

17. Aspect oriented programming with Spring. Core technologies, *Spring Framework Reference Documentation*. Available at: <https://docs.spring.io/spring/docs/3.0.x/spring-framework-reference/html/aop.html> (accessed 5 July 2018).
18. *Haggarty R. Diskretnaya matematika dlya programmistov* [Discrete mathematics for computing]. Moscow: Tehnosfera, 2003, 320 p.
19. *Vopenka P. Al'ternativnaya teoriya mnozhestv: Novyn vzglyad na beskonechnost'* [Alternative set theory: a New look at infinity]. Novosibirsk: Izdatel'stvo Instituta matematiki, 2004, 612 p.
20. *Bakhvalov N.S., Zhidkov N.P., Kobel'kov G.M. Chislennyye metody* [Numerical methods]. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2017, 636 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. Э.В. Мельник.

Левин Илья Израилевич – Южный федеральный университет; e-mail: iilevin@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, ул. Петровская, 15, кв. 143; тел.: 88634612111; и.о. зав. кафедрой интеллектуальных и многопроцессорных систем; д.т.н.; профессор.

Дордопуло Алексей Игоревич – Общество с ограниченной ответственностью «НИЦ супер-ЭВМ и нейрокомпьютеров», г. Таганрог; e-mail: dordopulo@superevm.ru; 347902, г. Таганрог, 9-й переулок, 44; тел.: 88634477407; начальник отдела математико-алгоритмического обеспечения; к.т.н.

Писаренко Иван Вадимович – e-mail: pisarenko@superevm.ru; 347942, г. Таганрог, ул. Нижняя линия, 8; тел.: 88634477407; программист.

Мельников Андрей Кимович – Закрытое акционерное общество «ИнформИнвестГрупп», Москва; e-mail: ak@iigroup.ru; 115432, г. Москва, Проспект Андропова, 18, Бизнес-Центр Nagatino i-Land, корп. 7 “Ломоносов”; тел.: 84957871109; с.н.с.; к.т.н.

Levin Ilya Izrailevich – Southern Federal University; e-mail: iilevin@sfedu.ru; 15, Petrovskaya street, ap. 143, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634612111; head of the department of intellectual and multiprocessor systems; dr. sc.; professor.

Dordopulo Alexey Igorevich – “Supercomputers and Neurocomputers Research Center” Co. Ltd., Taganrog, Russia; e-mail: dordopulo@superevm.ru; 44, 9th lane, Taganrog, 347902, Russia; head of the division of mathematic and algorithmic support; cand. of eng. sc.

Pisarenko Ivan Vadimovich – e-mail: pisarenko@superevm.ru; 8, Nizhnjaja Linija street, Taganrog, 347942, Russia; phone: +78634477407; software engineer.

Melnikov Andrey Kimovich – “InformInvestGroup” C. C., Moscow, Russia; e-mail: ak@iigroup.ru; 18, Andropov Av., Nagatino i-Land Business Centre, building 7 “Lomonosov”, floor 3, Moscow, 115432, Russia; phone: +74957871109; senior researcher; cand. of eng. sc.

УДК 004.93:551.5

DOI 10.23683/2311-3103-2018-3-58-67

В.А. Шаповалов, Х.А. Тумгоева

РАСПОЗНАВАНИЕ И СОПРОВОЖДЕНИЕ ОБЛАЧНЫХ КОНВЕКТИВНЫХ ЯЧЕЕК С ЦЕЛЮ ТЕКУЩЕГО ПРОГНОЗА ОПАСНЫХ ПОГОДНЫХ ЯВЛЕНИЙ

К настоящему моменту средства дистанционного зондирования атмосферы достигли больших успехов, в то же время появились современные методы оперативной обработки данных, все это требует обновления и развития существующего метеорологического программного обеспечения. Текущий прогноз опасных погодных явлений необходим именно на стадии получения и обработки оперативных данных наблюдений, период его актуальности и составляет время между обновлением информации большинства дистанционных методов зондирования в метеорологии (3–30 мин). В работе решаются задачи обнаружения, выделения, распознавания и слежения для цели текущего прогноза мезомасштабной метеорологической обстановки по радиолокационным, спутниковым и грозопеленгационным данным. Предложены методы и ал-

