

**ФУНКЦИИ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ УНИВЕРСАЛЬНОГО
АЛГОРИТМА ПРОГНОЗА ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ ПОГОДЫ:
ГРОЗОВАЯ АКТИВНОСТЬ КОНВЕКТИВНЫХ СИСТЕМ**

С.М. Абдуллаев, О.Ю. Ленская

Описана объектно-ориентированная оценка качества прогноза использующая динамической реконструкции жизненного цикла наблюдаемых и моделируемых конвективных систем. Предложен алгоритм прогноза опасных явлений основанный на функциональном преобразовании динамических характеристик этих систем. Приведен пример разработки функций принадлежности к прогнозу грозовых явлений.

Ключевые слова: конвективные системы, динамические реконструкции, дистанционные методы, численное моделирование, алгоритм прогноза опасных явлений, функции принадлежности, полярность и интенсивность гроз.

В этой статье продолжается описание этапов «универсального алгоритма» прогноза начатое в [1]. Сначала будут описаны методы динамической реконструкции жизненного цикла наблюдаемого и моделируемого конвективных объектов, необходимых для объектно-ориентированной оценки качества численного моделирования и воспроизведения прогностических технологий. Эти оценки призваны решить многие из проблем верификации результатов численных прогнозов высокого разрешения (см. [2, 3, 4, 5, 6, 7] среди многих других). Несколько подробнее будет описан алгоритма прогноза, включая новые функции принадлежности прогноза электрической активности конвективных систем.

Динамическая реконструкция жизненного цикла МКС – это объектно-ориентированный процесс идентификации и оценки систем представляющий особую форму объединения эмпирических и численных методов на основе климатологических выборок динамических характеристик объекта рассматривается нами как основа диагноза и прогноза опасных явлений погоды сопровождающих конвекцию. Сопоставляя эмпирические динамические характеристики наблюдаемых МКС с распределением аналогичных характеристик из мезоклиматологической реконструкции (см. [1]), можно установить степень принадлежности индивидуальной МКС к климатологической выборке. Аналогично устанавливается принадлежность прогнозируемой системы. Затем по квантилям климатологических распределений можно определить величину отклонения прогнозируемого набора динамических характеристик от наблюдаемого набора, что собственно и есть оценка согласия прогноза и наблюдения объекта. Пример динамической реконструкции мезомасштабной конвективной системы сопровождаемой торнадо и моделируемой в среде Weather Research Model (WRF) приведен в [7].

Используя динамические реконструкции, можно объективно установить степень прогнозируемости опасных явлений любого метода, в том числе и обеспечить преемственность подходов. Так, пользуясь правилами наукастинга шквалов, смерчей, града, экстремальных сумм осадков и гроз, можно адаптировать или сконструировать новые динамические характеристики отражающие потенциал опасного явления погоды (ОЯП). В этом случае, оценка прогнозируемости ОЯП получается как естественный продукт динамической реконструкции: достаточно сопоставить потенциалы ОЯП, полученные в ходе краткосрочного численного прогноза и диагностические, полученные из анализа радиолокационных или других наблюдений. Как вариант реконструкции, могут сравниваться результаты ансамблевого прогноза, а с учетом некоторых архитипичных форм эволюции – своеобразных каркасов жизненного цикла создаваться экспертные системы вероятностного и детерминированного прогнозирования. Основа таких систем в гибкости и точности функций принадлежности прогноза.

