

УДК551.508.94

*М.К. Олжабаев*<sup>1</sup> [murat16091973@gmail.com](mailto:murat16091973@gmail.com)*К.Ж. Исабаев*<sup>1</sup> [rtv\\_nk@mail.ru](mailto:rtv_nk@mail.ru)*С.А. Фомичев*<sup>1</sup> [sergfomichev@mail.ru](mailto:sergfomichev@mail.ru)*Б.Б. Имансакипова*<sup>2</sup> [imansakipova@mail.ru](mailto:imansakipova@mail.ru)<sup>1</sup>Военно-инженерный институт радиоэлектроники и связи,

г. Алматы, Республика Казахстан

<sup>2</sup>Университет Сампаева

## ДАТЧИКИ РЕГИСТРАЦИИ КНЧ И ОНЧ-ИЗЛУЧЕНИЯ

В этой статье описывается, каким образом возникают электромагнитные излучения в диапазоне крайне низких частот (КНЧ) и очень низких частот (ОНЧ), особенности возникновения грозовой активности в воздушном пространстве и способы, средства ее обнаружения. Описываются основные разновидности датчиков, которые используются для приема, обнаружения и регистрации этого излучения. Грозы, вулканы, пыльные бури, торнадо, смерчи сопровождаются грозowymi разрядами – мощными источниками электромагнитного излучения этого радиочастотного диапазона. Надежная и точная система обнаружения молний на большой территории и представления этой информации в режиме реального времени пилотам, операторам аэродромов и службам воздушного движения является большим преимуществом для безопасности, так как грозовая активность представляет значительную опасность воздушным судам как во время полета, так и на земле, при работе аэронавигационного оборудования, систем и комплексов противовоздушной обороны. Особо отмечается, что грозовая активность высокой интенсивности также может привести к чрезвычайным ситуациям природного и техногенного характера. Таким образом, описанная совокупность векторов-признаков грозowych разрядов, выделенная в грозовой очаг, позволит исследователям и разработчикам систематизировать законы распределения грозowych кластеров в пространстве и во времени и соотнести их с географическими законами, а также выявить среди грозowych объектов наиболее опасные, угрожающие жизни человека и наносящие ущерб многим сферам его деятельности.

**Ключевые слова:** датчики, частота, гроза, молния, воздушное пространство, активность, атмосфера, обнаружение, вспышка.

### Введение

Особый интерес к электромагнитным волнам в диапазоне крайне низких частот (КНЧ составляет от 30 до 3000 герц) и очень низких частот (ОНЧ составляет от 3 до 30 килогерц) появился в начале прошлого века, после подтверждения, что электромагнитные излучения данного диапазона могут распространяться в так называемом волноводе между Землей и ионосферой с очень малым затуханием и потерями. На начальных этапах основным практическим применением данного радиочастотного диапазона была связь между континентами. Однако сейчас этот диапазон частот является перспективным для разработки и создания радионавигационных комплексов, средств обнаружения опасных метеорологических явлений, связанных с грозовой детальностью, а также для связи с подводными лодками, так как электроволны могут проникать на большие глубины и расстояния в морской (соленой) воде [1, 20].

Изучение гроз и их действия на авиационную технику и сооружения на земле является актуальной темой исследований. Это связано с тем, что методы, используемые для определения действия ветра на конструкции, все еще основаны на моделях для стационарных явлений синоптического масштаба, которые происходят в нейтральных атмосферных условиях, с профилями скоростей в равновесии с планетарным пограничным слоем (ППС). Грозовая активность представляет опасность для эксплуатации воздушных судов (в полете и на земле), работы аэропорта и предоставления услуг воздушного движения. Молния может указывать на наличие других метеорологических опасностей для полетов. В некоторых ситуациях она может быть единственным надежным средством обнаружения этих других опасностей [1, 13].

### Источники КНЧ и ОНЧ-излучения

В научных изданиях рассматривается несколько основных источников КНЧ и ОНЧ-излучения.

