

А.Л. Мозер

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ДАННЫХ ГРОЗОПЕЛЕНГАТОРОВ И ДОПЛЕРОВСКИХ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЛОКАТОРОВ С ДВОЙНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИЕЙ

A.L. Mozer

DATA VISUALIZATION OF THE LIGHTNING DETECTORS AND DOPPLER WEATHER RADARS WITH DUAL POLARIZATION

Приводится обзор веб-сервисов, предназначенных для комплексного анализа данных грозопеленгационной сети LS 8000 и доплеровских метеорологических радиолокаторов с двойной поляризацией (ДМРЛ-С). Дано описание технологической схемы получения конечной продукции, предлагается метод комплексного анализа грозовых ячеек. Рассматриваются варианты дальнейшего развития системы, в частности, использования информации геостационарных спутников.

Ключевые слова: грозопеленгаторы, доплеровские метеорологические локаторы, геоинформационные системы.

This paper deals with online visualization services of lightning and radar data which was developed in SRC Planeta as part of Roshydromet Operation Center. These services provide access to Alwes, WWLLN, LS 8000 lightning detection systems and Doppler radars data. It is described in short the final product obtaining technological scheme. Thunder cells complex analysis algorithm is proposed.

Key words: lightning detectors, doppler weather radar, geoinformation systems.

Введение

Прогноз погодных явлений, особенно опасных, сегодня является обязательным условием для осуществления целого ряда видов деятельности человека. Без точного и своевременного прогноза сегодня не обходится ни один регулярный рейс гражданской и военной авиации, невозможна эффективная работа ремонтных и спасательных служб. На сегодняшний день немаловажными источниками информации для составления надежного прогноза являются спутниковая и радиолокационная информация [1]. Известно, что грозовая активность зачастую сопровождается ливневыми осадками, градом, штормовым и ураганым ветрами. Грозовая ячейка формируется в результате атмосферных процессов, обуславливающих появление и развитие мощной конвективной облачности. В задачи прогноза грозовой активности входят предсказание зарождения грозовой ячейки, определения ее параметров и физических характеристик, а также дальнейшей динамики. Значительные успехи в изучении молниевых ячеек были достигнуты благодаря развитию сетей метеорологических радиолокаторов, позволивших проводить оценку как параметров самих разрядов, так и метеорологической обстановки, характерной для их возникновения [7].

На сегодняшний день продолжается развертывание радиолокационной сети ДМРЛ-С Росгидромета. Всего запланирована установка 140 локаторов до 2020 г. ДМРЛ-С имеют максимальный радиус обзора, равный 250 км, и позволяют круглосуточно осуществлять циклические наблюдения с заданной периодичностью в автоматизированном режиме. Излучение сразу двух радиосигналов — на вертикальной и горизонтальной поляризациях — позволяет получать дополнительные параметры сигнала, а именно дифференциальную отражаемость, дифференциальную фазу и коэффициент кросс-корреляции. К концу 2016 г. по плану развертывания сеть ДМРЛ-С должна включать 96 действующих локаторов [3].

Идентификация грозовой активности радиолокационным методом достигается посредством оценки величины радиолокационной отражаемости и дополнительно привлекаемой метеоинформации. Существует практика увеличения вероятности идентификации гроз за счет привлечения информации с грозорегистрационных систем. Подобным образом для МРЛ достигается улучшение вероятности распознавания гроз до 30 % [5]. В Высокогорном геофизическом институте (ВГИ) [2] и Научно-исследовательском центре космической гидрометеорологии (НИЦ «Планета») с 2013 г. развернута система грозопеленгации LS 8000 фирмы Vaisala. Данная система позволяет получать информацию о местоположении источника электромагнитных возмущений в атмосфере, а также его электромагнитные характеристики. Информация поступает в оперативный геофизический центр Росгидромета (ОГЦ), функционирующий на базе НИЦ «Планета».

В рамках создания геоинформационной системы сбора и интеграции геофизической информации в оперативном геофизическом центре Росгидромета сотрудниками НИЦ «Планета» разработаны веб-сервисы, предоставляющие возможность комплексного отображения грозорегистрационной информации и данных с радиолокаторов. В рамках грозорегистрационной компоненты доступна информация системы грозопеленгации LS 8000, международной сети WWLLN, а также сети Главной геофизической обсерватории (ГГО) «Алвес». Продукция доплеровских радиолокаторов предоставляется Центральной аэрологической обсерваторией (ЦАО).

