

Определение параметров молниевых разрядов с использованием грозорегистраторов LS8000 и LS7002

А.Х. Аджиев, В.Н. Стасенко, Ю. Варлей, Н.В. Юрченко, С.Т. Казакова

Ключевые слова: молния, амплитуда тока, гроза, полярность молнии, импульс тока, поражаемость, удельная поражаемость

Аннотация

Излагаются результаты использования в Московской области и на Северном Кавказе грозорегистраторов LS8000 и LS7002 для определения параметров разрядов молний на землю положительной и отрицательной полярности. Сделаны сравнения полученных данных в различных регионах.

Получено, что среднее значение импульса разряда молнии приносящего на землю отрицательный разряд по Московской области составляет -17,31 кА. Для положительных разрядов молний среднее значение амплитуды тока составило 35,55 кА. Их значения для Ставропольского края составляют -15,78 кА и 32,33 кА соответственно.

По результатам выполненных исследований найдено значение удельной поражаемости рассматриваемых территорий наземными разрядами молнии (n). По Московской области удельная поражаемость составляет 7,0 кол/км²·год, а по Ставропольскому краю 4,3 кол/км²·год.

Согласно полученным данным в Московской области и в Ставропольском крае в наземных разрядах доминируют молнии отрицательной полярности, средняя доля которых за 5-ти летний период наблюдений составляет около 89,5% и 95,35% соответственно.

Введение

Перечень параметров разряда молнии, используемых в расчетах защиты высоковольтных линий и подстанций от грозových перенапряжений [1] включает:

- амплитуда и крутизна тока;
- длительность импульса и длительность фронта;
- полярность разряда;
- среднегодовая плотность ударов молнии в поверхность земли и др.

Поскольку вероятностные распределения параметров молний могут существенно отличаться по районам, имеющим различные физико-географические характеристики [2], необходима статистика по конкретным районам. Неучет этого обстоятельства приводит обычно к занижению или неоправданному завышению уровней надежности грозозащиты, а, следовательно, к экономическим потерям. Несмотря на более высокие значения погрешности по сравнению с прямыми методами измерений, наиболее приемлемыми являются дистанционные радиотехнические методы, позволяющие за короткий срок собрать достаточное для статистического анализа количество экспериментальных данных по параметрам молний.

Широко поставленные в прошлом столетии полевые исследования по измерению амплитуды тока молнии с помощью ферромагнитных регистраторов [3], осциллографических исследований [2] и дистанционных измерений [4] показали, что есть различия в распределениях J_m в разных регионах.

Эффективность молниезащиты энергетических объектов зависит от точного знания значений J_m для данного района.

1. Экспериментальное оборудование. Основные характеристики грозопеленгационной сети LS8000

Для определения статистических распределений амплитуды тока молний (J_m) и его пространственных вариаций на европейской территории России (ЕТР) впервые использованы грозорегистраторы LS8000 и LS7002 (ГРС) производства фирмы «Vaisala» Финляндия. Данные грозорегистраторы для измерения используют комбинацию разностно-дальномерного и магнитно-пеленгационного методов.

Установленная система грозопеленгации состоит из четырнадцати датчиков, восемь LS8000 и шесть установленных в 2019 году LS7002 (рисунок 1) и двух центральных пунктов приема, обработки информации и архивирования в Московской области (ФГБУ «НИЦ «Планета») и в Республике Кабардино-Балкария (ФГБУ «ВГИ»).

Датчики объединены в единую сеть и охватывают значительную часть европейской территории России и сопредельных государств [5]. ГРС определяет в режиме реального времени координаты, время и токовые характеристики молний типов облако-земля и облако-облако. Эта информация распространяется в виде сообщений с заданной периодичностью (от 1 минуты и больше), композитных карт на основе данных КА, ГРС и гидродинамических прогнозов ГМЦ России (с периодичностью 15 минут) с целью: мониторинга и прогноза опасных явлений погоды; обеспечения безопасности полетов авиации и работы объектов электроэнергетики; обнаружения лесных пожаров при «сухих» грозах в подразделениях Росгидромета, Минобороны России и др.

Грозопеленгатор LS8000 имеет два сенсора – низкочастотный (LF) и высокочастотный (VHF), грозопеленгатор LS7002 – низкочастотный (LF).

