

УДК 621.311+551.594.221:551.506

А. В. Бурцев, Ю. М. Невретдинов, Г. П. Фастий

Результаты экспериментальных регистраций грозовой активности на Кольском полуострове

A. V. Burtsev, Yu. M. Nevretdinov, G. P. Fastiy

Results of storm activity registration in the Kola Peninsula

Аннотация. Приведены результаты обработки регистрации грозовой активности на Кольском полуострове за период 2013-2014 гг. Отмечены значительные колебания грозовой активности, а также неравномерность распределения разрядов молнии по территории региона. Предложено при оценке эффективности молниезащиты объектов электроэнергетики в районах с низкой интенсивностью гроз применять показатель плотности разрядов на землю с учетом распределения их в конкретном регионе.

Abstract. Results of storm activity registration processing in the Kola Peninsula during 2013-2014 have been given. Considerable fluctuations of storm activity and unevenness of lightning discharges distribution across the region territory have been noted. It has been proposed to use a cloud-to-ground discharge density indicator taking into account their distribution in the region at an assessment of lightning protection efficiency of power generation facilities in areas with low thunder-storms intensity.

Ключевые слова: регистрация грозовой активности, Кольский полуостров, молниезащита, плотность разрядов.
Key words: storm activity registration, the Kola Peninsula, lightning protection, cloud-to-ground discharge.

Введение

В 2013 г. Центром физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН начата опытная регистрация грозовой деятельности, целью которой является определение плотности разрядов молний на территории Кольского полуострова и прилегающих территориях [1], [2].

К особенностям Кольского региона можно отнести сложность реализации требований к исполнению грозозащитных мероприятий, таких как заземляющие устройства и тросовая защита, из-за низкой проводимости грунта. Интенсивность грозовой деятельности принято определять числом грозовых часов или грозовых дней в году, вычисляемым как среднеарифметическое значение за ряд лет наблюдений для определенного места земной поверхности. Грозовая деятельность для данного региона по нормативным документам [3], [4] оценивается как низкая – от 20 до 30 грозовых часов для южной части региона и менее 10 для центральной и северной части (рис. 1). По данным эксплуатации грозовая активность может меняться от 10 до 45 грозовых часов в году [1]. При этом отмечается значительная неравномерность среднего числа грозовых отключений ЛЭП 110–330 кВ в регионе, что можно объяснить либо неравномерностью распределения разрядов молнии, либо различиями эффективности грозозащиты линий. Поэтому Центр физико-технических проблем энергетики Севера Кольского научного центра (ЦФТПЭС КНЦ) РАН начал проводить исследования характеристик грозовой деятельности на территории Кольского региона.

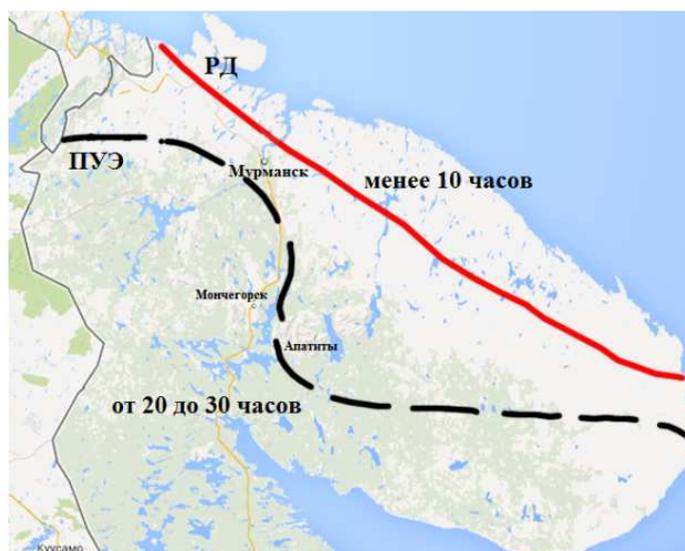


Рис. 1. Карта распределения грозовых часов на территории Кольского полуострова по ПУЭ и РД

Характеристика средств регистрации

В лаборатории ЦФТПЭС установлена система StormTracker канадской фирмы Voltek, которая предназначена для обнаружения атмосферных электрических разрядов (молний) на удалении до 480 км от места расположения базовой станции. Регистрация разрядов молний происходит круглосуточно в автоматическом режиме посредством программного обеспечения (ПО) NexStorm Lite фирмы Astrogenic, идущего в комплекте с системой StormTracker. Зарегистрированные события отображаются на карте в полярной системе координат, центром которой является г. Апатиты. Похожие системы длительное время функционируют в некоторых регионах России [5], [6], а также во многих странах мира [7]. В лаборатории ЦФТПЭС стандартное ПО используется исключительно для регистрации разрядов молний. Для обработки полученных результатов используются собственные программные разработки [8], [9].

Результаты регистрации в 2013 г.

По результатам регистраций длительность грозового сезона 2013 г. составила 100 дней. Начало сезона для Мурманской области определилось первой грозой 4 июня. Последняя гроза в области зарегистрирована 12 сентября. Статистические данные грозового сезона 2013 г. приведены в табл. 1.

Таблица 1

Статистика грозовых разрядов по месяцам 2013 г.

