

26. *Ibadov R.R., Ibadov S.R., Voronin V.V., Fedosov V.P.* Modifitsirovannyi metod rekonstruktsii izobrazheniy na osnove poiska podobnykh oblastey [The modified method of image reconstruction based on the search for similar areas], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, No. 6 (191), pp. 179-189.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Д.А. Безуглов.

**Ибадов Рагим Рауфевич** – Южный федеральный университет; e-mail: ragim\_ibadov@mail.ru; 347928, г. Таганрог, ул. Энгельса, 1; тел.: 89298184480; аспирант.

**Катков Дмитрий Николаевич** – e-mail: 000dnk000@mail.ru; тел.: 89515142676; аспирант.

**Федосов Валентин Петрович** – e-mail: vpfed@mail.ru; тел.: 89525601246; д.т.н.; профессор.

**Ибадов Самир Рауфевич** – Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал в г. Шахты) Донского государственного технического университета; e-mail: kuuuuuuuuuuuu.yandex.ru; 346500, г. Шахты, ул. Шевченко, 147; тел.: 89518463738; аспирант.

**Воронин Вячеслав Владимирович** – e-mail: voronin\_sl@mail.ru; тел.: 89885343459; к.т.н.; зав. лабораторией.

**Ibadov Ragim Raufevich** – Southern Federal University; e-mail: ragim\_ibadov@mail.ru; 1, Engels street, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79298184480; postgraduate student.

**Katkov Dmitry Nikolaevich** – e-mail: 000dnk000@mail.ru; phone: +79515142676; postgraduate student.

**Fedosov Valentin Petrovich** – e-mail: vpfed@mail.ru; phone: +79525601246; dr. of eng. sc.; professor.

**Ibadov Samir Raufevich** – Institute of Service and Entrepreneurship (branch) Don State Technical University; e-mail: kuuuuuuuuuuuu.yandex.ru; 147, Shevchenko street, Shakhty, 346500, Russia; phone: +79518463738; postgraduate student.

**Voronin Viacheslav Vladimirovich** – e-mail: voronin\_sl@mail.ru; phone: +79885343459; cand. of eng. sc.; head of laboratory.

УДК 004.62: 551.594

DOI 10.23683/2311-3103-2018-3-14-22

А.А. Аджиева, В.А. Шаповалов

## СИСТЕМА КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА ГРОЗОПЕЛЕНГАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

*Необходимость мониторинга характеристик грозовой деятельности диктуется как ростом материального ущерба и числа случаев серьезных травм и гибели людей от опасных природных явлений, сопровождающих грозовые процессы, так и требованиями к совершенствованию безопасности жизнедеятельности, грозо и молниезащиты и др. Для совершенствования мониторинга молниевых разрядов требуются системы анализа, информационные технологии наглядного представления и интерпретации исходных измерений. Создание таких технологий требует решения ряда задач. Одной, из таких задач, является математическая обработка данных мониторинга молниевых разрядов на основе кластерного анализа. Таким образом, целью работы являлась разработка методов и алгоритмов системы кластерного анализа грозопеленгационной информации. Грозопеленгационная сеть, установленная на Северном Кавказе, начала работу в 2008 году и непрерывно представляет информацию о развитии грозовых ячеек. Наблюдение параметров разрядов молнии с помощью сети радиолокаторов и грозопеленгаторов представляет собой источник данных, который полезен для распознавания, отслеживания информации о текущем состоянии грозовых процессов. Но, даже когда нет никакой другой информации, грозопеленгатор позволяет до некоторой степени в реальном времени оценить характеристики гро-*

зы. Настоящее исследование посвящено вопросу о том, какого рода грозовые очаги можно выделить автоматически и в какой степени отслеживание ячеек на основе молнии позволяет улучшить прогнозирование быстроразвивающихся конвективных опасных явлений. На базе внедрения системы грозопеленгации на Северном Кавказе, выполнены исследования и разработано программное обеспечение, позволяющее решать задачи обнаружения и отслеживания грозовых очагов. Разработан модуль кластеризации молниевых разрядов и отслеживания грозовых очагов, который позволяет оценивать вклад определенных параметров молнии для конкретных грозовых ячеек. Были представлены типичные примеры грозовых процессов. Дальнейшее совершенствование системы возможно в двух направлениях, прямые методы отслеживания, например, на нейронных сетях и математическое моделирование развития опасных явлений погоды. Это позволит добиться улучшения текущего прогноза, и подготовит систему для надежного практического применения.

