

Использование глобальной модели атмосферы (GFS NCEP) для прогноза грозоградовых процессов с заблаговременностью до пяти суток

А.Х. Кагермазов, Л.Т. Созаева

ФГБУ «Высокогорный геофизический институт, Нальчик, ka5408@mail.ru

Методами корреляционного анализа проведена оценка степени совпадения значений прогностической стратификации атмосферы с заблаговременностью 24, 48, 60, 84 и 132 ч, полученных из глобальной модели атмосферы GFS NCEP, с фактическими данными аэрологического зондирования на метеостанции «Минеральные воды» Центральной части Северного Кавказа. Выявлено, что последовательное увеличение заблаговременности прогноза метеополей до 132 ч не привело к заметному снижению коэффициентов корреляции между фактическими и прогностическими значениями параметров стратификации атмосферы. Предложен метод оценки градоопасности атмосферной ситуации на основе многомерного дискриминантного анализа по исследованным данным глобальной модели. Проведена оценка успешности метода и показано сохранение его прогностического потенциала для заблаговременности до пяти суток.

Ключевые слова: глобальная модель атмосферы, аэрологическое зондирование, заблаговременность, метеорологические параметры, дискриминантный анализ, прогноз опасных явлений.

Use of output data of the global model of the atmosphere (NCEP GFS) for forecasting thunderstorm processes with lead time of up to five days

A.Kh. Kagermazov, L.T. Sozaeva

FSBI «High-Mountain geophysical institute», Nalchik, Russia

Nowadays, it has become possible to use the fields of atmospheric meteorological parameters according to the GFS NCEP global model data for predicting dangerous weather phenomena, carrying out anti-hail operations, as well as mathematical modeling of thunderstorm clouds. The legitimacy of their application, instead of the data of actual upper-air sounding, was assessed by the methods of correlation analysis for the «Mineralnye Vody» meteorological station in the Central part of the North Caucasus. The analysis showed that a consistent increase in the lead time of forecasting meteorological fields from 24 to 132 hours did not lead to a noticeable decrease in the correlation coefficients between the actual and predicted values of the atmospheric stratification parameters. As a result, a statistical method was proposed for assessing the hazardousness of the atmospheric situation based on the output of the global model of the atmosphere (discriminant analysis). The method is based on a preliminary calculation of atmospheric parameters known from the existing methods for predicting convection and associated hazardous weather phenomena, and the subsequent selection of the most informative of them using a biserial correlation coefficient. As a result of the analysis, the decision rules and the conjugacy table of the signs «hail» and «without hail» were obtained. The success of the hail forecast, with increasing lead time, is shown to correspond to the accepted criteria for the quality of forecasts. The predictive potential of the proposed method is retained for a lead time of up to five days. The results obtained can be useful in modeling thunderstorm clouds and forecasting hazardous weather phenomena (thunderstorms, hail, etc.).

Keywords: global model of the atmosphere, aerological sounding, lead time, meteorological parameters, discriminant analysis, forecast of hazardous phenomena.

For citation: *A.Kh. Kagermazov, L.T. Sozaeva. Use of output data of the global model of the atmosphere (NCEP GFS) for forecasting thunderstorm processes with lead time of up to five days. *Gidrometeorologiya i Ekologiya. Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2021, 65: 671—680. [In Russian]. doi: 10.33933/2713-3001-2021-65-671-680*

Введение

Опасные явления погоды, связанные с атмосферной конвекцией, вносят существенный вклад в ущерб, причиняемый экономике стран, и имеют выраженную тенденцию к росту, усугубляемую недостаточной их предсказуемостью. Так, в статье «Сильный град обходится дорого, и его трудно предсказать» [1], проведен анализ другой статьи «Влияние климатических изменений на градовые процессы», включающей в себя 176 публикаций [2]. Сделан вывод: «из года в год град является одним из самых дорогостоящих стихийных бедствий для большей части мира. В Соединенных Штатах каждый год в результате ливня с градом убытки составляют около 10 млрд долл. Это также одно из самых сложных событий для прогнозирования даже для стандартного трехдневного прогноза погоды, не говоря уже о масштабах изменения климата на десятилетия. Каждый год град причиняет огромные финансовые убытки во всем мире. Но мы все еще не можем предсказать с удовлетворительной точностью, когда ударит град. Ученые-климатологи всего мира объединяются, чтобы добиться прогресса в этих прогнозах».