Период	Разряды молнии на землю		Междуоблачные разряды	
	CG+	CG–	IC+	IC–
Сезон	Всего разрядов молнии – 36 233 (100 %)			
	7 961 (22 %) / (100 %)		28 272 (78 %) / (100 %)	
	3 124	4 837	13 676	14 596
	39,2 %	60,8 %	48,4 %	51,6 %
Июнь с 4 по 30	Всего разрядов молнии – 12 749 (100 %)			
	954	1 910	4 364	5 521
	7,5 %	15,0 %	34,2 %	43,3 %
Июль	Всего разрядов молнии – 17 573 (100 %)			
	1 455	2 380	7 440	6 298
	8,3 %	13,5 %	42,3 %	35,9 %
Август	Всего разрядов молнии – 5 202 (100 %)			
	668	492	1 585	2 457
	12,8 %	9,5 %	30,5 %	47,2 %
Сентябрь с 1 по 12	Всего разрядов молнии – 709 (100 %)			
	47	55	287	320
	6,6 %	7,8 %	40,5 %	45,1 %

Как видно из табл. 1, число наземных разрядов составляет всего 22 % от общего числа разрядов. В среднем менее 40 % наземных разрядов имеет положительную полярность, что значительно превышает средний показатель 10 % [10].

По результатам регистраций 2013 г. с использованием ранее разработанного программного обеспечения построена карта территориального распределения грозовых разрядов (рис. 2). Карта разбита на 900 ячеек – 30 по вертикали и 30 по горизонтали. Такой формат выбран для наиболее комфортного визуального представления данных. Площадь каждой ячейки составляет 711 км² (квадрат со стороной 26,6 км). На карте показано число ударов молнии на землю (в пределах одной ячейки) за весь грозовой сезон.

Результаты регистрации показали значительную неравномерность распределения грозовых разрядов (от 0 до 18 ударов в ячейку). Основные зоны активности расположены в горном массиве Хибины и в северо-восточной части Кольского полуострова, а также прилегающей акватории Баренцева моря. Высокая грозовая активность наблюдается в северной части Финляндии – в районе Рованиеми и Соданкюля.

Для определения числа грозовых часов и построения карты распределения грозовых часов разработан алгоритм, схематично представленный на рис. 3. Согласно алгоритму, для определения числа грозовых часов в области, разбитой на ячейки, предпринимаются следующие действия.

- В качестве исходных данных берется массив событий (разрядов в землю), зарегистрированных за грозовой сезон. Все события содержат координаты и время. Каждое следующее событие новее предыдущего.
- Начинается перебор событий от первого до последнего из массива.

- Начинается перебор ячеек для проверки совпадения координат события и ячейки.
- Проверяется условие попадания события в ячейку. Если событие не принадлежит ячейке, то осуществляется переход к следующей ячейке. Если событие принадлежит ячейке, то выполняется следующий пункт.
- Проверяется условие существования в ячейке записи о времени. Если запись о времени присутствует, то проверяется временной диапазон между временем ячейки и временем события. Если этот диапазон меньше, чем 1 час, то осуществляется переход к следующему событию. Если же в ячейке нет записи о времени или диапазон больше, чем 1 час, ячейке присваивается время события и значение грозового часа для ячейки увеличивается на 1.

Так формируется область ячеек, которые отражают с заданной точностью карту грозовых часов исследуемой области. Если предположить, что массив состоит из одной ячейки, а не из 900, то очевидно, что все события попадут в эту ячейку. Если использовать предположение "о единственности ячейки", то в 2013 г. общее число грозовых часов по Мурманской области составляло 94.