*Молниевые разряды; грозопеленгация; кластерный анализ; грозовые очаги; мониторинг гроз; центр мониторинга геофизической обстановки.*

**A.A. Adzhieva, V.A. Shapovalov**

### **SYSTEM OF CLUSTER ANALYSIS OF THUNDERSTORM DIRECTION FINDING INFORMATION**

*The need to monitor the characteristics of thunderstorm activity is dictated by the increase in material damage and the number of cases of serious injuries and deaths from natural hazards accompanying thunderstorms, and the requirements for improving the safety of life, thunder and lightning protection, etc. To improve monitoring of lightning discharges, analysis systems, information technologies of visual representation and interpretation of initial measurements are required. The creation of such technologies requires a number of tasks. One of these tasks is the mathematical processing of lightning discharge monitoring data based on cluster analysis. Thus, the goal of the work was the development of methods and algorithms for the cluster-based analysis of thunderstorm information. The lightning detection network, established in the North Caucasus, started work in 2008 and continuously delivers information on the development of thunderstorm cells. Observation of the parameters of lightning discharges using a network of radar and thunderstorm seekers is a data source that is useful for detecting, tracking information about the current state of thunderstorm processes. But, even when there is no other information, the direction-finder allows you to estimate to a certain extent in real time the characteristics of the thunderstorm. The present study is devoted to the question of what kind of thunderstorms can be identified automatically and to what extent the tracking of cells based on lightning can improve the prediction of rapidly developing convective hazards. On the basis of the introduction of the system of thunderstorm direction finding in the North Caucasus, research and software has been developed to solve the problem of detection and tracking of thunderstorms. The module of lightning discharges clustering and tracking of thunderstorms is developed, which allows evaluating the contribution of certain lightning parameters for specific storm cells. Typical examples of thunderstorm processes are presented. Further improvement of the system is possible in two directions, direct methods of tracking, for example, on neural networks and mathematical modeling of dangerous weather phenomena. This will allow improving the current forecast and preparing the system for reliable practical application.*

*Lightning discharges; lightning location system; cluster analysis; storm centers; monitoring of thunderstorms; center of geophysical monitoring of the situation.*

**Введение.** Грозы относятся к опасным природным явлениям с широким спектром воздействия на деятельность человека. Они наносят значительный материальный ущерб многим отраслям хозяйства, и представляют угрозу для безопасной жизнедеятельности. Особую опасность представляют грозы для микроэлектроники, энергосистем и различных коммуникаций. Поэтому изучение грозовой деятельности является важным для обеспечения грозозащиты различных объектов инфраструктуры.

В настоящее время уточняются и корректируются многие методические параметры, ведется систематический анализ информации, разрабатывается методическое обеспечение защиты населения и инфраструктуры. Но для правильной ин-

терпретации накопленного материала по параметрам молниевых разрядов требуется соотнести эти данные с определенными грозовыми очагами имеющими общие характерные особенности эволюции [1–3].

Таким образом, в мировой практике грозорегистрации с внедрением новых технологий происходит накопление фактических данных об особенностях электрической активности мощных конвективных облаков, которые в силу определенных причинно-следственных связей с некоторой заблаговременностью дают информацию о существенной микрофизической перестройке облака и возможности возникновения опасных явлений погоды [1, 4–11]. Ставится новая актуальная задача исследования устойчивости таких связей в различных орографических и климатических условиях.

**Постановка задачи.** Обнаружение разрядов молний на Северном Кавказе осуществляется Центром мониторинга геофизической обстановки над южным регионом Российской Федерации. Он создан при ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» для наблюдения за опасными явлениями погоды по программе создания региональных геофизических центров выполняющих мероприятия по оперативной обработке, накоплению и передаче данных [12].

В структуру Центра входит грозопеленгационная сеть на базе LS 8000 фирмы Vaisala, она состоит из 8 сенсоров установленных в Ставропольском крае, Ростовской области, Кабардино-Балкарской и Карачаево-Черкесской республиках. Зона обзора грозопеленгационной сети LS8000 при этом составляет около 1,8 млн. км<sup>2</sup>. Эффективность обнаружения молниевых разрядов достигает 90–95 %, а погрешность измерения координат составляет 1–2 км.

Грозопеленгационная сеть отслеживает значения параметров молниевых разрядов. Центр позволяет вести мониторинг в реальном масштабе времени, обеспечивает прием информации о молниях со всей доступной сенсорам территории, её архивирование и передачу потребителям.

