Кроме того, многие вещества, содержащиеся в промышленных выбросах, действуют как ядра конденсации, что способствует образованию облаков. Однако, пока все эти факторы скажутся на осадкообразовании, облака в процессе воздушного переноса могут быть вынесены за пределы города.

В Санкт-Петербурге отчетливо прослеживается сочетание влияния как самого города, так и его местоположения (устье Невы, побережье Финского залива) на распределение осадков. В этом регионе преобладают осадки адвективного характера, поэтому влияние термической конвекции на образование облаков над городом проявляется не очень заметно.

В северной части города и на севере пригородной зоны годовое количество осадков больше на 11% и более чем на 20 % соответственно. В устье Невы годовые суммы осадков, напротив, меньше, чем в центре, на 5 – 7 %. Еще меньше осадков выпадает на побережье Финского залива (в пос. Лисий

Нос, Петродворцу, Стрельне) и на островах (в Кронштадте); здесь разница с центром достигает 8 – 9 %. В самом городе, к югу от центра, осадков выпадает почти на 5 % меньше, чем в центральных районах. Далее на юг суммы осадков постепенно возрастают и на границе Ордовикского плато, в районе Пушкина и Павловска, превышают количество осадков, выпадающих в центре города, на 7 – 8 %. К востоку от Санкт-Петербурга, в холмистой местности, подветренной по отношению к поступающим с Атлантики влажным воздушным массам, осадков за год выпадает больше, чем в центре города, примерно на 10 %, а в холодный период – почти на 20 %. Таким образом, различия в годовых суммах осадков между северной и южной частями города достигают 16 %, а с учетом ближайших окрестностей – и 25 %.

Облачность как главный регулятор притока лучистой энергии определяет количество поступающей к поверхности Земли солнечной радиации, является источником осадков и тем самым заметно влияет на формирование погоды и климата. Количество облаков при проведении наземных наблюдений оценивается визуально по десятибалльной шкале; при этом различают три состояния неба: малооблачное, ясное (0 – 2 балла), полужасное (3 – 7 баллов) и пасмурное (8 – 9 баллов).

Согласно современной классификации выделяют десять форм облаков, которые в зависимости от структуры и внешних особенностей подразделяются на виды. В зависимости от расположения облаков по высоте их подразделяют на облака верхнего, среднего и нижнего яруса, а также рассматривают общую облачность.

В среднем за год наибольшую повторяемость имеют слоисто-кучевые облака; особенно часто они наблюдаются осенью. Высококучевые и перистые облака доминируют в месяцы теплого периода; при этом доля слоисто-кучевых облаков сохраняется. В осенне-зимние месяцы значительная доля облаков приходится на слоисто-дождевые и разорвано-дождевые. Численные оценки

доли облаков затруднены, поскольку обычно одновременно наблюдаются облака нескольких форм. [4]

Грозы относятся к числу опасных явлений погоды. Они сопровождаются сильными электрическими разрядами, которые часто повреждают линии связи и электропередачи, вызывают пожары.

Грозы подразделяются на фронтальные, т. е. связанные с прохождением атмосферных фронтов, и внутримассовые, или конвективные. На рассматриваемой территории преобладают фронтальные грозы, на долю которых приходится примерно 80 % всех гроз. Наиболее часто грозы отмечаются на холодных фронтах, перемещающихся с запада, юго-запада и северо-запада. Как правило, они начинаются перед фронтом. Теплые фронты, перемещающиеся с юга на север, также являются грозовыми. В июне и июле эти фронты почти всегда сопровождаются грозами.

Конвективные грозы возникают преимущественно в заполняющейся ложбине или на периферии антициклона.

На грозовую деятельность существенное влияние оказывают местные физико-географические условия: рельеф местности, подстилающая поверхность, близость больших водоемов. Возвышенности, даже сравнительно небольшие, отличаются повышенной грозовой деятельностью по сравнению с равниной, что обусловлено усилением вертикальных движений над пересеченной местностью. Защищенные долины характеризуются некоторым ослаблением грозовой деятельности. Уменьшение грозовой деятельности отмечается также над крупными водоемами и их плоскими берегами (Финский залив, Ладожское озеро, Онежское озеро), где сказывается влияние бризов и нисходящих движений воздуха над водоемами.

Влияние подстилающей поверхности проявляется главным образом на развитии внутримассовых гроз. Наличие заболоченных территорий обеспечивает значительное испарение и увлажнение приземного слоя воздуха,

что при неустойчивой стратификации и достаточном прогреве увеличивает вероятность возникновения гроз. К таким районам следует отнести территорию, прилегающую к оз. Ильмень, и центральную часть бассейна р. Луги.

На рассматриваемой территории число дней с грозой колеблется от 10 до 30 за год. На общем фоне увеличения гроз с севера на юг, обусловленного ростом температуры и влажности, выделяются области наветренных склонов Валдайской возвышенности, где повторяемость гроз, равная 26 – 29 дням за год, является наибольшей. Реже всего возникают грозы на холодном побережье Белого моря и островах Финского залива, где за год отмечается всего лишь 10 дней с грозой. На северной части Карельского перешейка количество гроз не превышает 15 за год, такое же количество гроз отмечается на северном побережье Ладожского озера.

Грозовая деятельность наиболее развита в теплый период – с мая по август. Однако грозы начинаются значительно раньше. На западной территории Ленинградской области уже в апреле. Но такие ранние грозы бывают редко. На этой территории наиболее часто грозы возникают в июле. В этом месяце отмечается 5 – 7 дней с грозами, а в заболоченных низинах и на наветренных склонах Валдайской возвышенности число их увеличивается до 9. Осенью грозовая деятельность прекращается. В сентябре в Ленинградской области грозы наблюдаются 1 – 2 дня в месяц. В октябре грозы – редкое явление, на территории области отмечаются 1 раз в 10 лет. Зимой они представляют исключительно редкое явление.

Как и другие метеорологические элементы, число дней с грозой подвержено значительным изменениям. В год максимальной грозовой деятельности число дней с грозой может достигать на рассматриваемом районе 20 – 30. На территории Ленинградской области в отдельные годы отмечается до 35 – 45 дней с грозой за год.

Практический интерес представляют данные о продолжительности гроз. На побережье Финского залива продолжительность не превышает 35 час/год. При продвижении с севера на юг и с запада на восток продолжительность гроз увеличивается. Наибольшие значения, равные 60 – 65 час/год, отмечаются на наветренных склонах Валдайской возвышенности. В защищённых долинах продолжительность гроз несколько меньше. В годовом ходе наибольшая продолжительность гроз в сумме за месяц отмечается в июле.

Средняя продолжительность грозы в день колеблется от 1,5 до 2,5 часа, и только на островах Финского залива она несколько меньше – 1,2 часа. Непрерывная продолжительность отдельных случаев гроз может достигать 6 – 9 часов, а на равнинах даже 13 – 15 часов, но такие грозы наблюдаются редко. В течение суток наиболее часто грозы наблюдаются днем с 12.00 до 18.00 по местному времени. На это время приходится примерно 50 % всей продолжительности гроз. Чаще всего они начинаются в 15.00 – 16.00.

Град наблюдается преимущественно в теплую половину года при большой неустойчивости атмосферного воздуха, имеющего большие температурные различия по высотам и большую влажность. Чаще всего град выпадает при грозах, связанных либо с прохождением атмосферных фронтов, преимущественно холодных, либо с внутримассовыми процессами. В первом случае град на местности выпадает полосами, достигающими нескольких километров в длину и около одного километра в ширину. Во втором случае, что наблюдается чаще, град обычно выпадает пятнами на небольших территориях. Распределение числа дней с градом по территории зависит от характера подстилающей поверхности. В пересеченном рельефе в связи с усилением турбулентного обмена и увеличением конвективной облачности град выпадает чаще, чем на прилегающих равнинах. Над крупными водными бассейнами (Ладожское и Онежское озера, Финский залив), где условия для образования конвективной облачности менее благоприятны, град выпадает в 1,5 – 2 раза реже, чем на суше. Особенно редко выпадает град на островах.

Большая часть рассматриваемой территории характеризуется равномерным распределением числа дней с градом – от 1 до 2,5 дня. Наиболее часто град выпадает в восточной части Ленинградской области. Однако следует помнить, что град наблюдается не каждый год. На большей части территории повторяемость лет с отсутствием града составляет 10 – 25 %. Максимальное число дней с градом за год на рассматриваемой территории колеблется в основном от 4 до 8 за год.

В годовом ходе почти повсеместно наиболее часто град отмечается в мае и июне. В пунктах, расположенных на островах Финского залива, Ладожского и Онежского озёр, наблюдается заметное увеличение числа дней с градом в осенние месяцы (сентябрь – октябрь), что связано с более благоприятными условиями для образования конвективной облачности над теплыми по сравнению с сушей в это время водоемами. [6]

ГЛАВА 2. РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГРОЗОВОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Для исследования развития облака использованы измерения, полученные с помощью:

2.1 ДМРЛ-С

Поляризационный радиолокатор, в котором одновременно излучается два радиосигнала – на вертикальной и горизонтальной поляризациях.

Для приема отраженного радиоэха используются два приемных устройства для каждой поляризации. Это, в отличие от неполяризационных МРЛ, обеспечивает непосредственное измерение трех дополнительных радиолокационных параметров облаков и осадков – дифференциальной отражаемости Z_{dr} , дифференциальной фазы F_{dp} и коэффициента кросскорреляции ρ_{HV} . Их обработка в совокупности с остальными тремя параметрами Z , V , W обеспечивает решение следующих практических задач:

- повышение точности радиолокационного измерения осадков за счет уменьшения случайных ошибок, обусловленных вариациями распределения капель осадков по размерам и систематической ошибки абсолютной калибровки канала отражаемости;
- коррекция ослабления зондирующего радиоизлучения в осадках;
- идентификация типа гидрометеоров и фазы осадков;
- поляризационная фильтрация сигналов от неметеорологических целей (насекомых, пыльцы и семян, пыли в тропосфере, отражений от «местников» и т.д.).

Доплеровский поляризационный метеорологический радиолокатор ДМРЛ-С предназначен для обеспечения метеорологической информацией об облачности, осадках и связанных с ними явлениях погоды прогностических органов Росгидромета, АМЦ, АМСГ и Центров УВД гражданской авиации, а также других потребителей радиолокационной метеорологической информации.

Объединение метеорологических радиолокаторов в сеть позволяет во многих случаях компенсировать ограничения радиолокационного метода метеонаблюдений: ослабление радиоизлучения в осадках, блокировка радиоизлучения естественными (рельеф, растительность) и искусственными (здания и сооружения) препятствиями в отдельных секторах, азимутальные направления с помехами, снижение разрешающей способности радиолокатора за счет расширения луча и увеличение высоты луча за счет кривизны Земли на больших дальностях.