Естественные, к которым можно отнести грозовые разряды, вулканические извержения, бури и торнадо [1, 19]. Вместе с тем КНЧ и ОНЧ-излучения в виде шумов образуются молниевыми (грозовыми) разрядами в мировой электросети [2]. Молния (грозовой разряд) представляет собой мощный и особо мощный электрический разряд, короткий по длительности в атмосфере, длина которого обычно измеряется километрами и десятками километров.

Чаще всего молнии бывают внутри грозового облака (75%) и значительно реже между облаком и земной поверхностью (25%). По данным спутникового мониторинга, интенсивность грозовой активности составляет в среднем 40 раз в секунду [4, 14].

Наибольшая грозовая активность фиксируется в трех районах: в Индонезийском, Африканском и Американском (рис. 1) [5, 14, 15].

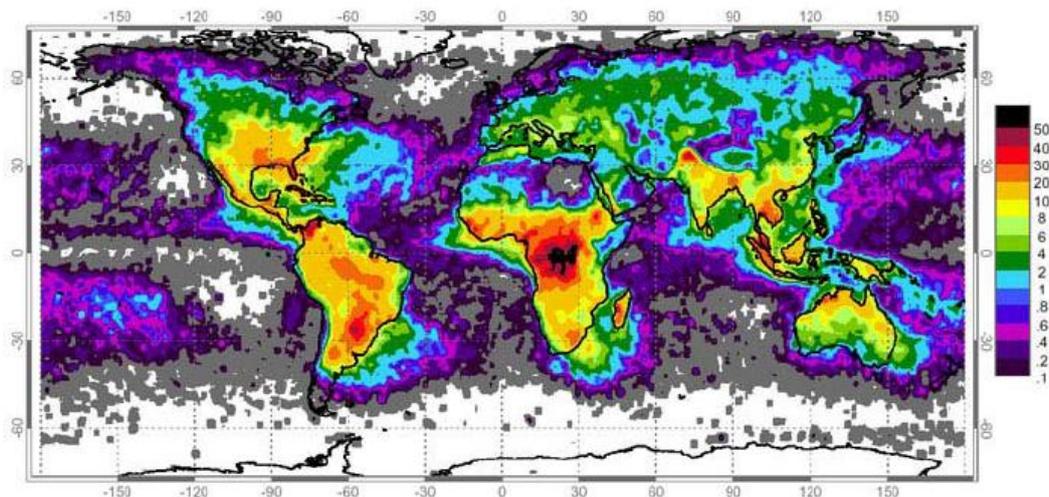


Рисунок 1 – Районы грозовой активности

### Понятие грозовой активности в воздушном пространстве

Гроза – один или несколько внезапных электрических разрядов, проявляющихся вспышкой света (молния) и резким или грохочущим звуком (гром) [1, 11, 12].

Молния – световое проявление, сопровождающее внезапным электрическим разрядом, который происходит из или внутри облака или, реже, из высоких сооружений на земле или в горах. Можно выделить три основных типа молний. Кроме того, существуют и другие формы светящихся электрических проявлений. Отметим также, что молнии иногда можно наблюдать вместе со шлейфами вулканического пепла во время извержений (рис. 2) [1].

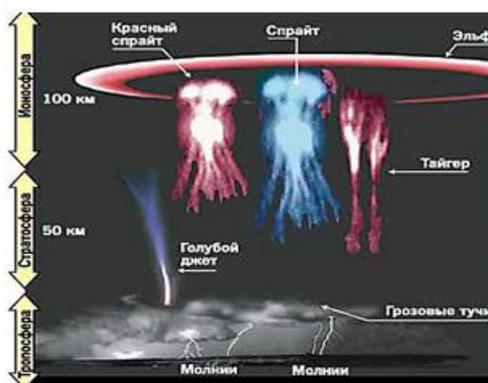


Рисунок 2 – природа газовых разрядов

### Особенности возникновения грозовой активности в воздушном пространстве

Грозы связаны с кучево-дождевыми облаками и чаще всего сопровождаются осадками, которые, достигая земли, выпадают в виде ливня, снега, снежных гранул, мелкого града или града [1, 18, 19].