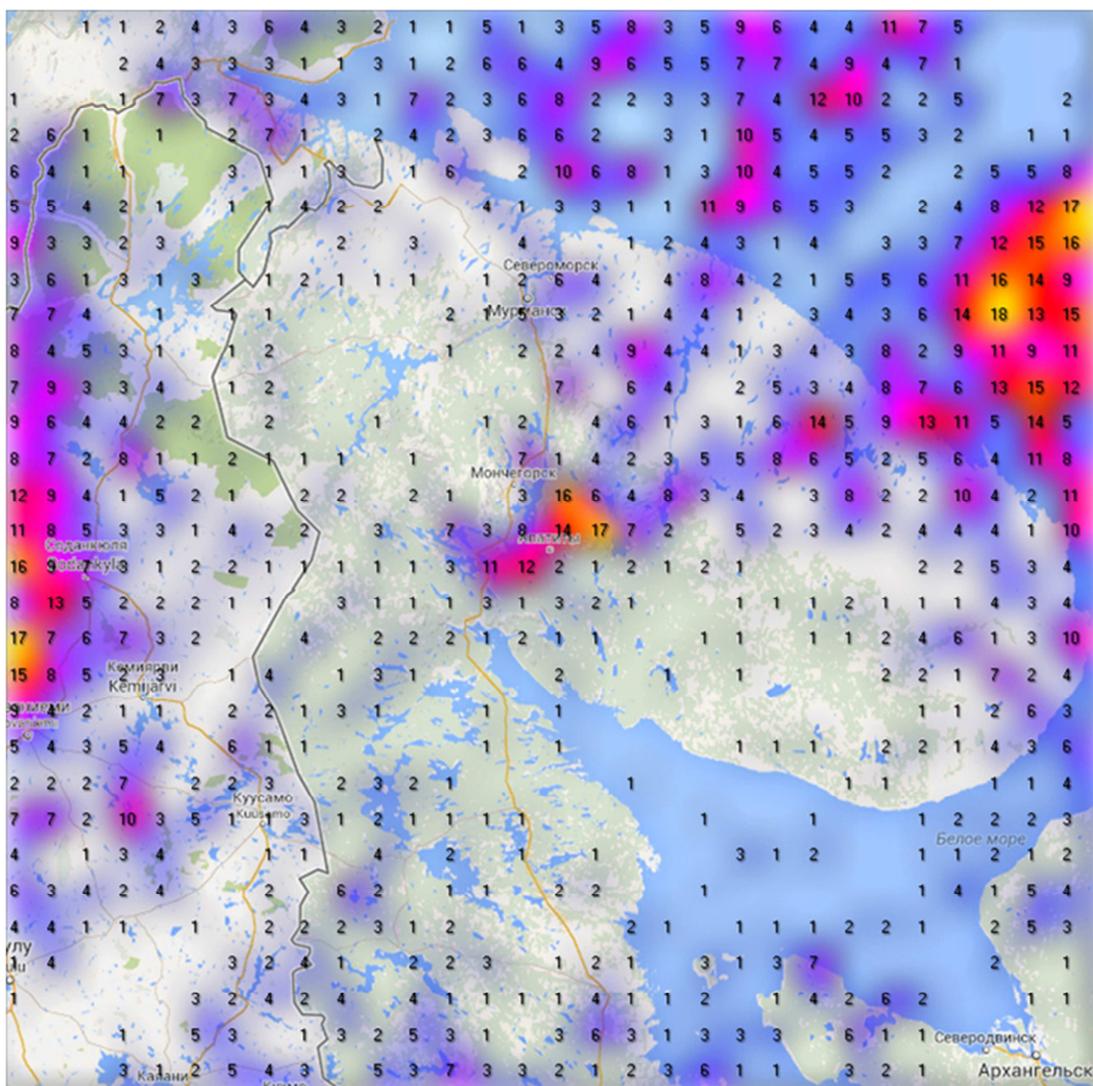


Рис. 2. Территориальное распределение грозовых разрядов в 2013 г.

Следует отметить, что одна ячейка не покажет какую-либо территориальную достоверность, но покажет ситуацию в исследуемой области в целом. Поэтому карты грозовых часов исследуемой области для повышения достоверности следует представлять в виде массива ячеек с заданной точностью. При этом следует учитывать, что при построении карты в качестве разряда принимались лишь разряды в землю. При учете всех разрядов, включая междуоблачные, количество грозовых часов нужно увеличить в среднем в 3 раза.

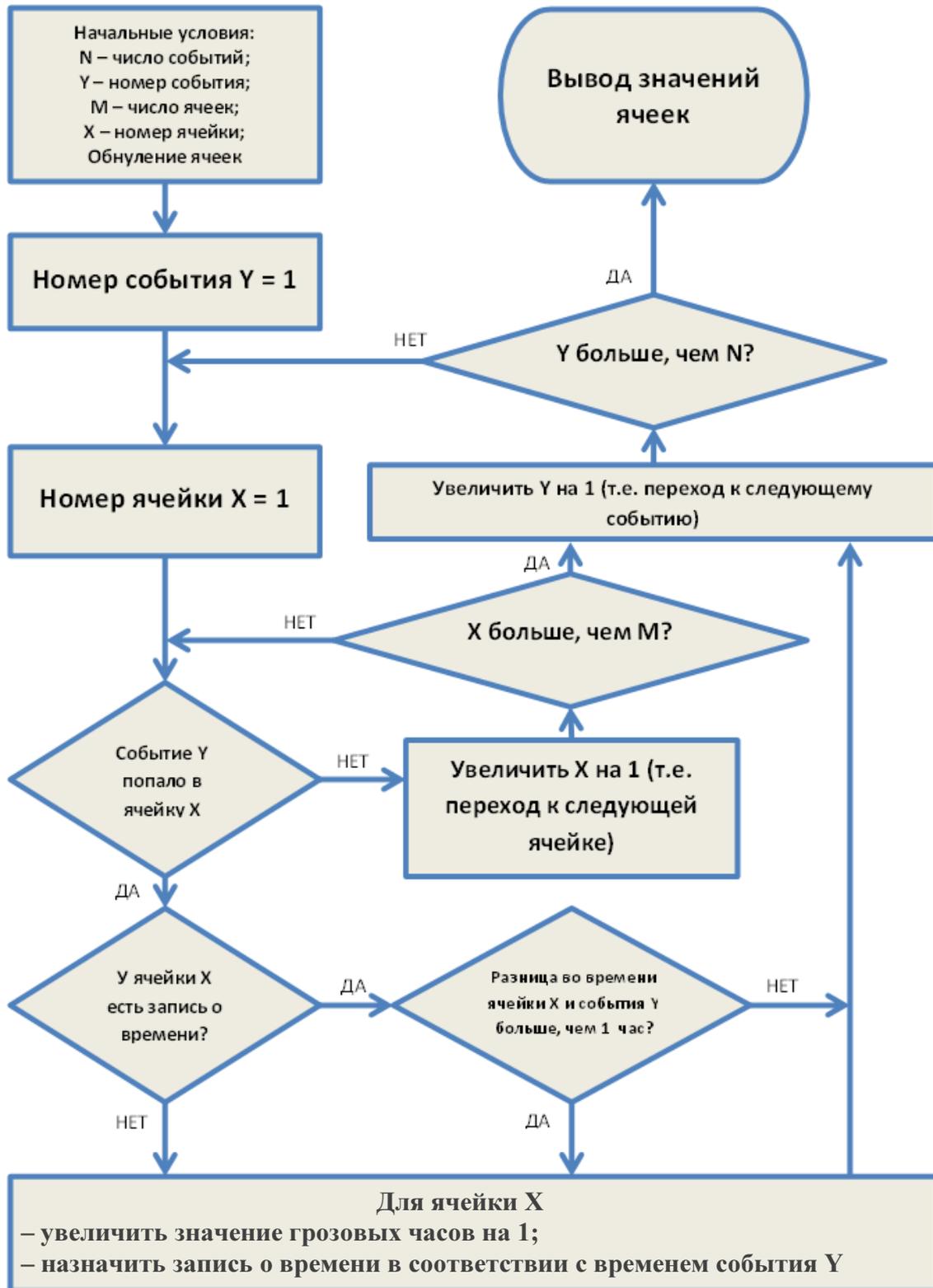


Рис. 3. Алгоритм для определения числа грозовых часов для области, разбитой на ячейки

С использованием предложенного алгоритма получена соответствующая карта распределения грозовых часов (рис. 4) для Мурманской области по результатам регистрации 2013 г.

