

22. Lobach V.T. Statisticheskie kharakteristiki radiolokatsionnykh signalov, otrazhennykh ot morskoy poverkhnosti [Statistical characteristics of radar signals reflected from the sea surface]. Moscow: Radio i svyaz', 2006, 250 p.
23. Lobach V.T., Potipak M.V. Model'nye issledovaniya radiolokatsionnogo otrazheniya slozhnykh signalov vzvolnovannoy morskoy poverkhnost'yu [Simulation studies of radar reflection signals complex rough sea surface], *Materialy 13 Mezhdunarodnoy Krymskoy konferentsii «SVCH Tekhnika i telekommunikatsionnye tekhnologii» KryMiKo'2003* [Materials 13th International Crimean conference "microwave and telecommunication technology" computer vision'2003]. Sevastopol', 2003, pp. 760-762.
24. Lobach V.T., Potipak M.V. Modeling of modulated signals back-scattering from quasiperiodic surface, *Proceedings of SPIE Aero Sense*, 2003, Vol. 5097, pp. 141-148.
25. Lobach V.T., Potipak M.V. Change in waveform envelope radar signal back-scattered from sea surface, *Proceedings of SPIE Aero Sense*, 2002, Vol. 4744, pp. 192-200.
26. Lobach V.T., Potipak M.V. HF-band synthetic aperture radar for buried objects detection, 2014 *24th International Crimean Conference Microwave & Telecommunication Technology*, 2014.
27. Lobach V.T. Radar measurements of layered medium parameters, *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Radioelektronika*, 2003, Vol. 45 (3), pp. 71-77.
28. Otchet po NIR «Modernizatsiya deystvuyushchego maketa podpoverkhnostnogo radiolokatora i provedenie naturnykh eksperimentov po distantsionnomu zondirovaniyu gruntovykh vod», kh/d №11230, 2004 g. Rukovoditel' Lobach V.T. [Report on the research "modernization of the existing layout of ground penetrating radar and conducting field experiments on remote sensing of groundwater", C/d No. 11230, 2004. Head Lobach V.T.].

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. А.О. Касьянов.

Бажчевников Валентин Владимирович – Южный федеральный университет; e-mail: bahchevnikov@sfned.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +79518289271; аспирант.

Bakhchevnikov Valentin Vladimirovich – Southern Federal University; e-mail: bahchevnikov@sfned.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79518289271; postgraduate student.

УДК 551.501

DOI 10.23683/2311-3103-2018-7-166-177

А.Х. Аджиев, А.С. Болдырев, В.А. Кузьмин

МЕТОДОЛОГИЯ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ГРОЗОВОЙ ОПАСНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ И ГРОЗОПЕЛЕНГАЦИОННОЙ СЕТИ

Представлена методология оповещения о грозовой опасности, использующая измерения напряженности электрического поля и данные грозопеленгационной сети. Использование методики позволяет устанавливать критерий опасности для предупреждения рисков и ущерба молниезависимым отраслям жизнедеятельности. Для организации предупреждений о грозах реализована методология «двух зон». Размер и масштаб зон выбраны в зависимости от эффективности определения координат молний, точности локализации системы детектирования электрического поля и масштаба цели. В данной работе проработана технология оповещения «двух зон» на основе выходных данных измерителя напряженности электрического поля атмосферы и регистратора разрядов молний. Выявлены особенности динамики изменений значений градиента потенциала электрического поля атмосферы в период отсутствия над пунктом регистраций облачности. Показано, что при наличии наземных разрядов молний над зонами динамика изменений значений градиента потенциала электрического поля атмосферы значительно трансформируется. Полученные результаты показали хорошую взаимосвязь данных грозопеленгационной сети с измеряемыми значениями градиента потенциала электрического поля атмосферы, в осо-

бенности для молниевых разрядов типа облако-земля. Показано, что по регистрациям у поверхности земли градиента потенциала электрического поля атмосферы можно судить о подготовленности условий в облаке для развития разрядов молний. В частности, если фиксируемые градиенты не превышают абсолютных значений от $-0,2$ до $+0,2$ кВ/м, то в облаке молнии не фиксируются. При значениях градиента от $-0,2$ кВ/м и менее и при $+0,2$ кВ/м и более следует ожидать облачные молниевые разряды, при их значениях от -2 кВ/м и менее и при $+2$ кВ/м и больше наземные молнии. С ростом абсолютных значений градиента потенциала электрического поля атмосферы в начале имеет место разряды отрицательной полярности, при дальнейшем росте градиента при значениях больше (меньше) $+3$ кВ/м (-3 кВ/м) фиксируются наряду с облачными и отрицательными и положительными молниевые разряды.

Гроза; молния; метод двух зон; напряженность электрического поля; грозопеленгационная сеть.

