

## **АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РЕГИСТРАЦИИ МОЛНИЕВОЙ АКТИВНОСТИ НА КОЛЬСКОМ ПОЛУОСТРОВЕ**

Отключения воздушных линий (ВЛ) из-за поражения их элементов молнией доставляют серьезные технические и финансовые проблемы как потребителям электроэнергии, так и ее поставщикам. При больших протяженностях отдельных линий время поиска повреждений при неуспешных АПВ может составить продолжительное время, особенно при неблагоприятных метеоусловиях в районах Крайнего Севера. Конечно, на подстанциях применяются специальные приборы для определения места повреждения (ОМП) ВЛ, и в настоящее время ведутся работы, направленные на улучшение этих приборов и методов ОМП [1]. Однако, как показывает текущий опыт эксплуатации, точность ОМП оставляет желать лучшего, поэтому данные региональных и глобальных систем грозопеленгации могут являться существенным подспорьем для служб линий и позволят значительно снизить расходы на восстановление электроснабжения потребителей.

В настоящее время функционируют региональные и глобальные систем грозопеленгации [2-9], в том числе коммерческие (ГПС Алвес, Верея-МР, WWLLN, NLDN (Vaisala), Euclid, Boltek, GLN (TOA Systems) и др.) и любительские (Blitzortung). Системы пеленгации могут быть однопунктовыми или содержать связанную сеть грозопеленгаторов, и, как правило, предоставляют некоторую гарантированную точность обнаружения атмосферных разрядов. Точность пеленгации напрямую зависит от плотности расположения детекторов: чем их больше на конкретной территории, тем выше точность обнаружения места разряда молнии на этой территории. Конечная цель большинства грозопеленгационных систем – это повышение точности определения места грозового разряда и предупреждение о надвигающемся грозовом фронте.

Особенностью Мурманской области является наличие узкого транспортного коридора, в котором сосредоточены разнородные инфраструктуры: автомобильная и железная дороги, воздушные и кабельные линии электропередачи и связи. Такое расположение приводит к интенсивному взаимному электромагнитному влиянию проводных коммуникаций, причем работоспособность их также является взаимозависимой. Воздействие токов молнии на проводные коммуникации и объекты

инфраструктуры нарушает электроснабжение и вызывает повреждение оборудования. Изменение климата привело к усилению грозовой активности в северных регионах России. В сочетании с низкой проводимостью грунта это приводит к более высокой удельной грозопоражаемости оборудования, чем в средней полосе РФ. Доля грозовых отключений системообразующих линий электропередачи на Кольском полуострове составляет в среднем за год 50-55%, а в грозовые месяцы доходит до 90-95%. В то же время в южных регионах России эта доля составляет 25%, хотя среднее число грозовых часов в десять раз больше.

С 2013 года ЦЭС КНЦ РАН в инициативном порядке проводит регистрацию разрядов молний на территории Кольского полуострова [10]. Регистрация проводится двумя однопунктовыми грозопеленгаторами дальнего радиуса действия StormTracker канадской фирмы Voltek. Кроме того, в начале 2020 г. в Апатитах установлен датчик молний LPS-200 разработки TOA Systems, Inc. (<http://toasystems.com>). В ходе исследований было выявлено, что точность локации молний в ближнем радиусе действия (до 50 км) является крайне низкой. Для проверки точности определения разрядов молний устройством Voltek StormTracker в 2018 году была предпринята попытка сравнить результаты регистрации со сторонней системой регистрации разрядов. К коммерческим зарубежным и Российским системам грозопеленгации у нас доступа нет. Грозопеленгационная система Росгидромета, к сожалению, не позволяет свободно оперировать ее данными, поэтому была выбрана любительская система Blitzortung [9].