горитмы анализа динамики облачных конвективных ячеек. Рассматриваются вопросы комплексирования данных как основы устойчивого распознавания быстроразвивающихся опасных погодных явлений. Были проведены комплексные исследования микрофизических и электрических процессов в атмосфере с использованием активно-пассивного комплекса геофизического мониторинга ФГБУ «ВГИ», состоящего из метеорологического радиолокатора и сети датчиков автоматического грозопеленгатора – дальномера LS 8000, работа которого в сопоставлении с данными сети пунктов наземных метеорологических наблюдений позволила существенно повысить качество выявления и прогноза опасных природных явлений. Установлено, что электрические процессы предшествуют появлению опасных гидрометеорологических явлений и таким образом являются предикторами стадий и тенденций их развития в атмосфере. К таким предикторам можно отнести: возникновение в облаке межоблачных и облако – земля разрядов, интенсивность разрядов в единицу времени, значения амплитуды тока молний, время нарастания тока, знак разряда молнии, местоположение разрядов в облаке, и т.д. Например, резкое увеличение интенсивности внутриоблачных разрядов в облаке (до 60 разр./мин) свидетельствует о том, что через 10–15 мин может возникнуть торнадо или сформируются шквалы, опасные для авиации. Реверс полярности молний, преимущественно с отрицательной на положительную, свидетельствует о начале периода формирования градовых частиц в облаке и начале их выпадения, а, после окончания градоопасной стадии, полярность восстанавливается. Приведены примеры работы разработанной системы объединения информации и текущего прогноза перемещения конвективных облачных ячеек. Показана высокая эффективность автоматической обработки данных в увеличении заблаговременности предупреждения об опасных явлениях конвективного происхождения.

Обнаружение и распознавание; конвективные облака; опасные погодные явления; текущий прогноз; метеорадиолокатор; грозопеленгатор.

V.A. Shapovalov, Kh.A. Tumgoeva

RECOGNITION AND SUPPORT OF CLOUD CONVECTIVE CELLS WITH THE AIM OF THE CURRENT FORECAST OF DANGEROUS WEATHER PHENOMENA

To date, the means of remote sensing of the atmosphere have achieved great success, at the same time, there are modern methods of operational data processing, all this requires updating and development of existing meteorological software. The current forecast of dangerous weather events is necessary at the stage of obtaining and processing the operational data of observations, the period of its relevance is the time between updating the information of most remote sensing methods in meteorology (3–30 min). The paper deals with the problem of detection, recognition and tracking for the current forecast of mesoscale meteorological conditions by radar, satellite and ground-penetrating data. The methods and algorithms of analysis of cloud convective cells dynamics are proposed. The problems of data integration as the basis of sustainable recognition of rapidly developing dangerous weather events are considered. Comprehensive studies of microphysical and electrical processes in the atmosphere were carried out using the active-passive geophysical monitoring complex constructed by FGBU "VGI", consisting of a meteorological radar and a network of sensors of the automatic thunder direction finder, rangefinder LS 8000, which work in comparison with the data of the network of ground meteorological observation points allowed to significantly improve the quality of detection and prediction of natural hazards. It is established that electric processes precede the appearance of dangerous hydrometeorological phenomena and thus are predictors of stages and trends of their development in the atmosphere. These predictors include: occurrence in the cloud of inter-cloud and cloud – earth discharges, the intensity of discharges per unit of time, the amplitude of the current of lightning, the rise time of the current, the sign of lightning discharge, the location of discharges in the cloud, etc. For example, a sharp increase in the intensity of intra-cloud discharges in the cloud (up to 60 times./min) indicates that a tornado or flurry of flocks dangerous to aviation may occur after 10-15 minutes. The reverse polarity of the lightning, mainly from negative to positive, indicates the beginning of the period of formation of hail particles in the cloud and the beginning of their loss, and, after the end of the hazardous stage, the polarity is restored. Examples of the developed system of information aggregation and current forecast of convective cloud cells movement are given. The high efficiency of automatic data processing in increasing the advance warning about the dangerous phenomena of convective origin is shown.

Detection and recognition; convective clouds; extreme weather events; nowcasting; weather radar; lightning sensor.

Введение. Под опасными погодными явлениями подразумеваются экстремальные климатические либо метеорологические явления. В одних регионах такие опасные явления появляются с большей частотой и разрушительной силой, чем в других. Они перерастают в стихийные бедствия тогда, когда разрушается инфраструктура, и погибают сами люди. Наиболее распространенными из них являются быстроразвивающиеся опасные гидрометеорологические явления, связанные с конвекцией: ливни, грозы, град, шквалы и вихри. Эти явления в свою очередь порождают такие вторичные опасные явления как, например: наводнения, нагоны, пожары, обвалы, оползни и сели [1–3].