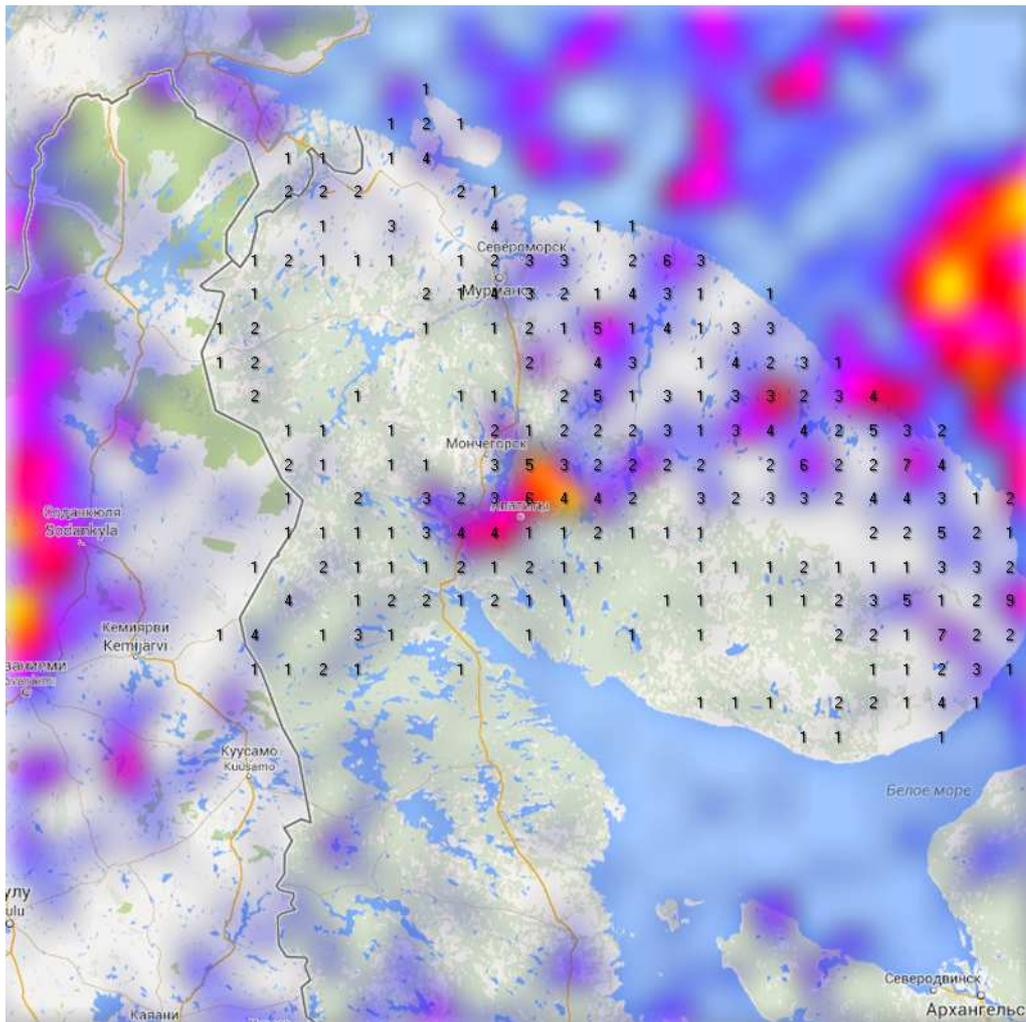


Рис. 4. Территориальное распределение грозовых часов в 2013 г.

Как видно, число часов по результатам регистраций в 2013 г. существенно отличается от данных ПУЭ и РД.

Результаты регистрации в 2014 г.

Грозовой сезон 2014 г. определился началом гроз 13 мая и завершением 4 сентября, длительность составила 113 дней. Следует отметить редкое явление – образование грозы 6-7 марта в северо-восточной и восточной части Кольского полуострова, которая началась в 8 часов и продолжалась 34 часа. За время этой грозы зарегистрировано 186 разрядов, из них 13 (7% от общего числа) разрядов в землю. Статистические данные грозового сезона 2014 г. приведены в табл. 2.

Таблица 2

Статистика грозовых разрядов по месяцам 2014 г.

Период	Разряды молнии на землю		Междуоблачные разряды	
	CG+	CG-	IC+	IC-
Сезон	Всего разрядов молнии – 98 233 (100 %)			
	32 282 (32,9 %) / (100 %)		65 951 (67,1 %) / (100 %)	
	8 993	23 289	31 370	34 581
	27,8 %	72,2 %	47,6 %	52,4 %
Май с 13 по 31	Всего разрядов молнии – 3 324 (100 %)			
	249	551	1249	1275
	7,5 %	16,6 %	37,6 %	38,3 %

Июнь	Всего разрядов молнии – 27 904 (100 %)			
	2437	6 520	7 523	11 424
	8,7 %	23,4 %	27,0 %	40,9 %
Июль	Всего разрядов молнии – 43 090 (100 %)			
	3 785	11 605	14 312	13 388
	8,8 %	26,9 %	33,2 %	31,1 %
Август	Всего разрядов молнии – 23 676 (100 %)			
	2 482	4 607	8 243	8 344
	10,5 %	19,4 %	34,8 %	35,3 %
Сентябрь с 1 по 4	Всего разрядов молнии – 239 (100 %)			
	40	6	43	150
	16,7 %	2,5 %	18,0 %	62,8 %

Как видно из табл. 2, в 2014 г. относительное число наземных разрядов увеличилось до 32,9%. При этом число наземных разрядов с положительной полярностью составило около 28 %.