В связи с тем, что сеть регистрирует огромное число разрядов, возникает потребность в способах их более эффективного и информативного отображения [12], позволяющих наглядно представлять пространственно-временной ход грозовой активности и рассматривать развитие грозовых очагов на уровне отдельных ячеек в режиме реального времени.

Для реализации подобных систем широко применяют методы кластеризации [13–19, 20–24], которые позволяют проводить классификацию данных и соотнесение их с тем или иным набором. Была разработана программа кластеризации, которая использует алгоритмы  $k$  – средних для упорядочения отдельных молниевых разрядов и итеративной группировки их в кластеры [16]. Алгоритм использует меру сходства – расстояние в двумерном Евклидовом пространстве [14, 18]. Кластеризацию данных можно проводить не только в пространстве, но и во времени. Поэтому время, определяемое на основании данных о среднем и максимальном времени жизни грозовых ячеек, включено как дополнительный параметр, определяющий максимальную по времени продолжительность развития кластеров.

В результате получаем следующий алгоритм.

На первом шаге вычисляется Евклидово расстояние  $d_m(k)$  между вектором параметров выбранного молниевых разряда и центроида кластера кандидата  $k$ , равное:

$$d_m(k) = \left\| \mu_k^n - T_m \right\|, \quad (1)$$

где  $\mu_k^n$  является главной точкой  $k$ -го кластера на  $n$ -ой итерации и  $T_m$  вектором параметров ( $m$ ). Второй шаг определяет смежность по времени,  $d_t(k)$ , которая измеряет количество прародителей, чьи параметры отличались от параметров кластера кандидата  $k$ . Формально можно выразить расстояние  $d_t(k)$  как:

$$d_i(k) = \sum_{ij \in N_m} (1 - \delta(S_{ij}^n - k)), \quad (2)$$

где  $S_{ij}^n$  полученные кластеры на n-й итерации, а  $N_m$ -множество прародителей ( $m$ ). Затем выбор кандидата для вектора параметров ( $m$ ) в  $(n + 1)$ -ой итерации,  $S_{ij}^{n+1}$ , задается кластером  $k \in S_{N_m}^n$  для которого энергия  $E(k)$  минимальна.

$$E(k) = \chi d_m(k) + (1 - \chi) d_i(k), \quad (3)$$

здесь  $\chi$  коэффициент, вычисляемый как для «альфа-бета» фильтра.

Алгоритм завершается когда, на какой-либо из итерации, уже не происходит изменения внутрикластерного расстояния.

В ходе исследований были разработаны методы, алгоритмы и программное обеспечение, позволяющие добиться более информативного представления пространственно-временного развития грозовой активности как движения центров кластеров.

На рис. 1, 2 приведены примеры представления информации в разработанной системе. Кластерный анализ позволяет связать отдельные вспышки в объекты, которые можно соотнести с грозовыми очагами. Это в свою очередь позволяет рассматривать изменение во времени параметров грозовой активности (в процессе эволюции отдельной грозовой ячейки, многоячейковой структуры или всего грозового фронта в целом).

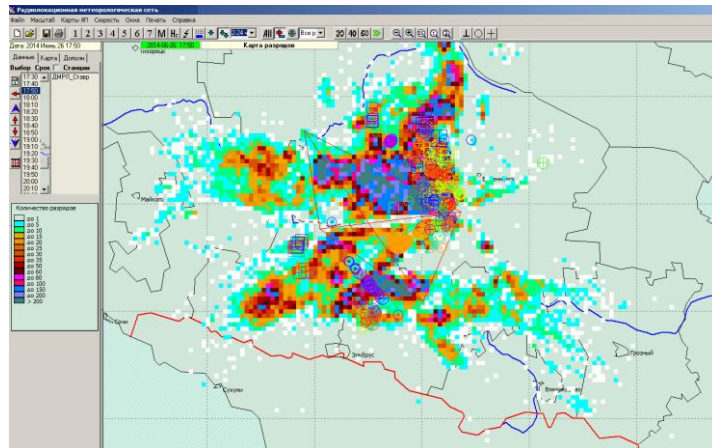


Рис. 1. Карта количества разрядов на землю во второй половине дня. Значки положительных, отрицательных молниевых разрядов внутриоблачных и «облако-земля» выведены за последние 10 минут