Проект был инициирован в 2003 г. Эгоном Ванке (Prof. Dr. Egon Wanke) – профессором Дюссельдорфского университета имени Генриха Гейне. Его исследования в области разработки алгоритмов для динамических сетей сенсорных устройств привели к идее создания распределенной сети детекторов молниевых разрядов, позволяющей с высокой точностью определять место удара молнии в землю. В конце 2005 г. был создан прототип сети из нескольких детекторов, а на конец 2021 г. в сети зарегистрировано свыше 2000 устройств в более чем 80 странах мира, из них приблизительно 1600 работают постоянно и поставляют данные из всех точек земного шара. Распределение детекторов по планете не является равномерным, максимальная плотность наблюдается в Европе (около 900 датчиков, причем почти четверть их часть размещена в Германии). На момент написания статьи (декабрь 2021 г.) в России были активны 25 детекторов из 35 зарегистрированных. Точно такое же число устройств работает в соседней Норвегии, в Финляндии активны более 40 станций, а в Швеции – около 60. За пределами Европы наибольшее число детекторов установлено в Северной Америке (около 500), Австралии (80) и Японии (50) [11]. В Африке, Южной Америке и континентальной Азии установлено

всего несколько десятков детекторов, в том числе три устройства расположены в Азиатской части России.

Blitzortung является некоммерческим проектом: разработка программного обеспечения и электронного оборудования, а также поддержка центральных элементов системы осуществляется в инициативном порядке группой исследователей под руководством Эгона Ванке, а размещение и обслуживание детекторов возложены на добровольное сообщество энтузиастов грозопеленгации. В основном это частные лица, но в настоящее время к процессу все чаще подключаются различные организации (учебные и научные заведения, метеорологические службы, энергетические предприятия), заинтересованные в развитии недорогой системы грозопеленгации в своем регионе и получении доступа к данным системы Blitzortung. Затраты пользователя на развертывание одного пункта грозопеленгации составляют сумму порядка 300 евро. Пока станция функционирует и посылает данные на серверы, пользователь получает свободный доступ ко всем данным сети, в том числе, архивным, но коммерческое использование этих данных строго запрещено.

Детектор Blitzortung является четырехканальным приемником сигналов ОНЧ и НЧ диапазонов (3-300 кГц). Электромагнитная волна, генерируемая молниевым разрядом, улавливается тремя ортогональными магнитными антеннами и одной электрической, причем могут быть задействованы от 1 до 4 приемных каналов. Аналоговые сигналы усиливаются, фильтруются, оцифровываются с частотой дискретизации 500 кГц и проходят предварительную обработку в микроконтроллере устройства для выделения молниеподобных сигналов из всего потока принятого электромагнитного излучения и определения точного времени получения детектором этих сигналов. Для получения места удара молнии в землю сеть Blitzortung использует только информацию о координатах детектора и времени регистрации молниевых разрядов. Ключевым моментом в построении сети является то, что каждый детектор снабжен приемником GPS, который и обеспечивает высокую точность определения координат и времени. Каждый зарегистрированный сигнал снабжается временной меткой (time stamp), которая вместе с координатами детектора посылается на сервер сбора данных. Связь детекторов с серверами осуществляется через интернет посредством сетевого интерфейса. Серверы осуществляют хранение и обработку полученных от детекторов данных и их визуализацию на сайтах [www.blitzortung.org](http://www.blitzortung.org) и [www.lightningmaps.org](http://www.lightningmaps.org).

Место удара молнии в землю вычисляется с помощью метода TOA (Time of Arrival) [12], который основан на измерении задержки распространения радиосигнала между источником (молнией) и приемником (детектором). Если несколько детекторов

принимают один и тот же сигнал в разные моменты времени, то зная скорость распространения сигнала (в случае электромагнитной волны в атмосфере это скорость света) можно построить семейство кривых, на которых лежат все точки возможного расположения источника этого сигнала. Точка пересечения этих кривых и будет являться координатой удара молнии в землю. Каждая кривая (в данном случае это гипербола) строится на основании разницы во времени получения сигнала двумя детекторами. Для определения координат разряда требуется, как минимум, пересечение двух гипербол, т.е. теоретически сигнал должен быть принят как минимум тремя детекторами. Основная проблема метода состоит в установлении факта, что принятый разными детекторами сигнал сгенерирован одним и тем же разрядом молнии. Для устранения этой проблемы при вычислениях используются сигналы от избыточного числа детекторов: на старте проекта, когда число детекторов в сети было невелико, использовали минимум 6 сигналов, а в настоящее время их число увеличено до 14.