A.Kh. Adzhiev, A.S. Boldyreff, V.A. Kuzmin

METHOD OF THUNDERSTORM WARNING USING VARIATIONS OF ELECTRIC FIELD AND DATA OF THUNDERSTORM SENSORS NETWORK

The method of thunderstorm warning alarms using data received from electric field mills network and data of lightning sensors network is presented. The method is capable to establish the criterion of danger to the prevention of risks and damages. The methodology of "two zones" has implemented for warnings of thunderstorms. The size and scale of the zones are selected depending on the efficiency of determining the coordinates of lightning, the accuracy of the localization of the electric field detection system and the target scale. The technology of warning "two zones" is based on the output of the meter of the electric field of the atmosphere and the lightning sensors. The features of the dynamics of changes in the values of the gradient potential of the electric field in the absence of clouds were established. It is shown that in the presence of ground lightning discharges over the zones, the dynamics of changes in the values of the gradient of the potential of the electric field of the atmosphere is significantly transformed. The obtained results showed a good relationship between the data of the lightning network and the measured values of the gradient of the potential of the electric field of the atmosphere, especially for lightning discharges of the cloud-earth type. It is shown that the registration at the earth's surface of the potential gradient of the electric field of the atmosphere can be judged on the preparedness of the conditions in the cloud for the development of lightning discharges. In particular, if the fixed gradients do not exceed the absolute values from -0.2 to $+0.2$ kV/m, the lightning is not fixed in the cloud. At gradient values from -0.2 kV/m and less and at $+0.2$ kV/m and more, cloud lightning discharges should be expected, at their values from -2 kV/m and less and at $+2$ kV / m and more ground lightning. With the increase in the absolute values of the gradient of the potential of the electric field of the atmosphere at the beginning there are discharges of negative polarity, with further growth of the gradient at values greater than (less) $+3$ kV/m (-3 kV/m) are fixed along with cloud and negative and positive lightning discharges.

Thunderstorm; lightning; two-zone method; electric field; lightning sensors network.

Введение. С вопросами молниезащиты и мониторингом пространственного распределения молниевых разрядов приходится сталкиваться специалистам многих отраслей, таких как: энергетика, связь, строительство, авиация, сельское и лесное хозяйство, др. Результатом их воздействия могут быть нарушения нормального функционирования производства. Кроме того, поражения молнией может привести к трагическим последствиям.

Правильная организация молниезащитных мероприятий и своевременное обнаружение местоположения опасного явления во многих случаях позволяет избежать ущерба или существенно снизить его.

Северный Кавказ, в силу своего географического положения, имеет высокую активность грозовой деятельности до 200-250 дней с грозой в год [1]. Несколько авторов получили для данной территории, что средняя плотность разрядов на зем-

лю в год составляет более 5 разрядов/км². Такая высокая молниевая активность создает проблемы электромагнитной совместимости, а также в хозяйственной деятельности. К примеру, авиация, связь, система электроснабжения и другие сферы жизнедеятельности испытывают негативное воздействие грозовых явлений.

Создание методов комплексного мониторинга грозовых процессов предполагает наращивание геофизических исследований, создание стационарных и мобильных пунктов наблюдений.

Существуют системы локализации гроз, основанные на информации о молниях «облако-земля» [1–4], другие используют данные о полной молниевой активности [5, 6]. Часто информацию о напряженности электрического поля атмосферы включают в технологию предупреждения о грозах [7]. Для этих целей также используется радиолокационная и спутниковая информация [8, 9].

Настоящая работа посвящена разработке методики предупреждения грозовой опасности, основанная на интегрированной информации значений напряженности электрического поля атмосферы в пункте мониторинга и данных грозорегистратора. В качестве возможной области использования предлагаемой методики рассматривается авиация.

Созданы несколько международных стандартов систем грозового оповещения для авиации.

В частности, Европейский комитет электротехнической стандартизации – CENELEC (European Committee for Electro technical Standardization) опубликовал стандарт EN50536 [10] – Защита от молний – Система грозового оповещения (Protection Against Lightning–Thunderstorm Warning Systems). Цель стандарта заключается в предоставлении информации о характеристиках системы грозового предупреждения и информации для оценки полезности данных о молниях в режиме реального времени и/или данных о штормовой электрификации с целью реализации мер по предотвращению молниевой опасности.

В России действует нормативный документ [11], в котором регламентированы действия по метеорологическому обеспечению гражданской авиации. Увеличение интенсивности воздушных перевозок и частоты возникновения опасных метеорологических явлений, связанных с конвективной облачностью, делает актуальной задачу создания системы оперативного мониторинга за их развитием по маршрутам полетов воздушных судов. В соответствии с Транспортной стратегией Российской Федерации, до 2030 года должны быть проведены работы по созданию системы раннего предупреждения и оповещения воздушных судов о формировании на пути их движения опасных атмосферных явлений.

Об особой уязвимости авиации от воздействия грозовых явлений свидетельствует ряд актуальных публикаций [12, 13]. В частности, Федеральное управление авиации (Federal Aviation Administration – FAA) в докладе №8 [12] – Система оповещения о молниях для использования аэропортами (Lightning Warning System for Use by Airports), обобщили влияние полного прекращения работы аэропортов, безопасности, стоимости вынужденного простоя, задержки самолетов, сбоя расписания и самый тяжелый случай – фатальные человеческие жертвы. Исходя из проведенного анализа делается вывод о необходимости разработки новых технологий грозового оповещения.

При организации предупреждений о грозах за рубежом реализована методология «метод двух зон», представленный M.J. Murphy и другими в работах [3–4]. Этот метод определяет две концентрические зоны у географической точки, именуемой «Точка Интереса» (Point of Interest - PI). Первая зона, которая окружает PI, называется Зона Касания (Area of Concern - АОС). На территории этой зоны сосредоточены объекты, имеющие высокий риск поражения любым разрядом молнии.