Разработка функций принадлежности универсального алгоритма прогноза включает прогностические мезоклиматические и динамические реконструкций с формализацией прогнозных правил и созданию прогнозных функций алгоритма. Остановимся на реализации подхода в виде алгоритма сверхкраткосрочного или краткосрочного прогноза опасных явлений погоды. Пусть предмет исследования – это диагноз (прогноз) какого-либо явления связанного с текущим (будущим) состоянием объекта наблюдения (моделирования). Очевидно, что в необходимый набор динамических характеристик объекта X^i включить, те характеристики, которые являются потенциальными предикторами тех или иных явлений. Например, если по наблюдаемому или модельному полю радиолокационной отражаемости необходимо оценить максимальную скорость порыва ветра при прохожде-

нии объекта «линия штормов», то в набор X^i следует включить скорость конвективного региона линии, значение отражаемости в объекте, форму объекта, площадь и положение слоистообразного региона [7, 8, 9]. Далее необходимо установить связь между отдельными категориями опасных явлений и X^i , т.е. сформулировать эмпирические правила прогноза.

В след за этим, производится разработка функций принадлежности универсального алгоритма прогнозирования. Для этого каждое правило прогноза опасных явлений формализуется в одну или несколько функций принадлежности динамической характеристики к прогнозу опасного явления с интенсивностью f в диапазоне значений $f_{\min} \leq f < f_{\max}$, т.е. строятся однопараметрические зависимости $M_j(X_j^i)$, где X_j^i диагностическое или прогнозируемое значение динамической характеристики, а значение M_j принадлежит интервалу $[0,1]$. Очевидно, что число таких функций $j = \overline{1, J}$ меньше или равно числу динамических характеристик $i = \overline{1, I}$, т.е. $J \leq I$. Оценка вероятности опасного явления искомой интенсивности, $P(f)$ вычисляется как взвешенная сумма функций принадлежности прогнозу $M_j(X_j^i)$, $j = \overline{1, J}$.

$$P(f) = \sum_{j=1}^J \lambda_j M_j(X_j^i), \quad (1)$$

где в формуле (1) при заданном значении X_j^i вычисленное значение функции принадлежности прогнозу $M_j(X_j^i)$ умножается на индивидуальный коэффициент $|\lambda_j| \leq 1$ – известную оценку вклада динамической характеристики объекта в возможность осуществления того или иного сопутствующего явления. При условии, что алгебраическая сумма весов должна быть больше единицы $\sum_{j=1}^J \lambda_j \geq 1$, первоначальный выбор весов λ_j осуществляется экспертно – ранжированием потенциальных предикторов X_j^i по степени значимости и за тем уточняется в процессе диагноза и прогноза.

Первая реализация «универсального алгоритма» осуществлена в рамках проекта 14.В37.21.0613, где установлены основные взаимосвязи и оценен потенциал опасных явлений погоды шести архитипов мезомасштабных систем осадков с интенсивной и умеренной конвективной активностью и обложными осадками, в т.ч. построены 36 прогностических реконструкций шквало- и паводко, градо- и грозо опасных систем. Формализованы общие системные и специфические объектно-ориентированные прогнозные правила. Первые, учитывают общие закономерности эволюции МКС, в т.ч. квазипериодические колебания интенсивности конвекции, с периодами 0,25, 1 и 3 часа; доминирование линейных и дугообразных скоплений масштаба мезо- β , сопряженное с цикличностью интенсивности α -кластера; консервативность скорости роста и диссипации конвективных элементов; свойство «запрета» на появление гроз и осадков в местах транслируемой

воздушной массы, ранее занятых конвекцией. Специфические правила, учитывают эволюцию отдельных типов систем: эволюционную классификацию линий шквала; скрытую структуру комплекса локальных «неорганизованных» штормов; эволюции доминирующих штормов под влиянием стационарных зон конвергенции природного и антропогенного происхождения, влияние ландшафтных особенностей региона на траектории штормов (см. [1]) и грозовую активность отдельных систем и др. При этом вновь реализуемые правила можно агрегировать любые типы не объектно-ориентированных методов краткосрочного прогноза – здесь главное установить приблизительное соответствие между предикторами прогноза и динамическими характеристиками X^i , определяемыми при реконструкции эволюции объектов. Например, в процессе создания правил связанных с объектом «локальный шторм» были адаптированы уже известные функции нечеткой логики системы экстраполяционных прогнозов nowcasting [10, 11], новыерезультаты физико-статистических методов и прогностические индексы численных моделей [12–16]. Таким образом, была решена задача прогностических реконструкций жизненного цикла – это селекция индивидуального набора X^i , используемого для создания правил прогноза отдельных категорий опасных явлений или воздействий производимых объектом в различных его состояниях.