Основным измерительным средством для дистанционного зондирования атмосферы являются метеорадиолокаторы. В отличие от классической радиолокации, где обнаруживаемые цели имеют размеры существенно меньше размеров элемента разрешения, в метеолокации обнаруживаемые цели в совокупности представляют собой протяженные объекты, занимающие десятки и сотни таких элементов. Метеорадиолокаторы позволяют производить различные наблюдения: определение скорости и направления движения метеообразований; обнаружение атмосферных фронтов и границ облаков и осадков; обнаружение турбулентных и конвективных образований атмосферы; определение фазового состава метеообразований и др.

Постановка задачи. В настоящее время во всем мире интенсивно развиваются и внедряются в оперативную практику системы сенсоров грозопеленгационных сетей. С их помощью собирают информацию о месте, интенсивности, типе и других параметрах молниевых разрядов. Ведутся работы по комплексированию данных метеолокации, грозопеленгации и спутникового мониторинга (рис. 1) для выявления новых зависимостей и путей совершенствования технологии [4–7].

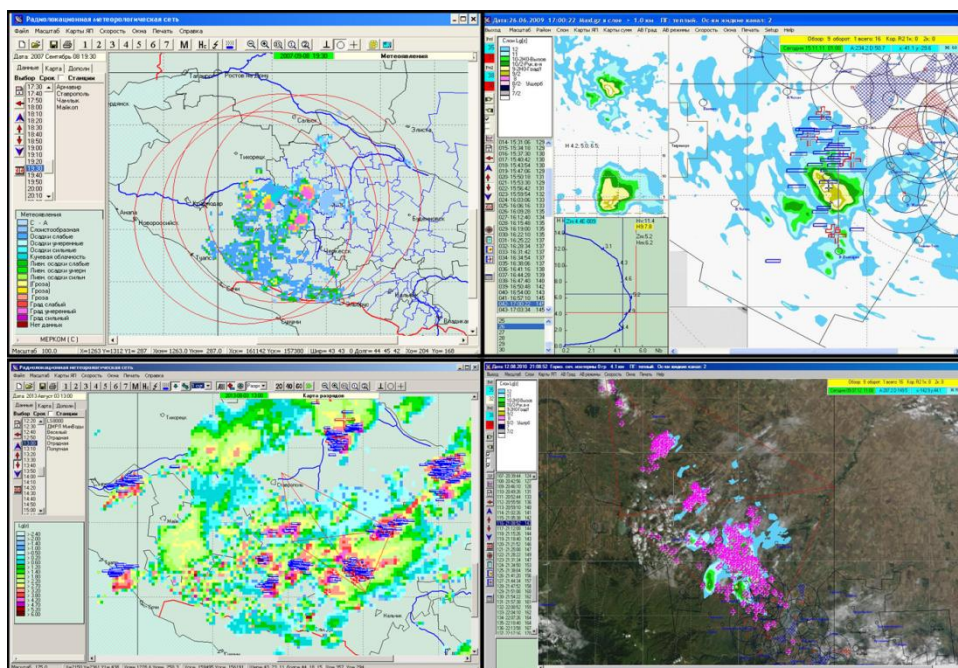


Рис. 1. Совмещение радиолокационных, грозопеленгационных и спутниковых данных

Мелкомасштабные метеобразования протяженностью несколько десятков и даже сотен километров, с которыми связаны опасные гидрометеорологические явления, пока не могут быть спрогнозированы с достаточной точностью. Прогноз таких образований составляется специалистом – синоптиком на основе интерпретации продукции численных моделей и использования дополнительной информации, отражающей развитие локальных процессов (данных радиолокационных и грозопеленгационных наблюдений, спутниковых данных и др.). Прогнозы локальной погоды связаны с некоторой неопределенностью в отношении конкретного местоположения, времени и интенсивности метеорологических явлений. Особенно это касается экстремальных явлений, которые возникают редко и внезапно, существуют непродолжительное время и которые зачастую возможно спрогнозировать только с небольшой заблаговременностью. Поэтому совершенствование мезомасштабных численных моделей [8] требует совместного развития автоматизированных средств наблюдений и методов обработки полученной информации.

Для определения параметров движения облачности с целью текущего прогноза их положения и тенденции развития необходимо выделить и проанализировать объекты облачности. Эффективными средствами в данном случае являются цифровая обработка изображений и контурный анализ [9, 10–19].

В качестве одной из удобных форм дальнейшего анализа и сопоставления объектов можно использовать аппроксимацию полученного контура метеобразования эллипсом (рис. 2).