Таким образом, регистрации 2013 и 2014 гг. показывают необходимость выполнения дополнительной оценки эффективности молниезащиты при ударах молнии положительной полярности.

По результатам регистраций 2014 г. построена карта территориального распределения грозовых разрядов (рис. 5). Для сопоставимости с предшествующими регистрациями рассматриваемая область карты грозового сезона 2014 г. имеет идентичную с картой 2013 г. характеристику.

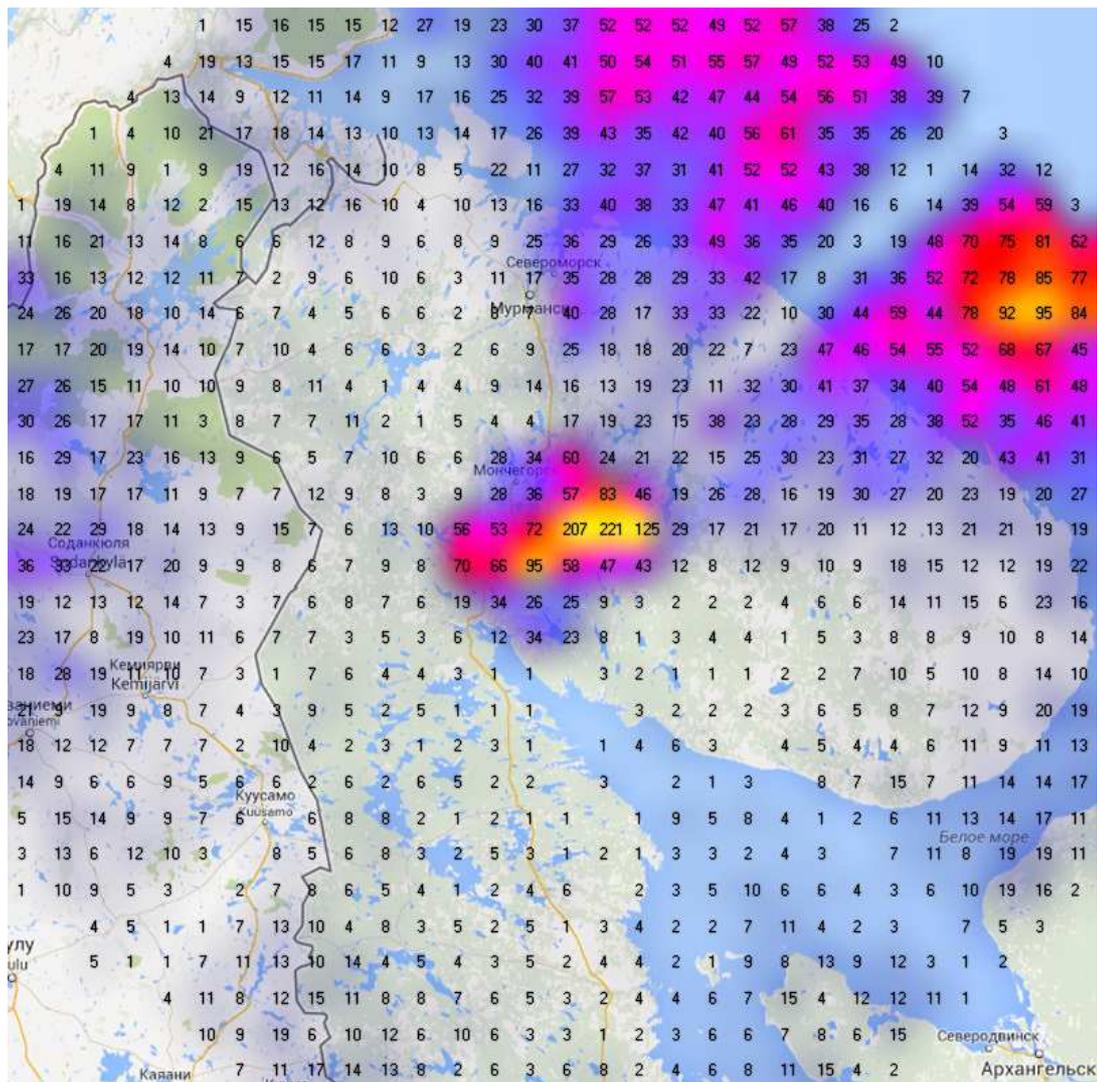


Рис. 5. Территориальное распределение грозовых разрядов в 2014 г.

Результаты регистрации также показали значительную неравномерность распределения грозовых разрядов (от 0 до 221 ударов в ячейку), но при сравнении с результатами 2013 г., прослеживаются ярко выраженные очаги повышенной концентрации грозовых разрядов в районе горного массива Хибины, а также в северной, северо-восточной части Кольского полуострова.

Так же, как и в 2013 г., отмечается высокая концентрация распределения разрядов в акватории Баренцева моря на северо-востоке Мурманской области, что можно объяснить столкновением холодного арктического фронта с теплым течением Гольфстрим.

По результатам регистрации 2014 г. построена карта грозовых часов (рис. 6) для Мурманской области.