В результате преобразовании правил прогноза опасных явлений в индивидуальные наборы однопараметрические функции принадлежности $M_j(X_j^i)$ вошли как функции основанные на общих и локальных свойствах облачности, так и специфические объектные. К первым относятся, например время суток, скорость адвекции, максимальная по всему полю отражаемость, ко вторым «сеточные переменные», например описывающие локальную интенсивность осадков. К объектным относятся как строго формализуемые характеристики, такие как ориентация, и скорость объекта «линия», максимальная отражаемость «локального шторма», так и лингвистические характеристики объектов, например «дугообразная», «монолитная» линия (здесь $M_j(X_j^i)$ -синглетон).

Приведем пример разработки функции принадлежности к прогнозу в двух категориях опасных явлений: «общая грозовая активность» как суммы разрядов из облака на землю CG и внутриоблачных разрядов CC и «сильный разряд CG» с токами $> 40\text{kA}$. В разработке использованы результаты [17, 18, 19 и 20]. Основными для оценки общей грозовой активности являются поля горизонтальной отражаемости на высотах изотерм 0, -10 , -20 , -30 °C. Для удобства применения, общая грозовая активность приведена к числу разрядов за 5 минут нормализована на стандартный пиксель площади $4 \times 4 \text{ км}^2$. Вычисления вероятности проводится на основе поля горизонтальной отражаемости высоте по локальной максимальной радиолокационной отражаемости Z_m измеряемой в dBZ. В таблице приведены наиболее употребляемые значения принадлежности $M(X)$.

Таблица

Функции принадлежности 1 молниевый разряд за 5 минут на площади $4 \times 4 \text{ км}^2$

$X_1, \text{ dBZ}$	$M(X_1)$	$X_2, \text{ dBZ}$	$M(X_2)$	$X_3, \text{ dBZ}$	$M(X_3)$	$X_4, \text{ dBZ}$	$M(X_4)$
35	0,01	30	0,03	25	0,03	20	0,05
42	0,1	33	0,1	27	0,1	22	0,1
45	0,25	36	0,25	30	0,25	25	0,25
48	0,5	40	0,5	34	0,5	30	0,5
50	0,75	44	0,75	38	0,75	34	0,75
52	0,9	48	0,9	42	0,9	38	0,9
54	0,95	50	0,95	46	0,95	41	0,95
55	0,98	52	0,98	48	0,98	45	0,98
56	0,99	53	0,99	50	0,99	48	0,99
60	1	55	1	53	1	50	1
$0 \text{ }^\circ\text{C}$	$0 \text{ }^\circ\text{C}$	$-10 \text{ }^\circ\text{C}$	$-10 \text{ }^\circ\text{C}$	$-20 \text{ }^\circ\text{C}$	$-20 \text{ }^\circ\text{C}$	$-30 \text{ }^\circ\text{C}$	$-30 \text{ }^\circ\text{C}$