На сегодняшний день продолжается развертывание радиолокационной сети ДМРЛ-С Росгидромета. Всего запланирована установка 140 локаторов до 2020 г. ДМРЛ-С имеют максимальный радиус обзора, равный 250 км, и позволяют круглосуточно осуществлять циклические наблюдения с заданной периодичностью в автоматизированном режиме. Излучение сразу двух радиосигналов — на вертикальной и горизонтальной поляризациях — позволяет получать дополнительные параметры сигнала, а именно дифференциальную отражаемость, дифференциальную фазу и коэффициент кросс-корреляции.

В состав радиолокатора ДМРЛ-С входят:

- антенная система;
- высокочастотный приемо-передающий тракт;
- клистронный передатчик;
- приемная система;

- центральный управляющий вычислительный комплекс (ЦУВК).

Перечисленная аппаратура устанавливается на башне и в аппаратном контейнере ДМРЛ-С. На позиции размещается также оборудование систем электроснабжения, охранной и пожарной сигнализации. На отдельных позициях предусмотрен дизель-генератор аварийного электроснабжения.

К достоинствам выбранной схемы размещения оборудования следует отнести относительно короткий волноводный тракт ДМРЛ-С, обеспечивающий минимальные потери.

Метеорологический радиолокатор ДМРЛ-С предназначен для производства наблюдений в автоматическом режиме и не требует постоянного присутствия на ДМРЛ-С квалифицированного обслуживающего персонала.

Контроль аппаратуры ДМРЛ-С, управление радиолокатором и вторичная обработка р/л информации проводится на удаленном управляющем вычислительном комплексе (УУВК), который может размещаться на значительном удалении от башни ДМРЛ.

Выбор мест установки ДМРЛ-С на территории РФ определяется комплексом критериев:

- создание непрерывного радиолокационного метеорологического поля;
- размещение ДМРЛ-С на удалении до 50 км от крупных аэропортов и аэродромов;
- размещение ДМРЛ-С на территориях с наибольшей плотностью населения.

В рамках рассматриваемой системы было разработано специальное программное обеспечение конвертации файлов в формате «абонентского пункта» в международный формат HDF5. Процесс формирования файлов

продукции ДМРЛ-С включал в себя этапы первичной и вторичной обработки. Стоит отметить, что в перечень 176 Метеорология радиолокационных продуктов, доступных в формате «абонентского пункта», входят карты радиолокационной отражаемости на горизонтальной и вертикальной поляризациях, радиальной скорости, ширины доплеровского спектра радиальных скоростей, дифференциальной фазы, коэффициента кросс-корреляции, горизонтального и вертикального сдвига ветра, интенсивности осадков, турбулентности, профиля скорости и направления ветра, горизонтального ветра, верхней и нижней границы облачности, метеорологических явлений, накопленных сумм осадков за 1, 3, 6, 12 ч. Формат «абонентского пункта» (АП) представляет собой бинарный файл с определенной структурой. По причине невысокой распространенности и узкой специализации данного формата возникают значительные трудности при попытке отобразить данные в стороннем программном обеспечении. В связи с этим в рамках текущей работы была успешно решена задача конвертации данных формата «абонентского пункта» в формат HDF5. Список программного обеспечения для обработки и анализа геоинформационных данных расширяется, в этой связи необходимо иметь формат данных, документируемый и развивающийся вне зависимости от работы конкретной компании-поставщика данных. Документация находится в свободном доступе, и доступны примеры для различных языков программирования, таких как Fortran, Java, Python, C++. Данный формат широко используется для представления массивов данных. Геофизические данные удобнее всего хранить и обрабатывать, предварительно структурировав их в виде массивов, содержащих данные различного типа: от символьных до чисел с плавающей точкой. При разработке программного приложения, осуществляющего тот или иной уровень обработки, удобнее, когда достаточно просто указать место, где размещены данные определенного типа, не заботясь о необходимости их представления или дешифровки.

В каждом обзоре радиолокатор последовательно проводит азимутальные круговые сканирования атмосферы под несколькими углами места антенны. В результате, в каждом обзоре радиолокационная информация об облачности и осадках собирается на нескольких конических сечениях в объемном файле первичных данных. Каждому элементу р/л данных в объемном файле соответствуют координаты: дальность, азимут и угол места (конич.сечение). Дальнейшая компьютерная обработка позволяет построить по набору первичных радиолокационных данных трехмерную модель облачной атмосферы в зоне радиолокационного обзора: до 250 км по дальности от ДМРЛ и до 20 км по высоте от поверхности Земли. Чем чаще по углу места будет проведено сканирование (чем больше конических сечений), тем подробнее (и точнее) будет построенная модель.

В ДМРЛ-С в настоящее время используется комбинированная стратегия сканирования (CVP) в диапазоне углов места антенны от 0,1 до 86°: сначала, на низких углах места, наблюдения проводятся с низкой частотой повторения PRF на дальности до 250 км, после чего частота импульсов растёт, и дальнейшее сканирование до 86° проводится с высокой PRF. Затем, для получения доплеровских продуктов с высокой частотой повторения (и высоким качеством доплеровских продуктов), проводится повторный проход нижних углов места.

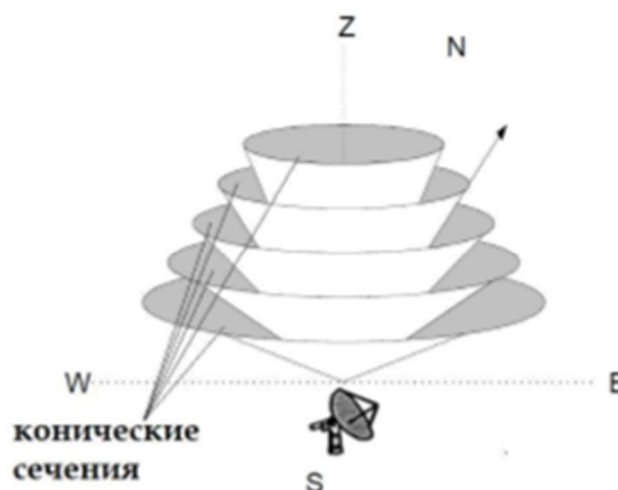


Рисунок 2.1. Схема сканирования ДМРЛ-С.

Радиолокатор ДМРЛ-С в течение каждого 10-мин цикла наблюдений обеспечивает получение информации в двух режимах: «Отражаемость» - объемный файл первичных данных с расширением *lnr* и «Скорость» - объемный файл с расширением *lnv*. Каждое р/л наблюдение представляет собой круговое сканирование атмосферы под несколькими фиксированными углами места антенны, начиная от $\sim 0,1^\circ$ до $\sim 85^\circ$. В результате каждого наблюдения получается набор 24-22 конических сечений, содержащих набор данных из 360 азимутальных направлений, каждое из которых содержит информацию по дальности до 250 км с разрешением 500 м для режима «Отражаемость» и до 125 км и разрешением по радиусу 250 м – для режима «Скорость».

Радиолокационная метеорологическая информация, наряду с информацией с метеорологических спутников, сегодня широко используется как для анализа, так и для прогноза атмосферных процессов, связанных с облачностью и осадками. С ее помощью уточняется местоположение и перемещения мезомасштабных облачных образований, влияющих на условия полета воздушных судов, что позволяет авиационному синоптику более успешно выделить районы образования опасных для авиации явлений, в том числе гроз, града, шквалов.

Метеорологический радиолокатор обеспечивает получение следующей метеоинформации:

- местоположение и размеры зон облачности и осадков;
- формы облачности и явления погоды, в том числе такие опасные для авиации как ливни, грозы, град;
- скорость и направление перемещения облачных систем;
- верхняя граница радиоэха всех обнаруживаемых облаков, нижняя граница радиоэха облаков верхнего и среднего яруса, а также межоблачные прослойки;
- оценка высоты «яркой полосы», указывающей на расположение слоя таяния и, соответственно, высоту нулевой изотермы в слоисто-дождевой облачности;
- интенсивность выпадающих осадков и накопленный слой осадков за выбранный интервал времени;
- распределение радиальной доплеровской скорости и ширины спектра, которые позволяют оценить сдвиги ветра, степень турбулентности, осредненный вертикальный профиль горизонтального ветра, осредненное распределение горизонтального ветра в зоне обзора на различных высотах;
- поляризационные характеристики облачности и осадков позволяют оценить тип гидрометеоров, провести фильтрацию помех и отражений от «местников», уточнить измерения интенсивности выпадающих осадков.

Радиолокационные наблюдения с высоким темпом обновления информации позволяют отслеживать эволюцию облачности и фиксировать процессы «взрывной конвекции», когда за несколько десятков минут происходит развитие грозовой облачности на больших территориях.

Сигнализация о наличии опасных явлений погоды в зоне обзора ДМРЛ-С. Согласно п.2.33 «Сертификационных требований (базиса) к доплеровскому метеорологическому радиолокатору ДМРЛ-С», утвержденных комиссией по сертификации аэродромов и оборудования межгосударственного авиационного комитета (МАК), в ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010» реализовано наличие сигнализации об опасных явлениях погоды в зоне обзора ДМРЛ-С. В случае наличия в зоне обзора хотя бы одной ячейки с явлением не ниже «Гроза с вероятностью 30-70%» (см. таблицу) в правом верхнем углу любой карты ДМРЛ-С загорается мигающий красный транспарант: «опасные явления»

Таблица 2.1 Метеорологические явления (и их коды), реализованные в
ПО ВОИ «ГИМЕТ-2010»

Код	Явление
0	Отсутствие радиоэхо
1	Облачность верхнего и среднего яруса
2	Слоистообразная облачность
3	Осадки слабые
4	Осадки умеренные
5	Осадки сильные
6	Кучевая облачность
7	Ливень слабый
8	Ливень умеренный
9	Ливень сильный
10	Гроза с вероятностью 30-70%
11	Гроза с вероятностью 71-90%
12	Гроза с вероятностью > 90%
13	Град слабый
14	Град умеренный
15	Град сильный
16	Шквал слабый
17	Шквал умеренный
18	Шквал сильный
19	Торнадо (смерч)
31	Отсутствующее значение

2.1.1 Характеристики облачности получаемые с помощью ДМРЛ-С

- Радиолокационная отражаемость (Z)

Радиолокационной отражаемостью Z называют величину, характеризующую отражающие свойства единичного объема гидрометеоров.

$$Z = \sum N * d^6 \quad (1)$$

где N – концентрация частиц в единичном объеме, d – диаметр частиц.