Чем выше плотность установки детекторов, тем выше точность определения координат разрядов и процент их обнаружения. Оптимальное расстояние между соседними детекторами составляет 50 – 100 км, т.е. для полного покрытия территории Мурманской области необходимо установить около 20 детекторов. Этого достаточно, чтобы регистрировать разряды с малыми значениями тока молнии. Однако, если детектор принимает слишком сильный сигнал, то входные усилители устройства перейдут в режим насыщения, и сигнал от детектора не будет использован при вычислении координат разряда. Для надежной пеленгации как “сильных”, так и “слабых” молний необходимо, чтобы минимально достаточное количество детекторов располагалось как в ближней зоне от разряда (первые сотни километров), так и на удалении от него (до 1000 км).

На конец 2018 г. на территории всей России были активны 20 детекторов, однако информация о некоторых разрядах на территории Мурманской области имелась, поскольку на Кольском полуострове и в Карелии, а также в соседних Норвегии, Швеции и Финляндии данные детекторы установлены. Плотность установленных детекторов была недостаточна для обнаружения большинства разрядов молний на Кольском полуострове. Данные из базы Blitzortung для территории Мурманской области доступны с 7 мая 2011 г., но на основе этих данных нельзя достоверно судить об изменении грозовой активности, т.к. все эти годы число детекторов в системе увеличивалось от единиц до тысяч, что повышало количество зафиксированных системой разрядов.

К началу грозового сезона 2019 года силами ЦЭС КНЦ РАН были установлены 5 детекторов Blitzortung вблизи населенных пунктов Алакуртти, Умба, Апатиты, Ловозеро, Никель. В мае 2021 года был установлен новый детектор в селе Варзуга. Теперь на

территории Мурманской области функционируют 9 детекторов молний, 7 из которых установлены сотрудниками ЦЭС КНЦ РАН. Также подготовлены к установке ещё 4 грозопеленгатора, которые будут установлены к началу грозового сезона 2022 г. В условной зоне радиусом 1000 км вокруг центра Кольского полуострова активны порядка 50-ти детекторов, расположенные в основном в Скандинавии, в юго-западном направлении от нашего региона (рис. 1).

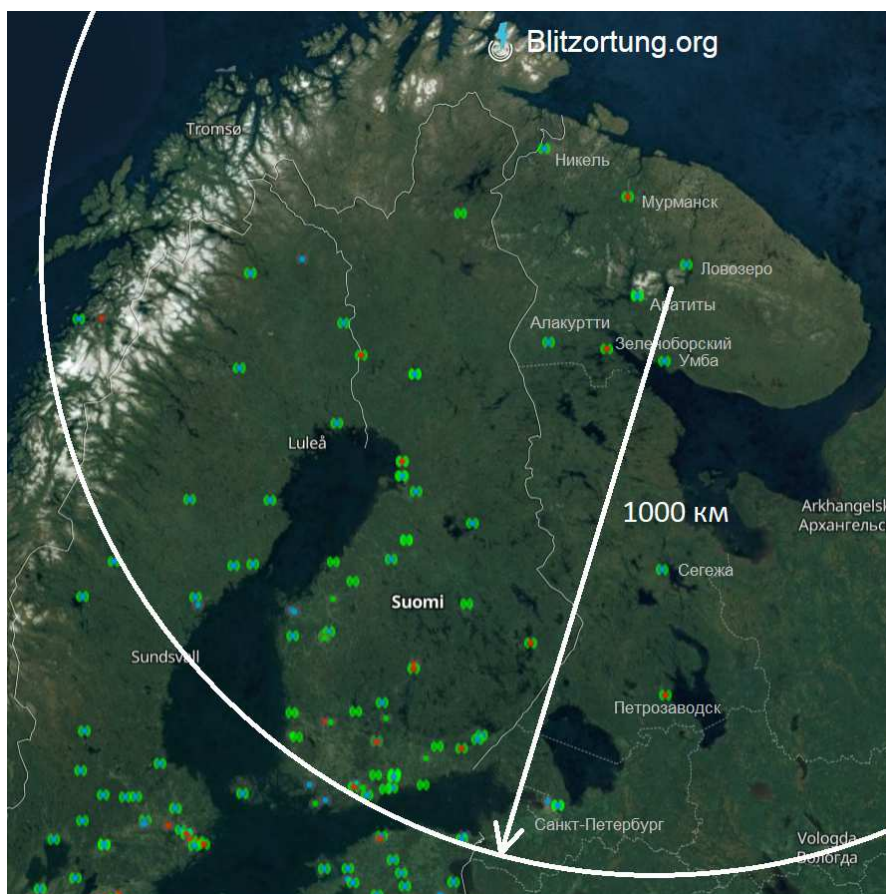


Рис. 1. Детекторы Blitzortung на карте Северной Европы

На рисунке 2а показан внешний вид четырехканальной электромагнитной антенны, а на рисунке 2б – приемное устройство в сборе. В металлическом ящике расположены плата детектора, источник бесперебойного питания, автоматический выключатель с варисторной защитой и роутер для организации канала связи посредством 3G модема. Электромагнитная антенна, модем и антенна приемника GPS сигнала размещаются вне помещения.