Подготовительные работы к разработке подобной системы можно разделить на три этапа. Первый заключался в разработке программного обеспечения приема, каталогизации и хранения требуемых данных. На втором этапе решалась задача преобразования данных в удобный для дальнейшего использования формат, а также обеспечение совместимости данных при их комплексном анализе. Третий этап состоял в обеспечении совместимости с существующими программными средствами визуализации, которые получают в ходе анализа данных.

Описание исходных данных ДМРЛ-С

В рамках рассматриваемой системы было разработано специальное программное обеспечение конвертации файлов в формате «абонентского пункта» в международный формат HDF5. Процесс формирования файлов продукции ДМРЛ-С включал в себя этапы первичной и вторичной обработки, подробнее с которыми можно ознакомиться в документации, распространяемой ЦАО [4]. Стоит отметить, что в перечень

радиолокационных продуктов, доступных в формате «абонентского пункта», входят карты радиолокационной отражаемости на горизонтальной и вертикальной поляризациях, радиальной скорости, ширины доплеровского спектра радиальных скоростей, дифференциальной фазы, коэффициента кросс-корреляции, горизонтального и вертикального сдвига ветра, интенсивности осадков, турбулентности, профиля скорости и направления ветра, горизонтального ветра, верхней и нижней границы облачности, метеорологических явлений, накопленных сумм осадков за 1, 3, 6, 12 ч. Формат «абонентского пункта» (АП) представляет собой бинарный файл с определенной структурой. По причине невысокой распространенности и узкой специализации данного формата возникают значительные трудности при попытке отобразить данные в стороннем программном обеспечении. В связи с этим в рамках текущей работы была успешно решена задача конвертации данных формата «абонентского пункта» в формат HDF5. Список программного обеспечения для обработки и анализа геоинформационных данных расширяется, в этой связи необходимо иметь формат данных, документируемый и развивающийся вне зависимости от работы конкретной компании-поставщика данных. Документация находится в свободном доступе, и доступны примеры для различных языков программирования, таких как Fortran, Java, Python, C++. Данный формат широко используется для представления массивов данных. Геофизические данные удобнее всего хранить и обрабатывать, предварительно структурировав их в виде массивов, содержащих данные различного типа: от символьных до чисел с плавающей точкой. При разработке программного приложения, осуществляющего тот или иной уровень обработки, удобнее, когда достаточно просто указать место, где размещены данные определенного типа, не заботясь о необходимости их представления или дешифровки.

Необходимость единого представления данных является первостепенной задачей на этапе проектирования геоинформационной системы. Результатом работы по данному направлению является программное обеспечение, позволяющее чтение радиолокационных данных, записанных в файле конечного абонентского пункта, и последующая их перезапись в формате HDF5. Конвертер разработан на языке C++ и на данном этапе представляет собой консольное приложение, ориентированное на чтение и последующую запись в формате HDF5 данных ДМРЛ-С, поступающих на приемную станцию, размещенную в оперативном геофизическом центре НИЦ «Планета». Программное обеспечение считывает данные заданного файла формата абонентского пункта, формирует массивы на основе полученных данных, создает в соответствии с заданными параметрами файл формата HDF5 и формирует блоки описания данных, параметров геопривязки, контейнеров данных и производит запись.

Описание исходных данных грозорегистрационных сетей

Грозопеленгационная система производства компании Vaisala состоит из четырех отдельных датчиков LS 8000, расположенных в населенных пунктах Нарофоминск, Кашира, Волоколамск, Электроугли. При регистрации и первичной обработке электромагнитного излучения информация о разряде с сенсора пересылается на центральный сервер обработки системы, расположенный в геофизическом центре НИЦ «Планета» в Москве. Излучение регистрируется в сверхдлинноволновом, длинноволновом

(1–300 кГц) и метровом (110–118 МГц) диапазонах. Исходная информация, прошедшая первичную обработку, заносится в архив событий, на основе которого производятся вычисления месторасположения каждого разряда.