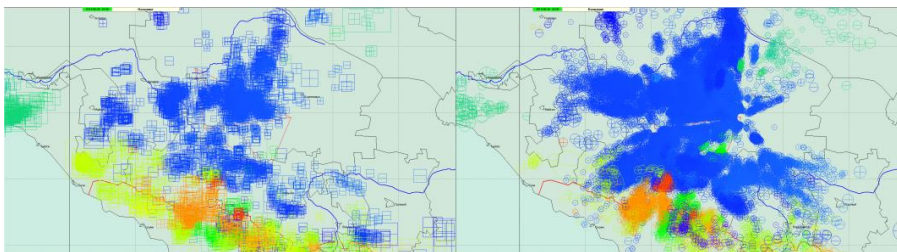


Рис. 2. Результаты кластеризации данных о молниевых разрядах

По результатам регистрации молниевых разрядов можно исследовать параметры мезомасштабных грозовых комплексов (скорость перемещения в пространстве, площадь охвата, длительность, интенсивность и другие параметры разрядов). При масштабах от десятков до сотен км<sup>2</sup>, они движутся со скоростью  $\approx 40$  км/ч, способны просуществовать около суток и имеют интенсивность разрядов порядка  $0,3 \times 10^{-4}$  км<sup>-2</sup>. Во время движения грозового фронта образуются новые грозовые очаги, а предыдущие разрушаются и затухают [25, 26].

Грозовые очаги состоят из нескольких ячеек. За час в ячейке бывает в среднем до 20 разрядов «облако-земля» и примерно на порядок больше внутриоблачных. Разброс длительности существования гроз составляет от одного часа до полутора суток, при этом около 80 % всех грозовых очагов существуют менее двух часов. Количество молниевых разрядов «облако-земля» отрицательной полярности, фиксируемых грозопеленгатором, в разы превосходит число положительных разрядов.

Интенсивность молниевых разрядов в очаге меняется от полусотни разрядов в час на начальной стадии до сотен в средней стадии и снижается до нескольких десятков в заключительной. Реже максимум наблюдается в последней или в первой стадии. В интенсивных грозах пиковая интенсивность разрядов может превышать 60 разр./мин. В очагах с меньшими площадями интенсивность разрядов больше, чем в более крупных очагах. С увеличением площади очагов интенсивность разрядов падает.

Интенсивность разрядов для грозовых очагов в горной местности возрастает примерно в два раза, при этом время существования отдельного очага уменьшается, но возрастает частота генерации разрядов.

Относительно пути ячейки по данным молниевых разрядов, можно сказать, что даже простая экстраполяция на основе трех или четырех последовательных интервалов времени в пять или десять минут часто дает хорошие результаты, особенно когда ячейки не слишком долгоживущие.

**Заключение.** Грозопеленгационная сеть, установленная на Северном Кавказе, начала работу в 2008 году и непрерывно поставляет информацию о развитии грозовых ячеек. Наблюдение параметров разрядов молнии с помощью сети радиолокаторов и грозопеленгаторов представляет собой источник данных, который полезен для распознавания, отслеживания информации о текущем состоянии грозовых процессов. Но, даже когда нет никакой другой информации, грозопеленгатор позволяет до некоторой степени в реальном времени оценить характеристики грозы.

Настоящее исследование посвящено вопросу о том, какого рода грозовые очаги можно выделить автоматически и в какой степени отслеживание ячеек на основе молнии позволяет улучшить прогнозирование быстроразвивающихся конвективных опасных явлений.

Разработан модуль кластеризации молниевых разрядов и отслеживания грозовых очагов, который позволяет оценивать вклад определенных параметров молнии для конкретных грозовых ячеек. Были представлены типичные примеры грозовых процессов.