Так как детекторы расположены достаточно далеко от г. Апатиты, то возникла проблема их дистанционного обслуживания и поддержание работоспособного состояния. Функция удаленного управления детектором реализована разработчиками в прошивке микроконтроллера через веб-интерфейс. Также через веб-интерфейс можно удаленно управлять роутером, при необходимости программно перезагружать и настраивать

отдельные компоненты станции и сетевые интерфейсы. На аппаратном уровне живучесть станции поддерживается сторожевым устройством, которое раз в сутки переключает питание устройства. В течение трех грозовых сезонов станции бесперебойно поставляли данные о молниевых разрядах на серверы сети Blitzzortung.

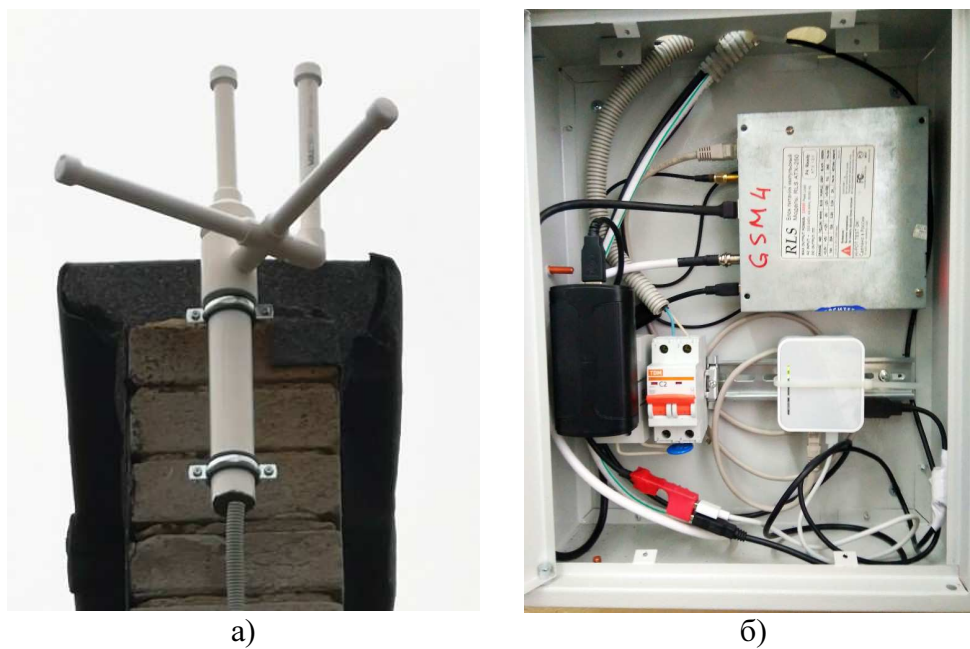


Рис. 2. Варианты размещения элементов устройств грозопеленгации

На рисунке 3 показана блок-схема устройств грозопеленгации, установленных на территории Мурманской области.

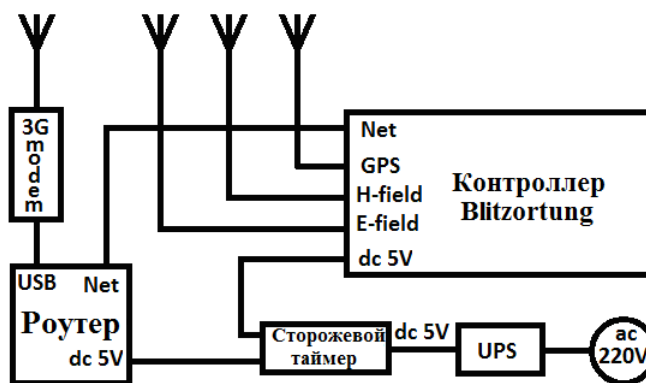


Рис. 3. Блок-схема устройств грозопеленгации

Кроме развития системы грозопеленгации на территории Мурманской области, мы проводим работы по созданию прототипа системы автоматического предупреждения диспетчерской службы воздушных линий о вероятном повреждении элементов ВЛ, расположенных в радиусе грозового разряда, зафиксированного системами грозопеленгации. Эта система построена на ранее разработанной модели [13-16], содержит электронную базу данных (БД) воздушных линий и электрических подстанций Мурманской области с максимально подробным описанием их компонентов и