Полученные после обработки центральным процессором данные о разрядах и грозовых событиях сохраняются в две базы данных. Первая из них функционирует в составе комплекса грозопеленгации. Данные, хранящиеся в ней, предназначены для отображения в программном модуле визуализации компании Vaisala LTS2005, а также статистического анализа программным обеспечением FALLS. Вторая база данных расположена на центральном сервере архивации геофизической информации и работает под управлением СУБД PostgreSQL. Она создавалась для целей долговременного хранения данных грозопеленгационной сети, а также для целей интеграции этих данных с данными иных источников метеорологической информации в рамках геоинформационной системы.

Таблицы информации о грозовых событиях в базе данных повторяют структуру формата UALF (Universal ASCII Lightning Format) и содержат поля с информацией о времени регистрации и координатах события, типе разряда, расчетном пиковом напряжении, повторяемости (количестве возвратных ударов в молнии, зарегистрированной в LF диапазоне), количестве задействованных для расчета местоположения события сенсоров, угле наклона эллипса распределения, длине большой и малой оси эллипса распределения, а также времени нарастания и затухания сигнала в микросекундах (от пикового значения до нуля, максимальной скорости нарастания сигнала).

Информация грозорегистрационной сети ГГО «Алвес» [6] поступает в организацию по каналу ведомственной сети связи в виде текстовых файлов, содержащих координаты, время начала и конца измерений, а также количество грозовых событий за указанный промежуток времени. Полученные данные в автоматическом режиме помещаются в базу данных долговременного хранения, размещенную на центральном сервере архивации.

Сеть грозорегистраторов WWLLN [11] — глобальная сеть, регистрирующая атмосферники в сверхдлинноволновом диапазоне (6–18 кГц) [10]. Данные с 6-часовой задержкой выкладываются в свободный доступ на сайте грозорегистрационной сети в формате архива .kmz. В состав распространяемой информации входят разряды, зарегистрированные не менее чем с пяти станций наблюдения [8]. В НИЦ «Планета» с 23.03.2015 в автоматическом режиме идет загрузка этих архивов, распаковка и запись в базу грозорегистрационных данных. Данные также доступны для визуализации в ArcGIS. Состав принимаемых данных: время регистрации разряда; координаты разряда; количество датчиков, зарегистрировавших разряд.

На сервере приема и обработки информации LS 8000 ежедневно в автоматическом режиме формируются отчеты по работе сети грозопеленгации. В данных отчетах отражается доступность сенсоров за прошедшие сутки и качественные характеристики детектирования грозовых разрядов отдельными сенсорами по ряду характеристик. Разработанная БД отвечает требованиям ArcGIS для геоинформационных баз данных и полностью совместима с его инструментарием анализа и отображения данных. Предусмотрено резервное копирование баз данных центрального сервера архивации геофизической информации. Ведутся работы по оценке качества привязки данных грозопеленгационной сети Vaisala по данным спутникового анализа гроз и радиолокации.

Комплексный анализ данных грозопеленгационной сети и данных ДМРЛ-С

Работы по комплексному представлению данных ДМРЛ-С и грозопеленгации выполнялись в три этапа: поиск и выделение объектов на картах продукции ДМРЛ-С; поиск и выделение зон с наибольшей молниевой активностью по данным грозопеленгационной сети; совместное представление и анализ полученных данных. Задача выделения объектов на изображении входит в круг задач технического зрения и вполне применима для анализа карт продукции ДМРЛ-С. Суть подобных методов заключается в том, чтобы выделить по заданному параметру на изображении элементарные составляющие и подготовить их для дальнейшей работы. Для решения задачи поиска и оконтуривания повешенных показателей на картах ДМРЛ-С были проанализированы популярные алгоритмы поиска контуров Кэнни (Canny) [9] и движущихся квадратов (Marching Squares). Алгоритм Кэнни оперирует данными об интенсивности градиентов, вычисляемых на основе производной гауссианы. На рис. 1, *а* приведен пример обработки карты отражаемости для среднеквадратических отклонений (σ), равных 3,0 и 5,5 соответственно.