Общепризнано, что основными причинами недостаточной предупрежденности опасных явлений конвективного характера является дефицит исходной информации, а также недостаточность традиционных подходов для прогнозирования локальных быстроразвивающихся процессов.

Из существующих подходов к прогнозированию опасных конвективных явлений погоды в нашей стране следует отметить работы, выполненные А.А. Алексеевой и Н.И. Глушковой в Гидрометцентре РФ [3, 4]. Попытки объективизации прогноза града в последние годы предпринимались также в Высокогорном геофизическом институте [5—8]. Неудобство этих подходов заключается в необходимости использования исходных данных, получаемых в ходе сложных расчетов. Поэтому их не всегда можно оперативно применять в метеорологических подразделениях низового звена и службах по активному воздействию на гидрометеорологические процессы.

Дефицит исходной информации связан с тем, что при прогнозировании опасных явлений погоды, проведении противорадовых работ и математическом моделировании грозо-градовых облаков в основном используются фактические данные аэрологического зондирования. Но сеть аэрологического радиозондирования атмосферы в нашей стране довольно редкая, а на имеющихся метеостанциях частота и время проведения измерений не соответствует моменту максимального развития конвекции. Такое положение неблагоприятно сказывается на исследованиях, связанных с конвекцией в атмосфере. Вместе с тем в настоящее время имеются глобальные модели атмосферы, выходная продукция которых, может использоваться взамен данных фактического аэрологического зондирования [9—12].

Возможность и правомерность замены фактических аэрологических данных на поля метеоэлементов из глобальной модели, заблаговременность которых достигает 10 суток, мало исследована. Показатели оправдываемости и заблаговременность являются основными характеристиками метеорологических прогнозов и штормовых предупреждений. В данной работе использована выходная продукция действующей модели глобальной системы прогнозирования NOAA (GFS NCEP), представляющая аналог аэрологического зонда и обладающая достаточно высокой достоверностью [13].

Целью данной работы является поиск решения актуальной задачи увеличения заблаговременности прогноза градоопасности атмосферной ситуации. Для ее решения методами корреляционного анализа рассчитаны корреляционные зависимости между наборами фактических и прогностических значений температуры воздуха, температуры точки росы, скорости и направления ветра на различных изобарических уровнях с увеличивающейся заблаговременностью от суток до пяти суток.

Материалы и методы исследования

Глобальная система прогнозирования NOAA (GFS NCEP) в начале 90-х годов получила широкое распространение и известность [9—11]. С ростом вычислительных ресурсов и изменения компьютерной архитектуры разрешающая способность ее увеличивалась. В июне 2019 г. глобальная система прогнозирования в рамках проекта NGGPS (Next Generation Global Prediction System) значительно обновилась [13]. Был осуществлен переход на новый неспектральный блок решения уравнений динамики, а также введен ряд усовершенствований в описании физических процессов подсеточного масштаба. Динамическое ядро разбивает атмосферу на небольшие кубические ячейки, расположенные на сетке, и вычисляет изменения параметров внутри каждой ячейки. Это позволяет телескопировать масштаб расчетной сетки для моделирования мезомасштабных штормовых систем для улучшения их прогноза. Вывод результатов моделирования имеет дискретность три часа для заблаговременности 0—180 ч и 12 ч для заблаговременности 180—384 ч.

Часть выходной продукции глобальной модели, необходимая для использования в методах прогноза конвективных явлений (аналог аэрологического зонда), включает в себя прогностические поля следующих метеоэлементов:

- PRESS — давление на изобарической поверхности, гПа;
- HGT — высоты, соответствующие изобарическим поверхностям, м;
- TEMP — температура окружающего воздуха, °С;
- DEW PT — температура точки росы, °С;
- WND DIR — направление ветра, град;
- WND SPD — скорость ветра, м/с.