Рисунок 3 – Громоотвод



Рисунок 4 – Облачный разряд

Этот тип молнии (рис. 3), называемый в народе «громоотвод» или «молния из облака в землю», возникает между облаком и землей. Обычно, кажется, что она следует извилистым путем и обычно разветвляется вниз от четко выраженного основного канала (полосатая, вилообразная или ленточная молния). Разряд в земле обычно инициируется, когда движущийся вниз отрицательно заряженный «ступенчатый лидер» соединяется с потоком положительного заряда, тянущимся вверх [2]. После создания электропроводящего канала следует мощный электрический разряд. Это «обратный удар» и наиболее яркая и заметная часть разряда молнии. Большинство вспышек молнии между облаками и землей состоят из нескольких ударов, что вызывает эффект мерцания или стробоскопического света [1, 2].

Хотя это случается гораздо реже, чем молнии, инициированные движущимися вверх стримерами, молнии «облако-земля» могут быть инициированы движущимся вниз положительно заряженным стримером. Обычно он возникает в верхней части грозового облака, а не в нижней. Положительный разряд от облака к земле обычно очень яркий по сравнению с другими молниями. Он также может пройти много километров по горизонтали и ударить в землю в виде так называемого «синего болта» (молния в чистом воздухе или наковальня). Разряды «земля-облако», инициированные движущимся вверх лидером, иногда могут исходить от объектов на земле, таких, как высокие башни и небоскребы (рис. 4).

Этот тип молнии (рис. 5), который в народе называют «листовой молнией», поскольку он освещает небо листовым светом, возникает внутри грозового облака (внутриоблачная молния) или из одного облака в другое (облачно-облачная молния или межоблачная молния). Как правило, она создает рассеянное освещение без четкого канала. К этому типу молний относятся так называемые тепловые молнии, состоящие из диффузного света, вспыхивающего от далеких гроз, видимых на горизонте [3]. Иногда разряды молнии, возникающие под наковальней или внутри нее, можно увидеть горизонтально движущимися на некоторое расстояние, образуя многочисленные ветви, похожие на деревья. Такие разряды известны как «ползущие наковальни» [4].



Рисунок 5 – воздушный разряд

Этот тип молнии, который также иногда называют «полосатой молнией», возникает в виде извилистых разрядов, проходящих из грозового облака в воздух и не ударяющих в землю. Разряд часто разделяется на ветви, но с четко выраженным главным каналом. Он часто включает длинную квазигоризонтальную часть [5, 10].

К другим формам светящихся электрических разрядов относятся следующие.



Рисунок 6 – Спрайты



Рисунок 7 – Джеты



Рисунок 8 – ELVES, эльфы

Короткоживущие светящиеся электрические проявления, формирующиеся в верхних областях атмосферы над крупными грозовыми облаками [3, 4].

Крупные грозовые облака способны производить электрические явления высоко в атмосфере. Они редко наблюдаются визуально и в основном с помощью чувствительного фотографического оборудования и в силу своей слабости только ночью. К переходным светящимся явлениям относятся спрайты, джеты и ELVES.

Спрайты (рис. 5). Это крупномасштабные электрические разряды, возникающие высоко в атмосфере на высоте около 50–90 км, над крупными грозовыми системами. Обычно они возникают одновременно с мощными положительными разрядами от облаков к земле. Они проявляются в виде большой, но слабой вспышки, обычно красного цвета. Спрайты длятся не более нескольких секунд. Их редко можно увидеть человеческим глазом и только ночью над отдаленными крупными грозовыми системами [4].

Джеты (рис. 6). К ним относятся голубые струи, голубые стартеры и гигантские струи. Голубые струи — это узкие конусообразные вспышки голубого цвета, выходящие из вершины грозового облака и поднимающиеся на высоту около 40–50 км. Голубые струи длятся всего долю секунды, но их наблюдали пилоты самолетов. Голубые звезды более слабые и короткие, чем голубые струи, и достигают высоты около 20 км. Гигантские струи были сфотографированы на высоте около 70 км [5, 8].

ELVES (рис. 8) (излучение света и возмущения очень низкой частоты, вызванные источниками электромагнитных импульсов) появляются на высокочувствительных видеозаписях в условиях низкой освещенности в виде тусклого, уплощенного, расширяющегося свечения диаметром до 400 км и продолжительностью, как правило, менее 0,001 секунды.