пополняемый в реальном времени архив данных по разрядам молний в регионе. Созданная система управления базами данных (СУБД), анализирует информацию о каждом грозном разряде, поступающем в БД и в реальном времени ведет поиск координат опор ВЛ, попавших в зону действия грозного разряда. В случае обнаружения таких опор, СУБД информирует службу линий о вероятном повреждении с указанием диспетчерского наименования ВЛ, номера опоры этой ВЛ, координат происшествия и его время. Если, при этом, в диспетчерской службе зарегистрировано аварийное отключение этой линии в это же время, то информация о проблемной опоре может стать ключом к поиску причины отключения ВЛ.

На данный момент в БД внесены следующие элементы:

- 145 ВЛ ЦЭС и 116 ВЛ СЭС Колэнерго;
- 11 ВЛ МЭС ФСК ЕЭС;
- 196 ПС и ЭС Мурманской области;
- 23914 координат опор ВЛ.

- разряды молний в землю, зарегистрированные сетью Blitzortung с 2008 года по настоящее время и в режиме почти реального времени (с 10-ти минутной задержкой).

Преимуществом системы является ее легкое развертывание в любой энергосистеме, интуитивно понятный интерфейс и модульная структура, позволяющая интегрировать в систему различные расчетные компоненты для параллельного решения производственных и научных задач. В текущем состоянии система включает в себя следующие модули:

- модуль записи в БД информации о разрядах молний в реальном времени (GPS-координаты, точное время, прочая служебная информация);
- модуль графического отображения суточного распределения разрядов молний за выбранный период;
- модуль графического отображения на карте разрядов молний одновременно с координатами подстанций и опор воздушных линий за выбранный период;
- модуль корректировки положения объектов на карте;
- модуль построения продольного профиля воздушных линий;
- основной расчетный модуль поиска объектов, попавших в зону действия грозного разряда;
- модуль автоматического информирования пользователей о выявленных объектах, попавших под воздействие грозного разряда, посредством рассылки сообщений на электронную почту.

Грозной сезон 2021 г. начался 18 мая, а последняя гроза отмечена 31 августа. В таблице 1 представлены данные о грозной деятельности за последние 5 лет по данным

сети Blitzortung. Необходимо отметить, что сеть находится в стадии развития, группировка грозопеленгаторов с каждым годом увеличивается, что значительно увеличивает эффективность системы. Кроме того, система грозопеленгации Blitzortung регистрирует только удары молнии в землю, исключая превосходящие их по количеству межоблачные разряды. С большой долей вероятности, точными в этой таблице являются показатели начала и конца грозового сезона, а также число грозовых дней в году. Суммарное число разрядов определяется эффективностью системы грозопеленгации, т.е. долей зарегистрированных разрядов от общего числа (которое, в реальности, является числом неизвестным, так как пока не существует систем грозопеленгации со 100 % эффективностью).

Таблица 1 – Показатели грозовой активности на территории Мурманской области

Показатель	2017	2018	2019	2020	2021
Первая гроза	10.06.2017	14.05.2018	11.05.2019	02.06.2020	18.05.2021
Последняя гроза	24.09.2017	22.09.2018	13.09.2019	11.09.2020	31.08.2021
Грозовых дней	38	32	28	38	47
Всего разрядов	2555	7476	4287	1440	2944

В таблице 2 представлены данные о распределении разрядов в течение грозового сезона.