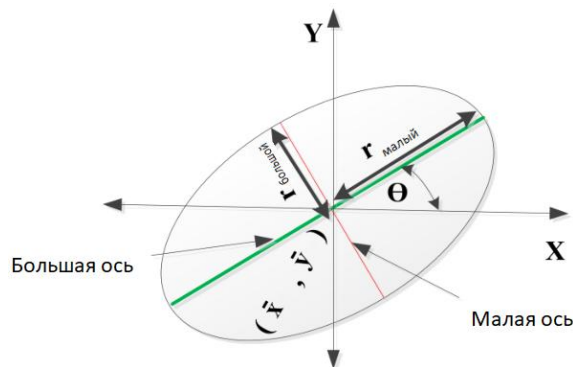


Рис. 2. Эллипс аппроксимирующий контур многоугольника

Для нахождения параметров аппроксимирующего эллипса используются пространственные и центральные моменты контура.

Моментом называют суммарную характеристика контура, рассчитанную интегрированием (суммированием) всех дискретных элементов раstra контура.

Момент $m(p, q)$ определяется как (1):

$$m(p, q) = \sum_{i=1}^k I(x, y) x^p y^q, \quad (1)$$

где p и q – порядок возведения в степень соответствующего параметра при суммировании; k – число пикселей контура [10, 16, 18].

Например, момент $m(0, 0)$ – равен площади пикселей контура.

Центральные моменты вычисляются по следующей формуле (2):

$$m_u(p, q) = \sum_{i=1}^k I(x, y) (x - x_c)^p (y - y_c)^q, \quad (2)$$

где x_c, y_c – центр масс (3) (центр тяжести плоской фигуры):

$$x_c = \frac{m(1,0)}{m(0,0)}, \quad y_c = \frac{m(0,1)}{m(0,0)}. \quad (3)$$

Найдем большую и малую ось эллипса (4–5).

$$A = \frac{m_u(2,0)}{m(0,0)} - x_c^2, \quad B = 2 \left(\frac{m_u(1,1)}{m(0,0)} - x_c y_c \right), \quad C = \frac{m_u(0,2)}{m(0,0)} - y_c^2. \quad (4)$$

$$\sigma_1, \sigma_2 = \sqrt{\frac{(A+C) \pm \sqrt{B^2 + (A-C)^2}}{2}}, \quad (5)$$

Площадь $S = ndxdy$,

Большая и малая полуоси эллипса соответственно (6):

$$r_{\text{большой}} = \sigma_1 \sqrt{\frac{S}{\pi \sigma_1 \sigma_2}}, \quad r_{\text{малый}} = \sigma_2 \sqrt{\frac{S}{\pi \sigma_1 \sigma_2}}. \quad (6)$$

Для вычисления угла наклона главной (большой) оси используем центральные моменты инерции (7)

$$\theta = \arctan \left(\frac{2 * m_u(1,1)}{m_u(0,2) - m_u(2,0)} \right) / 2. \quad (7)$$

Последовательность действий при распознавании объектов методом контурного анализа при этом будет выглядеть следующим образом:

- ◆ получение монохромного изображения;
- ◆ бинаризация изображения;
- ◆ выделение контуров объектов;
- ◆ первичная фильтрация контуров (по периметру, площади и другим признакам);
- ◆ перебор всех найденных контуров и анализ объектов.

Пример такой обработки представлен на рис. 3.

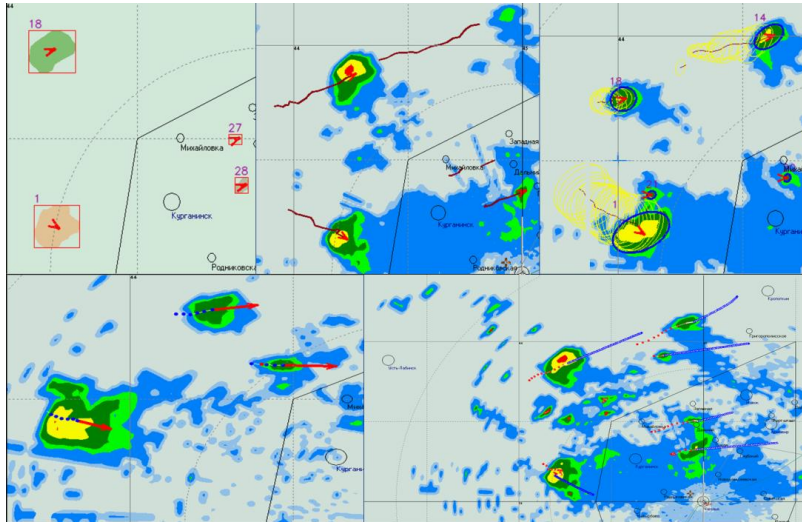


Рис. 3. Примеры выделения, сопоставления объектов при детерминированном слежении и текущего прогноза направления движения и положений конвективных ячеек, наблюдаемых через каждые 3,5 минуты