Распределение отражающих частиц по размерам (DSD) в импульсном объеме определяет отражающие свойства этого объема. Из формулы 1 видно, что Z пропорциональна размерам капель в 6-й степени, т.е. процессы укрупнения частиц в облаках и осадках приводят к быстрому росту Z .

Радиолокационная отражаемость облаков зависит от их фазового состава, водности и спектра размеров облачных частиц. Различия в этих характеристиках объясняют, почему облака, относящиеся к одному типу, могут в одних случаях обнаруживаться, а в других – нет. Радиолокационная отражаемость Z – один из основных вторичных продуктов ДМРЛ-С, использующихся при расчете других вторичных продуктов: карты метеоявлений, высот верхней и нижней границ радиоэхо, интенсивности осадков R , сумм осадков Q и т.д.

Радиолокатор не является прямым измерительным прибором, измеряющим метеорологические характеристики облачных полей – высоту верхней границы облачности, интенсивность выпадающих осадков и пр. Получение всех характеристик основано на способности облачных частиц и осадков отражать радиоволны сантиметрового диапазона, излученные радиолокатором.

В связи с тем, что диапазон отражаемостей Z в реальных облаках и осадках очень велик, в практике радиолокационных наблюдений используют

логарифмическую измерительную шкалу, в которой Z выражается в децилогарифмах $10 \lg Z$, а единица измерений называется dBZ.

Для формирования горизонтального сечения в дальней зоне – на дальностях более 120 км от ДМРЛ для сечения на высоте 1,5 км, и 210 км – для сечения на 4 км используется экстраполяция с нижнего луча.

Точность р/л измерений Z на ДМРЛ-С контролируется путем сравнения рассчитанных сумм осадков по ДМРЛ с данными измерений осадков на МС. Это косвенный метод контроля точности абсолютной калибровки радиолокатора, однако более точных методов сегодня не существует.

Радиолокационная отражаемость, измеренная в канале вертикальной поляризации Z_V используется только для расчета дифференциальной отражаемости Z_{dr} , во всех остальных случаях под отражаемостью Z понимается Z_H – радиолокационная отражаемость на горизонтальной поляризации.

Дифференциальная отражаемость Z_{dr} представляет собой отношение отражаемостей в каналах горизонтальной и вертикальной поляризаций:

$$Z_{dr} = 10 * \lg \left(\frac{Z_h}{Z_V} \right) \quad (\text{dB}) \quad (2)$$

Форма падающих капель дождя зависит от их размера. В процессе падения большие капли сплющиваются в потоке воздуха, в то время как малые ($d < 2$ мм) остаются сферическими. Типичные дождевые капли имеют $d=1-2$ мм, наибольший $d=6-7$ мм, максимальные измеренные капли имели $d=8$ мм. Величина Z_{dr} позволяет судить о форме и, следовательно, о фазовом составе гидрометеоров.

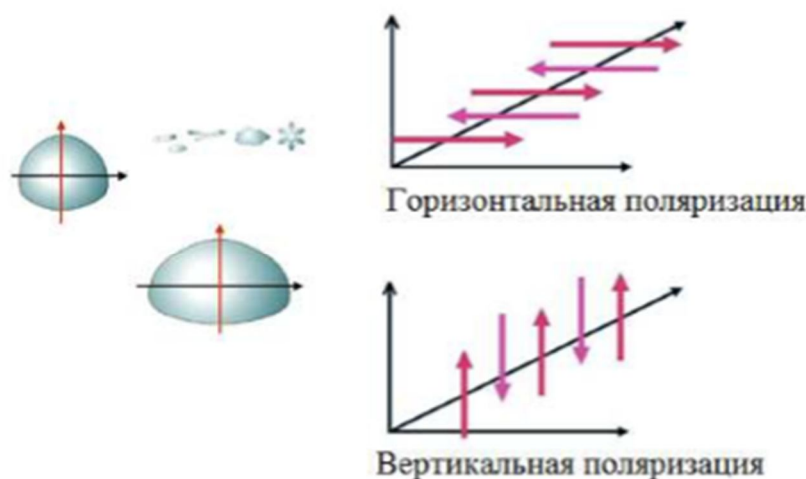


Рисунок 2.2 Схема поляризационных радиолокационных наблюдений.

Положительная величина Z_{dr} означает преимущественно горизонтальную ориентацию рассеивателей, отрицательная – вертикальную.

- Высота верхней границы облачности (ВГО).

Высота верхней границы облачности $H_{ВГО}$ – важная характеристика облачности, информация о которой позволяет судить о характере облачности ($H_{ВГО}$ слоистообразных облаков ниже и однороднее, чем кучевообразных) и степени опасности конвективной облачности (особенно это касается обеспечения полетов авиации).

Радиолокационная высота верхней границы, как правило, хорошо (в пределах нескольких сотен метров) согласуется с визуально фиксируемой пилотами с борта самолетов высотой облаков.

Оценка точности измерений высоты верхней границы радиоэха облачности проводится во время сертификационных испытаний Межгосударственного Авиационного Комитета, а также при проведении метеорологической адаптации каждого ДМРЛ-С при вводе его в эксплуатацию. При этом оценивается правильность измерения $H_{ВГО}$ путем сопоставления измеренных на ДМРЛ-С высот облачности с данными, полученными на

действующих автоматизированных метеорологических радиолокационных комплексах (АМРК), информация которых используется в оперативной практике, в том числе и для обеспечения полетов авиации.

Значения $H_{\text{вго}}$ оценивались при различных синоптических ситуациях для метеообъектов, находящихся в зонах перекрытий зон обзора в равноудаленных точках от ДМРЛ-С и других АМРК. Например, для ДМРЛ-С «Валдай» - в качестве эталона для сравнения АМРК были выбраны: АКСОПРИ «Валдай», АКСОПРИ «Тверь», АМРК Метеор-Метеоячейка «Пулково». С помощью специальной программы по большим массивам данных были рассчитаны разности $\Delta H_{\text{вго}}$ и их средние значения для нескольких дат 2012 г. Значения разностей $\Delta H_{\text{вго}}$ по ДМРЛ-С и АМРК по модулю не превышали 0.5 км, а среднее значение $\Delta H_{\text{вго}}$ по 1506 измерениям составило 0.05 км

- Интенсивность осадков

Карта интенсивности осадков ДМРЛ-С является важным прогностическим продуктом. Сильные осадки являются фактором риска для авиации [11].

Интенсивность осадков (R , мм/ч), т.е. слой воды, падающий на единичную площадь в единицу времени, зависит от концентрации и спектра размеров капель и скорости их падения относительно Земли.

В «ГИМЕТ-2010» интенсивность осадков определяется через значения радиолокационной отражаемости Z на специальном уровне H_1 (0.6 км над местом установки ДМРЛ-С).

Как правило, к обложным осадкам относят осадки интенсивностью от 0,6 до 3 мм/ч, к ливневым – с интенсивностью более 3 мм/ч. Поскольку первые выпадают из облаков слоистообразных, а вторые – из кучево-дождевых, являющихся облаками вертикального развития, при идентификации обложных и ливневых осадков учитывается вертикальная структура облачности.

Ливневые дожди интенсивностью не менее 30 мм/ч, смешанные осадки не менее 50 мм, выпавшие не более чем за 12 часов, а также снег не менее 20 мм, выпавший не более чем за 12 часов, по документам Росгидромета, относятся к стихийным гидрометеорологическим явлениям.

Поскольку радиолокационная отражаемость Z для расчета интенсивностей и сумм осадков измеряется на высоте 600 м над уровнем установки ДМРЛ-С, достоверно осадки измеряются в радиусе 100 км. За пределами 100 км измеренная Z может характеризовать как осадки, так и облачность. Учитывая непрерывность полей облачности, с большой долей вероятности можно предположить наличие осадков и за пределами 100 км, если туда простирается радиоэхо облачности, в которой осадки наблюдались до 100 км.

Накопленные суммы осадков за 12-часовые интервалы, измеренные ДМРЛ-С, являются одним из основных радиолокационных параметров, которые доступны для сопоставления с независимыми эталонами (измерениями на МС).

Необходимо отметить, что в действующую версию ПО ВОИ не включены некоторые алгоритмы, обеспечивающие повышение точности алгоритма расчета характеристик осадков, которые будут дорабатываться в дальнейшем.

- Вертикально проинтегрированная водность (VIL).

Вертикально проинтегрированная водность (VIL) оценивает массу жидкой воды на единицу площади в столбе по всей вертикальной протяженности C_b по данным о фактическом изменении отражаемости. VIL выражается в $\text{кг}/\text{м}^2$. Для расчета используется:

$$VIL = 3,44 * 10^{-6} \sum [(Z_i + Z_{i+1})/2]^{4/7} * \Delta h \quad (3)$$

где Z_i – отражаемость на i -том уровне облака; Δh – разность высот между уровнями i и $(i+1)$.

Суммирование проводится от 1 до уровня высоты верхней границы облака. По зарубежному опыту поляризационных радиолокационных наблюдений параметр VIL является одним из лучших индикаторов сильных гроз. [3]

2.2 ГПС «Blitzortung»

Идентификация грозовой активности радиолокационным методом достигается посредством оценки величины радиолокационной отражаемости и дополнительно привлекаемой метеоинформации. Существует практика увеличения вероятности идентификации гроз за счет привлечения информации с грозорегистрационных систем. [5]

Любая система пеленгации должна обеспечивать достаточную точность обнаружения искомого объекта. Не являются исключением и системы грозопеленгации.

В настоящее время существует достаточно много систем грозопеленгации, в том числе коммерческие (Vaisala, Voltek и др.) и любительские. Коммерческие системы могут состоять из однопунктовых и многопунктовых грозопеленгаторов, и, как правило, предоставляют какую-то гарантированную точность обнаружения атмосферных разрядов. При этом, полученные данные о месте разряда молнии можно использовать в коммерческих целях. Стоимость оборудования таких систем грозопеленгации достаточно высокая. Поэтому, для развитой системы грозорегистрации, охватывающей большую территорию и гарантирующей приемлемую точность, требуются серьезные финансовые вложения. В то же время, достаточно высокую популярность получила любительская система

Blitzortung, состоящая из большого числа однопунктовых пеленгаторов, связанных в общую сеть. Принять участие в проекте регистрации молний может любой желающий, достаточно лишь приобрести стартовый набор электронных компонентов с примерной ценой в 250 евро, и подключить собранное устройство к серверу через интернет. Полноценное функционирование системы началось в Германии в 2012 году, когда в системе появилось достаточное число грозопеленгаторов. На данный момент сеть охватывает практически всю Европу, Азию и Северную Америку, где повсеместно установлены станции грозопеленгации системы «Blitzortung» (Рисунок 2.3).