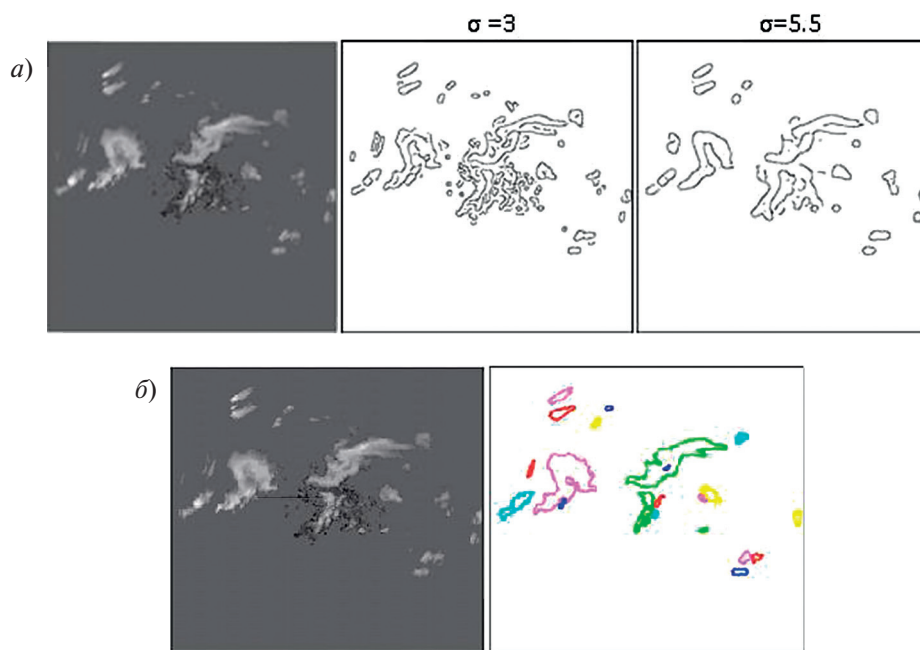


Рис. 1. Детектирование границ на карте отражаемости с применением оператора Кэнни (*а*) и алгоритма движущихся квадратов (Marching Squares) (*б*). Исходное изображение — слой карты отражаемости ДМРЛ-С г. Минеральные Воды за 09.06.2014 08:29

Разница между результатами работы алгоритмов оконтуривания на примере обработки карты слоя отражаемости показала большую эффективность использования

метода движущихся квадратов для поиска изолиний. Алгоритм детектирования границ Кэнни состоит из пяти этапов. На первом производится размытие изображения с помощью фильтра, основанного на первой производной от гауссианы. Для двумерного случая это произведение двух подобных гауссиан, по одной для каждого измерения:

$$g(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}, \quad (1)$$

где x, y — размерность ядра по горизонтали и вертикали соответственно.

После этого производится поиск горизонтальных, вертикальных и диагональных граней с помощью дискретного дифференциального оператора, вычисляющего приближенное значение градиента яркости. В данном случае применялся оператор Собеля ввиду простоты его вычисления. В общем случае нахождение величины и направления градиента можно представить следующим образом:

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}, \quad \theta = \arctg\left(\frac{G_y}{G_x}\right), \quad (2)$$

где $G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, $G_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$ — ядра фильтров; G — градиент, вычисляемый поэлементно; θ — направление градиента.

Для того чтобы избавиться от размытости границ, после этапа расчета градиентов как границы отмечаются только локальные максимумы. Оставшиеся пиксели довольно точно отражают реальные границы на изображении. После этого проводится двойная пороговая фильтрация. То есть задаются верхняя и нижние границы, и при значении пикселя, превышающем верхний порог, он считается принадлежащим границе; в случае слишком низкого значения пиксель подавляется. Далее применяется трассировка области неоднозначности, когда пиксели, имевшие промежуточное значение на этапе двойной пороговой фильтрации, подавляются, если они не соприкасаются по одному из восьми направлений с пикселем, значение которого превысило максимальный порог. В представленном на рисунке случае большая зашумленность центра изображения, не поддающаяся пороговой фильтрации, не позволила получить однозначно замкнутые контуры ячеек.