На карте распределения грозовых разрядов на землю видно, что наибольшая интенсивность молний наблюдалась в районе горного массива Хибины (порядка 1 000 разрядов), а также в северной, северо-восточной части Кольского полуострова (порядка 5 000 разрядов). Количество разрядов в 2014 г. на этих участках почти в 5 раз превышает аналогичные показатели 2013 г.

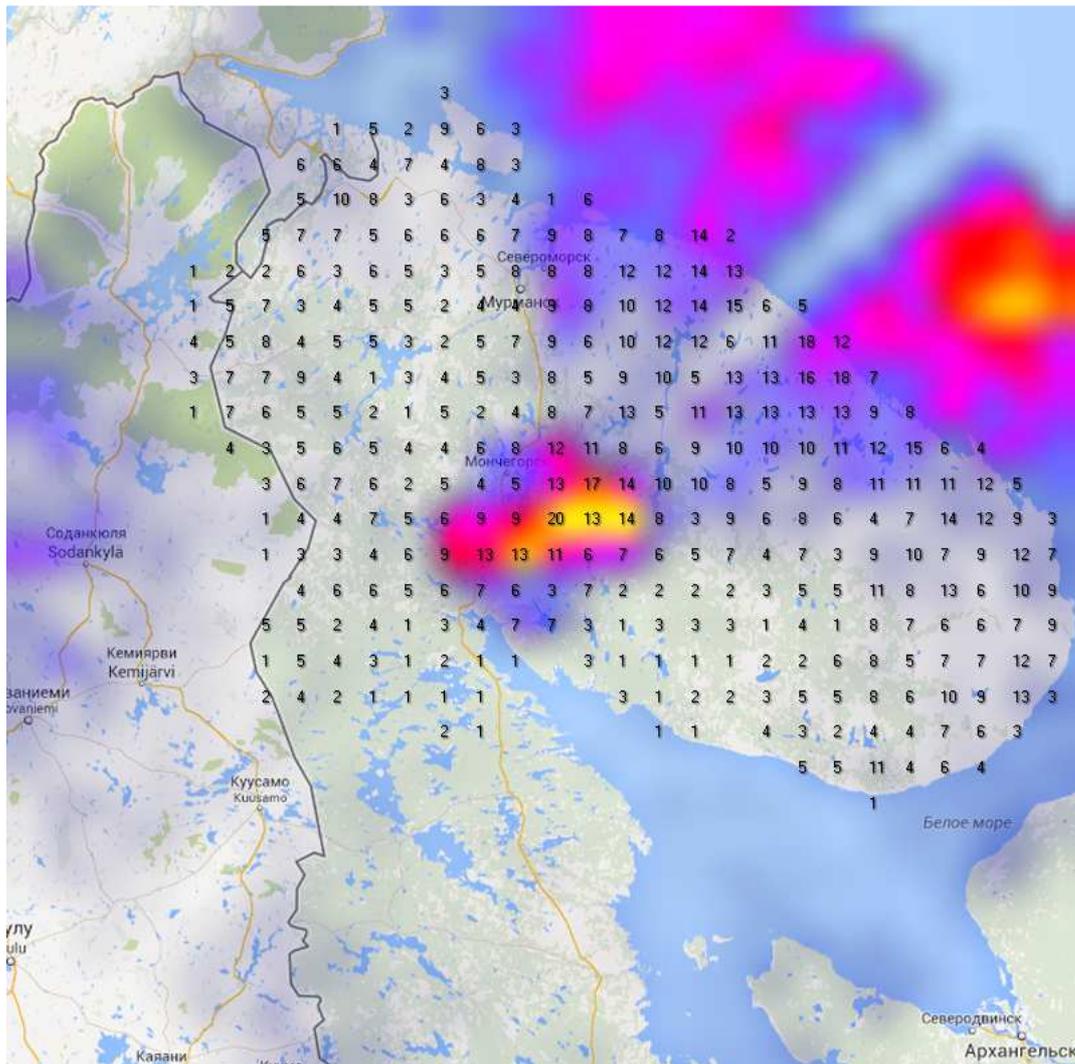


Рис. 6. Территориальное распределение грозовых часов в 2014 г.

Анализ и сравнение результатов регистраций 2013 и 2014 гг.

По результатам регистраций построены графики изменений грозовой активности в грозовом сезоне (по месяцам), которые приведены на рис. 7. Здесь показано распределение по месяцам полного числа грозовых разрядов, наземных и междуоблачных разрядов. Число разрядов $R_{мес}$ дано в относительных единицах (по отношению к общему числу разрядов за грозовой сезон).

Для двух рассмотренных грозовых сезонов характерно следующее: интенсивность грозовой деятельности в Мурманской области возрастает от мая до июля. С июля интенсивность уменьшается и к середине сентября грозовая активность прекращается. Однако в августе 2013 г. интенсивность разрядов молний (как в землю, так и междуоблачных) резко уменьшилась, тогда как в августе 2014 г. уменьшение интенсивности такое же плавное, как и увеличение в июне.

При изучении региональных особенностей грозовой активности может представлять интерес соотношение наземных и между облачных разрядов, а также деление их на разряды отрицательной и положительной полярности. Для этого на рис. 8 дано распределение числа наземных (P_{cg}) и междуоблачных (P_{ic}) разрядов относительно полного числа разрядов за месяц. Здесь же показано деление наземных разрядов на разряды положительной (P_{cg+}) и отрицательной (P_{cg-}) полярности.