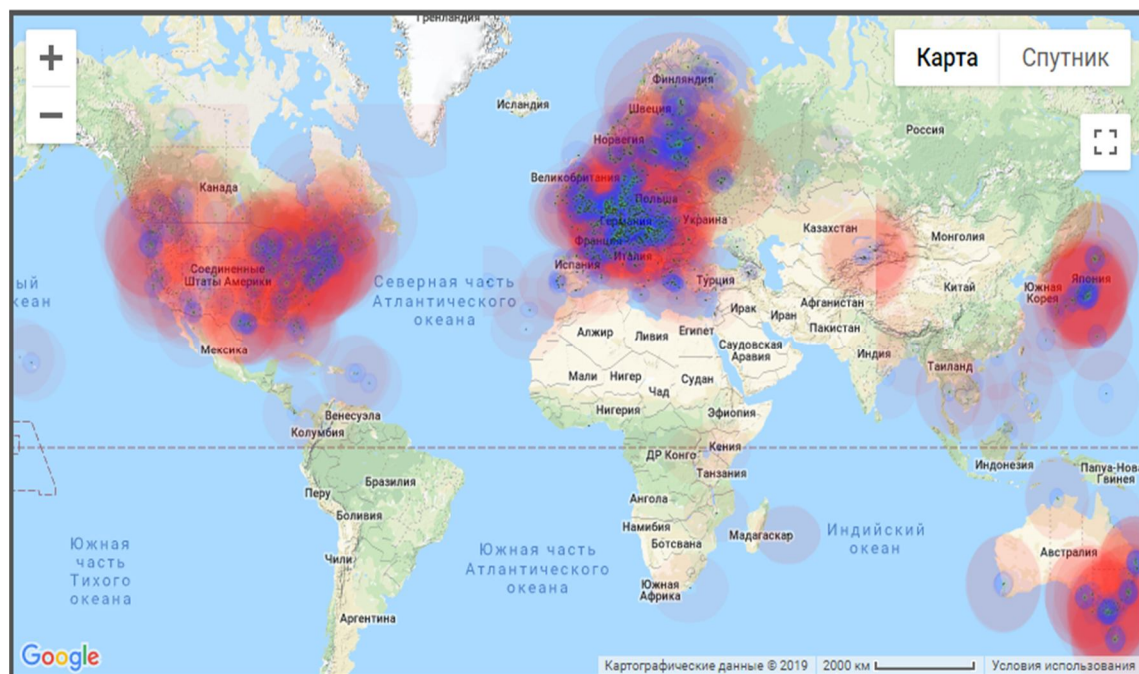


Рисунок 2.3 Зоны покрытия системы «Blitzortung» на 1.06.2019 г. [9]

Принцип действия системы «Blitzortung» основан на методе Time-of-Arrival (ToA) [5], когда радиоволна от источника, попавшего в радиус действия точно синхронизированных между собой приемников, доходит до этих приемников, вследствие чего по времени события вычисляются координаты источника. Радиус действия такого грозопеленгатора делится на три зоны:

- до 150 км (на рисунке 2 выделен зеленым цветом) — уверенный прием любых атмосферных разрядов из-за высокой плотности регистраторов;

- от 150 до 500 км (на рисунке 2 выделен синим цветом) — хороший прием молний, темно-синий цвет означает хорошее покрытие с высокой точностью и эффективностью обнаружения. Голубой цвет означает, что для лучшего обнаружения электрических разрядов могут понадобиться дополнительные станции вокруг этой области;
- от 500 до 2000 км — низкий уровень приема с вероятностью обнаружения молнии около 10–20% (с высокой мощностью). Для более высокой точности и эффективности обнаружения требуется больше станций в этих областях.

В районе Санкт-Петербурга пересечение зон пеленгаторов дает уверенный прием и среднюю точностью обнаружения электрических разрядов. [2]

2.3 ГПС «Алвес»

В настоящее время основой грозопеленгационной сети (ГПС) в России является разработанная в нашей стране ГПС «Алвес». Пункты сети располагаются на Европейской территории страны и на Урале.

Первая версия грозопеленгатора «Алвес» была разработана в ГГО им. А.И. Воейкова еще в 1992-1993 годах. Созданию «Алвес» предшествовали разработки других грозопеленгаторов и изучение электромагнитного излучения (ЭМИ) молний. Исследования в этом направлении были начаты в ГГО в 1972 году. В настоящее время на вооружении Росгидромета самая современная, девятая, версия ГПС «Алвес».

Принцип работы грозопеленгаторов сети основан на регистрации ЭМИ молниевых разрядов. Излучение регистрируется в территориально разнесенных пунктах.

Для определения координат разряда используется разностно-дальномерный метод. Он основан на том, что сигнал, излученный молнией,

поступит на более дальний грозопеленгатор с задержкой по времени, пропорциональной разнице дальностей между местом разряда и грозопеленгаторами.

Антенны грозопеленгаторов принимают ЭМИ, определяют точное время его прихода с помощью системы GPS (точность до 1 мкс), обрабатывают информацию и передают ее на Центральный процессор (ЦП). ЦП в свою очередь вычисляет следующие параметры разряда: координаты, дата и время, полярность, амплитуда сигнала, длительность переднего фронта и первой полуволны сигнала ЭМИ, перечень датчиков, зарегистрировавших разряд и датчиков, принявших участие в расчетах координат. Также ЦП ведет контроль и диагностирует сеть грозопеленгаторов. Частотный диапазон ГПС «Алвес» – от 1 до 100 кГц.

На рисунке 2.4 представлен пример визуализации грозовых процессов на географической карте с помощью ГПС «Алвес».

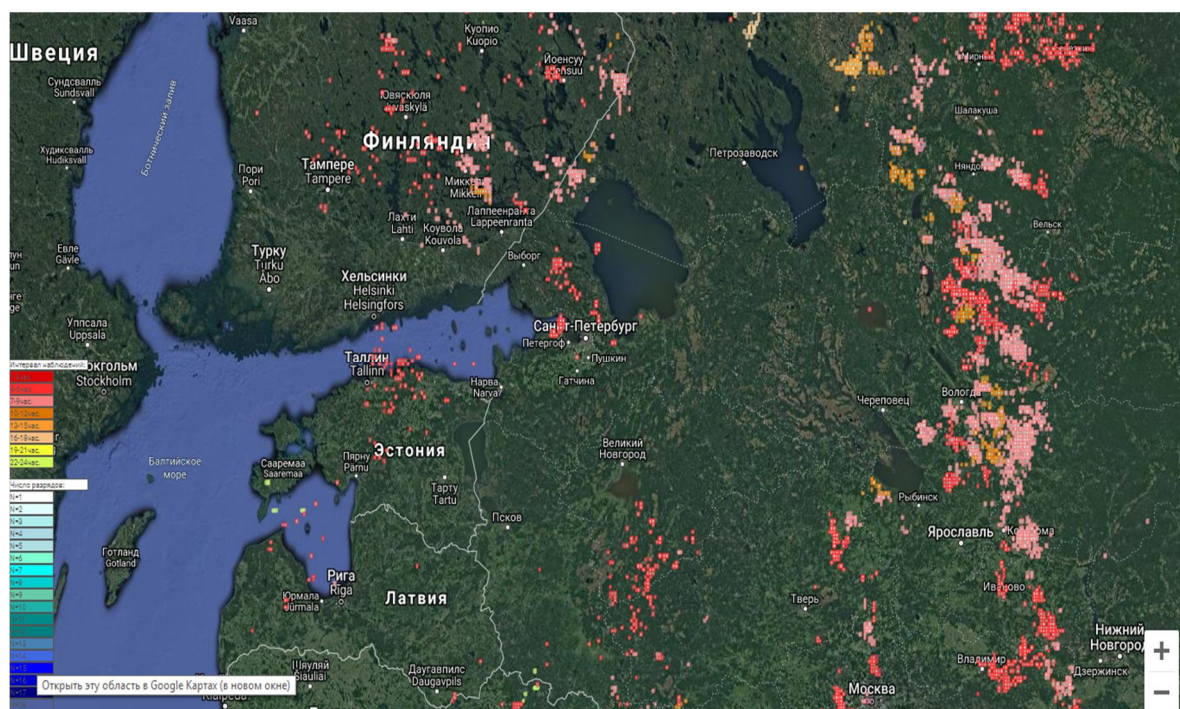


Рисунок 2.4 – Визуализация гроз с помощью ГПС «Алвес» [10]

После обработки данных ЦП отправляет их на Сервер базы данных SSK ИСУБД. Сервер базы данных SSK ИСУБД хранит все данные о молниевых разрядах. Он архивирует и первичные данные грозопеленгаторов, и

вычисленные параметры молниевых разрядов. Также на Сервер поступают дополнительные спутниковые и радарные данные о грозовой активности. Полная схема аппаратно-программного комплекса ГПС «Алвес» представлена на рисунке 2.5. [9]

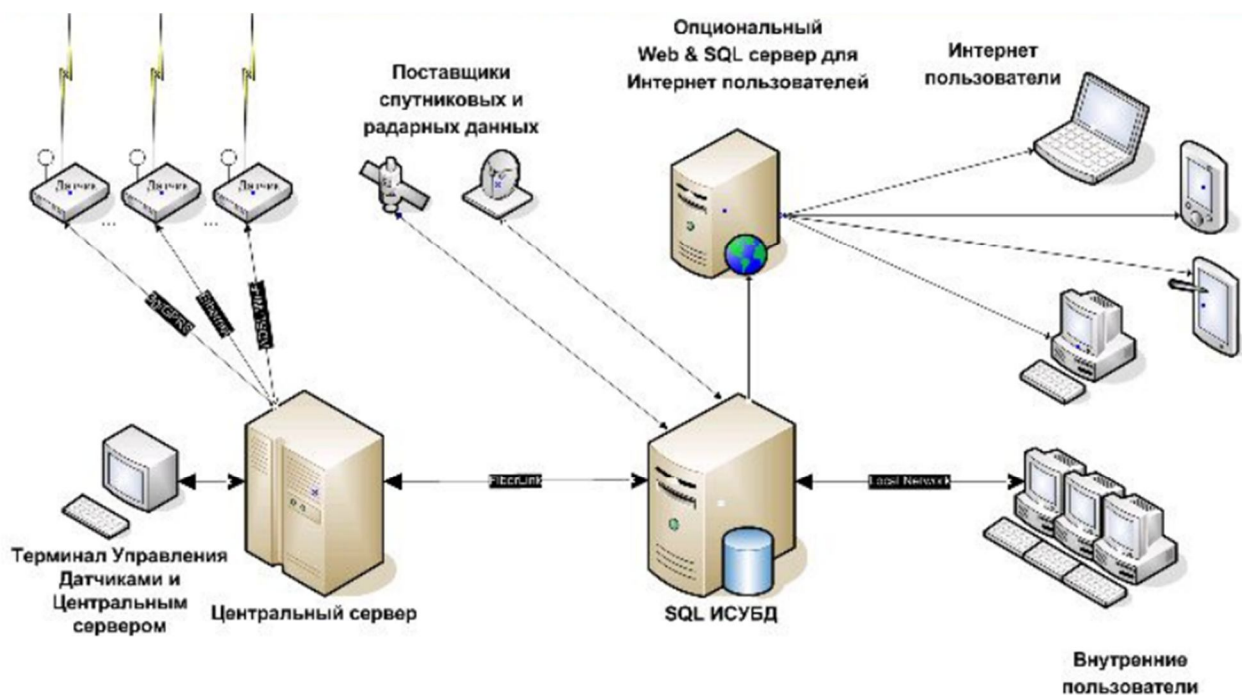


Рисунок 2.5 – Аппаратно-программный комплекс ГПС «Алвес» [9]