Гораздо более выгодным оказалось применение алгоритма движущихся квадратов. Суть данного метода заключается в том, что для обрабатываемого массива данных задается некоторый порог, при превышении которого элементу массива присваивается значение 1, в обратном случае — 0. Далее каждый блок элементов размерностью 2×2

проверяется на совпадение с заданными паттернами. Блоки, не относящиеся к границе, подавляются. В рассматриваемом примере порог выставлен равным 1.

В качестве инструмента для обработки данных ДМРЛ-С использовались библиотеки языка Python, scikit-image и scikit-learn. Данные библиотеки содержат множество инструментов для анализа различных наборов данных, таких как изображения или пространственно-временной набор точек. Для обработки данных грозорегистрационной сети используются прикладные программы, реализованные на языке Python с использованием пакетов программных инструментов, таких как numpy, scipy, geopandas. При этом для оперативного анализа данных прикладные программы могут быть включены в состав ГИС как модули серверной компоненты (сервера приложений).

Процесс разработки модуля анализа данных предполагает описание формата входных файлов, объектов, содержащих данные внутри программы, последовательности функций и их входов и выходов, реализующих задачи, возложенные на проектируемый модуль. Данное описание можно представить в виде функциональных схем. Далее выбираются наборы библиотек для используемого языка программирования, объекты и методы которых максимально соответствуют элементам функциональной схемы. В программе реализована функция доступа к базе данных PostgreSQL на основе, которой выполняется архивация информационного потока системы грозорегистрации. При этом для формирования выборки событий задается область на карте и исследуемый временной диапазон.

Анализ данных грозопеленгационной сети LS 8000 состоит из трех этапов: поиска групп событий по пространственно-временным характеристикам, поиска областей, занимаемых определенными группами, и в статистической оценке, обеспечивающей формирование трехмерной поверхности, характеризующей распределение интенсивности событий по исследуемой площади, за определенный период. Функция поиска кластера событий реализует плотностный алгоритм кластеризации пространственных данных с присутствием шума (DBSCAN — Density-based spatial clustering of applications with noise). Работа алгоритма основана на поиске участков с высокой плотностью событий при наличии помех. Аналитический модуль содержит методы, реализующие последовательность функций выделения кластеров, поиска границ кластеров, проецирования кластеров на сетку.

Каждая функция является примером достаточно распространенной на сегодняшний день задачи и в своей основе содержит проверенные математические алгоритмы. Методы реализуют компонентный подход к разработке программного обеспечения. Компоненты программного обеспечения — это простейшие структурные элементы, которые могут быть повторно использованы при построении программных систем.

Система интеграции данных предоставляет стандартные интерфейсы к имеющимся данным и функциям их обработки, что позволяет разрабатывать программное обеспечение для анализа данных в виде модулей имеющейся системы, заметно сократив затраты, связанные с подготовкой данных. По мере расширения системы накапливаются различные инструменты обработки данных, представляющие собой функциональные модули со стандартными интерфейсами. Унификация интерфейсов модулей позволяет проводить их композицию, получая комплексы функций для анализа и обработки данных.

Комплексная визуализация данных

Для решения задач отображения данных разработаны веб-сервисы для отображения распределения грозовой активности по данным грозорегистрационных сетей «Алвес», WWLLN, LS 8000 и данных измерений параметров атмосферного электричества, предоставляемых ГГО.

Для обеспечения задач контроля и протоколирования поступления продукции, а также ее интеграции в геоинформационную систему было разработано программное обеспечение подготовки, публикации и каталогизации грозорегистрационных данных сетей WWLLN и Vaisala LS 8000. Разработанный сервис распределения грозовой активности по данным LS 8000 (рис. 2, а) содержит слои разрядов облако–земля и межоблачных разрядов. Разработанный сервис распределения грозовой активности по данным WWLLN (рис. 2, б) содержит слой «События, зарегистрированные сетью WWLLN».