Примерами такой зоны являются аэропорт, ракетно-пусковой комплекс, крупный нефтеналивной танкер и др. Второй район или Зона Оповещения (Warning Area – WA) окружает Зону Касания (АОС). Когда атмосферная активность возникает около второй зоны, должен быть запущен режим грозового оповещения и должны начаться меры предупреждения.

В данной работе реализован аналогичный подход для мониторинга и оповещения о грозовых явлениях. На рис. 1. показана схема реализации метода двух зон, реализуемая в данной работе для мониторинга и оповещения о грозовой опасности.

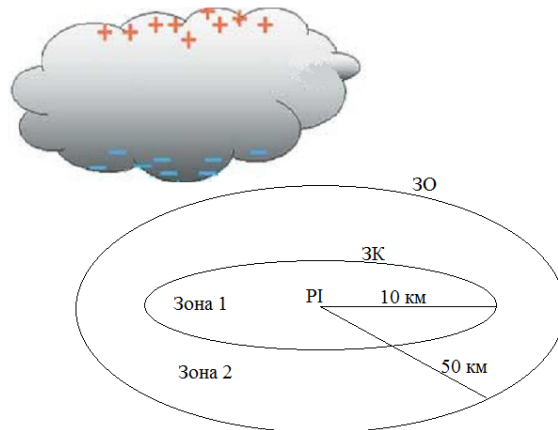


Рис. 1. Мониторинг грозовой опасности методом «двух зон»

Размер и масштаб зон должны быть выбраны в зависимости от эффективности определения координат молний, точности локализации системы детектирования электрического поля и масштаба цели. В данной работе проработана технология оповещения «двух зон» на основе выходных данных измерителя напряженности электрического поля атмосферы и регистратора разрядов молний. Данные измерителя напряженности электрического поля в точке PI и информация, полученная грозопеленгационной сетью, позволяет создавать мультикритерии для запуска системы предупреждения для «Зоны 1».

Методика валидации прогнозов и предупреждения грозовой опасности, основанная на использовании измерителей напряженности электрического поля (градиента потенциала) атмосферы EFM550 и грозорегистрационной сети LS8000 ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» (г. Нальчик) могут существенно повысить безопасность. Предлагаемая методология применима и при использовании их аналогов. Следует отметить, что в настоящее время грозопеленгационная сеть Росгидромета с датчиками LS8000 покрывает практически всю Европейскую часть России.

Методика и состав аппаратуры. Независимо от источника информации о молниевых разрядах необходимо оценивать эффективность и работоспособность «системы грозового оповещения». Предлагаемая методология основана на использовании:

- ◆ измерителя напряженности электрического поля атмосферы EFM550 фирмы Vaisala; она должна быть установлена в центре первой зоны (рис. 1);
- ◆ грозорегистратор LS8000, также производства фирмы Vaisala. Его местоположение (размещение датчиков) должно обеспечивать регистрацию разрядов молний в обеих зонах (рис. 1);

♦ программное обеспечение для решения задач измерения, передачи и визуализации значений напряженности электрического поля атмосферы и параметров молниевых разрядов.

Реализованный в настоящее время в ВГИ аппаратно-программный комплекс EFM550 производит измерение значения напряженности электрического поля атмосферы с частотой 2 Гц, т.е. каждые 0,5 секунды. Максимальные и минимальные значения напряженности, которые может измерить EFM550, составляют $\pm 10\,000$ В/м [14]. Измеренные значения сохраняются на жестком диске компьютера. По этим данным можно контролировать и изучать суточные и сезонные вариации напряженности электрического поля атмосферы с помощью программного обеспечения аппаратно-программного комплекса EFM550.

Для определения местоположения и параметров молниевых разрядов в работе используется грозопеленгационная сеть LS8000, установленная на Северном Кавказе [5].

По данным, полученным с LF и VHF датчиков, центральный процессор (CP8000), расположенный в центре приема и обработки информации, выдает до 25 параметров по каждому молниевому разряду. Основные параметры следующие:

- ♦ для молниевых разрядов Облако-Земля:
 - 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 положительные и отрицательные;
 - время роста сигнала до пикового значения, в мкс;
 - время спада сигнала от пикового значения до нуля, в мкс.
- ♦ для молниевых разрядов Облако-Облако:
 - дата и время с точностью до 100 наносекунд;
 - широта, долгота (WGS-84) (координаты разряда).

Исходя из технических характеристик вышеуказанной аппаратуры, предлагается радиус первой зоны в 10 км и второй зоны – 50 км. Измеритель напряженности электрического поля (градиента потенциала электрического поля) устанавливается в центре зон контроля (точка PI на рис. 1). При этом EFM550 с высокой точностью отображает электрические измерения в атмосфере в области зоны 1. В зоне 2 имеет место реакция на электрические процессы в атмосфере. На рис. 2 приведен пример записи суточного хода напряженности электрического поля при различных погодных явлениях над пунктом наблюдений (точкой PI).