Рисунок 9 – Шаровая молния



Рисунок 10 – Огонь

Иногда наблюдается светящийся шар (рис. 8) вскоре после разряда на землю. Этот шар, диаметр которого, как сообщается, обычно составляет от 10 до 20 см, но иногда достигает 100 см, известен как шаровая молния. Она медленно движется в воздухе или по земле и обычно исчезает с сильным взрывом [6, 7, 9].

Огонь святого Эльма (рисунок 9): более или менее непрерывный светящийся электрический разряд слабой или умеренной интенсивности в атмосфере, исходящий от возвышенных объектов на поверхности Земли (например, молниеотводов, ветряных лопастей и корабельных мачт) или от летящих самолетов (например, кончиков крыльев). Это явление можно наблюдать, когда электрическое поле вблизи поверхности объектов становится сильным [1]. Оно часто проявляется в виде фиолетовых или зеленоватых шлейфов или сполохов, хорошо видимых ночью. Хотя электрические условия, порождающие огонь святого Эльма, существуют в связи с грозами, он также может развиваться в электрических полях, усиленных обильным снегом и сильным ветром без гроз, а также при пролете самолетов через вулканический пепел [2, 3].

Существует два основных типа излучения, которые можно разделить на искусственные источники излучения КНЧ и ОНЧ-диапазонов:

1. Радиопередатчики большой мощности с антеннами электрического и магнитного типов.
2. Радиопередатчики большой мощности с антеннами беспроводного типа: нагревные стенды.

В областях разработки задач, как межконтинентальная связь, навигация и др., эффективность излучения имеет важное значение. Для получения высокой эффективности размеры антенн должны соответствовать длине излучаемой волны. ОНЧ-диапазон с частот от 3 до 30 кГц имеет длину волны 100 – 10 км. Таким образом, антенна ОНЧ-диапазона должна быть больших размеров. В случае с КНЧ-диапазоном от 3 до 3000 Гц, с длиной волны 100000 – 100 км, размер антенн должен быть порядка нескольких десятков километров. Антенна будет размером в несколько десятков километров.

#### **Распространение КНЧ и ОНЧ-волн**

В современной науке выделено несколько основных теорий распространения излучения этих диапазонов волн в волноводе, образованном Землей и ионосферой. Основное отличие в них заключается в трактовке границ волновода [16]. Но первостепенной считается Бадденовская теория распространения, особенность которой заключается в методе определения границы волновода с помощью коэффициентов отражения. Следует отметить, что граница волновода может быть резкой, слоистой и даже анизотропной структуры.

При образовании КНЧ и ОНЧ-излучения при грозовых разрядах излучаются три основных типа сигналов [17]:

1. Spheric (сферика). Он образуется молниевым разрядом. Имеет следующие особенности: широкополосный короткий импульс. На спектрограмме имеет вид вертикальной полосы (рис. 11). В ней по оси абсцисс время в секундах, по оси ординат – частота излучения. Цветом выделена амплитуда сигнала. В верхней части зависимости отражена волновая форма сигналов спектрограммы.