Эти метеоэлементы рассчитываются на различных уровнях от 1000 до 20 гПа и предоставляются потребителю в цифровом виде.

Используемый в работе алгоритм расчета параметров атмосферы и облаков, обуславливающих возникновение, развитие и интенсивность градовых процессов,

является обобщением схем расчета параметров, используемых в существующих методах прогноза конвекции и связанных с нею опасных явлений погоды, и является также, по сути, электронной аэрологической диаграммой [5].

Для прогноза града в данном алгоритме в качестве входных данных используется выходная продукция глобальной модели атмосферы с заблаговременностью от суток до пяти суток: температура воздуха и точки росы, направление и скорость ветра на стандартных уровнях (Земля, 900, 850, 800, 700, 600, 500, 400, 300 и 200 гПа). Предварительно рассчитываются около 45 параметров атмосферы, известных из существующих методов прогноза конвекции и связанных с ней опасных явлений погоды. Такое количество признаков предъявляет слишком жесткие (часто невыполнимые) требования к объему эмпирических данных и делает чрезвычайно трудоемкой (иногда даже нереализуемой) вычислительную процедуру прогноза. Поэтому возникла необходимость процедуры отбора наиболее информативных из них признаков.

Отбор производился с помощью бисериального коэффициента корреляции, который позволил сократить число параметров атмосферы до 10—11, допустимых при заданном числе случаев наблюдений. Затем с помощью статистического пакета SPSS [14] по отобранным параметрам составлялись дискриминантные функции по схеме:

— вычислялись средние значения переменных в каждой группе и объединенная матрица рассеивания для обеих групп;

— вычислялась обратная объединенная матрица рассеивания и ее определитель;

— для объединенной группы вычислялись: общие средние, обобщенная статистика Махаланобиса;

— для каждого события в каждой из двух групп рассчитывались дискриминантные функции. По вероятности, связанной с наибольшим значением дискриминантной функции осуществлялось разделение события на «град» и «не град».

Полученная дискриминантная функция имеет вид:

$$L^* = -0,05V_{700} + 0,3205\Delta t_m + 0,0071\Delta t_1 + 0,00359 \sum_{\text{Земля}}^{500} q - 0,03606 \sum_{\text{Земля}}^{500} \tau + 0,0389D_j - 12,57, \quad (1)$$

где V_{700} — упорядоченные вертикальные движения воздуха на 700 гПа; Δt_m — максимальная, разность температур облака и окружающего воздуха; Δt_1 — вертикальный градиент температуры в слое выше уровня конденсации на 2 км; $\sum_{\text{Земля}}^{500} q$ — массовая доля водяного пара в слое Земля — 5 км; D_j — индекс неустойчивости Джорджа; $0,03606 \sum_{\text{Земля}}^{500} \tau$ — суммарный дефицит точки росы в слое Земля — 500 гПа.

По функции (1) при $L^* \geq 0$ прогнозируется «град», при $L^* < 0$ — «не град».

Заметим, что параметры, вошедшие в дискриминантную функции, в основном отражают запас неустойчивости, влагосодержания и температурный режим в зоне роста града. Важной особенностью дискриминантной функции (1) является то, что она позволяет количественно учитывать крупномасштабные атмосферные движения (упорядочение вертикальные токи), на фоне которых развивается конвективные явления.

Для оценки успешности и качества предлагаемого метода прогноза града составлялась таблица сопряженности (табл. 1), по которой определялись основные параметры (общая оправдываемость прогноза, $P_{\text{опп}}$; предупреденность наличия явления, $P_{\text{пня}}$; оправдываемость прогноза наличия явления, $P_{\text{опня}}$; оправдываемость отсутствия явления, $P_{\text{ооя}}$; предупреденность отсутствия явления, $P_{\text{поя}}$) и дополнительные показатели (критерий Пирси—Обухова, T ; критерий Багрова, H ; ошибка риска метода, a ; ошибка страховки метода, P ; критерий Обухова, Q).