ГЛАВА 3. КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРОЗОГРАДОВОГО ОБЛАКА

22 июля 2017 г. в окрестностях города Санкт-Петербург наблюдалась фронтальная гроза, связанная с прохождением холодного фронта. В городе выпал крупный град, диаметр градин достигал 2 см. В результате на улицах образовался мощный слой града (рисунок 3.1) толщиной около 5 см, вследствие таяния которого некоторые районы города были подтоплены.



Рисунок 3.1 Слой града, образовавшийся в Санкт-Петербурге 22.07.2017 г.

3.1 Аэросиноптический анализ 22.07.2017 г.

По данным синоптического анализа над городом Санкт-Петербург в 10 UTC проходил холодный фронт. В срок 09 UTC по данным станции Санкт-Петербург наблюдалась мощная кучевая облачность, высота нижней границы

которой составляла 600 – 1000 м, количество облаков 5 баллов. На станции Ломоносов зафиксированы кучево-дождевые облака, количество – 4 балла, высота нижней границы 300 – 600 м. Над станцией Шлиссельбург наблюдалась кучево-дождевая облачность – 6 баллов, а также ливневой дождь.

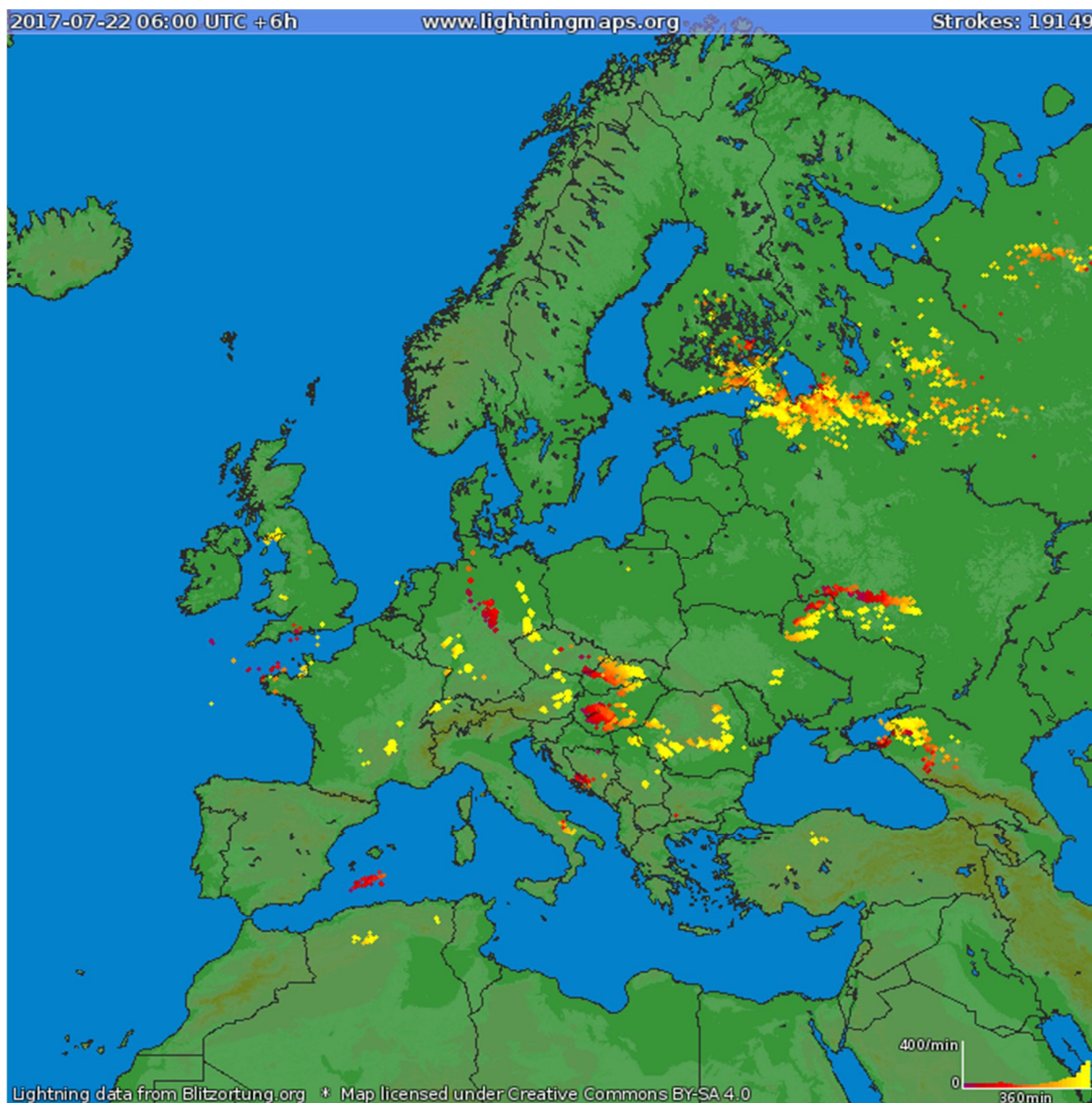


Рисунок 3.2 Количество электрических разрядов по данным ГПС
«Blitzortung» 22.07.2017 г. За время 06.00 – 12.00 UTC [11]

В атмосфере наблюдалась вертикальная термическая неустойчивость (рисунок 3.3). Нижняя граница облаков находилась на высоте 1,0 км при температуре 10,6 °С. Запас энергии неустойчивости в слое развития конвекции составлял 1348 Дж/кг, указывая на то, что в анализируемый день могли развиваться мощные конвективные облака. Уровень конвекции был равен 9.0 км

(-47,4°C), далее начинался задерживающий слой, связанный с тропопаузой. Значение энергии неустойчивости не очень велико, поэтому можно ожидать, что верхняя граница облаков будет располагаться вблизи высоты - 9 км. Высота нулевой изотермы была равна 2,2 км, это способствовало выпадению твердых осадков, которые не успевали растаять. Отмечался сдвиг ветра: в нижних слоях атмосферы ветер имел северное направление, начиная с высоты 7 км, происходит его изменение на западное. Таким образом, можно было ожидать преимущественный перенос облаков с севера на юг, что и наблюдалось в данный день. В большинстве случаев наличие сдвига ветра способствует пространственному разделению зоны выпадения осадков и зоны восходящего потока, интенсифицирует конвекцию и приводит к появлению более мощных и долгоживущих облаков.

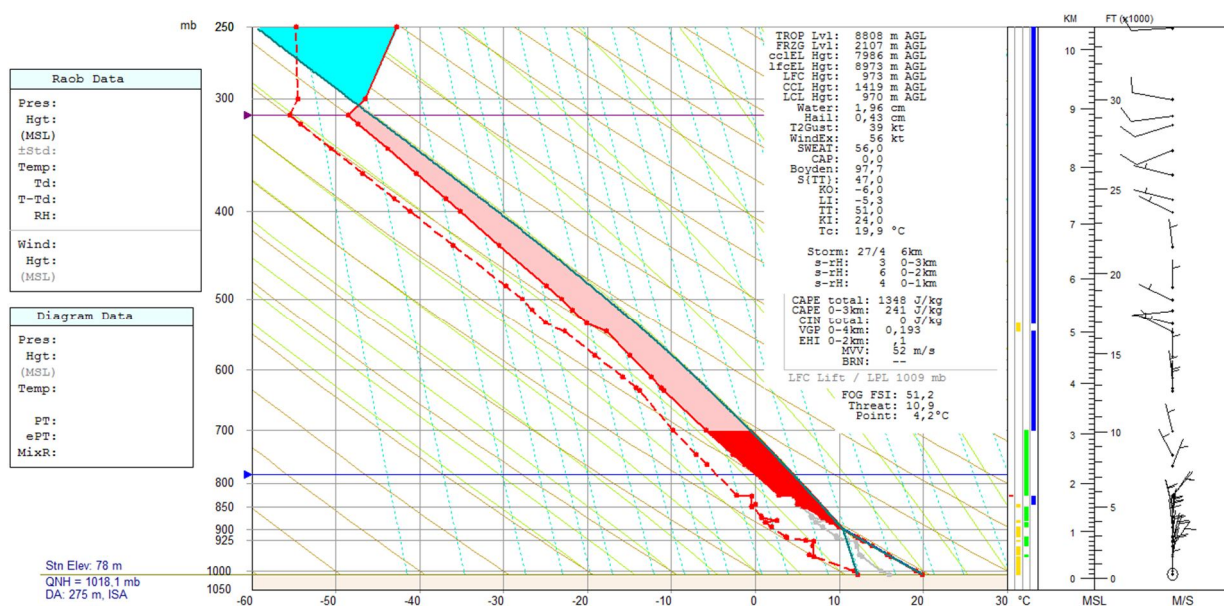


Рисунок 3.3 Аэрологическая диаграмма SKEW-T. 22.07.2018, срок 12 UTC

3.2 Анализ электрических и радиолокационных характеристик

В 07.40 UTC радиолокатором ДМРЛ-С впервые было зарегистрировано исследуемое облако, для удобства дальнейшего изложения это время принимается за начальный момент времени – «0 минут». По данным радиолокатора высота верхней границы развивающегося облака составляла 4,7

км (рисунок 3.5). К 30 минуте облако полностью перешло в кучево-дождевую стадию. В районе рассматриваемого облака росло другое мощное кучевое (рисунок 3.4), к 80 минуте произошло полное слияние этих облаков.