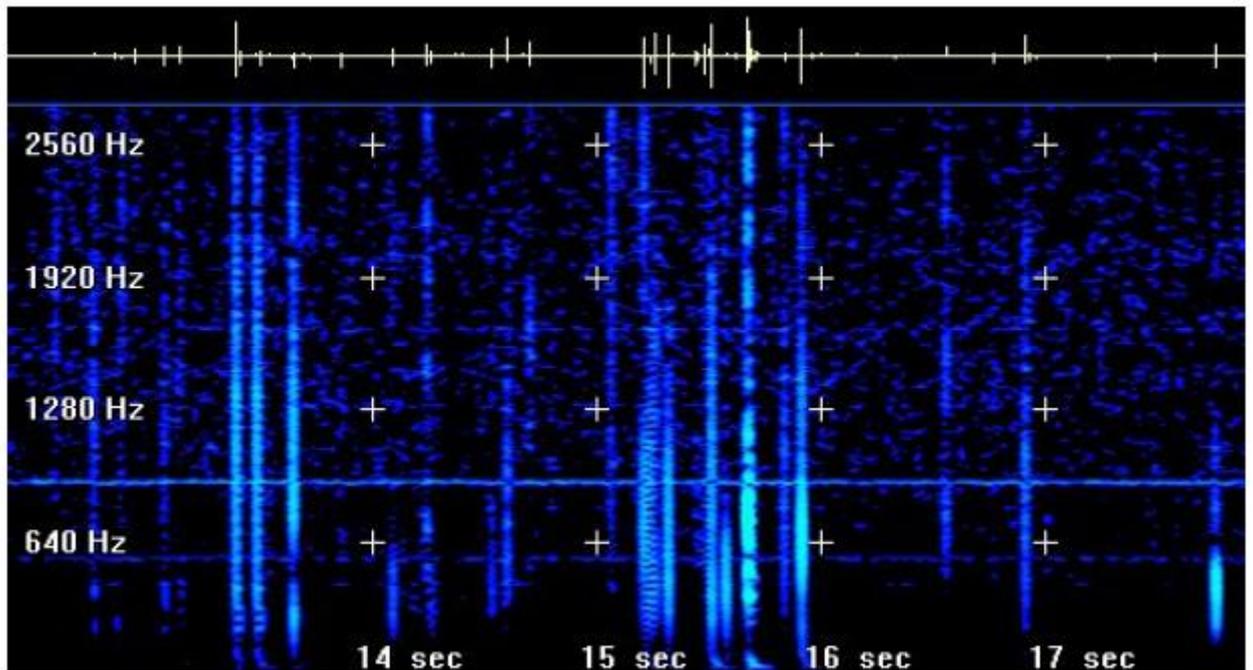


Рисунок 11 – Типовая спектрограмма разрядов типа «сфериков»

2. Tweek (твики). Эта разновидность излучения, образующаяся от молниевых разрядов, преодолевшее большое расстояние между Землей и ионосферой (волноводе). Особенностью является многократное отражение от стенок волновода и дисперсия сигнала, которые отражены на спектрограмме (рис. 12) в виде вертикальных полос в диапазоне высоких частот, которые имеют характерный хребет в диапазоне около 2 кГц.