Если на изображениях $I(x, y, t-2)$, $I(x, y, t-1)$ и $I(x, y, t)$ выделены объекты, то с учетом некоторых ограничений возможно установление соответствий между объектами, найденными на предыдущем и последующем кадрах, такой метод носит название детерминированное слежение. При выполнении алгоритма возникают следующие ситуации [20]: появление нового объекта; сопоставление прослеживаемому объекту; разделение объекта; слияние объектов; пропадание объекта. Поэтому простейшая стратегия прослеживания в данном случае не срабатывает, и вводятся различные ограничения [20]: близость, максимальная скорость, общая тенденция, малое изменение вектора скорости, «жесткость», трендовая инертность и др. При этом алгоритм слежения (сопровождения) позволяет получить лишь частную траекторию.

Пусть $[x_i, y_i]$ – пары координат положения объекта (точки центра масс фигуры), если количество точек больше двух и точки имеют случайную составляющую (ошибки измерения) провести линию через все точки одновременно в общем случае невозможно. Суть метода регрессионного прогноза заключается в том, что по значениям исследуемого параметра за прошлые периоды подбирается наиболее подходящая функция и уже по ней рассчитываются прогнозные значения. При этом предполагается, что будущие значения зависят от данных прошлых периодов, имеют определенную инерцию и почти не зависят от других факторов [21, 22]. Это вполне согласуется с накопленными в результате наблюдений данными о динамике ячеек [23–25].

Уравнение авторегрессионной зависимости (7) чаще всего представляют в виде линейной функции:

$$Y_t = a_0 + a_1 \cdot Y_{t-1} + a_2 \cdot Y_{t-2} + \dots + a_i \cdot Y_{t-i} + \dots + a_n \cdot Y_{t-n}, \quad (7)$$

где Y_t – прогнозируемое значение показателя Y в момент времени t ; Y_{t-i} – значение показателя Y в момент времени $(t-i)$; n – объём выборки, т.е. число известных параметров по которым строится линейная функция; a_i – i -й коэффициент регрессии.

Коэффициенты определяются из условия минимума ошибки аппроксимации, в частности, сумма квадратов разностей значений функции и значений исследуемых параметров должна быть минимальной (8):

$$\sum_{i=1}^n (a_n t_i^n + \dots + a_2 t_i^2 + a_1 t_i + a_0 - y_i)^2 \rightarrow \min, \quad (8)$$

где y_i – значение показателя y в момент времени i ; a_m – параметры аппроксимирующей функции $m \in [0, n]$; n – объём выборки (число известных параметров по которым строится линейная функция); t_i – номер периода от 1 до n .

В качестве прогнозных значений аппроксимирующей функции $Y(t)$ выступают следующие характеристики конвективных ячеек: декартовы координаты центра масс, радиолокационная отражаемость, высота облака и др. А искомые значения коэффициентов аппроксимирующей функции получаются в результате обработки серии накопленных данных.

Заключение. Разработка программных средств для текущего прогноза опасных погодных явлений на основе данных радиолокационной метеорологической информации и систем гронопеленгации является перспективным направлением автоматизации обработки данных дистанционного зондирования в метеорологии. В рамках автоматизированного рабочего места разработаны новые и усовершенствованные существующие алгоритмы распознавания опасных явлений погоды, основанные на комплексном анализе поступающей информации с использованием ма-

тематического аппарата распознавания образов. Создан метод экстраполяции координат очагов опасных явлений погоды по данным дистанционного зондирования атмосферы. Выделяются конвективные процессы, определяются направление и скорость их перемещения.