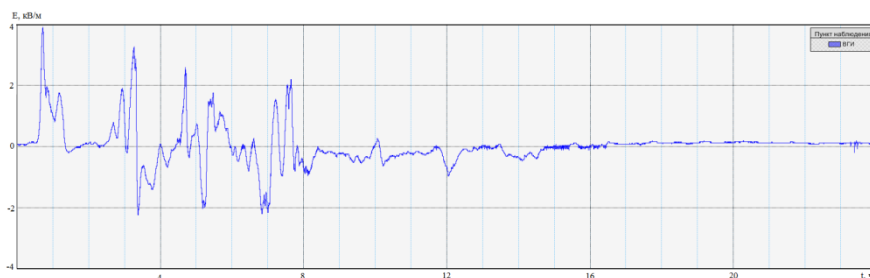


Рис. 2. Суточный ход градиента потенциала (напряженности) электрического поля атмосферы при различных погодных явлениях над пунктом наблюдений

За период записи градиента поля над точкой регистрации (рис. 2) наблюдалась следующая погода. Скорость ветра варьировалась в пределах от 1 до 3 м/с. Атмосферное давление 711...717 мм.рт.ст. В период от 0 до 16 часов облачность

составляла 100 %. С 16 по 24 часа облачность не превышала 10...20 %. В ночные часы от 0 до 8 часов наблюдались слабые осадки, с 8 по 16 часов при 100 % облачности осадки отсутствовали. Согласно данным грозорегистратора за весь период наземных разрядов не зафиксировано. В период от 0 до 8 часов фиксировались облачные разряды молнии, в остальной период также облачные разряды отсутствовали. Запись градиента потенциала электрического поля атмосферы, приведенный на рис. 2, является характерным для суток с указанными погодными явлениями.

При такой динамике погодных явлений временной ход градиента потенциала электрического поля атмосферы в указанный день можно разбить на три периода.

Первый период с 0 до 8 часов, когда фиксировались облачные разряды молнии и наблюдалось выпадение осадков над пунктом регистрации градиента потенциала. В этот период значение градиента потенциала электрического поля атмосферы менялся от -2кВ/м до $+4\text{кВ/м}$. При этом каждый облачный разряд приводил к быстрому изменению значения градиента потенциала. Амплитуда изменений регистрируемых на земле значений градиента потенциала не превышает $\pm 4\text{кВ/м}$. Указанные изменения при каждом облачном разряде происходят сравнительно медленно – за 5...10 мин. Скорость изменения градиента потенциала электрического поля атмосферы составляет $\pm 0,2\text{кВ/мин}$... $\pm 0,4\text{кВ/мин}$. В рассматриваемый период градиента потенциала электрического поля атмосферы может быть как положительной, так и отрицательной полярности.

Период наличия над пунктом регистраций облачности без грозových разрядов, период с 8 до 16 часов, характерен градиентом потенциала электрического поля атмосферы в пределах от $-0,5\text{кВ/м}$ до $+0,5\text{кВ/м}$. Изменения градиента потенциала электрического поля атмосферы в этот период не связаны с разрядными процессами, а являются следствием микроструктурных преобразований в облаке. Градиент потенциала электрического поля атмосферы в этот период происходит ещё медленнее, чем в первый период, с 0 до 8 часов. Продолжительности роста (убывания) градиента потенциала электрического поля атмосферы в этот период составляют 20 ... 30 мин. Скорость указанных изменений составляет $\pm 0,01\text{кВ/мин}$... $\pm 0,1\text{кВ/мин}$.

Динамика изменений значений градиента потенциала электрического поля атмосферы в период отсутствия над пунктом регистраций облачности, время с 16 по 24 часа, имеет следующие особенности:

1. За весь период градиент потенциала электрического поля атмосферы положительный;
2. Значения градиента потенциала электрического поля атмосферы варьируется в пределах от 100 до 200 В/м;
3. В временном ходе значений градиента потенциала электрического поля атмосферы при рассматриваемой погоде наблюдается в вечернее время.

При наличии наземных разрядов молний над зонами I и II динамика изменений значений градиента потенциала электрического поля атмосферы значительно трансформируется.

На рис. 3 и 4 показаны совмещенные данные градиента потенциала электрического поля атмосферы с данными количества молниевых разрядов различных типов над выбранной территорией, для дней с грозами. На этих рисунках график хода значений градиента потенциала электрического поля атмосферы – соответствующая ось с левой стороны. В виде гистограммных столбиков показаны количества молниевых разрядов над выбранной территорией, соответствующая ось с правой стороны.

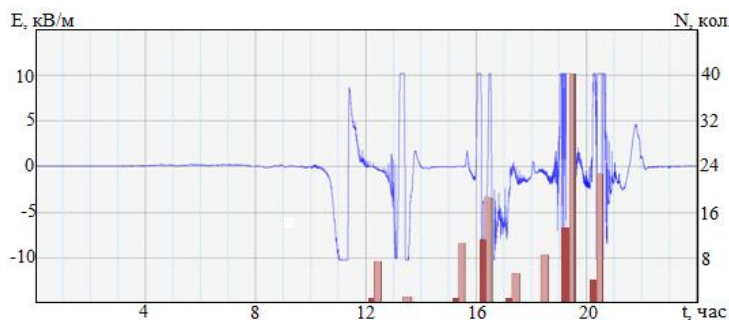


Рис. 3. Ход напряженности электрического поля и количество разрядов облако-земля от времени, за 17 мая 2013 года (— количество положительных разрядов, — количество отрицательных разрядов)