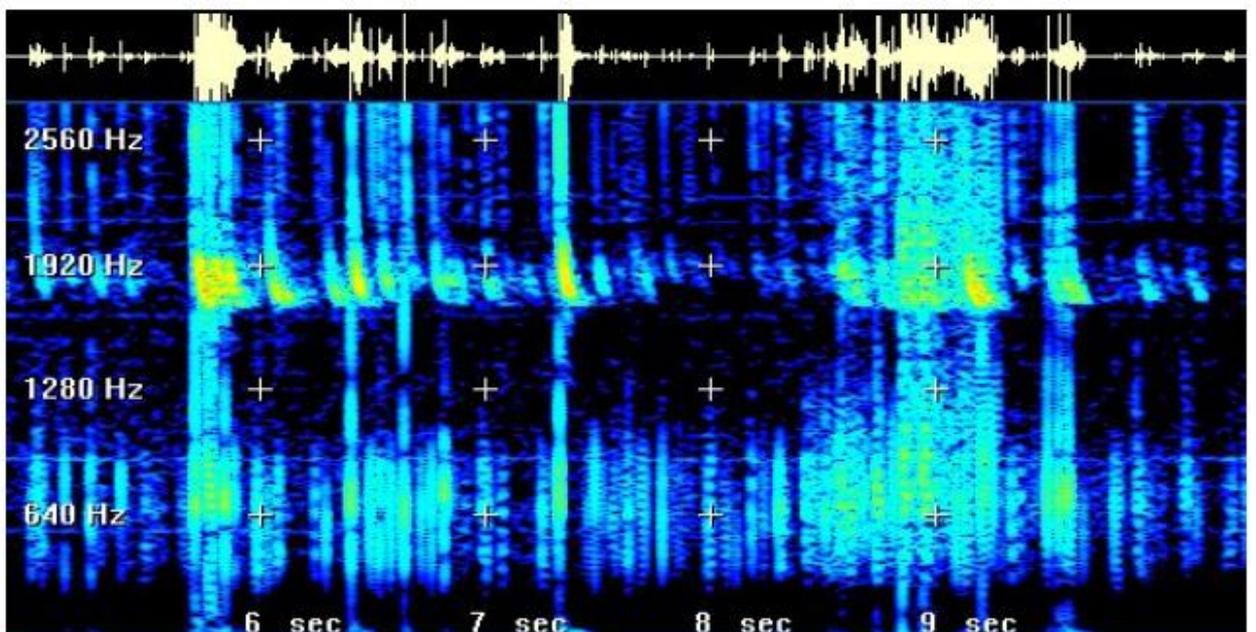


Рисунок 12 – Типовая спектрограмма разрядов типа «твики»

3. Whistler (вистлер, или свист). Эта разновидность излучения, образующаяся от молниевых разрядов, направление движения которых направлено вдоль силовых линий магнитного поля Земли. Они регистрируются спутниками [1, 6]. По причине того, что оно распространяется преимущественно в ионосфере – дисперсия этих сигналов гораздо более ярко выражена, чем у твиков. На спектрограмме вистлер имеет вид (рис. 13) длинной дуги.

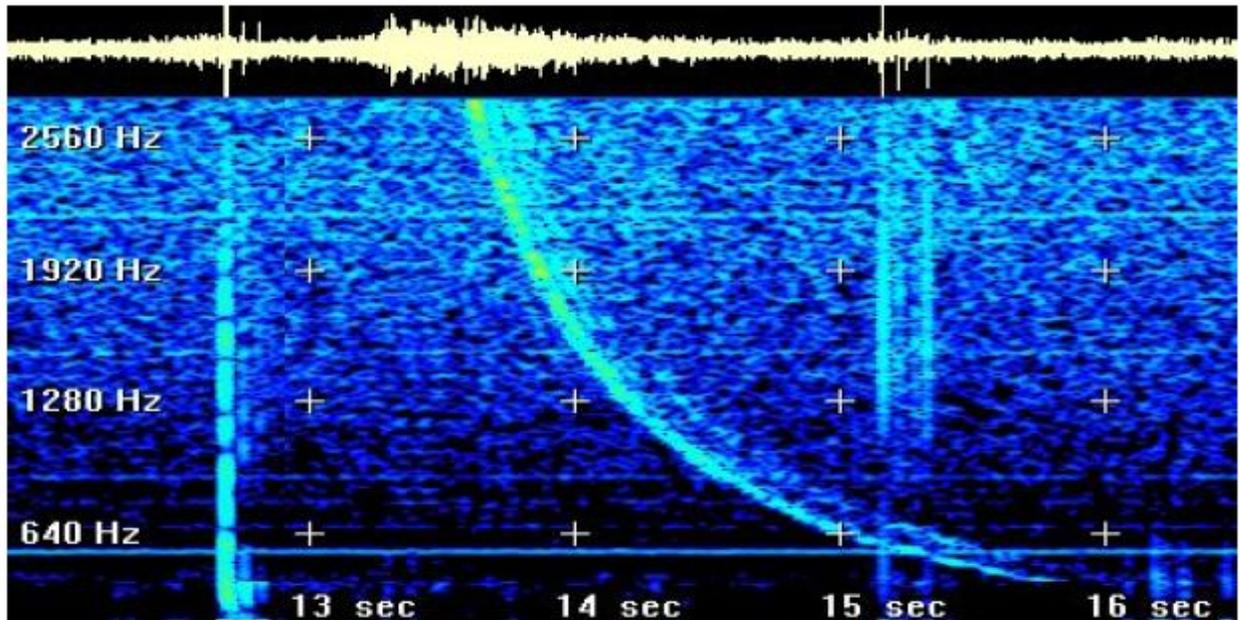


Рисунок 13 – Типовая спектрограмма разрядов типа «вистлер»

#### Датчики регистрации КНЧ и ОНЧ-излучения

В настоящее время существует множество метрологических систем, работающих в КНЧ/ОНЧ-диапазоне, использующихся в практических и научно-исследовательских целях.