Таблица 2 – Распределение разрядов по месяцам года (в числителе – число грозовых дней, в знаменателе – количество разрядов в месяце)

Год / Месяц	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
2017	0/0	5/83	19/1834	11/452	3/186
2018	5/312	6/805	11/2922	8/3430	2/7
2019	3/317	10/3127	5/27	6/799	4/17
2020	0/0	8/488	16/623	12/326	2/3
2021	4/290	13/634	16/1351	14/669	0/0

На рисунке 4 отображены результаты регистрации грозовых разрядов на территории Мурманской области системой Blitzortung в грозовой сезон 2021 г. Максимальная грозовая активность наблюдалась в июле, причем в течение одного дня, 6 июля, было зарегистрировано 452 разряда. На этом рисунке показаны также подстанции и воздушные линии 35 – 330 кВ Кольской энергосистемы. По информации, полученной от служб линий энергетических предприятий Мурманской области, в 2021 г. “грозовые” отключения произошли 65 раз, а в 2020 г. 34 раза, т.е. почти в два раза меньше, что подтверждает статистику по молниевой активности, полученную от сети Blitzortung.



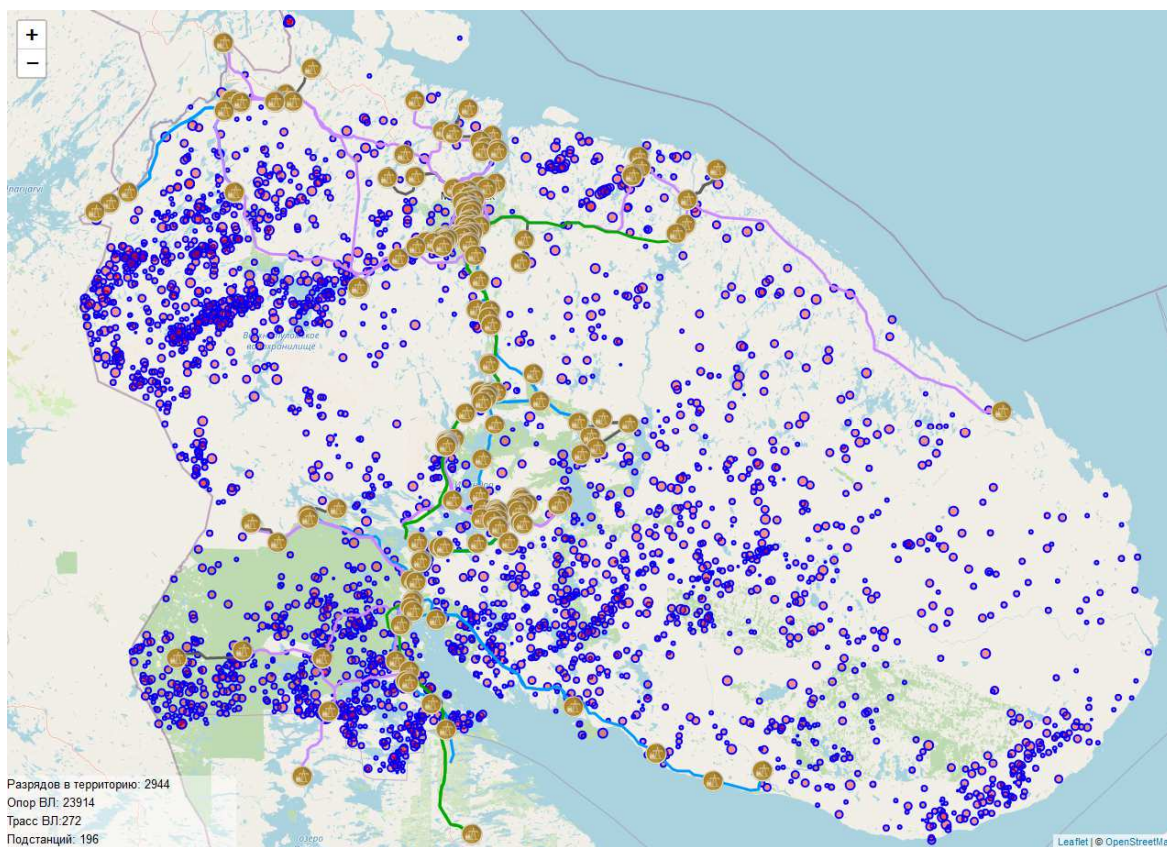


Рис. 4. Молниевые разряды в Мурманской области в 2021 г.