Таблица 1

Таблица сопряженности при нарастающей заблаговременности
Conjugacy table with increasing lead time

Прогноз явления	Наблюдение явления		Сумма
	<i>Заблаговременность 24 ч</i>		
	«град»	«не град»	
«град»	26	7	33
«не град»	6	16	22
сумма	32	23	55
	<i>Заблаговременность 72 ч</i>		
	«град»	«не град»	
«град»	14	7	21
«не град»	5	13	18
сумма	19	20	39
	<i>Заблаговременность 132 ч</i>		
	«град»	«не град»	
«град»	10	5	15
«не град»	6	18	24
сумма	16	23	39

Результаты исследований и их обсуждение

Поскольку продукция модели (стратификация полей температуры, влажности, направления и скорости ветра) обладает достаточно высокой достоверностью, то была исследована возможность ее использования взамен данных фактического аэрологического зондирования. Для этого сформированы два набора данных значений температуры воздуха и точки росы на различных изобарических поверхностях от уровня Земли ($z_{\text{ем}}$) до уровня 300 мбар:

— прогностические значения, полученные из модели GFS за 24, 48, 72 и 132 ч до проведения зондирования;

— фактические значения по результатам аэрологического зондирования.

Данные были сформированы для метеостанции «Минеральные воды», расположенной в Центральной части Северного Кавказа. Объемы выборок для прогностических данных с заблаговременностью 24 и 48 ч составляли 70 наборов модельных данных за теплый период 2018 г. В случаях с заблаговременностью 72 и 132 ч выборки состояли из наборов 50 данных за теплый период 2019 г. на соответствующих стандартных изобарических поверхностях от уровня Земли (*zem*) до уровня 300 мбар.

Далее определялись коэффициенты корреляции между фактическими и прогностическими значениями данных полей метеорологических параметров на выделенных изобарических уровнях с увеличивающейся заблаговременностью (24, 48, 72 и 132 ч). В таблицах 2 и 3 представлены коэффициенты корреляции между фактическими данными температуры воздуха и точки росы с их значениями из глобальной модели с нарастающей заблаговременностью до 132 ч.

Коэффициенты корреляции между фактическими и прогностическими значениями температуры воздуха для случаев с заблаговременностью 24—48 ч принимают значения в пределах $0,91 \div 0,98$. По шкале Чеддока это соответствует очень высокой степени связи между ними (табл. 2). Для данных с заблаговременностью 72 ч степень связи высокая, за исключением некоторых высот, на которых корреляционная связь снижается до заметной $0,74 \div 0,92$. При увеличении заблаговременности до 132 ч коэффициенты корреляции для температуры воздуха также очень высокие $0,88 \div 0,97$, хотя несколько ниже, чем при заблаговременности 24 и 48 ч, но больше, чем для заблаговременности 72 ч. Такие высокие коэффициенты

Таблица 2

Коэффициенты корреляции
между фактическими и прогностическими значениями температуры воздуха
Correlation coefficients between actual and forecasting values of air temperature

Изобарические уровни, мб	Коэффициенты корреляции**				
	заблаговременность, ч				
	24	48	60	84	132
1000 (<i>zem</i>)	0,93	0,91	0,91	0,58	0,90
900	0,95	0,94	0,95	0,77	0,90
850	0,96	0,97	0,96	0,83	0,92
800	0,95	0,95	0,96	0,71	0,89
700	0,97	0,98	0,97	0,83	0,93
600	0,94	0,95	0,95	0,53	0,88
500	0,93	0,98	0,98	0,77	0,95
400	0,93	0,95	0,97	0,84	0,97
300	0,93	0,89	0,96	0,88	0,97

** Корреляция значима при $\alpha = 0,01$.

Таблица 3

Коэффициенты корреляции
между фактическими и прогностическими значениями температуры точки росы
Correlation coefficients between actual and values of forecasting dew point temperature