С точки зрения практического направления важное место занимает задача локации и детектирования грозовых облаков. С этой целью реализованы глобальные, а также национальные системы мониторинга. К ним относятся: World Wide Lightning Location Network, National Lightning Detection Network (NLDN) и др. [15].

К пионерам систем, разработанных для научно-исследовательской деятельности, можно отнести систему Atmospheric Weather Electromagnetic System for Observation, Modeling, and Education (AWESOME) [20]. Ее основой является набор магнитных рамочных антенн различных размеров и форм, имеющих в своем составе GPS-модули для синхронизации данных и значений [16].

Основным средством измерений излучения в КНЧ/ОНЧ-диапазонах является два типа датчиков: это магнитометры и рамочные антенны.

Особенностью конструкции магнитометров являются сердечники с очень высокой магнитной проницаемостью. Это дает неоспоримое преимущество в виде уменьшения геометрических размеров – компактности. Это позволяет при их установке на местности минимизировать ветровые и вибрационные нагрузки, приводящие к паразитным сигналам на датчике. Их объективным недостатком является большое количество витков, вызывающих высокое омическое сопротивление. Это вызывает рост так называемых тепловых шумов во входной части предусилителя.

Достоинством, с одной стороны, рамочных антенн является малое количество витков и при большой площади сечения провода сопротивление датчика минимальных значений. Это минимизирует тепловые шумы на входной части предусилителя. Но объективным недостатком рамочных антенн являются большие конструкции, в которых возможно возникновение собственных нежелательных колебаний, вызываемых внешними нагрузками, наиболее часто ветровыми, так называемые паразитные ложные сигналы.

Таблица 1– Основные характеристики некоторых датчиков

Разновидность датчика		Некоторые его основные характеристики
1	Индукционный магнитометр MFS-06	Чувствительность датчика: 10 пТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$ при частоте 0.01 герц Чувствительность датчика: 0.1 пТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$ при частоте 1 герц Чувствительность датчика: 1 фТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$ при частоте 1 килогерц Диапазон рабочих частот: 0.00025-10000 герц
2	Индукционный магнитометр MFS-07	Чувствительность датчика: пТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$ при частоте 0.01 герц Чувствительность датчика: 0.3 пТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$ при частоте 1 герц Чувствительность датчика: 0.8 фТл/ $\sqrt{\text{Гц}}$ при частоте 1 килогерц Диапазон рабочих частот: 0,001-60000 герц
3	Рамочная антенна "Вистлер"	Чувствительность датчика: 0.4 фТл/ $\sqrt{\text{герц}}$ Диапазон рабочих частот: 800-100000 герц
4	Рамочная антенна "Плутон"	Чувствительность датчика: 0.5 фТл/ $\sqrt{\text{герц}}$ Диапазон рабочих частот: 800-30000 герц

### Заключение и выводы

Грозы – это опасное природное явление, приводящее к возникновению чрезвычайных ситуаций, в результате которых гибнут люди и наносится ущерб многим сферам человеческой деятельности, таким как электроэнергетика и лесное хозяйство [13, 20]. В связи с этим необходимо совершенствовать методы регистрации грозы и методы выделения грозовых объектов с целью выявления закономерностей эволюции грозовой активности и прогнозирования особенностей развития и интенсивности грозовой деятельности. В результате выполненного обзора научных публикаций, посвященных задаче выделения грозового очага, выявлено, что не существует аналитического выражения, описывающего развитие грозового очага.

С целью обнаружения с большой точностью эпицентра грозовой деятельности и детектирования из общего массива данных о грозовых разрядах большое значение имеет точность определения самого грозового разряда. Необходимо учитывать, что данные датчиков (грозорегистраторов) в определенной доле имеют неверные данные: «шумы» от ветровой нагрузки или так называемое воздействие «тепловых шумов». Также имеет место быть возможная погрешность определения координат грозового разряда в пункте наблюдения и воздушном пространстве [17, 20].

Таким образом, совокупность векторов-признаков грозовых разрядов, выделенная в грозовой очаг, позволит исследователям систематизировать законы распределения грозовых кластеров в пространстве и во времени и соотнести их с географическими законами, а также выявить среди грозовых объектов наиболее опасные, угрожающие жизни человека и наносящие ущерб многим сферам его деятельности.