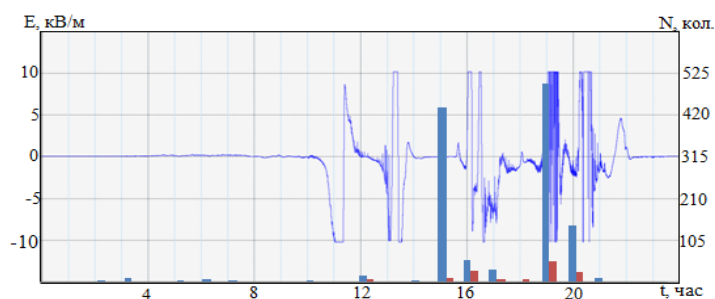


Рис. 4. Ход напряженности электрического поля и количество разрядов облако-облако и облако-земля (сумма положительных и отрицательных) от времени, за 17 мая 2013 года (— количество разрядов облако-облако, — количество разрядов облако-земля)

В указанное на рис. 3 и 4 время (24 часа) над пунктом регистрации наблюдалась следующая погода. В период с 10 до 21 часов имела место гроза с разрядами молний в облаке и на землю, осадки интенсивностью до 2 мм/мин, ветер до 10 м/сек, температура воздуха 21 °С в ночное и 26 °С в светлый период суток. В рассматриваемые сроки с 0 до 10 часов и с 21 до 24 часов облачных образований над пунктом наблюдений практически отсутствовали, облачность не превышала 10 %. При такой динамике погодных явлений, временной ход градиента потенциала электрического поля атмосферы в указанный промежуток (сутки) можно разбить на два периода – с 10 до 21 часа при грозах и остальной период с ясной «хорошей» погодой. Периоду без гроз в рассматриваемый на рисунке 3 день соответствуют значения градиента потенциала электрического поля атмосферы, характерные значения градиента поля «хорошей» погоды. Они варьируются от 100 В/м до 200 В/м. В грозовой период при наличии в облаке и наземных и облачных разрядов молний значения градиента потенциала электрического поля атмосферы могут меняться от -10 кВ/м до +10 кВ/м.

Реакция хода напряженности поля на молниевые разряды являются резкие скачки от нормального значения +130 В/м до значений от -10 кВ/м до +10 кВ/м после каждого разряда. Амплитуда изменений регистрируемых на земле значений градиента потенциала при разряде на землю не зависит от её полярности составляет около ± 5 кВ/м... ± 10 кВ/м. Указанные изменения при каждом наземном разряде происходят за 3...5 мин, значительно быстрее, чем при облачных разрядах. Ско-

рость изменения градиента потенциала электрического поля атмосферы составляет $\pm 0,3$ кВ/мин ... $\pm 0,5$ кВ/мин. В рассматриваемый период градиента потенциала электрического поля атмосферы может также быть как положительной, так и отрицательной полярности. При этом, чем интенсивнее происходят разряды в облаке, тем больше амплитуда и частота изменений градиента потенциала электрического поля атмосферы.

Было выполнено значительное количество совместных исследований градиента потенциала и молниевой активности. Характерная выборка за 2013–2016 гг. таких исследований представлена в табл. 1.

Таблица 1

Информация о количествах разрядов молний разных типов при заданных значениях градиента потенциала электрического поля.

Тип разряда	Градиент потенциала, кВ/м												Всего
	0-0,2	0,2-1	1-2	2-4	4-10	>10	-0,2-0,2	-0,2--1	-1--2	-2--4	-4--10	<-10	
<i>06 мая 2013 года</i>													
Внутриоблачные	0	26	48	64	111	79	0	10	35	55	169	103	700
Наземные положительные	0	0	0	1	2	1	0	0	0	1	3	0	8
Наземные отрицательные	0	0	0	2	4	4	0	0	2	8	6	4	30
<i>13 мая 2013 года</i>													
Внутриоблачные	0	7	15	84	229	549	0	47	45	131	295	124	1526
Наземные положительные	0	0	0	1	4	4	0	0	0	1	3	2	15
Наземные отрицательные	0	0	1	2	12	20	0	2	2	7	15	16	77
<i>16 мая 2013 года</i>													
Внутриоблачные	0	1	1	8	22	19	0	2	4	12	62	29	160
Наземные положительные	0	0	0	1	2	3	0	0	0	0	3	1	10
Наземные отрицательные	0	0	0	2	11	5	0	1	3	5	6	4	37
<i>17 мая 2013 года</i>													
Внутриоблачные	0	36	97	85	96	318	0	113	124	125	130	100	1224
Наземные положительные	0	0	0	2	7	6	0	1	2	5	6	2	31
Наземные отрицательные	0	0	2	13	26	12	0	2	7	12	25	11	110

Всего в зоне действия измерителя (территория ограничена окружностью радиусом 10 км, в точке установки EFM 550) зарегистрированы около 3928 разрядов. Из них 3610 облачных разрядов молний, 320 разрядов на землю, в том числе отрицательных молний 254 и положительных 64. Зарегистрированные разряды молний были разбиты по группам в соответствии с диапазоном градиента потенциала электрического поля атмосферы при значениях которых они были зафиксированы (табл. 1). Как видно из таблицы, в конвективном облаке условия для развития молниевых разрядов формируются при градиенте потенциала электрического поля атмосферы у поверхности земли превышающими значения 2 кВ/м. Учитывая, что поле в атмосфере убывает пропорционально квадрату расстояния и, принимая дальность до центра заряда, инициировавший разряд в 10 км, радиус заряда равным 1 км оценка градиента потенциала электрического поля внутри облака состав-