По данным, полученным с LF и VHF датчиков, центральный процессор (TLP), после обработки этих данных, выдает следующую информацию о разряде:

- Дата и время с точностью до 100 наносекунд.
- Широта, долгота (WGS-84) (координаты разряда).
- Сила и полярность сигнала (тока в канале разряда), в кА.
- Классификация разрядов на типы: облако-земля или внутриоблачный разряд.

- Классификация разрядов на положительные и отрицательные.
- Время роста сигнала до пикового значения, в мкс.
- Время спада сигнала от пикового значения до нуля, в мкс.
- Максимальное значение скорости увеличения сигнала (крутизна тока молнии), в кА/мкс.

На рисунке 1 представлена схема размещения датчиков LS8000 и LS7002. Рассчитанные изготовителем ГРС границы зоны со 100% вероятностью обнаружения молний представляют окружность с радиусом около 310 км, что бралось в учет при определении молниевой статистики. Таким образом площадь уверенного обнаружения гроз составляет порядка 10^6 км². За ее пределами ошибки в определении координат молний могут составлять от 10 до 40%.

В России существует аналог такой системы – ГРС «Алвес» [6], а до 2000-х годов широко использовались системы местоопределения грозových очагов – грозорегистраторы-дальномеры типа «Очаг-2П» [7]. Обладая определенными достоинствами, эти образцы имеют большие погрешности и ограниченную территорию использования.

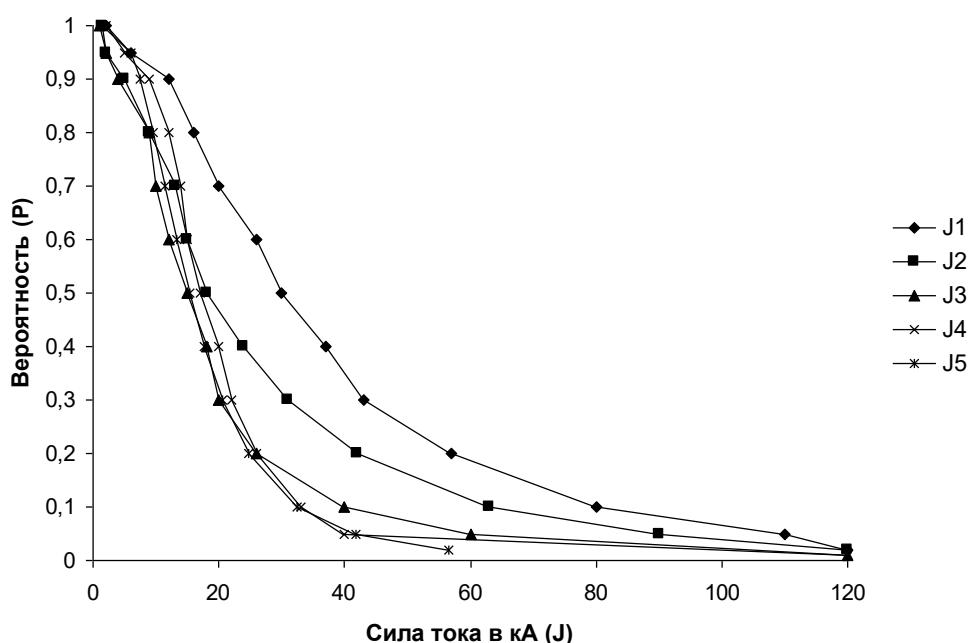


Рисунок 1. Расположение и территория обнаружения гроз с использованием ГРС «НИЦ «Планета» и «ВГИ»

По результатам измерений LS8000 и LS7002 (рисунок 2) установлено распределение амплитуд тока первых компонентов наземных отрицательных разрядов

молний J_5 для Северного Кавказа. Для сравнения на рисунке 2 также приведены распределения J_m , для других регионов: рекомендованное CIGRE распределение J_1 (кривая 1); полученное НИИ ПТ по данным финской сети инструментальных наблюдений гроз (кривая 3) для северной части Карельского перешейка; рекомендованные РАО ЕЭС распределения J_m (кривая 2); данные дистанционного осциллографирования разрядов молнии с синхронным определением расстояния до молний с помощью радиолокатора [2] (кривая 4) на Северном Кавказе.

Как видно из рисунка 2, значения J_m , полученные с использованием датчиков LS8000 и LS7002, достаточно хорошо согласуются с измерениями в данном районе [2], полученными с использованием активно-пассивных радиотехнических средств.