За грозовой сезон 2021 г. с помощью полученной из сети Blitzortung информации были обнаружены несколько мест повреждений на линиях электропередачи Кольской энергосистемы. Обнаружение мест удара молнии в объект электроэнергетики (ВЛ или подстанцию), расположенный в радиусе грозового разряда, выполняется системой автоматического предупреждения. Эта система содержит электронную базу данных воздушных линий и электрических подстанций Мурманской области с максимально подробным описанием их компонентов и пополняемый в реальном времени архив данных по разрядам молний в регионе. Созданная система анализирует информацию о каждом грозовом разряде, поступающем в базу данных, и в реальном времени ведет поиск координат опор ВЛ и подстанций, попавших в зону действия грозового разряда. В случае обнаружения таких опор, система информирует о вероятном повреждении с указанием диспетчерского наименования объекта, номера опоры ВЛ, координат происшествия и времени события.

Зоной действия грозового разряда считается окружность, имеющая радиус погрешности определения координаты разряда. Из-за физических ограничений используемого системой Blitzortung метода определения координат разряда (TOA - Time of Arrival), погрешность составляет в среднем порядка 1400 м. Эта погрешность вычисляется для каждого удара молнии «облако-земля», поэтому можно определить координаты объектов электрической сети, попавшие в зону действия грозового разряда.

На рисунке 5 показан пример, когда в зону действия грозового разряда попало большое количество опор линий электропередачи и подстанций. С наибольшей вероятностью молния ударила в центр окружности, но существует также вероятность, что она поразила любую точку в пределах выделенной зоны радиусом 1724 м, в которую попали 140 опор воздушных линий и 4 подстанции 35 – 150 кВ.

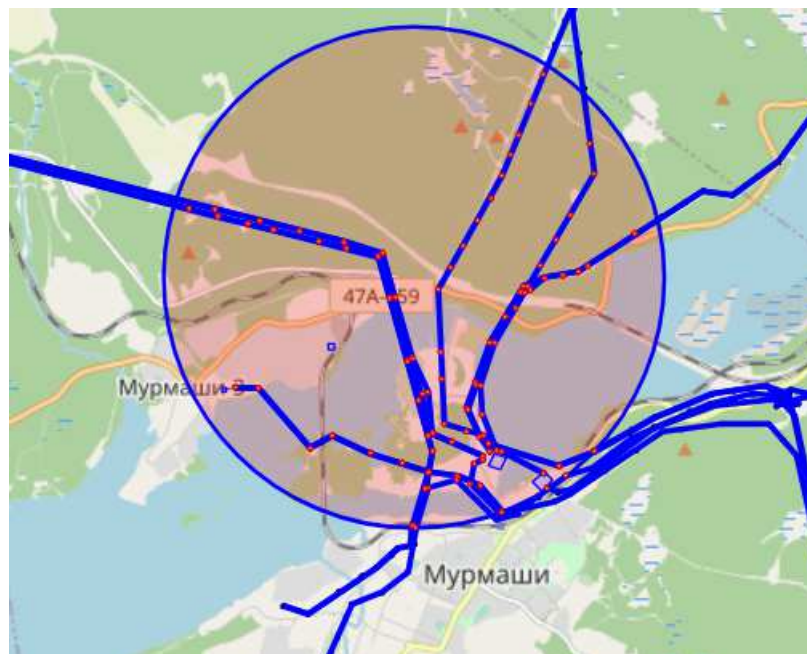


Рис. 5. Зона действия грозового разряда

В 2021 г. зафиксировано 227 событий, в результате которых в зону действия грозового разряда попали объекты классов напряжений 35 – 330 кВ, из них в 28 событиях в зону действия попали подстанции. В 60 случаях центр зоны действия находился на расстоянии менее 300 метров от подстанции или опоры линии электропередачи.

В таблице 3 представлена оценка молниевой активности на территории Мурманской области с 2011 по 2021 гг. по результатам анализа двух источников данных: данные грозопеленгационной сети Blitzortung и данные по грозовым отключениям воздушных линий классов напряжения 35, 110 и 150 кВ.

Таблица 3 – Молниевая активность в Мурманской области в 2011 – 2021 гг.

Источник \ Год	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Blitzortung	327	260	1063	2009	417	8045	2555	7476	4287	1440	2944
Грозовые отключения	28	9	31	129	25	94	29	120	76	34	65

Данные сети Blitzortung вполне адекватно отражают характер изменения молниевой активности по годам. Особенно это заметно для данных последних пяти лет, когда зона уверенного покрытия сетью достигла Кольского полуострова.