ляет около $2 \cdot 10^5$ кВ/м. Примерно такие значения приводят в литературе [15, 16] как необходимое условие для развития разрядных явлений в облаке. Из табл. 1 следует, что более 70 % от общего количества разрядов в облаке происходят при фиксируемых у поверхности под облаком абсолютных значениях градиента потенциала электрического поля, превышающих 2 кВ/м. При значениях градиента от -2 до $+2$ кВ/м. формируются только менее 20 % от общего числа разрядов. В этом диапазоне градиентов разряды на землю, как правило, не отмечаются. Наибольшее количество наземных молний (более 60 %) отмечаются при градиенте потенциала электрического поля от -4 до $+4$ кВ/м. Во всех исследованных облаках в части, касающейся молниевых разрядов, отмечены следующие закономерности:

- ◆ положительные молнии развиваются при больших абсолютных значениях градиента потенциала электрического поля, чем отрицательные;
- ◆ критическими значениями градиента потенциала электрического поля атмосферы при которых не отмечаются молнии всех типов является диапазон от $-0,2$ до $+0,2$ кВ/м.

Исходя из проведенных исследований и выявленных критических значений напряженности электрического поля атмосферы нами сформулирована методология предупреждения грозовой опасности на основе мониторинга указанных характеристик. Предлагаемая методология предупреждения грозовой опасности представлена в табл. 2. В таблице приведены характерные значения E и информация гронопеленгационной сети для оценки грозоопасности в «Зоне 1».

Таблица 2

Характерные значения E и информация гронопеленгационной сети для оценки грозоопасности в «Зоне 1»

Значение E в точке $P1$	$0 < E < 200$ (В/м)	$-200 < E < 200$ (В/м)	$-400 < E < 400$ (В/м)	$ E > 400$ (В/м)
Грозовая деятельность в «Зоне 2»	0	Разряды: облачные – да наземные – нет	Разряды: облачные – да наземные – да	Разряды: облачные – да наземные – да
Грозовая деятельность в «Зоне 1»	0	маловероятно	Разряды: облачные – да наземные – нет	Разряды: облачные – да наземные – да
Оценка грозоопасности в «Зоне 1»	Не опасно	Не опасно	Слабая опасность	Высокая опасность
Дополнительные характеристики	-	$\frac{dE}{dt} > 0$	$\frac{dN_0}{dt} > 0$	$\frac{dN_H}{dt} > 0$

Заключение. Полученные результаты свидетельствуют о хорошей взаимосвязи данных гронопеленгационной сети LS8000 с измеряемыми значениями градиента потенциала электрического поля атмосферы EFM550, в особенности для молниевых разрядов Облако-Земля. По регистрациям у поверхности земли градиента потенциала электрического поля атмосферы можно судить о подготовленности условий в облаке для развития разрядов молний. В частности, если фиксируемые градиенты не превышают абсолютных значений от $-0,2$ до $+0,2$ кВ/м, то в облаке молнии не фиксируются. При значениях градиента от $-0,2$ кВ/м и менее и при $+0,2$ кВ/м и более следует ожидать облачные молниевые разряды, при их значениях от -2 кВ/м и менее и при $+2$ кВ/м и больше наземные молнии. С ростом абсо-