Обобщенные:

1 - СИГРЭ ($\bar{J} = 33,3$ кА), прямые и косвенные измерения преимущественно на башнях [8];

2 - «Руководство ...» ($\bar{J} = 20$ кА), косвенные измерения на ВЛ [9].

Региональные:

3 - Карелия ($\bar{J} = 13,5$ кА), косвенные измерения КирНИОЭ на ВЛ [4];

4 - Измерения на Северном Кавказе ($\bar{J} = 18,6$ кА), дистанционные измерения пассивно-активными средствами [2];

5 - Измерения с помощью грозорегистратора LS 8000 (для положительных токов $\bar{J} = 10,6$ кА; для отрицательных токов $\bar{J} = 13,5$ кА).

Рисунок 2. Распределения тока молнии J_m , полученные в различных регионах

Из рисунка также видно, что нет полного совпадения кривых распределения токов молний и это, по-видимому, связано, во-первых, с индивидуальными особенностями характеристик молний в районах с различной орографией и широтой и подтверждает

необходимость изучения параметров молний там, где планируются молниезащитные мероприятия, и, во-вторых, с техническими особенностями различных методов. Данные [10], полученные методами прямого осциллографирования и магнитозаписи, а также антенно-оптическим методом (расстояние до разряда определяется по регистрации светового излучения), а, следовательно, и построенные по ним вероятностные распределения будут отличаться от выборок и соответственно распределений, полученных антенно-радиолокационным методом.

Полученные с использованием ГРС LS8000 и LS7002 значения тока молнии позволяют выявить основные факторы, влияющие на получаемые характеристики распределений J_m . К ним относятся орографические и климатические условия, высота местности над уровнем моря: тип подстилающей поверхности, тип объекта (сосредоточенный или протяженный). Ниже приведены среднестатистические значения молниевых разрядов типа «облако-земля», по двум регионам европейской части России (Московской области и Ставропольского края), полученные за период с 2017 по 2021 годы (таблицы 1, 2).

Площадь зоны сбора грозоразрядной информации по Московской области составляет 45900 км², по Ставропольскому краю – 66500 км².

Таблица 1. Среднестатистические значения молниевых разрядов типа «облако-земля» по Московской области

Месяцы	общее количество молниевых разрядов	Количество «+»	% «+»	Количество «-»	% «-»	Среднее значение «+» токов, кА	Среднее значение «-» токов, кА	Медиана «+» токов	Медиана «-» токов
январь	8	0	0,00	8	100,00	0,00	-6,38	0	-3,5
февраль	0	0	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0	0
март	5	1	20,00	4	80,00	68,00	-43,50	68	-48,5
апрель	1740	98	5,63	1642	94,37	42,90	-12,55	32,5	-8
май	31275	1511	4,83	29764	95,17	34,82	-13,86	24	-11
июнь	128338	4020	3,13	124318	96,87	29,78	-14,71	24	-11
июль	126473	3820	3,02	122653	96,98	28,99	-14,18	23	-11
август	30090	1245	4,14	28845	95,86	31,73	-15,44	24	-12
сентябрь	4546	289	6,36	4257	93,64	31,83	-18,34	24	-12
октябрь	234	2	0,85	232	99,15	88,00	-12,92	88	-9
ноябрь	31	1	3,23	30	96,77	35,00	-15,57	35	-11
декабрь	2	0	0,00	2	100,00	0,00	-23,00	0	-23

Таблица 2. Среднестатистические значения молниевых разрядов типа «облако-земля» по Ставропольскому краю

Месяцы	общее количество молниевых разрядов	Количество «+»	% «+»	Количество «-»	% «-»	Среднее значение «+» токов, кА	Среднее значение «-» токов, кА	Медиана «+» токов	Медиана «-» токов
январь	3	1	33,33	2	66,67	17,00	-13,00	17	-13
февраль	94	3	3,2	91	96,8	29,33	-18,67	25	-14
март	379	44	11,61	335	88,39	55,02	-18,16	42	-14
апрель	3615	320	8,85	3295	91,15	44,02	-8,34	37	-6
май	41574	3514	8,45	38060	91,55	45,75	-10,14	35	-8
июнь	70216	6792	9,67	63424	90,33	45,45	-12,97	36	-10
июль	98913	5680	5,74	93233	94,26	30,83	-16,43	21	-14
август	47590	1937	4,07	45653	95,93	29,16	-16,56	23	-14
сентябрь	20006	862	4,31	19144	95,69	33,64	-13,53	26	-11
октябрь	1643	176	10,71	1467	89,29	41,91	-13,79	35	-10
ноябрь	24	2	8,33	22	91,67	16,50	-32,05	16,5	-25,5
декабрь	0	0	0	0	0	0	0	0	0

2. Результаты и обсуждения

2.1 Грозовая активность

В целом на рассматриваемых территориях наблюдается достаточно стабильная грозовая активность. Всего за период работы с 2017 по 2021 годы в Московской области ГРС зарегистрировала 317 дней с грозой. Из них более 200 дней характеризуются как интенсивные грозы с большим количеством наземных молний (более 2000 разрядов в день).