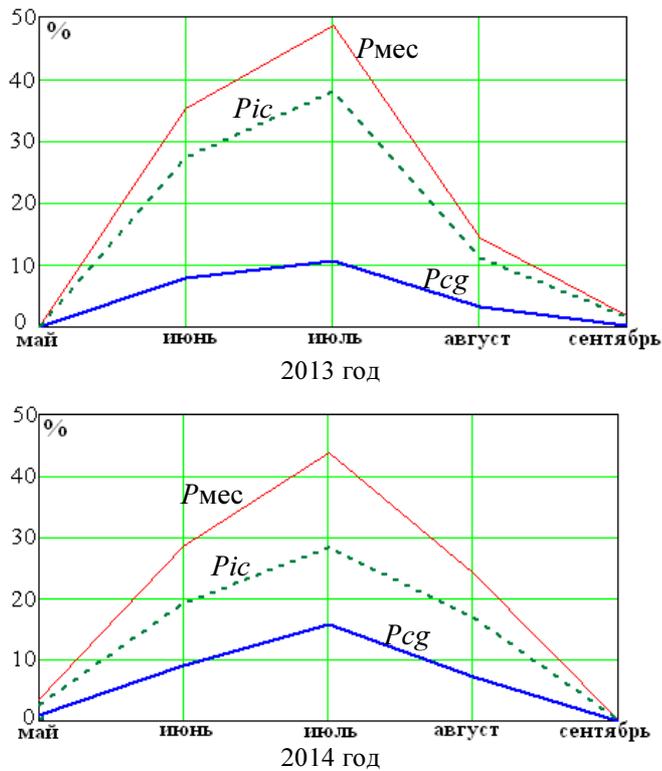


Рис. 7. Распределение по месяцам разрядов относительно всех разрядов

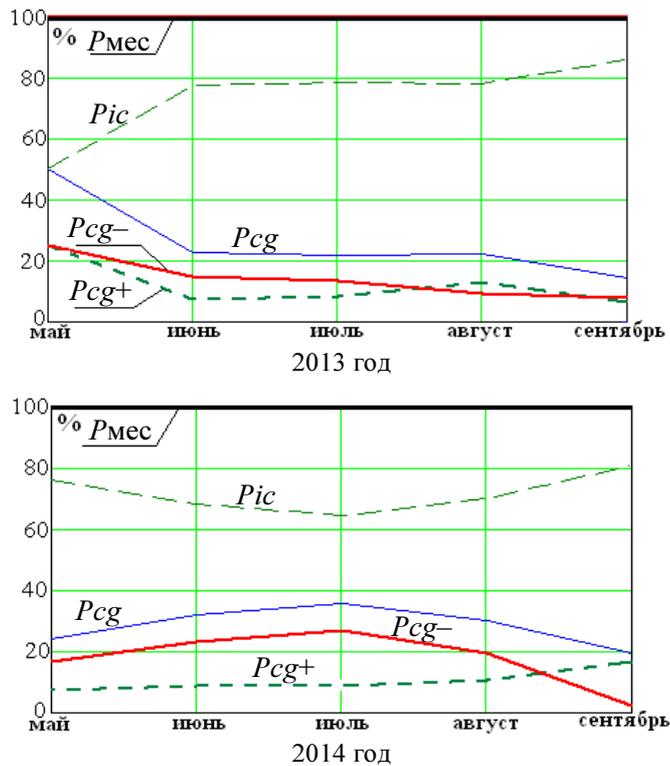


Рис. 8. Распределение разрядов по месяцам относительно разрядов за месяц

Из зависимостей на рис. 8 отчетливо видно преобладание междуоблачных разрядов в любом месяце грозовой активности. Особенностью данных регистрации является увеличение в конце грозового сезона относительного числа разрядов положительной полярности, что противоречит общепринятым данным [10].

Заключение

Регистрация грозовой деятельности в 2013–2014 гг. показала ярко выраженные очаги повышенной плотности разрядов молний на территории Кольского полуострова, прилегающих территорий и акватории. Выявлено значительное увеличение (в 2,7 раза) числа разрядов молний в 2014 г. по отношению к 2013 г.

Из-за ощутимой неоднородности распределения грозовых часов и плотности грозовых разрядов на землю по территории региона при проектировании молниезащитных мероприятий справедливо использовать полученные карты распределения плотности разрядов молнии на землю вместо устоявшегося применения общего числа грозовых часов по региону, описанных в ПУЭ и РД.

Выявлены региональные особенности деления разрядов молнии на разряды отрицательной и положительной полярности, а также распределения числа разрядов в течение грозового сезона.

Библиографический список

1. Бурцев А. В., Невретдинов Ю. М., Сытина А. Н. Опыт регистрации грозовой активности на территории Кольского полуострова // Вестник Кольского научного центра РАН. 2014. № 2 (17). С. 126–133.
2. Burtsev A. V., Nevretdinov Yu. M. Lightning discharges distribution on the Kola Peninsula in 2013 // Proceedings of the 3rd International Conference on GIS AND REMOTE SENSING. November 17–19, 2014, Tsaghkadzor, Armenia. Environmental Research and GIS Center. 2014. P. 93–98.
3. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е изд. М. : Изд-во НЦ ЭНАС, 2003.
4. Руководство по защите электрических сетей 6–1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений. РД 153-34.3-35.129-99. СПб. : Изд-во ПЭИПК, 1999.
5. Горбатенко В. П., Ершова Т. В., Константинова Д. А. Пространственное распределение плотности разрядов молнии в землю над Западной Сибирью // Вестник Том. гос. ун-та. 2009. № 3 (29). С. 215–221.
6. Мониторинг опасных метеорологических явлений в Верхневолжском регионе / Ю. В. Шлюгаев [и др.] // VII Всерос. конф. по атмосферному электричеству : сб. трудов, 24–28 сентября 2012 г. СПб., 2012. С. 133–135.
7. Davis C. J., Kin-Hing Lo. An enhancement of the ionospheric sporadic E-layer in response to negative polarity cloud-to-ground lightning. Geophysical Research Letters. V. 35, L05815, doi:10.1029/2007GL031909, 2008.
8. Бурцев А. В. Использование математического и логического аппарата для преобразования данных программы Astrogenic Nexstorm Lite для регистрации атмосферных электрических разрядов // Математические исследования в естественных науках // Труды IX Всерос. науч. школы. Апатиты : Изд-во К & М, 2013. С. 113–118.
9. Бурцев А. В. Разработка программного обеспечения и получение данных по грозовой активности для сопоставления с аварийными отключениями оборудования энергосистемы Мурманской области // XXI Междунар. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным наукам "Ломоносов–2014". Секция "Физика" : сб. тезисов. М., 2014. С. 78–79.
10. Rakov V. A. Lightning parameters of engineering interest: Application of lightning detection technologies. EGAT, Bangkok, Thailand, November 7, 2012.