Получены составляющие системы обеспечения текущего прогноза опасных погодных явлений на основе объединения данных радиолокационной и грозо-ленгационной сетей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Акимов Л.М., Новикова С.С., Лисиченко Е.А.* Автоматизированная система расчета опасных явлений погоды // *Материалы Международной научной конференции «Региональные эффекты глобальных изменений климата (причины, последствия, прогнозы)»*. – 2012. – С. 455-458.
2. *Мазур И.И., Иванов О.П.* Опасные природные процессы. – М.: Экономика, 2004. – 702 с.
3. Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций в Российской Федерации / под общ. ред. С.К. Шойгу. – М.: ИПЦ «Дизайн. Информация. Картография», 2005. – 270 с.
4. *Аджиева А.А., Шаповалов В.А., Маиуков И.Х., Скорбеж Н.Н., Шаповалов М.А.* Обнаружение и распознавание опасных конвективных процессов радиотехническими средствами // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки*. – 2014. – № 1 (179). – С. 59-62.
5. *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.
6. *Вербицкая Е.М., Романский С.О.* Применение высокопроизводительных средств для прогноза опасных явлений погоды конвективной природы // *Материалы III всероссийской науч.-практ. конф. «Информационные технологии и высокопроизводительные вычисления»*. – 2015. – С. 18-21.
7. *Аджиева А.А., Шаповалов В.А., Маиуков И.Х.* Методы обработки и представления радиолокационной метеорологической информации на территории Северного Кавказа // *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. Физика атмосферы. Спецвыпуск*. – 2010. – С. 12-17.
8. *Шаповалов В.А.* Численное исследование микроструктурных и электрических характеристик конвективных облаков // *Процессы в геосредах*. – 2018. – № 1 (14). – С. 804-810.
9. *Шаповалов В.А., Шаповалов М.А.* Распознавание опасных конвективных процессов с применением алгоритмов нейронных сетей (Neural Network) и компьютерного зрения (Computer Vision) // *Материалы Всероссийской открытой конференции по физике облаков и активным воздействиям на гидрометеорологические процессы, посвященной 80-летию Эльбрусской высокогорной комплексной экспедиции АН СССР*. – Нальчик, 2014. – С.148-154.
10. *Meyer V.K., Holler H., Betz H.D.* Automated thunderstorm tracking: utilization of three-dimensional lightning and radar data // *Atmos. Chem. Phys.* – 2013. – No. 13. – P. 5137-5150.
11. *Yu Liu, Du-Gang Xi, Zhao-Liang Li, Chun-Xiang Shi.* Automatic Tracking and Characterization of Cumulonimbus Clouds from FY-2C Geostationary Meteorological Satellite Images // *Advances in Meteorology*. – 2014. – Vol. 2014. – P. 18.
12. *Shah S., Notarpietro R., Branca M.* Storm Identification, Tracking and Forecasting Using High-Resolution Images of Short-Range X-Band Radar // *Atmosphere*. – 2015. – No. 6. – P. 579-606.
13. *Johnson J.T., MacKeen P.L., Witt A., et al.* The storm cell identification and tracking algorithm: an enhanced WSR-88D algorithm // *Weather Forecast*. – 1998. – No. 13. – P. 263-276.
14. *Novo S., Martínez D., Puentes O.* Tracking, analysis, and nowcasting of Cuban convective cells as seen by radar // *Met. Apps*. – 2014. – Vol. 21. – P. 585-595.
15. *Lakshmanan V., Rabin R., DeBrunner V.* Multiscale Storm Identification and Forecast // *Elsevier Atmospheric Research*. – 2003. – P. 67-68, 367-380.
16. *Dixon M., Weiner G.* TITAN: Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis, and Nowcasting—A Radar-based Methodology // *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. – 1993. – Vol. 10 (6). – P. 785-797.

17. del A. Moral, T. Rigo, M. Llasat. Identification of anomalous motion of thunderstorms using radar and satellite data: the splitting thunderstorm of the 10th July 2013 in Catalonia // 15th Plinius Conference on Mediterranean Risks. – 2016. – Vol. 15. – P. 1-20.
18. Han L., Fu S., Zhao L., Zheng Y., Wang H., Lin Y. 3D Convective Storm Identification, Tracking and Forecasting-An Enhanced TITAN Algorithm // J. Atmos. Oceanic Technol. – 2009. – Vol. 26. – P. 719-732.
19. Bally J. The Thunderstorm Interactive Forecast System: Turning Automated Thunderstorm Tracks into Severe Weather Warnings // Wea. Forecasting. – 2004. – No. 19. – P. 64-72.
20. Adzhieva A.A., Shapovalov V.A., Boldyreff A.S. Development of thunderstorm monitoring technologies and algorithms by integration of radar, sensors and satellite images // Proc. SPIE 10424, Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XXII, 104240H (20 October 2017); doi: 10.1117/12.2299289.
21. Herzegh P., Wiener G., Bateman R., Cowie J., Black J. Data fusion enables better recognition of ceiling and visibility hazards in aviation // Bulletin of the American Meteorological Society. – 2015. – Vol. 96 (4). – P. 526-532.
22. Nayak M.A., Ghosh S. Prediction of extreme rainfall event using weather pattern recognition and support vector machine classifier // Theoretical and Applied Climatology. – 2013. – Vol. 114, I. 3-4. – P. 583-603.
23. Матвеев Л.Т. Динамика облаков. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 311 с.
24. Мазин И.П., Шметтер С.М. Облака, строение и физика образования. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 280 с.
25. Иванова А.П., Шакина Н.П. Перспективы развития наукастинга для метеорологического обеспечения авиации в рамках реализации глобального аэронавигационного плана (ГАНП) // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. – 2016. – №. 360. – С. 113-134.