Функции можно использовать для оконтуривания интенсивности гроз по диагностическим полям или моделируемым полям отражаемости с весом $\lambda=0.9$ для обычных условий суши с высотами менее 1000 м, для высот более 1 км, и подветренных зон городов, вес $\lambda=1 \div 1,25$, а для поверхности океанов, морей, крупных озер и водохранилищ вес принимать не более 0,7. Очевидно, что четыре функции принадлежности с весами описывают диапазон общей грозовой активности от 0 до 5 разрядов с площади $4 \times 4 \text{ км}^2$. Вероятность грозы вычисляется следующим образом – с известным весом просто суммируются все значения принадлежности $M(X)$ по 4 вертикальным площадкам, согласно значению Z_m на площади пикселя. К примеру пусть на высотах 0, -10 , -20 , $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ наблюдаются отражаемости 50, 48, 36, и 30 dBZ над поверхностью с весом $\lambda = 0,9$. Используя значения $M(x_i)$ из таблицы и при необходимости интерполируя их, получим значение $P(f)$. $P(f) = \lambda_i M(x_i) = 0,9 \times (0,75 + 0,9 + (0,5 + (36 - 34) \times 0,25 / (38 - 34)) + 0,5) = 2,775 \times 0,9 = 2,5$. Значение $P(f) = 2,5 > 1$ означает, с одной стороны, что с вероятностью в 100 % в ближайшие 5 минут произойдет один разряд, при этом в этом же объеме (т.е. над площадкой) следует ожидать не менее двух разрядов.

Важная прикладная задача – построение функции принадлежности сильных грозовых разрядов облако-земля обоснована и реализована нами впервые. Здесь важен следующий аспект проблемы, что сила тока в положительных разрядах CG+ в равнинных условиях в среднем почти на 10 кА выше, чем отрицательных разрядов CG- [19]. Однако положительные разряды, составляют 15–20 % от общего числа CG. Это нами объясняется тем, что в производстве отрицательных разрядов главную роль играют отдельные мультячейковые штормы или линии штормов в начальной стадии развития кучево-дождевой конвекции (рис. 1 а), а в производстве сильных положительных (и реже отрицательных) разрядов главную роль играют мезомасштабные системы, сопровождаемые обширным регионом слоистообразных осадков (рис. 1 б).

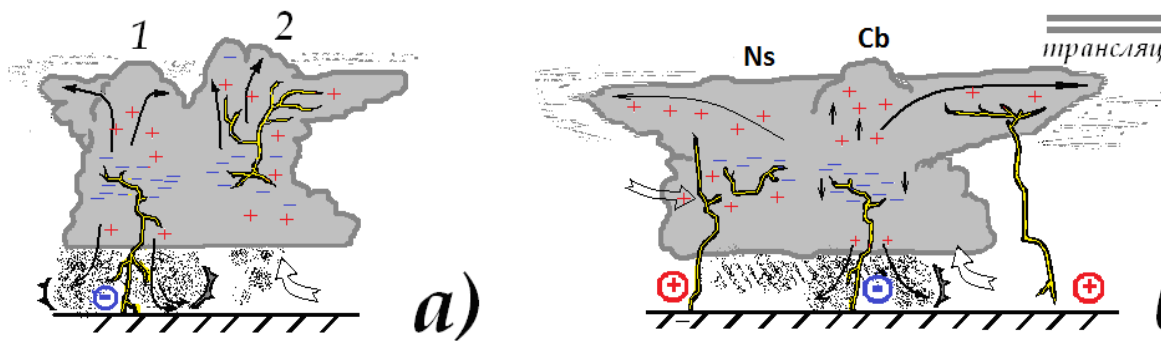


Рис. 1. Распределение зарядов и грозовые разряды а) в объекте «мультиячейковый шторм» при трансляции ниже средней $\sim 10 \text{ мс}^{-1}$ и б) поперек объекта «сверхбыстрая линии шквала» при трансляции со скоростью больше средней. Пояснение к рисунку. В шторме а) показаны внутриоблачные разряды (CC) растущей ячейки 2 и ступенчатый лидер, несущий отрицательный разряд CG- в зрелой ячейке 1. Большая часть ближних к земле положительных зарядов удаляется вместе с частицами осадков и меньшая часть выносятся с ледяными частицами вверх. В линейной МКС б), возвратные удары CG- в зрелой ячейке конвективного региона (Cb) даже более часты, чем в шторме, причем им сопутствуют редкие и более сильные положительные разряды CG+ из наковальни и региона обложных слоистообразных осадков (Ns). Стрелками показаны движения воздуха относительно трансляции шторма