References

1. Burtsev A. V., Nevretdinov Yu. M., Sytina A. N. Opyt registratsii grozovoy aktivnosti na territorii Kolskogo poluostrova [Experience of storm activity registration in the Kola peninsula's territory] // Vestnik Kolskogo nauchnogo tsentra RAN. 2014. N 2 (17). P. 126–133.
2. Burtsev A. V., Nevretdinov Yu. M. Lightning discharges distribution on the Kola Peninsula in 2013 // Proceedings of the 3rd International Conference on GIS AND REMOTE SENSING. November 17–19, 2014, Tsaghkadzor, Armenia. Environmental Research and GIS Center. 2014. P. 93–98.
3. Pravila ustroystva elektroustanovok (PUE) [EIC, Electrical Installations Code]. 7-e izd. M. : Izd-vo NTs ENAS, 2003.
4. Rukovodstvo po zaschite elektricheskikh setey 6–1150 kV ot grozovyh i vnutrennih perenapryazheniy [Guidelines for electrical networks 6-1150 kV protection from storm and internal surge]. RD 153-34.3-35.129-99. SPb. : Izd-vo PEIPK, 1999.
5. Gorbatenko V. P., Ershova T. V., Konstantinova D. A. Prostranstvennoe raspredelenie plotnosti razryadov molnii v zemlyu nad Zapadnoy Sibiryu [The spatial distribution of the CG-strikes density in West Siberia] // Vestnik Tom. gos. un-ta. 2009. N 3 (29). P. 215–221.

6. Monitoring opasnykh meteorologicheskikh yavleniy v Verhnevolzhskom regione [Dangerous meteorological phenomena monitoring in the Upper Volga region] / Yu. V. Shlyugaev [i dr.] // VII Vseros. konf. po atmosfernomu elektrichestvu : sb. trudov, 24–28 sentyabrya 2012 g. SPb., 2012. P. 133–135.

7. Davis C. J., Kin-Hing Lo. An enhancement of the ionospheric sporadic E-layer in response to negative polarity cloud-to-ground lightning. Geophysical Research Letters. V. 35, L05815, doi:10.1029/2007GL031909, 2008.

8. Burtsev A. V. Ispolzovanie matematicheskogo i logicheskogo apparata dlya preobrazovaniya dannyh programmy Astrogenic Nexstorm Lite dlya registratsii atmosferynykh elektricheskikh razryadov // Matematicheskie issledovaniya v estestvennykh naukakh [Using mathematical and logical apparatus for Astrogenic Nexstorm Lite data conversion for atmospheric electrical discharges registration] // Trudy IX Vseros. nauch. shkoly. Apatity : Izd-vo K & M, 2013. P. 113–118.

9. Burtsev A. V. Razrabotka programmogo obespecheniya i poluchenie dannyh po grozovoy aktivnosti dlya sopostavleniya s avariynymi otklyucheniyami oborudovaniya energosistemy Murmanskoy oblasti [Software development and data obtaining on thunderstorm activity for comparison with the power system equipment emergency shutdown in the Murmansk region] // XXI Mezhdunar. konf. studentov, aspirantov i molodykh uchenykh po fundamentalnym naukam "Lomonosov–2014". Sektsiya "Fizika" : sb. tezisov. M., 2014. P. 78–79.

10. Rakov V. A. Lightning parameters of engineering interest: Application of lightning detection technologies. EGAT, Bangkok, Thailand, November 7, 2012.

Сведения об авторах

Бурцев Антон Владимирович – Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, лаборатория высоковольтной электроэнергетики и технологии, мл. науч. сотрудник;
e-mail: tonyburt@rambler.ru

Burtsev A. V. – Centre for Physical and Technological Problems of Energy in Northern Areas of KSC RAS, Laboratory of High-Voltage Electroenergy and Technology, Cand. of Tech. Sci., Leading Researcher;
e-mail: ymnevr@mail.ru

Невретдинов Юрий Масумович – Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, лаборатория высоковольтной электроэнергетики и технологии, канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник, доцент, e-mail: ymnevr@mail.ru

Nevretdinov Yu. M. – Centre for Physical and Technological Problems of Energy in Northern Areas of KSC RAS, Laboratory of High-Voltage Electroenergy and Technology, Cand. of Tech. Sci., Leading Researcher;
e-mail: ymnevr@mail.ru

Фастий Галина Прохоровна – Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, лаборатория высоковольтной электроэнергетики и технологии, науч. сотрудник;
e-mail: fastiy@ien.kolasc.net.ru

Fastiy G. P. – Centre for Physical and Technological Problems of Energy in Northern Areas KSC RAS, Laboratory of High-Voltage Electroenergy and Technology, Researcher; e-mail: fastiy@ien.kolasc.net.ru