Изобарические уровни, мб	Коэффициенты корреляции**				
	заблаговременность, ч				
	24	48	60	84	132
1000 (zem)	0,87	0,92	0,87	0,63	0,89
900	0,90	0,88	0,87	0,74	0,89
850	0,83	0,96	0,90	0,71	0,90
800	0,88	0,90	0,88	0,63	0,82
700	0,87	0,88	0,90	0,65	0,75
600	0,87	0,81	0,87	0,85	0,76
500	0,83	0,80	0,81	0,73	0,76
400	0,71	0,81	0,73	0,80	0,83
300	0,93	0,77	0,82	0,55	0,8

** Корреляция значима $\alpha = 0,01$.

корреляции в этом случае обусловлены тем, что расчеты за этот срок были проведены по данным модели за 2019 г., и как было отмечено выше, в том же году была усовершенствована сама глобальная модель атмосферы.

Температура точки росы — очень изменчивый и трудно прогнозируемый параметр. Коэффициенты корреляции для этого параметра несколько ниже, чем для температуры воздуха, тем не менее, они соответствуют высокой и очень высокой степени связи между прогностическими и фактическими данными, так как принимают в среднем значения $0,71 \div 0,96$ для всех сроков (табл. 3).

Оценка корреляционной связи параметров атмосферы показала правомерность замены данных фактического аэрологического зондирования значений температуры воздуха и точки росы на соответствующие прогностические значения по модели с заблаговременностью от суток до 5 суток.

Прогноз града составлялся при помощи дискриминантных функций, составленных по данным модели GFS для географических координат станции «Минеральные воды» за май—август 2020 г.

В случаях прогнозирования града с заблаговременностью 48 и 60 ч выборки составляли 55, а с заблаговременностью 72 и 132 ч — 50 наборов данных на соответствующих стандартных изобарических поверхностях от уровня Земли (zem) до 300 мбар.

По данным таблицы сопряженности рассчитывались критерии качества прогноза града (табл. 4). Разделение явлений на «град» или «не град» осуществлялось по данным наблюдений военизированных служб по активному воздействию на метеорологические и другие геофизические процессы, расположенных в радиусе репрезентативности фактических данных аэрологического зондирования по станции «Минеральные воды».

Результаты прогнозов града по дискриминантным функциям на 24, 72 и 132 ч показали, что рассматриваемый метод соответствует принятым критериям качества прогнозов. Из табл. 4 наглядно видно, что показатели успешности прогноза с заблаговременностью 24 часа оказались высокие. Что касается показателей для заблаговременности 72 ч, то они оказались незначительно ниже показателей при прогнозе града этими же функциями при меньшей заблаговременности (24 ч). При заблаговременности 132 ч критерии качества прогноза оказались на уровне или несколько выше, чем для предыдущей заблаговременности. Это обусловлено тем, что расчеты за этот срок были проведены по данным модели за 2019 г., и как было отмечено выше, в том же году была усовершенствована сама глобальная модель атмосферы.

Таблица 4

Критерии качества прогноза града с нарастающей заблаговременностью
Quality criteria for hail forecast with increasing lead time

Наименование критериев качества прогноза	Заблаговременность, ч		
	24	72	132
Общая оправдываемость прогноза, $P_{\text{опп}}$	77	69	72
Предупрежденность наличия явления, $P_{\text{пня}}$	88	74	63
Оправдываемость прогноза наличия явления, $P_{\text{опня}}$	80	67	67
Оправдываемость отсутствия явления, $P_{\text{ооа}}$	73	72	75
Предупрежденность отсутствия явления, $P_{\text{поа}}$	70	65	78
Критерий Пирси—Обухова, T (в долях единицы)	0,51	0,39	0,41
Критерий Багрова, H (в долях единицы)	0,52	0,39	0,41
Ошибка риска метода, a (в долях единицы)	0,18	0,26	0,38
Ошибка страховки метода, P (в долях единицы)	0,30	0,35	0,22
Критерий Обухова, Q (в долях единицы)	0,51	0,39	0,41

Отметим, что, оправдываемость предлагаемого метода равна $\approx 70\%$ для заблаговременности 72 ч, в отличие от аналогичного метода прогноза на 24 ч ($\approx 77\%$) и за 132 ч ($\approx 72\%$).