На основе этих и других реконструкций нами предложен следующий набор функций принадлежности «сильных разрядов CG» (рис. 2). Во-первых, учтено, что функции принадлежности прогноза сильных разрядов CG не могут быть основаны только на значении отражаемости в одном пикселе и должны учитывать наличие соседних пикселей в данном случае – четырех пикселей. Первая функция (рис. 2 а) учитывает максимальную отражаемость в одном из этих пикселей. Кроме того климатологические исследования [19] показывают, что число сильных ударов должно возрастает в весенние сезоны, т.е. в условиях, характеризующихся большими скоростями ветра (сдвига) в тропосфере и относительно низкой тропопаузой, и в целом для высоких скоростей трансляции систем (рис. 2 б). Функция на рис. 2 в обусловлена, главным образом тем, что интенсивность разрядов пропорциональна объёму смешанной части облака $>30 \text{ dBZ}$ при низких температурах, в пределах первых 5 км выше нулевой изотермы [18]. Функция на графике 2 г отражает факт относительного увеличения числа положительных разрядов в зрелой стадии систем, т.е. с длительностью процесса конвекции [17, 18].

В заключении, резюмируем три этапа «универсального алгоритма».

1. На репрезентативной выборке данных дистанционных или обычных наблюдений производится анализ поведения объектов, сопровождаемый морфолого-эволюционной классификацией объектов. В опорных фазах эволюции подобных объектов определяются динамические характеристики, описывающие различные свойства о., как правило, отражающие предмет диагноза и прогноза. Результат этапа – климатологические распределения динамических характеристик о. на различных стадиях его жизни – базис для оценки качества численного моделирования объектов.

2. На выборке тестируемых наблюдаемых и моделируемых объектов, устанавливается принадлежность этих объектов к диапазонам климатически типичных или редких событий, определяется вероятностная климатическая дистанция между их динамическими характеристиками. Итог этапа – комплексная оценка качества реконструкции жизненного цикла о. моделью, включая оценку прогностического потенциала численной модели – исследование воспроизведения динамических характеристик в интервалах принадлежности прогноза.

3. Универсальный алгоритм прогноза, оперирует с линейной комбинацией функций принадлежности прогноза – однопараметрических аналитических функций заданных на интервале принадлежности динамической характеристики о. с весовым множителем, учитывающим вклад каждой функции в прогноз данной категории данного явления или условий среды. Универсальность алгоритма позволяет трансформировать функции принадлежности нечеткой логики системы autowcasting, результаты физико-статистических методов, прогнозы численных моделей. Набор вычисленных значений функций трансформируется одновременно в вероятность возникновения сопутствующего явления данной категории и детерминированную оценку его интенсивности.