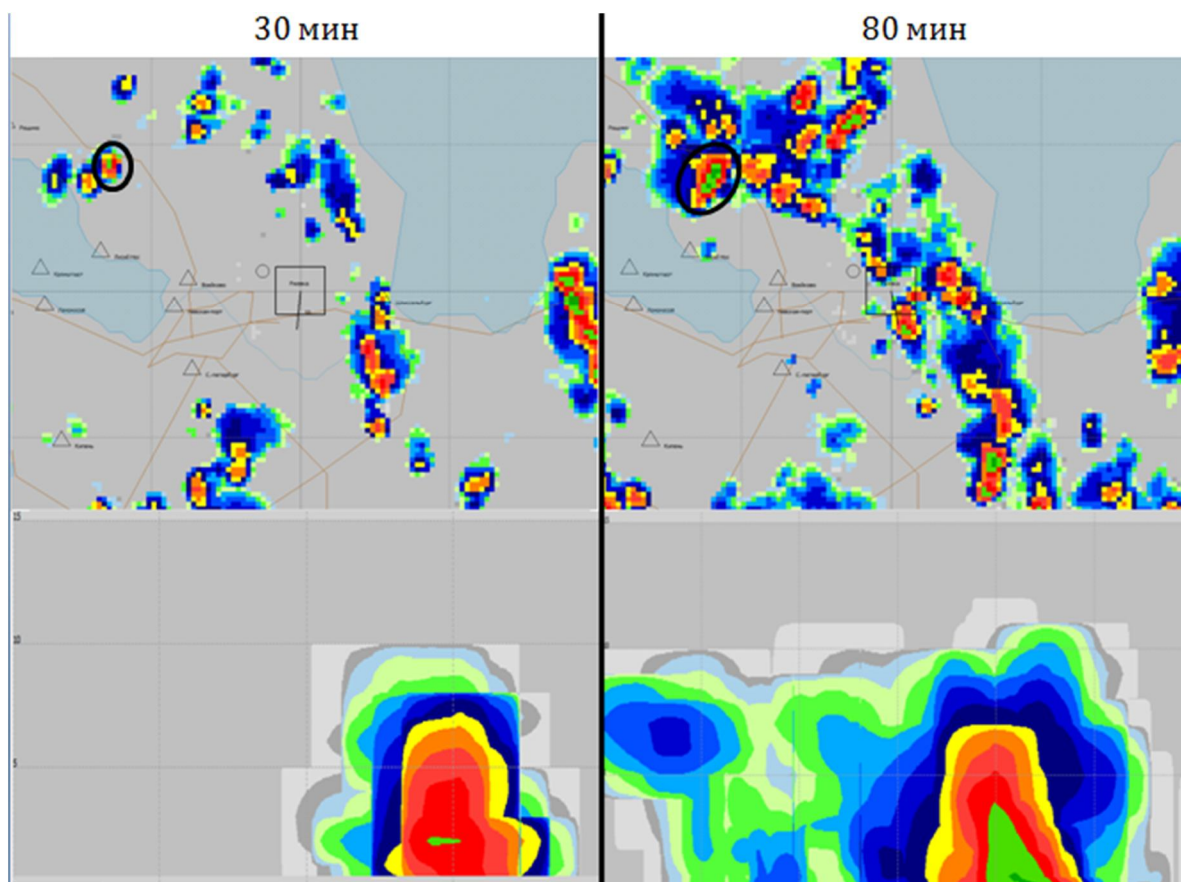


Рисунок 3.4 Радиолокационный снимок и вертикальный разрез облака

Стала наблюдаться, связанная с выпадающими осадками, обширная зона высокой отражаемости. По данным радиозондирования высота верхней границы облака превысила 10 км.

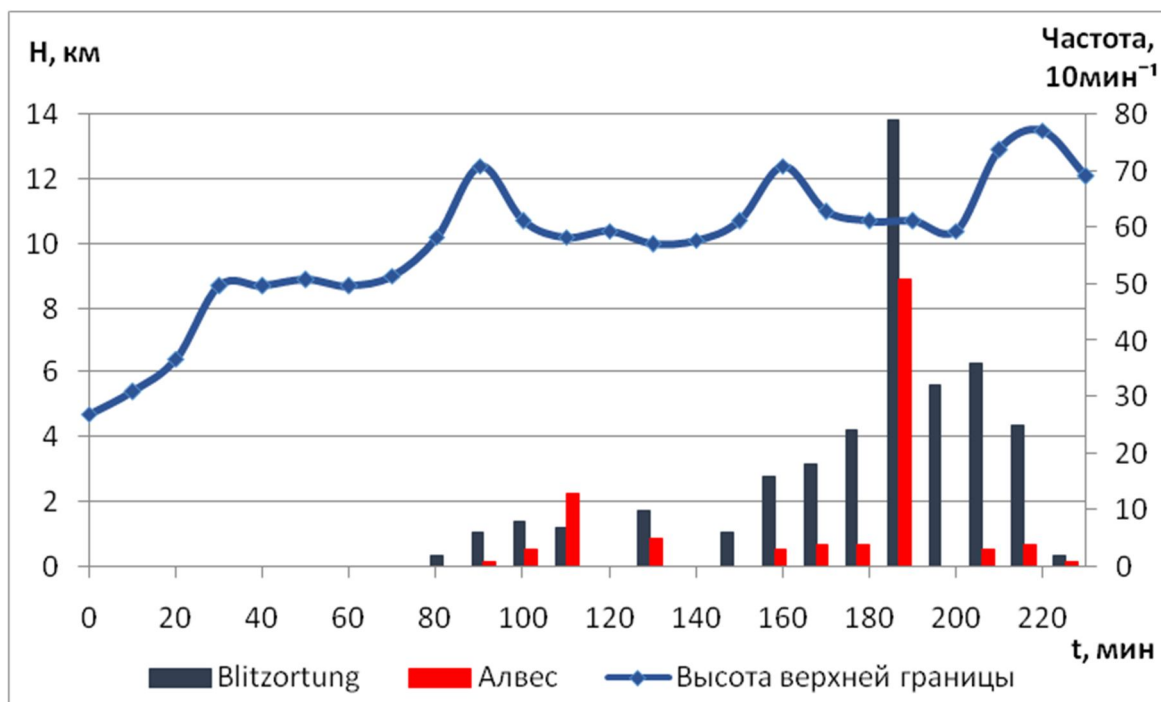


Рисунок 3.5 Распределение высоты верхней границы облака и частоты электрических разрядов

Высота верхней границы облака постепенно увеличивалась. Максимальная высота верхней границы по радиолокационным измерениям была равна 13,5 км и была зафиксирована на 220 минуте развития. Существует вероятность того, что полученные значения высоты верхней границы облака по результатам радиолокационного зондирования могут быть завышенными вследствие влияния боковых лепестков диаграммы направленности антенны, учитывая, что максимальная отражаемость от облака в это время была достаточно велика – 58,5 dBZ.

Первые молниевые разряды зафиксированы грозопеленгационной системой (ГПС) «Blitzortung» на 80 минуте, через 10 минут обе системы, «Алвес» и «Blitzortung», фиксировали электрические разряды. В данном случае появление электрических разрядов можно было ожидать значительно раньше, чем это произошло. Зафиксированные частицы града появились уже на 30 минуте развития облака, далее они регистрировались на каждой снимке радиолокатора. В это время высота верхней границы составляла 10,2 км, максимальная отражаемость фиксировалась вблизи нижней границы и была равна 56,5 dBZ, что было обусловлено наличием града (рисунок 3.4)

Вертикально проинтегрированная водность – 310 кг/м², максимальная интенсивность осадков 77 мм/ч (рисунок 3.6).

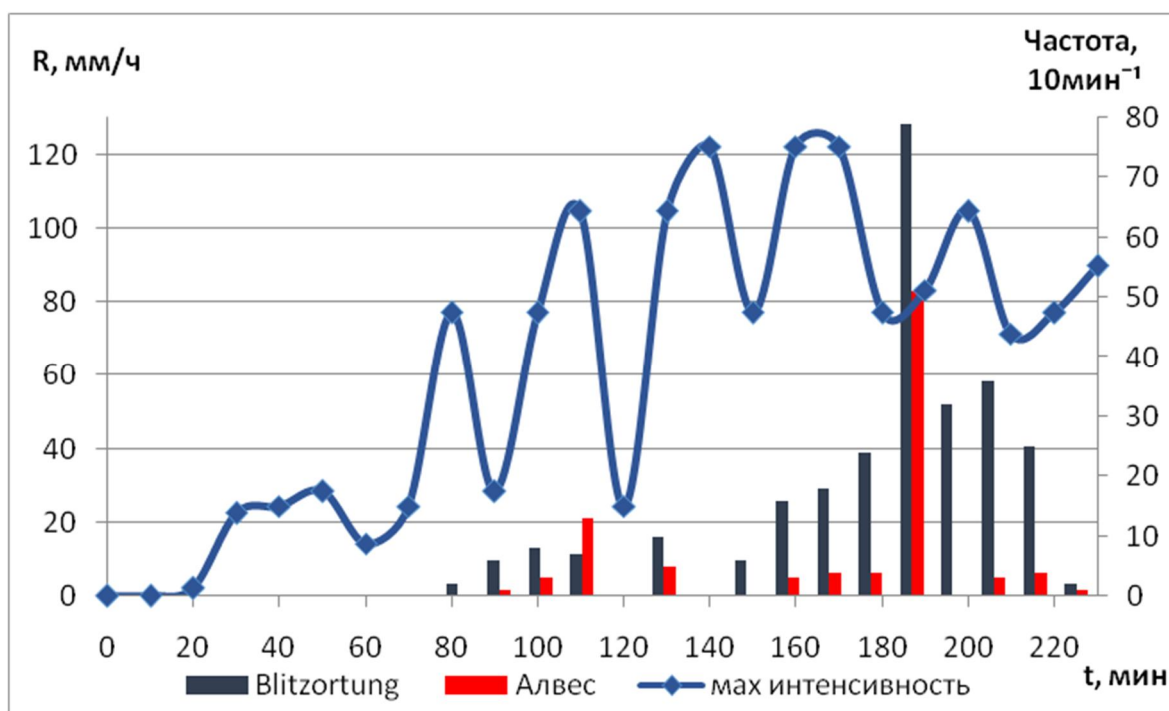


Рисунок 3.6 Распределение максимальной интенсивности осадков и частоты электрических разрядов

На отрезке времени 30-70 минут максимальная интенсивность осадков была не более 30 мм/час, она резко поднялась на 80 минуте, достигнув значения 77 мм/час по данным радиолокатора. Значительное усиление осадков на 80 минуте могло привести к формированию молний вследствие разделения зарядов и усиления коронных разрядов. Интенсивность осадков, в течение всего жизненного цикла облака, имела несколько пиков, максимум же пришелся на 160 – 170 минут, составляя 122 мм/ч. Следует учесть, что эта оценка могла быть завышена из-за присутствия града.