лутных значений градиента потенциала электрического поля атмосферы в начале имеет место разряды отрицательной полярности, при дальнейшем росте градиента при значениях больше (меньше) $+3$ кВ/м (-3 кВ/м) фиксируются наряду с облачными и отрицательными и положительные молниевые разряды. Указанные закономерности можно использовать для мониторинга грозových явлений над особо важными молниезависимыми объектами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Аджи́ев А.Х., Богаченко Е.М.* Грозы Северного Кавказа. – Нальчик, 2011. – 152 с.
2. *Inampues J., Aranguren D., Torres H., Montanya J., Santoyo I., Olarte E. and Younes C.* Analysis of lightning forecasts in Colombia based on the lightning detection network data // X International Symposium on Lightning Protection – X SIPDA, Curitiba, Brasil: SIPDA, 2009.
3. *Murphy M.J.* Probabilistic early warning of cloud – to – ground lightning at an airport // 16th Conference on Probability and Statistics in the Atmospheric Sciences, Orlando, Florida, 2002.
4. *Clements N.C.* The warning time for cloud – to – ground lightning in isolated, ordinary thunderstorms over Houston, Texas,” Master study: Texas A&M University, 2007.
5. *Аджи́ев А.Х., Тапасханов В.О., Стасенко В.Н.* Система грозопеленгации на Северном Кавказе // Метеорология и гидрология. – 2013. – № 1. – С. 5-11.
6. *Murphy M.J. and Demetriades N.* The role of total lightning in thunderstorm nowcasting // Symposium on Planning, Nowcasting and Forecasting in the Urban Zone, Tucson, Arisona, USA: VAISALA Inc, 2005.
7. *Lopez J., Perez E., Herrera J., Aranguren D. and Porras L.* Thunderstorm warning alarms methodology using electric field mills and lightning location networks in mountainous regions // International Conference on Lightning Protection (ICLP), Vienna, Austria, 2012.
8. *Гашина С.Б., Дивинская Б.Ш., Сальман Е.М.* Методика использования и результаты проверки численного радиолокационного критерия грозоопасных облаков // Тр. ГГО. – 1968. – Вып. 231. – С. 24-29.
9. *Алексеева А.А., Бухаров М.В.* Спутниковый диагноз гроз по синхронной информации радиометров микроволнового и инфракрасного диапазонов // Метеорология и гидрология. – 2005. – № 6. – С. 30-39.
10. EN50536. “Protection against lightning. Thunderstorm warning systems”. European Committee for Electrotechnical Standardization, 2010.
11. Наставление по метеорологическому обеспечению гражданской авиации (НМОГА-73). – Гидрометеоиздат, 1973. – 137 с.
12. ACRP Report 8. “Lightning – Warning Systems for Use by Airports”. Airport Cooperative Research Program, Federal Aviation Administration, USA, 2008.
13. *Uman M.A., Rakov V.A.* The interaction of lightning with airborne vehicles Progress in Aerospace Sciences. – 2003. – Vol. 39. – P. 61-81.
14. Измеритель электрического поля EFM550. Руководство пользователя <http://www.vaisala.com>. 2004.
15. *Базелян Э.М., Райзер Ю.П.* Физика молнии и молниезащиты. – М.: Физматлит, 2001. – 320 с.
16. *Uman M.* Lightning Return Stroke Electric and Magnetic Fields, 1984, IC on Atmospheric Electricity, Albany, New York, June 3-8.
17. *Adzhiev A., Kuliev D., Kazakova S., Malkandueva L., Korovin I., Boldyrev A., Schaefer G.* Investigating the influence of thunderstorms on atmospheric electric field potential gradient variations // 5th International Conference on Informatics, Electronics and Vision. – 2016. – P. 1165-1168.
18. *Boldyreff A.S., Bespalov D.A., Adzhiev A.Kh.* Automated information-analytical system for thunderstorm monitoring and early warning alarms using modern physical sensors and information technologies with elements of artificial intelligence // SPIE Commercial + Scientific Sensing and Imaging, 10218. – 2017.
19. *Adzhiev A.Kh., Boldyrev A.S., Bolgov Y.V., Wendisch M., Bondareva O.V.* Advanced remote sensing of thunderstorm events and atmospheric electric field // Proc. SPIE 10424, Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XXII, 2017. – Doi: 10.1117/12.2299290.
20. *Aida A. Adzhieva, Vitaliy A. Shapovalov, Anton S. Boldyrev, Dmitry A. Bespalov.* Sensing of parameters of lightning discharges on the South of the European part of Russia // Proc. SPIE 10786, Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XXIII, 107860F 2018. – Doi: 10.1117/12.2513299.

REFERENCES

1. Adzhiev A.Kh., Bogachenko E.M. Grozy Severnogo Kavkaza [Thunderstorms of the North Caucasus]. Nal'chik, 2011, 152 p.
2. Inampues J., Aranguren D., Torres H., Montanya J., Santoyo I., Olarte E. and Younes C. Analysis of lightning forecasts in Colombia based on the lightning detection network data, *X International Symposium on Lightning Protection – X SIPDA, Curitiba, Brasil: SIPDA, 2009.*
3. Murphy M.J. Probabilistic early warning of cloud – to – ground lightning at an airport, *16th Conference on Probability and Statistics in the Atmospheric Sciences, Orlando, Florida, 2002.*
4. Clements N.C. The warning time for cloud – to – ground lightning in isolated, ordinary thunderstorms over Houston, Texas,” Master study: Texas A&M University, 2007.
5. Adzhiev A.Kh., Tapaskhanov V.O., Stasenko V.N. Sistema grozopelengatsii na Severnom Kavkaze [System of lightning direction finding in the North Caucasus], *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and hydrology], 2013, No. 1, pp. 5-11.
6. Murphy M.J. and Demetriades N. The role of total lightning in thunderstorm nowcasting, *Symposium on Planning, Nowcasting and Forecasting in the Urban Zone, Tucson, Arisona, USA: VAISALA Inc, 2005.*
7. Lopez J., Perez E., Herrera J., Aranguren D. and Porras L. Thunderstorm warning alarms methodology using electric field mills and lightning location networks in mountainous regions, *International Conference on Lightning Protection (ICLP), Vienna, Austria, 2012.*
8. Gashina S.B., Divinskaya B.Sh., Sal'man E.M. Metodika ispol'zovaniya i rezul'taty proverki chislennogo radiolokatsionnogo kriteriya grozopasnykh oblakov [Methods of use and results of verification of the numerical radar criterion of thunderstorm clouds], *Tr. GGO* [Proceedings of the Main geophysical Observatory], 1968, Issue 231, pp. 24-29.
9. Alekseeva A.A., Bukharov M.V. Sputnikovyy diagnoz groz po sinkhronnoy informatsii radiometrov mikrovolnovogo i infrakrasnogo diapazonov [Satellite diagnosis of thunderstorms by synchronous information of microwave and infrared radiometers], *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and hydrology], 2005, No. 6, pp. 30-39.
10. EN50536. “Protection against lightning. Thunderstorm warning systems”. European Committee for Electrotechnical Standardization, 2010.
11. Nastavlenie po meteorologicheskomu obespecheniyu grazhdanskoy aviatsii (NMOGA-73) [Manual on meteorological support of civil aviation (NMOGA-73)]. Gidrometeoizdat, 1973, 137 p.
12. ACRP Report 8. “Lightning – Warning Systems for Use by Airports”. Airport Cooperative Research Program, Federal Aviation Administration, USA, 2008.
13. Uman M.A., Rakov V.A. The interaction of lightning with airborne vehicles *Progress in Aerospace Sciences*, 2003, Vol. 39, pp. 61-81.
14. Izmeritel' elektricheskogo polya EFM550. Rukovodstvo pol'zovatelya [Meter EFM550 electric field/ user Guide]. Available at: <http://www.vaisala.com.2004>.
15. Bazelyan E.M., Rayzer Yu.P. Fizika molnii i molniezashchity [Lightning physics and lightning protection]. Moscow: Fizmatlit, 2001, 320 p.
16. Uman M. Lightning Return Stroke Electric and Magnetic Fields, 1984, IC on Atmospheric Electricity, Albany, New York, June 3-8.
17. Adzhiev A., Kuliev D., Kazakova S., Malkandueva L., Korovin I., Boldyrev A., Schaefer G. Investigating the influence of thunderstorms on atmospheric electric field potential gradient variations, *5th International Conference on Informatics, Electronics and Vision*, 2016, pp. 1165-1168.
18. Boldyreff A.S., Bepalov D.A., Adzhiev A.Kh. Automated information-analytical system for thunderstorm monitoring and early warning alarms using modern physical sensors and information technologies with elements of artificial intelligence, *SPIE Commercial + Scientific Sensing and Imaging*, 10218, 2017.
19. Adzhiev A.Kh., Boldyrev A.S., Bolgov Y.V., Wendisch M., Bondareva O.V. Advanced remote sensing of thunderstorm events and atmospheric electric field, *Proc. SPIE 10424, Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XXII*, 2017. Doi: 10.1117/12.2299290.
20. Aida A. Adzhieva, Vitaliy A. Shapovalov, Anton S. Boldyrev, Dmitry A. Bepalov. Sensing of parameters of lightning discharges on the South of the European part of Russia, *Proc. SPIE 10786, Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XXIII*, 107860F 2018. Doi: 10.1117/12.2513299.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. А.О. Касьянов.