Дальнейшее совершенствование системы возможно в двух направлениях, прямые методы прослеживания, например, на нейронных сетях и математическое моделирование развития опасных явлений погоды. Это позволит добиться улучшения текущего прогноза, и подготовит систему для надежного практического применения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Аджиев А.Х., Агзагова М.Б., Бжекишев С.М., Гозуноква Е.Б., Калов Р.Х.* Пространственные и временные изменения грозовой активности над Северным Кавказом // Труды ВГИ. – СПб.: Гидрометеиздат, 2002. – Вып. 92. – С. 96-102.
2. *Аджиева А.А., Маиуков И.Х., Шаповалов В.А.* Оценка степени градоопасности конвективных облаков радиолокационными методами // Гелиогеофизические исследования. Труды Института прикладной геофизики им. академика Е.К. Фёдорова. – 2011. – Вып. 90. – С. 165-168.
3. *Бычков А.А., Шаповалов В.А.* Исследование на основе численного моделирования эффективности воздействия на конвективные облака льдообразующими реагентами с целью искусственного увеличения осадков // Учёные записки Российского государственного гидрометеорологического университета. – 2017. – № 49. – С. 65-72.
4. *Goodman S.J., Blakeslee R., Christian H., Koshak W., Bailey J., Hall J., McCaul E., Buechler D., Darden C., Burks J., Bradshaw T., and Gatlin P.* The North Alabama Lightning Mapping Array: Recent Severe Storm Observations and Future Prospects // Special Issue (ICAE), Atmos. Research. – 2005. – Vol. 76. – P. 423-437.
5. *Price C.* Lightning sensors for observing, tracking and nowcasting severe weather // Sensors. – 2008. – Vol. 8. – P. 157-170.
6. *Orville R.E., Silver A.C.* Lightning ground flash density in the contiguous United States: 1992-95 // Monthly Weather Review. – 1997. – Vol. 125. – P. 631-638.
7. *Lakshmanan V., Rabin R., DeBrunner V.* Multiscale Storm Identification and Forecast // Atmospheric research. – Vol. 67. – P. 367-380.
8. *Rigo T., Llasat M.C.* A methodology for the classification of convective structures using meteorological radar: Application to heavy rainfall events on the Mediterranean coast of the Iberian Peninsula // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. – 2004. – No. 4 (1). – P. 59-68.
9. *Betz H.-D., Schmidt K., Oettinger P., and Wirz M.* Lightning Detection with 3D-Discrimination of Intracloud and Cloudto-Ground Discharges, Geophys. Res. Lett., 31, L11108, doi:10.1029/2004GL019821, 2004.
10. *Bally J.* The Thunderstorm Interactive Forecast System: Turning Automated Thunderstorm Tracks into Severe Weather Warnings // Wea. Forecasting. – 2004. – No. 19. – P. 64-72.
11. *Hutchins M.L., Holzworth R.H., Brundell J.B.* Diurnal variation of the global electric circuit from clustered thunderstorms // Journal of Geophysical Research - Space Physics. – 2014. – Vol. 119. – P. 620-629.
12. *Аджиев А.Х., Стасенко В.Н., Шаповалов А.В., Шаповалов В.А.* Напряженность электрического поля атмосферы и грозовые явления на Северном Кавказе // Метеорология и гидрология. – 2016. – № 3. – С. 46-54.
13. *Беликова М.Ю., Кречетова С.Ю., Перельгин А.А.* Методы и результаты кластеризации данных по грозовым разрядам // Известия АлтГУ. – 2016. – № 1 (89). – С.97-100.
14. *Беликова М.Ю., Каранина С.Ю., Глебова А.В.* Экспериментальное сравнение алгоритмов кластеризации в задаче группировки данных о грозовых разрядах // Кибернетика и программирование. – 2018. – № 1. – С.15-26.
15. *Горбатенко В.П., Ершова Т.В., Константинова Д.А.* Пространственное распределение плотности разрядов молнии в землю над Западной Сибирью // Вестник ТГУ. – 2009. – № 329. – С. 215–221.
16. *Аджиева А.А., Шаповалов В.А.* Кластерный анализ в автоматическом выявлении и сопровождении грозовых очагов по данным грозопеленгационной сети // Инженерный вестник Дона. – 2016. – № 2. – С. 164-171.
17. *Перельгин А.А.* Кластеризация многомерных данных: методы, алгоритмы, программы // Вестник Алтайского государственного педагогического университета: естественные и точные науки. – 2015. – Т. 25. – С. 24-31.
18. *Кононов И. И., Юсупов И. Е.* Кластерный анализ грозовой активности // Радиотехника и электроника. – 2004. – Т. 49, № 3. – С. 283-291.
19. *Kononov I.I., Petrenko I.A., Yusupov I.E.* Space-temporal variations of electromagnetic radiation of thunderstorms in the process of their evolution // Proc. 24th Int. Conf. on Lightning Protection, 2000, Rodos, Greece. – P. 145-150.
20. *Kriegel H.-P., Kroger P., Sander J., Zimek A.* Density-based clustering // Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery. – 2011. – Vol. 1 (3). – P. 231-240.