Наибольшее число дней с грозой отмечено в 2020 г. - 78 дней, наименьшее в 2018 г. - 57 дней. Средняя грозовая активность на рассматриваемой территории за указанный период составляет 64 дня с грозой в год.

В Ставропольском крае за анализируемый период система зарегистрировала около 442 дня с грозой. Из них более 300 дней характеризуются как интенсивные грозы с большим количеством наземных молний в грозовой период (более 3000 разрядов в день).

Наибольшее число дней с грозой отмечено в 2019 г. - 96 дней, наименьшее в 2020 г. - 78 дней. Средняя грозовая активность на рассматриваемой территории за указанный период составляет 89 дней с грозой в год.

Разряды молний «облако-земля» принято классифицировать и по знаку переносимого электрического заряда - на положительные и отрицательные. За рассматриваемый период над территорией обзора, Московской областью, системой зафиксировано около 322742 молниевых разрядов «облако-земля» (таблица 3). Из них

10987 разрядов положительной полярности и 311755 отрицательной полярности. В среднем в год зарегистрировано 64549 молний (2198 положительных и 62351 отрицательных молний).

За рассматриваемый период над территорией обзора, Ставропольским краем, системой зафиксировано около 284057 молниевых разрядов «облако–земля» (таблица 3). Из них 19331 разряд положительной полярности и 264726 отрицательной полярности. В среднем в год зарегистрировано 56811 молний (3866 положительных и 52945 отрицательных молний).

Согласно полученным данным в Московской области и в Ставропольском крае в наземных разрядах доминируют молнии отрицательной полярности, средняя доля которых за 5-ти летний период наблюдений составляют около 89,5% и 95,35% соответственно. Следовательно, в Московской области доля наземных отрицательных разрядов от общего их числа, примерно на 5% больше чем в Ставропольском крае.

Таблица 3 – Среднегодовые значения количества молниевых разрядов и токов молнии по территориям Московской области и Ставропольского края

Регион	общее количество молниевых разрядов	Количество «+»	% «+»	Количество «-»	% «-»	Среднее значение «+» токов, кА	Среднее значение «-» токов, кА	Медиана «+» токов	Медиана «-» токов
Московская область	64549	2198	4,65	62351	95,35	35,55	-17,31	31,14	-14,5
Ставропольский край	56812	3866	10,5	52945	89,5	32,33	-15,78	28,5	-12,68

Эти результаты хорошо согласуются с исследованиями в различных регионах. Так в исследованиях в Якутии [11] за 4-х летний период с 2009 по 2012 годы доля отрицательных разрядов молний за один грозовой день составила от 75% (2012 г.) до 92% (2009 г.).

Сезонный ход интенсивности наземных молниевых разрядов по месяцам в Московской области и в Ставропольском крае представлен на рисунке 3. Наибольшая их интенсивность на рассматриваемой территории - Московской области имела место в июне-июле, а в Ставропольском крае с мая по сентябрь. На этот период приходится и наибольшее количество облачных разрядов молний.