Максимум молниевой активности пришёлся на 190 минуту, 79 разрядов зафиксировано ГПС «Blitzortung» и 51 ГПС «Алвес». В этот момент облако уже находилось южнее Санкт-Петербурга. Высота верхней границы достигла 10,7 км. Облако являлось мультитячейковым с тремя выраженными зонами высокой отражаемости, которая превышала 50 dBZ в двух из них (рисунок 3.7).

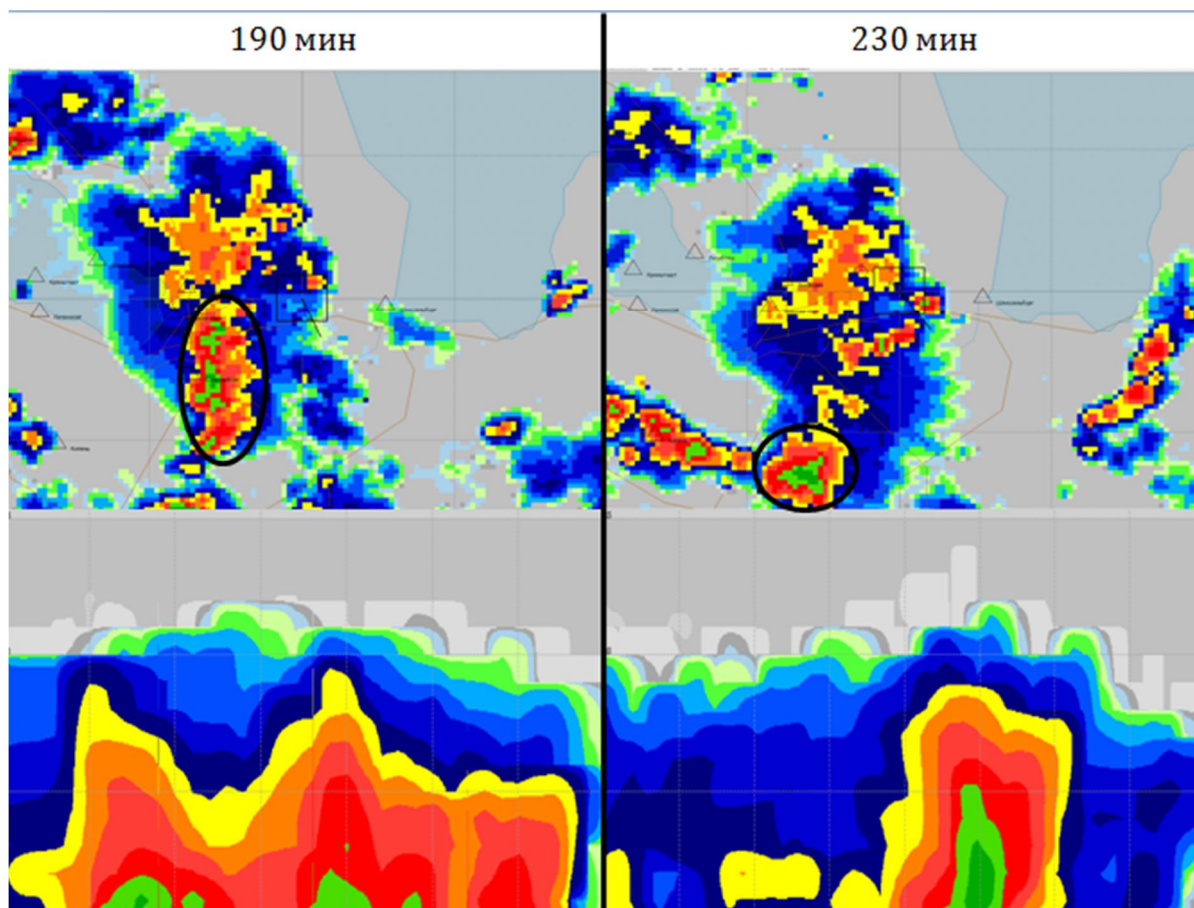


Рисунок 3.7 Радиолокационный снимок и вертикальный разрез облака

Максимальное значение радиолокационной отражаемости за весь рассматриваемый период, равное 61,5 dBZ, было отмечено на 30 мин раньше, здесь произошло существенное его уменьшение до 57 dBZ. Максимальная интенсивность осадков в это время уже начала уменьшаться и составила 83 мм/ч, по радиолокационным данным максимум наблюдался на 20 минут раньше. Вертикально проинтегрированная водность составляла 1036 кг/м².

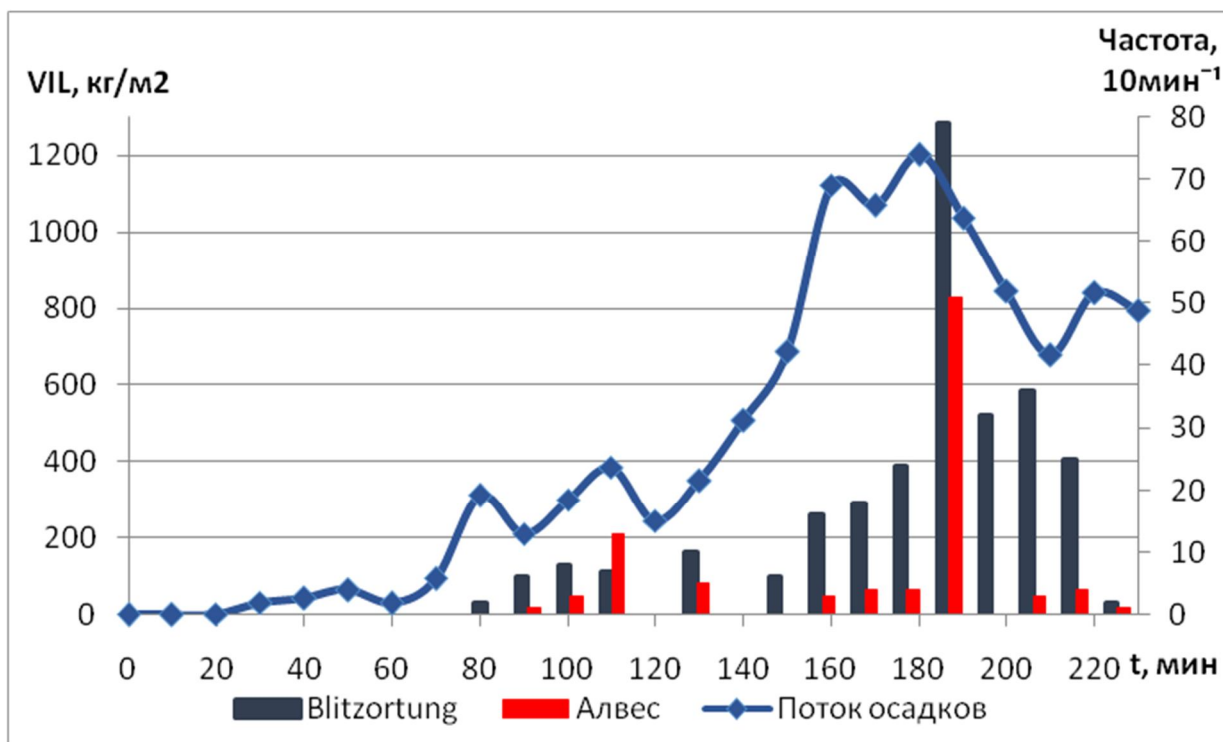


Рисунок 3.8 Распределение значений вертикально проинтегрированной влажности и частоты электрических разрядов

На 80 минуте наблюдается резкий скачок значений вертикально проинтегрированной влажности осадков с 93 кг/м² до 310 кг/м², в это же время были зарегистрированы первые разряды молний. Происходит увеличение значений до 180-190 минуты развития и далее их уменьшение. На графике также выделяются два максимума на 160 и 180 минутах и составляют 1123 кг/м², 1202 кг/м² соответственно.

Последние электрические разряды были зафиксированы на 230 минуте, когда облако имело одну ячейку с высокой отражаемостью (рисунок 3.7). Грозопеленгационная система «Blitzortung» зафиксировала 2 разряда и 1 разряд ГПС «Алвес». Верхняя граница облака располагалась на высоте 12,1 км. Максимальная отражаемость была равна 58 dBZ. Высокие значения отражаемости могут говорить о наличии частиц града. Область повышенной отражаемости $Z > 55$ dBZ располагалась примерно в центре облака.

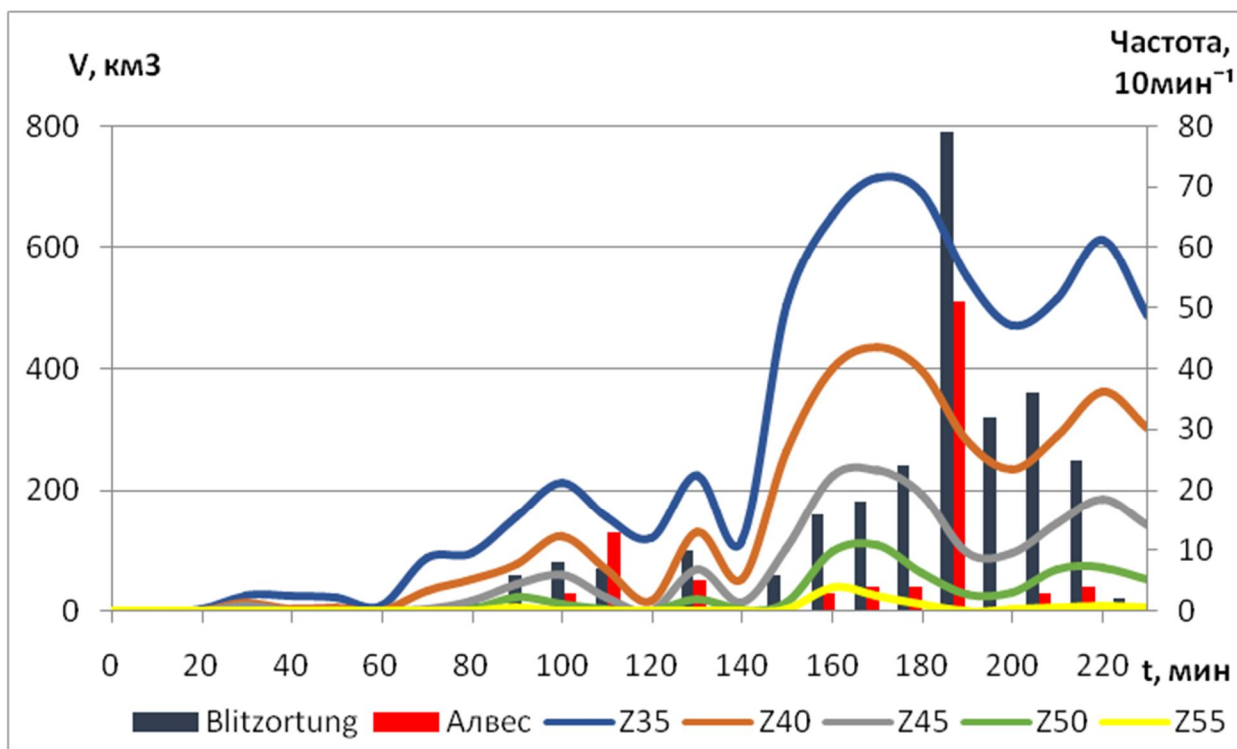


Рисунок 3.9 Распределение объема переохлажденной части облака с отражаемостями более 35-55 dBZ и частоты электрических разрядов