21. Yair Y.Y., Aviv R., Ravid G. Clustering and synchronization of lightning flashes in adjacent thunderstorm cells from lightning location networks data // *J. Geophys. Res.* – 2009. – Vol. 114, D09210. – P. 1-10.
22. Vasconcellos C.A., Curotto C.L., Benetti C., Sato F., Pinheiro L.C. Electrical thunderstorm nowcasting using lightning data mining // *Data Mining VII: Data, Text and Web Mining and their Business Applications.* – 2006. – Vol. 37. – P. 161-166.
23. Кудрявцев Н.Г., Беликова М.Ю., Кречетова С.Ю., Гейман Т.Н., Кочеева Н.А., Кудин Д.В. Построение кластеров молниевых разрядов на основе данных глобальной сети грозопеленгации wwlп и определение их параметров // *Новые информационные технологии в исследовании сложных структур пос. Катушь, 09-11 июня 2014 г.* – С. 21.
24. Шабеганова С.Н., Козлов В.И. Применение кластерного анализа для выделения грозовых очагов // *Динамика сложных систем.* – 2010. – Т. 4, № 2. – С. 43-47.
25. Козлов В.И., Муллаяров В.А., Васильев А.Е. Характеристики грозовых очагов по инструментальным наблюдениям в Якутии в 1993-2001 гг. // *Метеорология и гидрология.* – 2003. – № 2. – С. 39-45.
26. Матвеев Л.Т. Физика атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 2000. – 780 с.

## REFERENCES

1. Adzhiev A.Kh., Agzagova M.B., Bzhekshiev S.M., Gogunokova E.B., Kalov R.Kh. Prostranstvennye i vremennye izmeneniya grozovoy aktivnosti nad Severnym Kavkazom [Spatial and temporal changes in thunderstorm activity over the Northern Caucasus], *Trudy VGI* [Proceedings of VGI]. Saint Petersburg: Gidrometeoizdat, 2002, Issue 92, ppS. 96-102.
2. Adzhieva A.A., Mashukov I.Kh., Shapovalov V.A. Otsenka stepeni gradoopasnosti konvektivnykh oblakov radiolokatsionnymi metodami [Estimation of hailstorm degree of convective clouds by radar methods], *Geliogeofizicheskie issledovaniya. Trudy Instituta prikladnoy geofiziki im. akademika E.K. Fedorova* [Proceedings of the Institute of applied Geophysics named after academician E. K. Fedorov], 2011, Issue 90, pp. 165-168.
3. Bychkov A.A., Shapovalov V.A. Issledovanie na osnove chislennogo modelirovaniya effektivnosti vozdeystviya na konvektivnye oblaka l'doobrazuyushchimi reagentami s tsel'yu iskusstvennogo uvelicheniya osadkov [Research on the basis of numerical simulation of the effectiveness of exposure to convective clouds by ice-forming reagents for the purpose of artificial increase in precipitation], *Uchenye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta* [Scientific notes of the Russian state hydrometeorological University], 2017, No. 49, pp. 65-72.
4. Goodnan S.J., Blakeslee R., Christian H., Koshak W., Bailey J., Hall J., McCaul E., Buechler D., Darden C., Burks J., Bradshaw T., and Gatlin P. The North Alabama Lightning Mapping Array: Recent Severe Storm Observations and Future Prospects, *Special Issue (ICAE), Atmos. Research*, 2005, Vol. 76, pp. 423-437.
5. Price C. Lightning sensors for observing, tracking and nowcasting severe weather, *Sensors*, 2008, Vol. 8, pp. 157-170.
6. Orville R.E., Silver A.C. Lightning ground flash density in the contiguous United States: 1992-95, *Monthly Weather Review*, 1997, Vol. 125, pp. 631-638.
7. Lakshmanan V., Rabin R., DeBrunner V. Multiscale Storm Identification and Forecast, *Atmospheric research*, Vol. 67, pp. 367-380.
8. Rigo T., Llasat M.C. A methodology for the classification of convective structures using meteorological radar: Application to heavy rainfall events on the Mediterranean coast of the Iberian Peninsula // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* – 2004. – No. 4 (1). – P. 59-68.
9. Betz H.-D., Schmidt K., Oettinger P., and Wirz M. Lightning Detection with 3D-Discrimination of Intracloud and Cloudto-Ground Discharges, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L11108, doi:10.1029/2004GL019821, 2004.
10. Bally J. The Thunderstorm Interactive Forecast System: Turning Automated Thunderstorm Tracks into Severe Weather Warnings, *Wea. Forecasting*, 2004, No. 19, pp. 64-72.
11. Hutchins M.L., Holzworth R.H., Brundell J.B. Diurnal variation of the global electric circuit from clustered thunderstorms, *Journal of Geophysical Research - Space Physics*, 2014, Vol. 119, pp. 620-629.
12. Adzhiev A.Kh., Stasenko V.N., Shapovalov A.V., Shapovalov V.A. Napryazhennost' elektricheskogo polya atmosfery i grozovye yavleniya na Severnom Kavkaze [The intensity of atmospheric electric field and thunderstorm phenomena in the North Caucasus], *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and hydrology], 2016, No. 3, pp. 46-54.