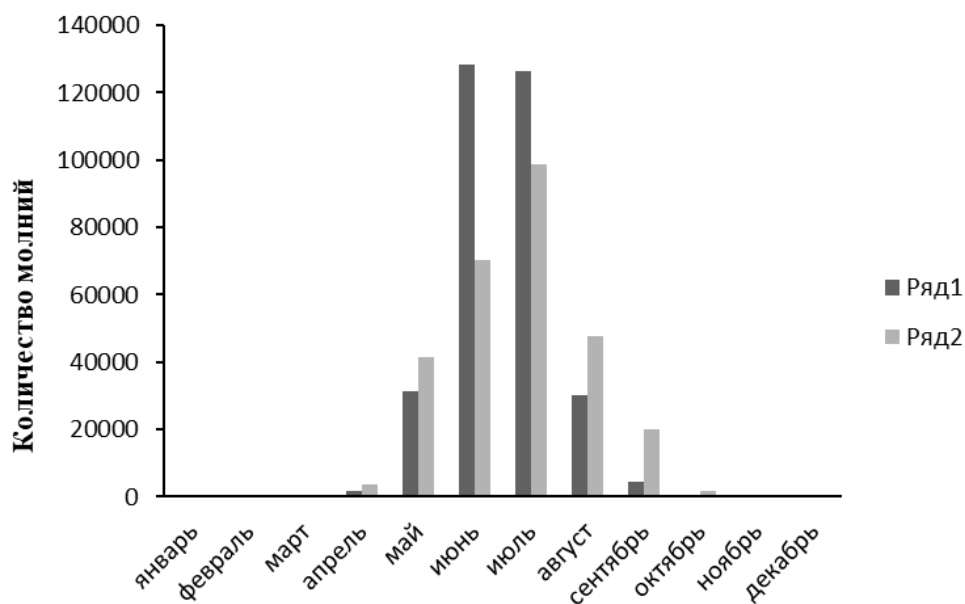


Рисунок 3. Сезонный ход грозовой активности в Московской области (ряд 1) и в Ставропольском крае (ряд 2)

2.2 Грозопоражаемость земной поверхности молниями и токи молнии

Важной характеристикой для проведения молниезащитных мероприятий является грозопоражаемость земной поверхности в год.

Производственные, жилые и общественные здания и сооружения промышленных предприятий в зависимости от их назначения, конструктивного исполнения, географического местоположения, связанного с интенсивностью грозовой деятельности и ожидаемого количества поражения их молнией, должны быть обеспечены молниезащитой. Молниезащита указанных объектов должна быть выполнена в зависимости от ожидаемого числа поражений N в год. Величина N определяется в общем случае по выражению

$$N = (b+3h)(L+3h) \cdot n \cdot 10^{-6},$$

b – ширина защищаемого здания (сооружения), м; L – длина защищаемого здания, сооружения, м; h – высота здания, сооружения, м; n – среднее число поражений 1 км^2 земной поверхности молниями в год.

По результатам выполненных исследований найдено значение удельной поражаемости рассматриваемых территорий наземными разрядами молнии n . По Московской области за исследуемый период удельная поражаемость составляет $7,0 \text{ кол/км}^2 \cdot \text{год}$, а по Ставропольскому краю $4,3 \text{ кол/км}^2 \cdot \text{год}$.

Другой характеристикой, используемой для расчета молниезащиты различных объектов, является среднее значение токов молнии. Как правило, в качестве

среднестатистической характеристики тока молнии используют значения токов отрицательной полярности. Для исследованных территорий среднее значение амплитуды отрицательных токов молний составляет: для Московской области -17,31 кА, для Ставропольского края -15,78 кА.

Выводы

1. Для определения среднестатистических параметров молний «облако-земля» в Московской области и на Северном Кавказе использованы грозорегистраторы LS8000 и LS7002.

2. На рассматриваемых территориях наблюдается достаточно стабильная грозовая активность. Всего за время работы с 2017 по 2021 годы в Московской области система зарегистрировала около 317 дней с грозой. Из них более 200 дней характеризуются как интенсивные грозы с большим количеством наземных молний в грозовой период (более 2 000 разрядов в день).

Наибольшее число дней с грозой отмечено в 2020 г. - 78 дней, наименьшее в 2018 г. - 57 дней. Средняя грозовая активность на рассматриваемой территории за указанный период составляет 64 дня с грозой в год.

В Ставропольском крае за анализируемый период система зарегистрировала около 442 дня с грозой. Из них более 300 дней характеризуются как интенсивные грозы с большим количеством наземных молний в грозовой период (более 3000 разрядов в день).

Наибольшее число дней с грозой отмечено в 2019 г. - 96 дней, наименьшее в 2020 г. - 78 дней. Средняя грозовая активность на рассматриваемой территории за указанный период составляет 89 дней с грозой в год.

3. Получено, что среднее значение импульса разряда молнии переносающего на землю отрицательный разряд по Московской области составляет -17,31 кА. Для положительных разрядов молний среднее значение амплитуды тока составило 35,55 кА. Их значения для Ставропольского края составляют -15,78 кА и 32,33 кА соответственно.

4. По результатам выполненных исследований найдено значение удельной поражаемости рассматриваемых территорий наземными разрядами молнии n . По Московской области удельная поражаемость составляет 7,0 кол/км²·год, а по Ставропольскому краю 4,3 кол/км²·год.

