

## Типологизация синоптических объектов района в терминах прикладной статистики

Е. В. Шувакин<sup>1</sup>✉, Л. М. Акимов<sup>2</sup>, В. С. Балакин<sup>3</sup>, Ю. В. Шипко<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина», Российской Федерации  
(394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А)

<sup>2</sup>Воронежский государственный университет, Российской Федерации  
(394018, г. Воронеж, Университетская пл., 1)

<sup>3</sup>Центральный научно-исследовательский институт Военно-воздушных сил  
(127083, г. Москва, аллея Петровско-Разумовская, 12А, стр. 4)

**Аннотация.** Цель – построение методики выявления внутренней структуры мезомасштабной атмосферной циркуляции на основе типологизации синоптических ситуаций определенного сезона в заданном районе.

**Материалы и методы.** Исходная информация – данные реанализа параметров атмосферы NCEP/DOE AMIP-II. Используются методы прикладной статистики: факторного, кластерного, дискриминантного анализа.

**Результаты и обсуждение.** Построена факторная модель климатической совокупности синоптических объектов с учетом их вертикальной структуры; выявлены статистически различающиеся группы объектов циркуляции (на примере зимнего сезона района пункта Воронеж).

**Выходы.** Разработана методика типологизации мезомасштабных синоптических ситуаций для определенного сезона и заданного района.

**Ключевые слова:** типологизация, синоптический объект, изобарический уровень, геопотенциальная высота, факторный анализ, кластер.

**Для цитирования:** Шувакин Е. В., Акимов Л. М., Балакин В. С., Шипко Ю. В. Типологизация синоптических объектов района в терминах прикладной статистики // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология, 2025, № 1, с. 108-114. DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2025/1/108-114>

### ВВЕДЕНИЕ

В данной работе используется понятие типологизации как метода познания, выявления естественного расслоения синоптических объектов на выраженные «сгустки» (кластеры), лежащие друг от друга на некотором расстоянии в анализируемом многомерном пространстве признаков [7]. Прикладная цель типологизации – выявление и описание расслоенной природы анализируемой совокупности объектов. Типологизацию следует отличать, во-первых, от классификации – процесса разделения совокупности объектов (явлений) на однородные в определенном смысле группы (известные, принятые); во-вторых, – от понятия типизации – выявления типовых форм атмосферных процессов с использованием устойчивых характеристик атмосферной циркуляции, типичных, общих для многих объектов свойств, и обоснованного сведения многообразия выбранных типов к небольшому числу [2].

Отмечается многообразие и субъективность существующих систем типизаций процессов атмосферной циркуляции [1]. Так, известны типизации циркуляции Б. П. Мультановского [2] (три основных типа для Ев-

ропы), Б. Л. Дзердзеевского [1] (13 типовых синоптических схем в масштабах северного полушария) и др.

В настоящее время процедуры типизации синоптических ситуаций проводятся в автоматизированном режиме с использованием программных реализаций. Например, методом автоматизированной типизации получен результат 16 типовых ситуаций из классов: «циклоны – ложбины», «антициклоны – гребни», «малоискривленные поля», «седловины» [4]. При применении численных методов типизации синоптических ситуаций у поверхности Земли для определения областей пониженного и повышенного атмосферного давления и направления переноса воздушных масс ограничиваются двумя характеристиками: лапласианом и градиентом давления воздуха [5]. В процедурах автоматизированной типизации синоптических ситуаций используются и статистические приемы, например, обработка исходных данных реанализа включает этапы: разложение методом главных компонент полей приземного давления и последующая кластеризация коэффициентов разложения методом  $k$ -средних [3].

Цель настоящего исследования – построение методики выявления внутренней структуры мезомасштаб-

© Шувакин Е. В., Акимов Л. М., Балакин В. С., Шипко Ю. В., 2025

✉ Шувакин Евгений Витальевич, e-mail: argentina\_85@mail.ru



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

ной атмосферной циркуляции на основе типологизации синоптических ситуаций определенного сезона в заданном районе.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве информационной базы исследования использован материал резервного объективного анализа (реанализа) параметров атмосферы NCEP/DOE AMIP-II<sup>1</sup> в узлах регулярной сетки с шагом 2,5° по широте и долготе на стандартных изобарических уровнях 1000, 850, 700 и 500 гПа за сроки 00, 06, 12, 18 ч (Всемирного скординированного времени): геопотенциальной высоты и составляющих скорости ветра. К расчету принят зимний сезон (декабрь, январь, февраль), период анализа – 10 лет (2012-2021 годы). Объем выборки составил 3612 случаев. Автоматизированная обработка файлов реанализа и расчет представленных ниже параметров атмосферной циркуляции проведены с использованием составленной программы на языке Python.