13. Belikova M.Yu., Krechetova S.Yu., Perelygin A.A. Metody i rezul'taty klasterizatsii dannykh po grozovym razryadam [Methods and results the clustering of the data on lightning discharges], *Izvestiya AltGU* [Bulletin of the ASU], 2016, No. 1 (89), pp. 97-100.
14. Belikova M.Yu., Karanina S.Yu., Glebova A.V. Eksperimental'noe sravnenie algoritmov klasterizatsii v zadache gruppировки dannykh o grozovykh razryadakh [Experimental comparison of clustering algorithms in the problem of grouping data on lightning discharges], *Kibernetika i programmirovaniye* [Cybernetics and programming], 2018, No. 1, pp.15-26.
15. Gorbatenko V.P., Ershova T.V., Konstantinova D.A. Prostranstvennoe raspredelenie plotnosti razryadov molnii v zemlyu nad Zapadnoy Sibir'yu [The Spatial distribution of density of lightning discharges to the ground over Western Siberia], *Vestnik TGU* [Bulletin of the TSU], 2009, No. 329, pp. 215–221.
16. Adzhieva A.A., Shapovalov V.A. Klasternyy analiz v avtomaticheskoy vyavlenii i soprovozhdenii grozovykh ochagov po dannym grozopelengatsionnoy seti [Cluster analysis in automatic detection and maintenance of thunderstorm foci according to the data of the thunderstorm-direction network], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the don], 2016, No. 2, pp. 164-171.
17. Perelygin A.A. Klasterizatsiya mnogomernykh dannykh: metody, algoritmy, programmy [Clustering high-dimensional data: methods, algorithms, and applications], *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta: estestvennye i tochnye nauki* [Bulletin of the Altai state pedagogical University: natural and exact Sciences], 2015, Vol. 25, pp. 24-31.
18. Kononov I.I., Yusupov I.E. Klasternyy analiz grozovoy aktivnosti [Cluster analysis of thunderstorm activity], *Radiotekhnika i elektronika* [Radiotekhnika and Elektronika], 2004, Vol. 49, No. 3, pp. 283-291.
19. Kononov I.I., Petrenko I.A., Yusupov I.E. Space-temporal variations of electromagnetic radiation of thunderstorms in the process of their evolution, *Proc. 24th Int. Conf. on Lightning Protection, 2000, Rodos, Greece*, pp. 145-150.
20. Kriegel H.-P., Kroger P., Sander J., Zimek A. Density-based clustering, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, 2011, Vol. 1 (3), pp. 231-240.
21. Yair Y.Y., Aviv R., Ravid G. Clustering and synchronization of lightning flashes in adjacent thunderstorm cells from lightning location networks data, *J. Geophys. Res.*, 2009, Vol. 114, D09210, pp. 1-10.
22. Vasconcellos C.A., Curotto C.L., Benetti C., Sato F., Pinheiro L.C. Electrical thunderstorm nowcasting using lightning data mining, *Data Mining VII: Data, Text and Web Mining and their Business Applications*, 2006, Vol. 37, pp. 161-166.
23. Kudryavtsev N.G., Belikova M.Yu., Krechetova S.Yu., Geyman T.N., Kocheeva N.A., Kudin D.V. Postroenie klasterov molnievykh razryadov na osnove dannykh global'noy seti grozopelengatsii wlln i opredelenie ikh parametrov [Kudin Construction of clusters of lightning discharges based on data from the global network of gruzoperevalki wlln and determination of their parameters], *Novye informatsionnye tekhnologii v issledovanii slozhnykh struktur pos. Katun', 09-11 iyunya 2014 g.* [New information technologies in complex structures study of the settlement of Katun, 09-11 June 2014], pp. 21.
24. Shabaganova S.N., Kozlov V.I. Primenenie klasternogo analiza dlya vydeleniya grozovykh ochagov [The use of cluster analysis for the allocation of thunderstorms], *Dinamika slozhnykh system* [Dynamics of complex systems], 2010, Vol. 4, No. 2, pp. 43-47.
25. Kozlov V.I., Mullayarov V.A., Vasil'ev A.E. Kharakteristiki grozovykh ochagov po instrumental'nym nablyudeniyam v Yakutii v 1993-2001 gg. [Characteristics of storm centers on instrumental observations in Yakutia in 1993-2001], *Meteorologiya i gidrologiya* [Meteorology and hydrology], 2003, No. 2, pp. 39-45.
26. Matveev L.T. Fizika atmosfery [Physics of atmosphere]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 2000, 780 pp.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н. профессор Х.М. Калов.