В настоящее время нами намечены направления расширения сети гронопеленгации для увеличения точности и эффективности обнаружения ударов молний в наземные проводные коммуникации Северо-Западного региона России. К грозовому сезону 2022 г. ещё четыре гронопеленгатора предполагается установить на территории Архангельской и Мурманской областей и Республики Карелия.

### Литература

1. Патент на полезную модель RU 185831 U1. Устройство регистрации грозовых разрядов и мест повреждения изоляции на ВЛ / Гайворонский А.С., Пуртов А.В., Бутымов А.С., Соловьев А.Л., Максимов Л.В. - № 2017127925 заявл. 04.08.2017; опубл. 19.12.2018. Бюл. № 35. – 10 с.
2. Морозов В.Н., Попов И.Б., Снегуров А.В., Снегуров В.С., Соколенко Л.Г., Шварц Я.М. Исследования в области атмосферного электричества и пеленгации гроз // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2009. № 560. С. 213-242.
3. Московенко В.М., Знаменщиков Б.П., Золотарев С.В. Применение системы гронопеленгации "Веря-МР" в интересах электроэнергетики России // Новое в российской электроэнергетике. 2012. № 2. С. 15-23.
4. Dowden, R.L., Brundell, J.B.; Rodger, C.J.: VLF lightning location by time of group arrival (TOGA) at multiple sites, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, v 64, n 7, May 2002, p 817-830.
5. National Lightning Detection Network NLDN. URL: <https://www.vaisala.com/en/products/data-subscriptions-and-reports/data-sets/nldn/> (дата обращения: 14.02.2020).
6. Schulz, W., Diendorfer, G., Pedebay, S., and Poelman, D. R.: The European lightning location system EUCLID – Part 1: Performance analysis and validation, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 16, 595–605, 2016.
7. Boltek. Lightning Detection Systems. URL: <https://www.boltek.com/> (дата обращения: 14.02.2020).
8. Global Lightning Network - TOA Systems. URL: <http://toasystems.com/our-network/global-lightning/> (дата обращения: 14.02.2020).
9. Egon Wanke, Richo Andersen, Tobias Volgnandt: World-Wide Low-Cost Community-Based Time-of-Arrival Lightning Detection and Lightning Location Network, 2016,

URL: <http://www.blitzortung.org/> (дата обращения: 14.02.2020).

10. Бурцев А.В., Невретдинов Ю.М. Пространственное распределение грозových разрядов на территории Кольского полуострова в 2013 году // В сборнике: Геоинформационные системы и дистанционное зондирование Материалы III Международной конференции. 2014. С. 93-98.

11. Narita T., Wanke E., Sato M., Sakanoi T., Kumada A., Kamogawa M., Hirohiko I., Harada S., Kameda T., Tsuchiya F., Kaneko E. A study of lightning location system (Blitz) based on VLF sferics // 2018 34th International Conference on Lightning Protection (ICLP), Rzeszow, 2018, pp. 1-7.

12. Lewis E.A., Harvey R.B., Rasmussen J.E. Hyperbolic direction finding with sferics of transatlantic origin. J. Geophys. Res., 1960, no. 65, pp. 1879–1905.

13. Бурцев А. В. Модель аналитической системы поиска повреждений на воздушных линиях вследствие грозových разрядов // Вестник МГТУ. 2019. Т. 22, № 4. С. 477-483.

14. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020619255. Программа расчета промежуточных географических координат и построения продольного профиля протяженного объекта с заданным шагом / А.В. Бурцев, В.Н.Селиванов; заявитель и правообладатель ФИЦ КНЦ РАН. - №2020618400; заявл. 27.07.2020; опублик. 13.08.2020. Бюл. №8. – 1 с.

15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020619102. Программа нахождения объекта, попавшего в зону действия грозového разряда, и оповещения пользователя о данном событии / А.В. Бурцев, В.Н.Селиванов; заявитель и правообладатель ФИЦ КНЦ РАН. - №2020618392; заявл. 27.07.2020; опублик. 11.08.2020. Бюл. №8. – 1 с.

16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU2021618127. Программа оценки интенсивности воздействия грозových разрядов на протяженные объекты / Бурцев А.В., Селиванов В.Н.; заявитель и правообладатель ФИЦ КНЦ РАН. - № 2021618127; заявл. 04.05.2021; опублик. 24.05.2021. Бюл. №6. – 1 с.