REFERENCES

1. Akimov L.M., Novikova S.S., Lisichenko E.A. Avtomatizirovannaya sistema rascheta opasnykh yavleniy pogody [Automated system of calculation of dangerous weather events], *Materialy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Regional'nye efekty global'nykh izmeneniy klimata (prichiny, posledstviya, prognozy)»* [Proceedings of the International scientific conference "Regional effects of global climate change (causes, consequences, forecasts)"], 2012, pp. 455-458.
2. Mazur I.I., Ivanov O.P. Opasnye prirodnye protsessy [Dangerous natural processes]. Moscow: Ekonomika, 2004, 702 p.
3. Atlas prirodnykh i tekhnogennykh opasnostey i riskov chrezvychaynykh situatsiy v Rossiyskoy Federatsii [Atlas of natural and technogenic dangers and risks of emergencies in the Russian Federation], under the General editorship of Sergei Shoigu]. Moscow: IPTs «Dizayn. Informatsiya. Kartografiya», 2005, 270 p.
4. Adzhieva A.A., Shapovalov V.A., Mashukov I.Kh., Skorbezh N.N., Shapovalov M.A. Obnaruzhenie i raspoznavanie opasnykh konvektivnykh protsessov radiotekhnicheskimi sredstvami [Detection and recognition of dangerous convective processes by radio engineering means], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Seriya: Estestvennye nauki* [Proceedings of higher educational institutions. North Caucasus region. Series: Natural Sciences], 2014, No. 1 (179), pp. 59-62.
5. 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.
6. Verbitskaya E.M., Romanskiy S.O. Primenenie vysokoproizvoditel'nykh sredstv dlya prognoza opasnykh yavleniy pogody konvektivnoy prirody [The use of high-performance tools for the forecast of dangerous weather phenomena of convective nature], *Materialy III vserossiyskoy nauch.-prakt. konf. «Informatsionnye tekhnologii i vysokoproizvoditel'nye vychisleniya»* [Materials of the III all-Russian scientific-prakt. conf. "Information technology and high-performance computing"], 2015, p. 18-21.