**Шаповалов Виталий Александрович** – ФГБУ «Высокогорный геофизический институт» (Росгидромет); e-mail: vet555\_83@mail.ru; Кабардино-Балкарская Респ., 360030, Нальчик, проспект Ленина, 2; тел.: 89280758034; к.ф.-м.н.; с.н.с.

**Аджиева Аида Анатольевна** – ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный аграрный университет им. В.М. Кокова»; e-mail: aida-adzhieva@mail.ru; Кабардино-Балкарская Респ., 360030, г Нальчик, ул. Ватутино, 4, кв. 41; тел.: 89604279686; профессор; д.ф.-м.н.; доцент ВАК.

**Shapovalov Vitalie Aleksandrovich** – FSBI High - Mountain Geophysical Institute (Roshydromet); e-mail: vet555\_83@mail.ru; 2, Lenina av., Nalchik, KBR, 360030, Russia; phone: +79280758034; cand. of phys. and math.; sc.; senior researcher.

**Adzhieva Aida Anatolievna** – FGBEU HE "Kabardino-Balkarian State Agrarian University named after V. Kokova"; e-mail: aida-adzhieva@mail.ru; 4, ap. 41, Vatutino, Nalchik, 360030, KBR, Russia; phone: +79604279686; dr. of phys. and math, sc.; associate professor.

УДК 519.7, 004.9

DOI 10.23683/2311-3103-2018-3-22-33

**А.М. Макаров, С.С. Постовалов****МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРИГОНОМЕТРИЧЕСКИ-  
ЛОГАРИФМИЧЕСКИХ БАЗИСНЫХ ФУНКЦИЙ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ  
МЕЛЛИНА И ИХ ЦИФРОВАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ**

*Рассмотрены возможности применения преобразования Меллина для различных задач. Отмечена недостаточная исследованность преобразования для построения универсальных цифровых моделей преобразования и поставлена задача проанализировать граничные параметры и построить обобщенную модель преобразования для цифровой обработки. Выделена базисная функция преобразования Меллина, удовлетворяющая равенству Парсеваля, или закону сохранения энергии. Определены основные трудности при генерации базисных функций – неравномерность распределения опорных точек функции и их смещение, проблема выбора шага дискретизации. В процессе работы эти трудности частично разрешены. Продемонстрированы закономерности базисных функций, из них определены прямые и рекурсивные формулы для нахождения опорных точек – нулей и экстремумов базисной функции Меллина, продемонстрирована сравнительная эффективность двух методов вычисления в рамках цифровой модели. Так же обозначены наиболее удобные опорные точки – начало отсчета для простого определения остальных опорных точек и нули функции как не подверженные смещению из-за согласования с равенством Парсеваля. Частично разрешена проблема выбора шага дискретизации в силу непостоянной длины периодов базисных функций через постоянную корректировку шага дискретизации либо через выбор шага, исходящего из свойств функции.*

*Преобразование Меллина; базисная функция Меллина; математика; информационные технологии.*

**A.M. Makarov, S.S. Postovalov****MATHEMATICAL MODEL OF TRIGONOMETRIC-LOGARITHMIC BASIS  
FUNCTIONS OF MELLIN TRANSFORM AND THEIR DIGITAL  
IMPLEMENTATION**

*Possibilities of application of the Mellin transform for different tasks are discussed. Marked is the lack of research of transformations for building universal transformation digital models and the task to perform boundary options and build a generalized model conversion for digital processing is set. Selected is the basis function of the Mellin transform that satisfies the equality Parseval, or the law of conservation of energy. The main difficulties in the generation of basic function are the uneven distribution of the function control points and their displacement, the problem of selection of the sampling step. These difficulties are partially resolved in the process of work. Demonstrated are the regularities of the basis functions,*