Аджиев Анатолий Хабасович – Высокогорный геофизический институт; e-mail: adessa1@yandex.ru; 360030, КБР, г. Нальчик, пр. Ленина, 2; тел.: +78662401916; д.ф.-м.н.; профессор; зав. отделом стихийных явлений.

Кузьмин Владимир Аркадьевич – e-mail: vl.kuzmin1992@gmail.com; тел.: 89253129455; аспирант.

Болдырев Антон Сергеевич – Южный федеральный университет; e-mail: boldyrev@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, ул. Энгельса, 1; тел.: +79888987877; директор Института радиотехнических систем и управления; к.ф.-м.н.; доцент.

Adzhiev Anatoly Khabasovich – High-mountain geophysical Institute; e-mail: adessa1@yandex.ru; 2, Lenin ave., Nalchik, 360030, Russia; phone: +78662401916; dr. of phis.-math. sc.; professor; head of the department of natural phenomena,

Kuzmin Vladimir Arkadievich – e-mail: vl.kuzmin1992@gmail.com; phone: +79253129455; postgraduate student.

Boldyreff Anton Sergeevich – Southern Federal University; e-mail: boldyrev@sfedu.ru; 1, Engelsa street, Taganrog, 347928, Taganrog, Russia; phone: +79888987877; director of Institute of radio-engineering systems and control; cand. of phis.-math. sc.; associate professor.

УДК 621.396.67

DOI 10.23683/2311-3103-2018-7-177-185

В.А. Обуховец

СИНТЕЗ СИММЕТРИЧНЫХ СВЧ МНОГОПОЛЮСНИКОВ

Рассмотрена постановка задачи синтеза СВЧ-многополюсников по заданным на фиксированной частоте коэффициентам матрицы рассеяния. Обсуждаются способы оценки качества решения. Показано, что для упрощения решения задачи и снижения ее размерности необходимо учитывать свойства многополюсника. Наибольший эффект удается получить для симметричных многополюсников. Подробно рассмотрен вариант полной круговой симметрии. Для многополюсников, инвариантных относительно поворота на угол $2\pi/N$, процедура определения системы собственных векторов наиболее проста. В этом случае применение спектрального разложения матрицы рассеяния позволяет свести решение к синтезу невырожденных собственных чисел. Для простейших базовых элементов в виде отрезков линий передачи разработан регулярный метод синтеза как структуры, так и параметров многополюсника. Показано, что при определенном способе выбора длин отрезков вычисление волновых проводимостей основано на решении системы линейных алгебраических уравнений. Рассмотрен пример синтеза реактивного многополюсника с шестью входами. Исследованы его частотные свойства. Расчетные результаты проверены экспериментально на макете устройства.

Многополюсник; анализ; синтез; собственные векторы; собственные числа; симметрия; базовые элементы; частотные свойства.

V.A. Obukhovets

SYNTHESIS OF SYMMETRIC MICROWAVE MULTIPOINTS

There is considered the microwave multipoints synthesis problem. The scattering matrix coefficients at the prescribed frequency are the initial data for the problem. Methods of solution quality evaluating are discussed. It is shown that in order to simplify the problem solution and reduce its dimension, it is necessary to take into account the multipoint physical properties. The most effective solution can be obtained for symmetric multipoints. A variant of complete circular symmetry is considered in detail. For multipoints that are invariant under rotation by the angle $2\pi/N$, the procedure for determining the system of eigenvectors is the simplest one. In this case, the application