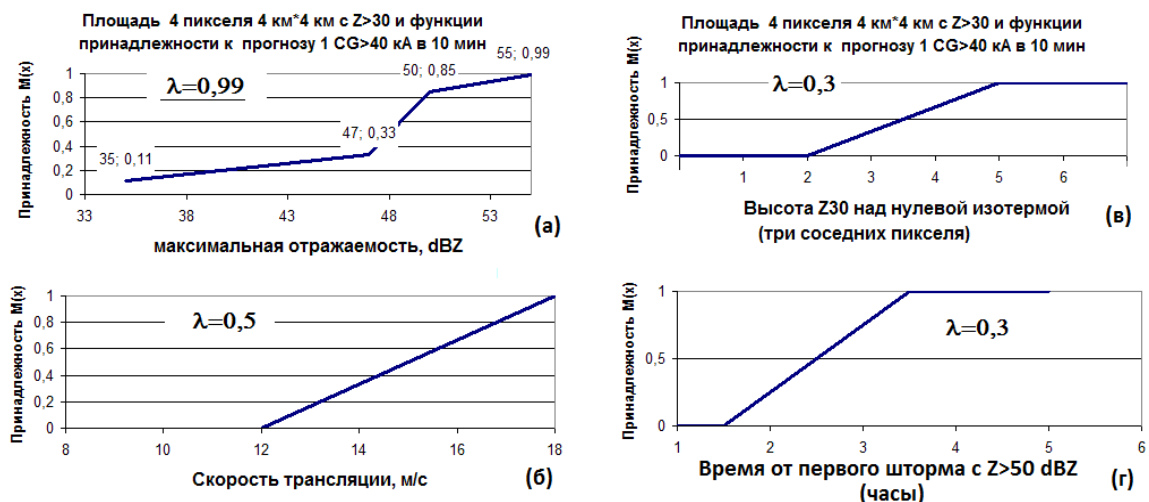


Рис. 2 Функции принадлежности сильных грозовых разрядов облако-земля.
Примечание: веса λ на графиках требуют уточнения.

Отметим, что в настоящее время выделение динамических характеристик из метеорологических полей реализуются большей частью интерактивно. Ожидается, что совершенствование алгоритма дисплея жизненного цикла [21] и внедрение новых техник анализа численных прогнозов конвективных систем ускорят обработку больших объемов наблюдаемых и прогнозных полей.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках соглашения № 14.В37.21.0613.

Библиографический список

1. Абдуллаев, С.М. Универсальный алгоритм прогноза опасных явлений погоды: реконструкция жизненного цикла конвективных систем / С.М. Абдуллаев // Сб. Трудов 66-й научной конференции ППС ЮУрГУ. – 2014.
2. Davis, C. Object-Based Verification of Precipitation Forecasts. Part II: Application to Convective Rain Systems / C.Davis, B. Brown, R. Bullock // Mon. Wea. Rev. – 2006. – V.134. – С. 1785–1795.
3. Rossa, A. Overview of methods for the verification of quantitative precipitation forecasts / A. Rossa, P. Nuirmi, E. Ebert.// in Precipitation: Advances in measurement, Estimation and Prediction. – 2008. Springer. – Chapter 16. – С. 419–452.
4. Gilleland, E. Intercomparison of spatial forecast verification methods / E. Gilleland, D. Ahijevych, B.G. Brown, B. Casati, E.E. Ebert // Wea. Forecasting. – 2009. – V. 24. – С. 1416–1430.
5. Berenguer, M. The diurnal cycle of precipitation from continental radar mosaics and numerical weather prediction models. Part II: Intercomparison among numerical models and with nowcasting / M. Berenguer, M. Surcel, I. Zawadzki, M. Xue, F. Kong//Mon. Wea. Rev. – 2012. – V.140. – С. 2689–2705.
6. Adams-Selin, R.D. Sensitivity of Bow-Echo Simulation to Microphysical Parameterizations / R.D. Adams-Selin, S.C. van den Heever, R.H. Johnson // Wea. Forecasting. – 2013. – V. 28. – С. 1188–1209.
7. Lenskaia, O.Yu., Organization and evolution of mesoscale convective systems using radar data: objective description. The “dominating thunderstorm” conception and its application to MCS climatology. / O.Yu Lenskaia, S.M. Abdullaev, A.A. Zhelnin // Preprints, 15th Conf. on Mesoscale Proc. – 2013. Portland, Oregon. – URL: <https://ams.confex.com/ams/15MESO/web-program/Paper227607.html>.
8. Ленская, О.Ю. Использование доплеровского радара и данных наземных наблюдений для изучения и прогноза шквалов / О.Ю. Ленская, С.М. Абдуллаев // Вестник Челябинского университета. – 2005. – Вып. 1. – № 1(1). – С. 131–143/
9. Ленская, О.Ю. Методические вопросы использования спутниковой и радиолокационной информации в мезомасштабном прогнозе (на примере опасных явлений погоды в Москве 24 июля 2001 г.) / О.Ю. Ленская // Вестник Челябинского Университета. – 2007. – Вып. 2. – № 6(84). – С. 131–143.
10. Mueller, C., T. NCAR Autonowcast system / C.Mueller, T. Saxen, R. Roberts, J. Wilson, T. Betancourt, S. Dettling, N. Quin, J. Yee // Wea. Forecasting. – 2003. – V.18(4). – С. 545–561.