5. Согласно полученным данным в Московской области и в Ставропольском крае в наземных разрядах доминируют молнии отрицательной полярности, средняя доля которых за 5-ти летний период наблюдений составляют около 89,5% и 95,35% соответственно.

6. Проводимые в масштабах ЕТР наблюдения мощных конвективных облаков с помощью ГРС показывают, что грозовые явления свидетельствуют о существенной микрофизической перестройке облака и, в силу определенных причинно – следственных связей, предшествуют граду, шквалам, смерчам, т.е. они фактически являются индикаторами степени опасности облака. Дальнейшее исследование физического существа и устойчивости таких связей в разных синоптических и физико – географических условиях имеет большое практическое значение и способствует повышению качества диагноза и прогноза мощных конвективных облаков, а также подготовки предупреждений о вероятном ущербе для погодозависимых производств и служб.

Литература

1. Методические указания по защите распределенных электрических сетей напряжением 0,4-10 кВ от грозовых перенапряжений. Гос.регистрация №24.0086. 2004.
2. Аджиев А.Х., Богаченко Е.М. Применение радиотехнических средств для оценки используемых в грозозащите параметров разряда молнии. // Электричество.- 1990.- № 7.- С. 18-20.
3. Стекольников К.С. Физика молнии и грозозащита.- М-Л.: Издательство Академии Наук СССР, 1943.
4. Аджиев А.Х. и др. Особенности грозозащиты ВЛ в горных условиях: параметры разрядов молнии; влияние структуры грунтов и рельефа местности; схемы грозозащиты// «Проектирование и технология электронных средств».- 2004.- С.50-54.
5. Применение спутниковой информации для решения задач гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды/ под ред. Академика РАКЦ В.В. Асмуса, М. 2020 – 68 с. ISBN 978-5-904206-20-8
6. Снегуров А.В., Снегуров В.С. Экспериментальная грозопеленгационная система, 2012 г., Труды ГГО, вып. 567, С. 188–200.
7. Аджиев А. Х., Богаченко Е.М. Грозы Северного Кавказа //Нальчик: ООО «Полиградосервис и Т», 2011. 151 с.
8. Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines. WC 01, SC 33, CIGRE, 1991.
9. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений. РД153-34.3-35.125-99, С-Пб.: ПЭИПК, 1999.

10. Lin Y.T., Uman M.A. Electric radiation fields of lightning return strokes in three isolated Florida thunder storms// J.Geoph. Res.-1973.- Vol. 78, № 33.

11. В.И., Муллаяров В.А., Григорьев Ю.М., Тарабукина Л.Д. Параметры грозовой активности и молниевых разрядов на территории центральной Якутии в 2009-2012 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2014. Т. 50. №3. С. 365–372.

Авторы

Аджиев Анатолий Хабасович (докладчик) - ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», заведующий отделом стихийных явлений, доктор физ.-мат. наук, профессор;

Адрес: 360030, КБР, г. Нальчик, пр. Ленина, 2

e-mail: adessa1@yandex.ru

т. раб. 8-(8662)- 40-19-16

т. моб. 8-905-435-24-44

Стасенко Валерий Никифорович – ФГБУ «Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова», старший научный сотрудник, доктор физ.-мат. наук;

Адрес: 129128, г. Москва, ул. Ростокинская, 9

e-mail: stass47v@yandex.ru

+ 7 (499) 187-81-86

Юлия Варлей – компания Vaisala Oyj , региональный Менеджер

Адрес: Vaisala Oyj , Vanha Nurmijarventie 21, Vantaa, Finland

Tel +358 9 8949 3064 | Mobile+358 40 7584390 | Mobile Russia +7 985 192 2616

e-mail: julia.warley@vaisala.com

Юрченко Наталья Владимировна - ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», младший научный сотрудник отдела стихийных явлений;

Адрес: 360030, КБР, г. Нальчик, пр. Ленина, 2

e-mail: ynatalya64@mail.ru

т. раб. 8-(8662)- 40-19-16

т. моб. 8-928-079-56-15

Казакова Сания Тахировна - ФГБУ «Высокогорный геофизический институт», младший научный сотрудник отдела стихийных явлений;

Адрес: 360030, КБР, г. Нальчик, пр. Ленина, 2

e-mail: saniya_07@mail.ru

т. раб. 8-(8662)- 40-19-16