На рисунке 3.9 изображено изменение объемов переохлажденной части с отражаемостями, превышающими 35-55 dBZ в течение жизненного цикла облака. Впервые превышение объема переохлажденной части облака с отражаемостью более 55 dBZ происходит только на 90 минуте. Максимальный объем переохлажденной части более 50 dBZ пришёлся на 170 минуту, когда как максимальный объем более 55 dBZ наблюдался на 10 минут раньше.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что максимальная частота разрядов наблюдается в период, когда облако достигло максимума в своем развитии, из него продолжают выпадать ливневые осадки, интенсивность которых начала снижаться, присутствует жидкая и ледяная фазы, продолжается рост геометрических размеров наковальни. Наличие разрядов свидетельствует о том, что напряженность электрического поля в облаке достигла пробойного значения. Частота разрядов является достаточно большой, что указывает на то, что в Сб происходят активные процессы электризации. Можно предположить, что существенный вклад в электризацию вносит механизм заряжения, связанный с разделением зарядов при контактах “кристаллы–крупы” в

присутствии жидкой фракции. Учитывая столь высокую частоту разрядов и интенсивные осадки, значительный вклад в электризацию облака могут вносить коронные разряды, здесь возможно коронирование с отдельных градовых частиц, крупных кристаллов, а также при сближении частиц осадков.

3.3 Связь частоты разрядов с характеристиками облака

Был выполнен анализ связи частоты электрических разрядов в исследуемом облаке с измеряемыми характеристиками. Установлено, что наибольшая связь проявляется с такими характеристиками, как объем переохлажденной части облака и вертикально проинтегрированная водность.

На рисунках выше представлены результаты измерений молниевых разрядов гронопеленгационными системами «Blitzortung» и «Алвес». Ход электрических разрядов во времени примерно одинаков для двух ГПС, однако количество разрядов зарегистрированных ГПС «Blitzortung» значительно превосходит то, которое регистрируется «Алвес». Из представленных графиков следует, что количество разрядов резко менялось на протяжении жизни облака, что может быть связано с процессами слияния облаков, которые наблюдались на 60, 140 и 200 минутах развития.

Заметна хорошая корреляция с кривыми объема переохлажденной части облака с отражаемостями более 35-55 dBZ и частоты разрядов, при этом видно, что кривые разнесены во времени. Кривая для вертикальной водности по радиолокационным измерениям соответствует кривым для частоты разрядов. Для выявления корреляционных связей вычислим коэффициенты корреляции (таблица 3.1)

Таблица 3.1

Значения коэффициента корреляции

	VIL	Z > 35	Z > 40	Z > 45	Z > 50	Z > 55
$r(\text{Blitzortung})$	0,67	0,65	0,6	0,51	0,45	0,19
$r(\text{Алвес})$	0,38	0,31	0,27	0,16	0,1	0,01

С целью выяснения временного сдвига между кривыми, а также связи между ними, рассчитаны кросскорреляционные функции для объемов переохлажденных частей облака и частоты разрядов, для вертикально проинтегрированной водности и частоты разрядов. Установлено, что максимальное значение коэффициента корреляции наблюдается при временном сдвиге между исследуемыми кривыми в 20 минут. Их максимальные значения приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2

Значения коэффициента корреляции со сдвигом 20 минут

	VIL	Z > 35	Z > 40	Z > 45	Z > 50	Z > 55
$r(\text{Blitzortung})$	0,79	0,78	0,81	0,84	0,81	0,86
$r(\text{Алвес})$	0,46	0,45	0,49	0,53	0,61	0,75

Таким образом, максимальной частоте электрических разрядов предшествует максимальный объем переохлажденной части облака с большими значениями отражаемости. Этот результат соответствует представлениям о том, что важнейшую роль в электризации облака играют ледяные кристаллы, наличие которых в значительной степени обуславливает большую отражаемость. Здесь также следует указать на то, что корреляция между объемом переохлажденной части и частотой разрядов по данным ГПС

«Blitzortung» оказалась более тесной, чем по данным «Алвес». Для объема с отражаемостью более 35 dBZ максимальный коэффициент корреляции для ГПС «Blitzortung» и «Алвес» соответственно составил 0,65 и 0,31. Максимальные значения коэффициента корреляции 0,86 и 0,75 (таблица 3.2) отмечены для кросскорреляционной функции между частотой разрядов по данным ГПС «Blitzortung» и «Алвес» соответственно и объемом переохлажденной части облака с отражаемостью более 55 dBZ. Столь высокая отражаемость в облаках связана с наличием градовых частиц, отсюда следует вывод о том, что они вносят существенный вклад в электризацию облака.

Расчет кросскорреляционной функции показал, что максимальное значение коэффициента корреляции наблюдается при временном сдвиге между исследуемыми кривыми в 20 минут, т.е. максимальное значение вертикально проинтегрированной водности предшествует максимальной частоте молний. Этот результат указывает на то, что осадки приводят к разделению зарядов в облаке, способствуя его электризации. В формировании электрической структуры облака нельзя исключить роль коронных разрядов, которые отмечаются в сильных осадках. Максимальный коэффициент корреляции для систем «Blitzortung» и «Алвес» соответственно составил 0,79 и 0,46 (таблица 3.2).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Совершенствование методов прогноза и диагноза грозовых процессов с целью ослабления их негативного влияния на хозяйственную деятельность человека невозможно без формирования более полных и точных научных представлений о физике кучево-дождевых облаков. Один из перспективных путей решения этой задачи - выявление связей между частотой электрических разрядов и характеристиками Сб, получаемыми с помощью метеорологических радиолокаторов.

В данной работе были проанализированы результаты наблюдений за грозоградовым облаком, развивавшимся в районе Санкт-Петербурга 22.07.2017г. Выполнено детальное комплексное исследование развития грозоградового облака с использованием дистанционных средств измерений: доплеровского поляризационного радиолокатора и грозопеленгационных систем ГПС «Алвес» и «Blitzortung». В ходе анализа полученной информации рассматривалась связь между такими радиолокационными характеристиками облака, как высота верхней границы, максимальная интенсивность осадков, вертикально проинтегрированная водность, объем переохлажденной части облака с отражаемостями более 35-55 dBZ, с частотой молниевых разрядов.

Установлено, что частота разрядов слабо коррелирует с высотой верхней границы облака и максимальной интенсивностью осадков, коэффициенты корреляции частот с объемами переохлажденной части облака со значениями отражаемости, превосходящими 35 дБZ и вертикально проинтегрированной водностью существенно выше.

Было выявлено, что значительное увеличение частоты электрических разрядов происходит приблизительно через 20 минут после достижения максимальных значений объемов переохлажденных частей облака с отражаемостями, превышающими 35-55 дБZ, и значений вертикально

проинтегрированной водности. Данный вывод соответствует принятой гипотезе электризации конвективных облаков, согласно которой, процессы электризации в облаке определяются наличием крупных ледяных частиц. Однако для накопления заряда, достаточного для возникновения молниевой активности, требуется, чтобы с момента появления ледяных частиц прошло некоторое время.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Абшаев М.Т., Абшаев А.М., Малкарова А.М., Мизиева Ж.Ю. О водозапасах ливневых и градовых облаков // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2008. – №2(144). – С.105-109.
2. Бурцев А. В., Фастий Г. П., Ярошевич В. В. Сопоставление результатов регистрации различных систем грозопеленгации в Кольском регионе // Труды Кольского научного центра РАН. – 2018. – Т.9 № 3-16. – С. 48-52.
3. Временные методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике. – Москва, 2014. – 110 с.
4. Климат Санкт-Петербурга и его изменения/ Федер. служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Гос. учреждение “Гл. геофиз. обсерватория им. А.И. Воейкова”; под ред. д.ф.-м.н. В.П. Мелешко [и др.]. – Санкт-Петербург: государственное учреждение “Главная геофизическая обсерватория”, 2010. – 256 с.
5. Мозер А.Л. Визуализация данных грозопеленгаторов и доплеровских метеорологических локаторов с двойной поляризацией // Записки Российского Гидрометеорологического Университета. – 2016. - №43. – С. 174-183.
6. Справочник по климату СССР Выпуск 3 Часть II. – Ленинград, 1965
7. Швер Ц.А. КЛИМАТ Ленинграда. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1982. – 254 с.
8. R. W. Klebesadel, W. Doyle Evans, E. E. Fenimore, J. G. Laros, and J. Terrell, Time-of-arrival location technique, Los Alamos Science, vol. 3, pp. 10–23, 1982.
9. Описание аппаратно-программного комплекса грозопеленгационной системы (АПК ГПС) «Alwes 9.301» [Электронный ресурс]. – URL: <http://alwes.ru/index2.php/>

10. Грозопеленгационная система Росгидромета [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.lightnings.ru/> (Дата обращения: 1.06.2019)
11. A community project with free lightning maps and apps: LightningMaps.org [Электронный ресурс]: Lightning archive. URL: https://www.lightningmaps.org/blitzortung/europe/index.php?bo_page=archive&bo_map=0&lang=en&bo_year=2017&bo_month=07&bo_day=22&bo_hour_from=6&bo_hour_range=6#bo_arch_strikes_maps_form
12. A community project with free lightning maps and apps: LightningMaps.org [Электронный ресурс]: The Coverage Map. URL: <http://www.lightningmaps.org/extra/coverage?lang=en> (Дата обращения: 1.06.2019).