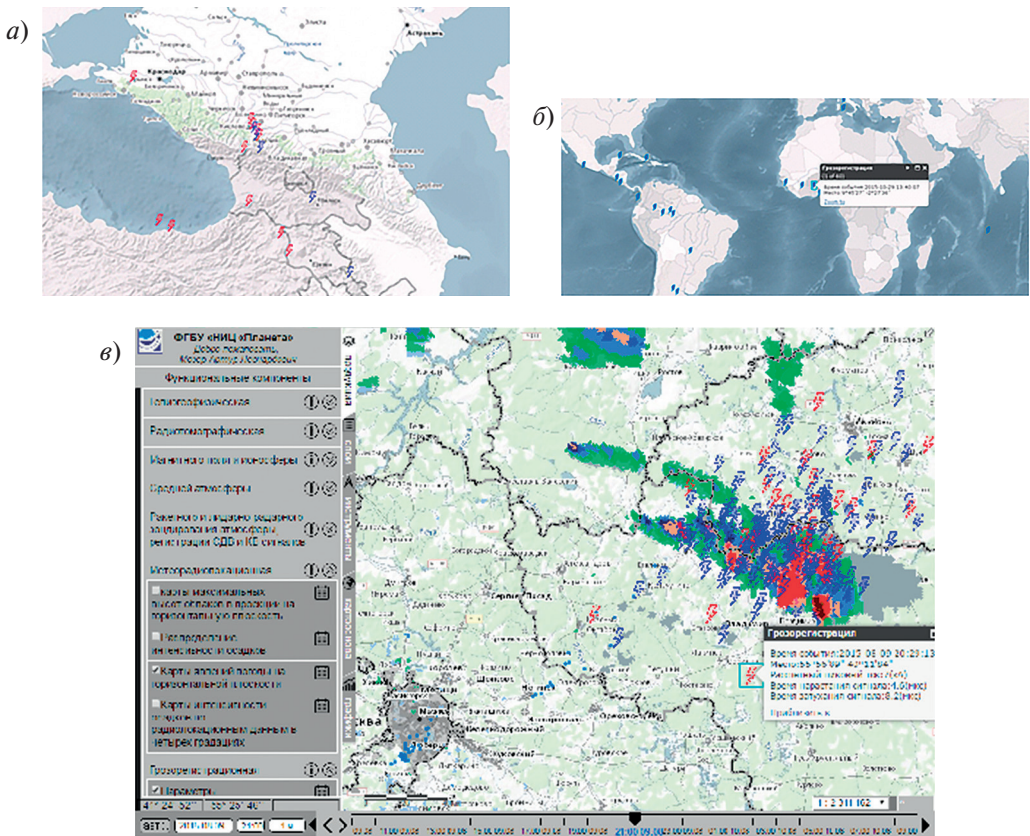


Рис. 2. Визуализация распределения грозовой активности по данным системы LS 8000 (а), грозорегистрационной сети WWLLN (б), а также пример комплексного представления данных LS 8000 и ДМПЛ-С (в)

Как видно на рисунке, в системе присутствует возможность отображения каждого информационного продукта по отдельности, а также комплексной визуализации. Для каждого отображаемого разряда доступна информация о его пространственных и электромагнитных характеристиках.

На текущий момент налажена передача в оперативный геофизический центр Росгидромета радиолокационных данных в формате GeoTIFF из ЦАО. Принимаются карты отражаемости, погодных явлений, интенсивности осадков и верхней границы облачности. На текущий момент данные поступают 1 раз в 3 ч.

Сравнение с аналогичными системами

Существует ряд систем, позволяющих одновременно оценивать развитие грозовой активности. К таковым относится геоинформационный портал «Метеорад», разработанный ЦАО, портал LightningMap.org и др.

Геоинформационный портал ЦАО доступен по адресу <http://map.meteorad.ru>. В данной системе доступны для отображения радиолокационные карты метеоявлений, интенсивности осадков и высоты верхней границы облачности. Разработчиками проведена большая работа по объединению данных международных грозорегистрационных сетей WWLLN и GLD360, системы ГГО «Алвес», объединенной системы LS 8000, включающей данные с датчиков, расположенных на Северном Кавказе и в Московской области. Для каждого разряда доступна информация о его месторасположении и времени регистрации.

Геоинформационный портал сообщества LightningMap.org [12] предоставляет доступ к композитным изображениям балльности облачности и интенсивности осадков по данным геостационарных спутников MSG с нанесенными поверх разрядами молний по данным европейской системы Blitzortung. Карты представляются в виде растровых изображений, информация по конкретным молниевым событиям отсутствует.