### Литература

1. Белоцерковский, А. В. Активно-пассивная радиолокация грозовых и грозоопасных очагов в облаках / А. В. Белоцерковский [и др.] // СПб.: Гидрометеиздат, 2020. – 215 с.
2. Будуев, Д. В. Однопунктовая система пассивного мониторинга грозовой деятельности. Дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18 / Будуев Денис Владимирович. – Челябинск, 2021. – 125 с.
3. Ершова, Т. В. Параметры молниевой активности по инструментальным измерениям / Т. В. Ершова, В. П. Горбатенко // Вестник Томского государственного педагогического университета. – 2020. – №. 5. – С.150–154.

4. Иньков, В. К. Широкие особенности грозовой деятельности / В. К. Иньков, Л. Г. Махоткин // Труды ГГО. Атмосферное электричество. – 2020. – Вып. 442. – С.34–38.
5. Кононов, И. И. Радиотехнические методы местоопределения грозовых очагов / И. И. Кононов, И. А. Петренко, В. С. Снегуров. – Л.: Гидрометеиздат, 2021. – 221 с.
6. Муллаяров В.А., Каримов Р.Р., Козлов В. И., Мурзаева Н. Н. Связь грозовой деятельности с солнечной активностью по наблюдениям фонового ОНЧ-излучения // Метеорология и гидрология. – 2020. – N 8. – С. 48–56.
7. Панюков, А. В. Системы пассивного мониторинга грозовой деятельности / А. В. Панюков, Д. В. Будуев, Д. Н. Малов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Сер.: Математика, Физика, Химия. – 2021. – №. 8. – 24 с.
8. Раков, В. А. Современные пассивные радиотехнические системы местоопределения молний / В. А. Раков // Метеорология и гидрология. – 2020. –№1. – С.118–123.
9. Снегуров, А. В. Методика и результаты наблюдений за грозами, системами пеленгации гроз и МРЛ / А. В. Снегуров, В. С. Снегуров, Г. Г. Щукин // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2021. – №. 12. – С.38–49.
10. Трусовский, П. Анализ методов и средств однопозиционной пассивной радиолокации грозовых очагов / П. Трусовский // Proceedings of International Conference RelStat'04. Transport and Telecommunication. – Vol.6. – №3. – 2021. – С.431–437.
11. Авиационные факторы риска, программа обучения и подготовки ETR - №20 ВМО – ТД - №1390 // Секретариат Всемирной метеорологической организации Женева – Швейцария – 2007. – С.39–43.
12. Ефимов В.В., Основы авиации. Часть I. Основы аэродинамики и динамики полета летательных аппаратов / В.В Ефимов, М.Г Ефимова.// Учебное пособие. – М.: МГТУ ГА, 2012. – С.42–58.
13. Лободин Т.В. К вопросу об ущербе, наносимом грозами // Труды ГГО. – Вып. 486. – 1986. – С. 70 –71.
14. Иньков В.К., Махоткин Л.Г. Широкие особенности грозовой деятельности // Труды ГГО. Атмосферное электричество. – 1981. – Вып.442. – С. 34–38.
15. Раков В.А. Современные пассивные радиотехнические системы местоопределения молний // Метеорология и гидрология. – 1990. – № 11. –С.118–123.
16. Кашпровский В. Е. Определение местоположения гроз радиотехническими методами. — М.: Наука, 1984. – 220 с.
17. Панюков А.В., Будуев Д.В. Алгоритм определения расстояния до местоположения молниевых разрядов // Электричество. – № 4. – 2001. – С. 10–14.
18. Степаненко В. Д., Гальперин М. С. Радиотехнические методы исследования гроз. — Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 204 с.
19. Дружин Г.И., Козлов В.И. Экспериментальные исследования влияния трассы распространения при регистрации излучения мировых очагов гроз // Геомагнетизм и аэрномия. – 1994. – Т.34. – N 6. – С. 174–176.
20. Лободин Т.В. К вопросу об ущербе, наносимом грозами // Труды ГГО. – Вып. 486. – 1986. – С. 70–71.