7. Adzhieva A.A., Shapovalov V.A., Mashukov I.Kh. Metody obrabotki i predstavleniya radiolokatsionnoy meteorologicheskoy informatsii na territorii Severnogo Kavkaza [Methods of processing and presentation of radar meteorological information to the North Caucasus], *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Estestvennye nauki. Fizika atmosfery. Spetsvyпуск* [News universities. North Caucasus region. Natural science. Atmospheric physics. Special issue], 2010, pp. 12-17.
8. Shapovalov V.A. Chislennoe issledovanie mikrostrukturnykh i elektricheskikh kharakteristik konvektivnykh oblakov [Numerical study of the microstructural and electrical characteristics of convective clouds], *Protsessy v geosredakh* [Processes in GeoMedia], 2018, No. 1 (14), pp. 804-810.
9. Shapovalov V.A., Shapovalov M.A. Raspoznavanie opasnykh konvektivnykh protsessov s primeneniem algoritmov neyronnykh setey (Neural Network) i komp'yuternogo zreniya (Computer Vision) [Recognition of dangerous convective processes using neural network (Neural Network) and computer vision (Computer Vision) algorithms], *Materialy Vserossiyskoy otkrytoy konferentsii po fizike oblakov i aktivnym vozdeystviyam na gidrometeorologicheskie protsessy, posvyashchenoy 80-letiyu El'brusskoy vysokogornoy kompleksnoy ekspeditsii AN SSSR* [Materials of the all-Russian open conference on cloud physics and active effects on hydrometeorological processes, dedicated to the 80th anniversary of the Elbrus complex high-mountain expedition of the USSR Academy of Sciences]. Nal'chik, 2014, pp. 148-154.
10. Meyer V.K., Holler H., Betz H.D. Automated thunderstorm tracking: utilization of three-dimensional lightning and radar data, *Atmos. Chem. Phys.*, 2013, No. 13, pp. 5137-5150.
11. Yu Liu, Du-Gang Xi, Zhao-Liang Li, Chun-Xiang Shi. Automatic Tracking and Characterization of Cumulonimbus Clouds from FY-2C Geostationary Meteorological Satellite Images, *Advances in Meteorology*, 2014, Vol. 2014, pp. 18.
12. Shah S., Notarpietro R., Branca M. Storm Identification, Tracking and Forecasting Using High-Resolution Images of Short-Range X-Band Radar, *Atmosphere*, 2015, No. 6, pp. 579-606.
13. Johnson J.T., MacKeen P.L., Witt A., et al. The storm cell identification and tracking algorithm: an enhanced WSR-88D algorithm, *Weather Forecast*, 1998, No. 13, pp. 263-276.
14. Novo S., Martínez D., Puentes O. Tracking, analysis, and nowcasting of Cuban convective cells as seen by radar, *Met. Apps.*, 2014, Vol. 21, pp. 585-595.
15. Lakshmanan V., Rabin R., DeBrunner V. Multiscale Storm Identification and Forecast, *Elsevier Atmospheric Research*, 2003, pp. 67-68, 367-380.
16. Dixon M., Weiner G. TITAN: Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis, and Nowcasting—A Radar-based Methodology, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1993, Vol. 10 (6), pp. 785-797.
17. del A. Moral, T. Rigo, M. Llasat. Identification of anomalous motion of thunderstorms using radar and satellite data: the splitting thunderstorm of the 10th July 2013 in Catalonia, *15th Plinius Conference on Mediterranean Risks*, 2016, Vol. 15, pp. 1-20.
18. Han L., Fu S., Zhao L., Zheng Y., Wang H., Lin Y. 3D Convective Storm Identification, Tracking and Forecasting—An Enhanced TITAN Algorithm, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 2009, Vol. 26, pp. 719-732.
19. Bally J. The Thunderstorm Interactive Forecast System: Turning Automated Thunderstorm Tracks into Severe Weather Warnings, *Wea. Forecasting*, 2004, No. 19, pp. 64-72.
20. Adzhieva A.A., Shapovalov V.A., Boldyreff A.S. Development of thunderstorm monitoring technologies and algorithms by integration of radar, sensors and satellite images, *Proc. SPIE 10424, Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XXII, 104240H (20 October 2017)*; doi: 10.1117/12.2299289.
21. Herzegh P., Wiener G., Bateman R., Cowie J., Black J. Data fusion enables better recognition of ceiling and visibility hazards in aviation, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2015, Vol. 96 (4), pp. 526-532.
22. Nayak M.A., Ghosh S. Prediction of extreme rainfall event using weather pattern recognition and support vector machine classifier, *Theoretical and Applied Climatology*, 2013, Vol. 114, I. 3-4, pp. 583-603.
23. Matveev L.T. Dinamika oblakov [Dynamics of clouds]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1981, 311 p.

24. *Mazin I.P., Shmeter S.M.* Oblaka, stroenie i fizika obrazovaniya [Shmeter Clouds, structure and physics of formation]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1983, 280 p.
25. *Ivanova A.R., Shakina N.P.* Perspektivy razvitiya naukastinga dlya meteorologicheskogo obespecheniya aviatsii v ramkakh realizatsii global'nogo aeronavigatsionnogo plana (GANP) [Prospects for the development of science casting for meteorological support of aviation in the framework of the implementation of the global air navigation plan (GANP)], *Trudy Gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo tsentra Rossiyskoy Federatsii* [Proceedings of the Hydrometeorological research center of the Russian Federation], 2016, No. 360, pp. 113-134.

Статью рекомендовал опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.Х. Аджиев.

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.

Тумгоева Хадижат Абубакарвна – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Чеченский государственный университет; e-mail: tumgoeva_75@mail.ru; 364907, г. Грозный, ул. Шерипова, 32; тел.: 89287425835; кафедра алгебры и геометрии; к.ф.-м.н.; доцент.

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.

Tumgoeva Khadizhat Abubakarova – Federal state budgetary educational institution of higher professional education The Chechen State University; e-mail: tumgoeva_75@mail.ru; 32, Sheripova street, Grozny, 364907, Russia; phone: +79287425835; the department of algebra and geometry; cand. of phys. and math. sc.; associate professor.