Заключение

Корреляционный анализ между данными фактического аэрологического зондирования и прогностическими метеорологическими данными с увеличивающейся заблаговременностью до 132 ч по глобальной модели GFS NCEP подтвердил возможность использования последних для прогноза опасных явлений до средних сроков. Критерии качества прогнозов града с заблаговременностью до 5 суток соответствует принятым критериям качества прогнозов.

Таким образом, прогностические значения стратификации атмосферы могут использоваться для составления прогнозов опасных явлений и элементов погоды, (заменяя собой фактическое аэрологическое зондирование) не поддающееся пока прогнозу самими глобальными моделями атмосферы.

Список литературы

1. *Dzombak B.* Severe hailstorms are costly and hard to predict // *Eos*. 2021. № 102. doi: 10.1029/2021EO158268.
2. *Raupach, T.H., Martius, O., Allen, J.T. et al.* The effects of climate change on hailstorms // *Nat Rev Earth Environ*. 2021. № 2. P. 213—226. doi: 10.1038/s43017-020-00133-9.
3. *Алексеева А.А., Глушкова Н.И.* Способ прогноза стихийных конвективных гидрометеорологических явлений теплового полугодия. Патент РФ № 2162237. 2001.
4. *Алексеева А.А.* Методика прогноза опасных и стихийных конвективных явлений погоды, а также их совокупности, приносящих значительный ущерб отраслям экономики / Методический кабинет Гидрометцентра: [Электронный ресурс]. URL: <http://method.meteorf.ru/danger/economy/economy.html> (дата обращения: 14.04.2021).
5. *Кагермазов А.Х.* Цифровая атмосфера. Современные методы и методология исследования опасных метеорологических процессов и явлений. Нальчик: Печатный двор, 2015. 215 с.
6. *Кагермазов А.Х.* Прогноз града по выходным данным глобальной модели атмосферы (T254 NCEP) // *Метеорология и гидрология*. 2012. № 3. С. 28—34.
7. *Кагермазов А.Х., Сиротенко Л.А.* Результаты апробации программных модулей расчета метеопараметров и компьютерного прогноза града по данным аэрологического зондирования на Северном Кавказе // *Известия Высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Физика атмосферы. Естественные науки*. 2010. Спецвыпуск. С. 49—53.
8. *Кагермазов А.Х., Созаева Л.Т.* Прогноз града с заблаговременностью до трех суток по выходным данным глобальной модели атмосферы // *Труды ГГО*. 2020. Вып. 598. С. 204—214.
9. *Kalnay E., Kanamitsu M., Baker W.E.* Global numerical weather prediction at the National Meteorological Center // *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 1990. V.71. P. 1410—1428.
10. *Kanamitsu M.* Description of the NMC global data assimilation and forecast system // *Wea. and Forecasting*. 1989. V. 4. P. 335—342.
11. *Kanamitsu M., Alpert J.C., Campana K.A., Caplan P.M., Deaven D.G., Iredell M., Katz B., Pan H.-L., Sela J., White G.H.* Recent changes implemented into the global forecast system at NMC // *Wea. and Forecasting*. 1991. V. 6. P. 425—435.
12. *Гусейнов Н.Ш., Агаева А.А.* Применение индексов неустойчивости атмосферы к оперативному прогнозированию грозы на основе модельных данных // *Ученые записки РГГМУ*. 2019. № 56. С. 30—37.
13. National Centers for Environmental Prediction(NCEP) Environmental Modeling Center (EMC) USA. URL: <http://www.emc.ncep.noaa.gov> (дата обращения: 14.04.2020).
14. *Бюль А., Цёфель П.* SPSS: Искусство обработки информации. Анализ статистических данных и восстановление скрытых закономерностей. СПб.: ДиаСофтЮП, 2005. 608 с.