Выгодным отличием геоинформационных веб-сервисов, разработанных в НИЦ «Планета», является возможность просмотра дополнительных параметров по каждому грозовому разряду. Для отображения доступна информация о зарегистрированном пиковом токе, времени нарастания и затухания сигналов. Кроме того, доступна возможность загрузки данных по REST запросу в формате CSV.

Вывод

В НИЦ «Планета» разработана и внедрена в практику система усвоения, хранения и комплексной визуализации данных грозорегистрационных сетей WWLLN и LS 8000 и информации доплеровских метеорологических радиолокаторов с двойной поляризацией ДМРЛ-С, которая позволяет в оперативном порядке решать вопросы мониторинга грозовой активности. Отличительной особенностью системы является возможность просмотра информации об электромагнитных параметрах каждого зарегистрированного разряда, а также возможность скачивания данных по пользовательскому запросу. В дальнейшем система будет развиваться в направлении привлечения космических систем наблюдений, и в первую очередь, данных геостационарных спутников.

Литература

1. *Асмус В.В., Кровотынцев В.А., Милехин О.Е., Соловьев В.И., Успенский А.Б.* Использование спутниковых данных ДЗЗ для решения задач гидрометеорологии и мониторинга окружающей среды // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ, 2008, № 105, с. 6–16.
2. *Аджиев А.Х., Стасенко В.Н., Тапасханов В.О.* Система грозопеленгации на Северном Кавказе // Метеорология и гидрология, 2013, № 1, с. 2–11.
3. Временные методические указания по использованию информации доплеровского метеорологического радиолокатора ДМРЛ-С в синоптической практике. — М.: Росгидромет, 2014. — URL: <http://map.meteorad.ru/static/VMU-DMRL-140701.pdf>
4. Общесистемные решения по сбору, анализу, контролю и предоставлению радиолокационной информации от ДМРЛ-С: технический проект. Центральная аэрологическая обсерватория. — Долгопрудный: ФГБУ «ЦАО», 2013. — URL: <http://map.meteorad.ru/static/TP-DMRL-2014.pdf>
5. *Снегуров А.В., Снегуров В.С., Щукин Г.Г.* Методика и результаты наблюдений за грозами, системами пеленгации гроз и МРЛ // Учёные записки РГГМУ, 2010, № 12, с. 38–49.
6. *Снегуров В.С.* Концепция сети пеленгации гроз // Труды НИЦ ДЗА (филиал ГГО), 1997, вып. 1(546), с. 92–104
7. *Степаненко В.Д., Гальперин С.М.* Радиотехнические методы исследования гроз. — Л.: Гидрометиздат, 1983. — 204 с.
8. Electromagnetic methods of lightning detection // WMO guide to meteorological instruments and methods of observation. — [Электронный ресурс] URL: https://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/CIMO-Guide/Prelim-2014Ed/Prelim2014Ed_P-II_Ch-7.pdf (дата обращения: 11.12.2015).
9. *Moeslund T.* Canny Edge // Detection Laboratory of Computer Vision and Media Technology. — Denmark: Aalborg University, 2009. — [Электронный ресурс] URL: http://www.cvmt.dk/education/teaching/f09/VGIS8/AIP/canny_09gr820.pdf
10. *Hutchins M.L., Holzworth R.H., Brundell J.B.* Relative detection efficiency of the World Wide Lightning Location Network // Radio science, 2012, № 47. — DOI: 10.1029/2012RS005049.
11. World Wide Lightning Location Network. — [Электронный ресурс] URL: <http://wwlln.net/> (дата обращения: 24.10.2011).
12. LightningMap.org community page: precipitation and lightnings map. — [Электронный ресурс] URL: http://www.lightningmaps.org/blitzortung/europe/index.php?bo_page=archive&bo_hour_range=24&bo_oldmap=sat_europe_mpe&bo_oldani=0&bo_map=sat_europe_mpe&bo_year=2016&bo_month=3&bo_day=4&bo_hour_from=0&bo_hour_range=0.25&bo_animation=0#bo_arch_strikes_maps_form (дата обращения: 24.10.2011).