11. Lin, P.-F. Objective prediction of warm season afternoon thunderstorms in Northern Taiwan using a fuzzy logic approach / Lin, P.-F., P.-L. Chang, B. J.-D. Jou, J. W. Wilson, R. D. Roberts // *Wea. Forecasting.* – 2012. – V.27. – С. 1178–1197.
12. Duda, J.D. Spring and summer Midwestern severe weather reports in supercells compared to other morphologies / J.D. Duda, W.A. Gallus JR // *Wea. Forecasting.* – 2010. – V.25(1). – С. 190–206.
13. Smith, B.T. Convective modes for significant severe thunderstorms in the contiguous United States. Part I: Storm classification and climatology / B.T. Smith, R.L. Thompson, J.S. Grams, C. Broyles, H.E. Brooks // *Wea. Forecasting.* – 2012. – V. 27 (5) – С. 1114–1135.
14. Thompson, R.L. Convective modes for significant severe thunderstorms in the contiguous United States. Part II: Supercell and QLCS tornado environments / R.L. Thompson, B.T. Smith, J.S. Grams, A.R. Dean, C. Broyles // *Wea. Forecasting.* – 2012. – V. 27 (5). – С. 1136–1154.
15. Zheng, L. Organizational modes of mesoscale convective systems over Central East China / Zheng, L, J. Sun, X. Zhang, C. Liu // *Wea. Forecasting.* – 2013. – V. 28. – С. 1081–1098.
16. Grams, J.S. A climatology and comparison of parameters for significant tornado events in the United States / J.S. Grams, R.L. Thompson, D.V. Snively, J.A. Prentice, G.M. Hodges, L.J. Reames // *Wea. Forecasting.* – 2012. – V. 27. – С. 106–123.
17. Abdoulaev, S. An exploratory study of lightning activity on Southeast and South of Brazil / S. Abdoulaev, V.S. Marques, F.M. A. Pinheiro, E.F. A. Martinez, O. Lenskaia // *Prepr. 20th Conf. on Severe Local Storms. Amer. Met. Soc.*, 11–15, September, 2000, P.5.2, Orlando, Florida. – 2000. – С. 110–111.
18. Abdoulaev, S. Analysis of mesoscale system using cloud-to-ground flash data / S. Abdoulaev, V.S. Marques, F.M. A. Pinheiro, E.F. A. Martinez, O. Lenskaia // *Brazilian Journal of Geophysics.* – 2001. – V 19. – n1. – С. 75–95.
19. Abdoulaev, S. Oscilações intrazonais e centros de ação das tempestades com descargas nuvem-terra na America do Sul / S. Abdoulaev // *Anais XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, Foz de Iguaçu, Parana, 4–9 Agosto de 2002.* – 2002. – С. 1027–1052.
20. Cecil, D.J. Three years of TRMM precipitation features. Part I: Radar, radiometric, and lightning characteristics / D.J.Cecil, S.J. Goodman, D.J. Vocioppio, E.J. Zipser, S.W. Nesbitt // *Mon. Wea. Rev.* – 2005. – V. 133. – С. 543–566.
21. Абдуллаев, С.М. Алгоритмы краткосрочного прогноза с использованием радиолокационных данных: оценка трансляции и композиционный дисплей жизненного цикла / С.М. Абдуллаев, О.Ю. Ленская, А.О. Гаязова, О.Н. Иванова, А.А. Носков, Д.Н. Соколов, Г.И. Радченко // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Вычислительная математика и информатика».* – 2014. – Том 3. – № 1. – С. 17–32.

[К содержанию](#)