References

1. *Dzombak B.* Severe hailstorms are costly and hard to predict. *Eos*. 2021, 102. doi: 10.1029/2021EO158268.
2. *Raupach, T.H., Martius, O., Allen, J.T. et al.* The effects of climate change on hailstorms. *Nat Rev Earth Environ*. 2021, 2: 213—226. doi : 10.1038/s43017-020-00133-9.
3. *Alekseeva A.A.* Methods of forecasting dangerous and natural convective weather events, as well as their combination, causing significant damage to the economy. Methodical office Hydrometeorological Center. [In Russian]. Available at: <http://method.meteorf.ru/danger/economy/economy.html>. (accessed 14.04.2019).
4. *Alekseeva A.A., Glushkova N.I.* Method of forecasting natural convective hydrometeorological phenomena of the warm half of the year. Patent RF, no. 2162237, 2001. [In Russian].
5. *Kagermazov A.Kh. Tsifrovaya atmosfera. Sovremennyye metody i metodologiya issledovaniya opasnykh meteorologicheskikh protsessov i yavleniy.* Digital atmosphere. Modern methods and methodology for the study of hazardous meteorological processes and phenomena. Nalchik: Pechatnyy dvor, 2015: 215 p. [In Russian].
6. *Kagermazov A.Kh.* Hail prediction from Global atmosphere model output (T254 NCEP). *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 2012, 3:28—34. [In Russian].

7. Kagermazov A.Kh., Sirotenko L.A. Results of approbation of software modules for calculating meteorological parameters and computer forecasting of hail based on aerological sounding data in the North Caucasus. *Izvestiya Vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Fizika atmosfery. Yestestvennyye nauki*. Proceedings of Higher Educational Institutions. North-Caucasian Region. Natural Sciences. Special issue. 2010: 49—53. [In Russian].
8. Kagermazov A.Kh., Sozaeva L.T. Hail forecast on the output data of the global atmospheric model with tree-day advance time. *Trudy Glavnoy geofizicheskoy observatorii*. Proceedings of the Voeikov Main Geophysical Observatory. 2020, 598: 204—214. [In Russian].
9. Kalnay E., Kanamitsu M., Baker W.E. Global numerical weather prediction at the National Meteorological Center. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 1990, 71: 1410—1428.
10. Kanamitsu M. Description of the NMC global data assimilation and forecast system. *Wea. and Forecasting*. 1989, 4: 335—342.
11. Kanamitsu M., Alpert J.C., Campana K.A., Caplan P.M., Deaven D.G., Iredell M., Katz B., Pan H.-L., Sela J., White G.H. Recent changes implemented into the global forecast system at NMC. *Wea. and Forecasting*. 1991, 6: 425—435.
12. Huseynov N.Sh., Agayeva A.A. Application of atmospheric instability indexes for operational thunder forecasting based on the model data. *Uchenyye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*. Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University. 2019, 56: 30—37. [In Russian].
13. National Centers for Environmental Prediction(NCEP) Environmental Modeling Center (EMC) USA. Available at: <http://www.emc.ncep.noaa.gov> (accessed 14.04.2020).
14. Bityul A., Zöfel P. *SPSS: Iskusstvo obrabotki informatsii. Analiz statisticheskikh dannykh i vosstanovleniye skrytykh zakonornostey*. The Art of Information Processing. Analysis of statistical data and recovery of hidden patterns. St. Petersburg: DiaSoftYUP, 2005: 608 p. [In Russian].

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 21.07.2021

Принята к публикации после доработки 26.10.2021

Сведения об авторах

Кагермазов Артур Хасанбиевич — канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией атмосферных конвективных явлений, ФГБУ «ВГИ», ka5408@mail.ru.

Созаева Лежинка Танашевна — канд. физ.-мат. наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории атмосферных конвективных явлений, ФГБУ «ВГИ», ljk_62@rambler.ru.

Information about the authors

Kagermazov Artur Khasanbievich — PhD (Phys. and Math. Sci.), head of the laboratory of atmospheric convective phenomena, FSBI «HMGI», ka5408@mail.ru.

Sozaeva Lezhinka Tanashevna — PhD (Phys. and Math. Sci.), associate professor, senior researcher at the laboratory of atmospheric convective phenomena, FSBI «HMGI», ljk_62@rambler.ru.