Рассматривается область регулярной сетки точек ± 5° по широте и долготе (с шагом 2,5°), где в качестве центра принимаются координаты заданного пункта, для которого требуется оценить синоптико-климатические особенности циркуляции атмосферы (для примера выбран пункт Воронеж). Схема принятых к расчету секторов на регулярной сетке отображена на рисунке 1.

На расчетной сетке точек (рис. 1) принята нумерация [2], узел 0 – заданный пункт исследуемого района, рассматриваются условные секторы его окружающие (на изобарических уровнях 1000, 850, 700, 500 гПа),  $k = 1, 2, \dots, 8$ : сектор 1 с центром в узле 6 включает точки сетки 22, 18, 10, 14, 6, 2, 11, 3, 0; сектор 2 с центром в узле 2 включает точки 18, 10, 17, 6, 2, 5, 3, 0, 1; сектор 3 с центром в узле 5 – 10, 17, 21, 2, 5, 13, 0, 1, 9; сектор 4 с центром в узле 1 – 2, 5, 13, 0, 1, 9, 4, 8, 16, и т.д.

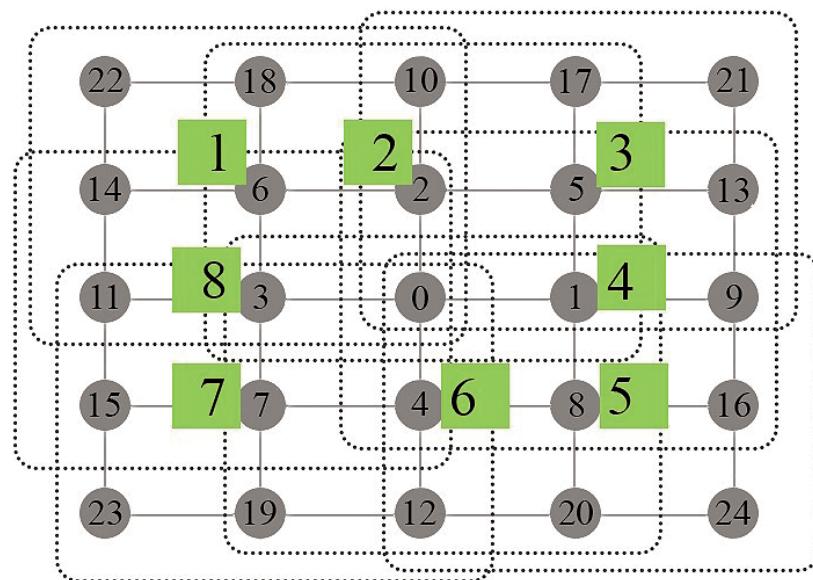


Рис. 1. Схема расположения рассматриваемых секторов на регулярной сетке узлов  
[Fig. 1. The layout of considered areas on a regular grid of knots]

Для характеристики синоптических объектов в заданном районе принятые к расчету следующие параметры с обозначениями:  $x_i^j$ , где нижний индекс  $i = 1, 2, \dots, 11$  – порядковый номер расчетного параметра; верхний индекс  $j$  идентифицирует изобарический уровень ( $j = 1 – 1000$  гПа,  $j = 8 – 850$  гПа,  $j = 7 – 700$  гПа,  $j = 5 – 500$  гПа):

–  $x_1^j, x_2^j$  – значения геопотенциальной высоты (дам) в центральном узле сектора с минимумом и максимумом (соответственно) суммы значений геопотенциальной высоты в узлах, относящихся к данному сектору (см. рис. 1);

–  $x_3^j = (x_2^j - x_1^j)/k$  – условный градиент геопотенциальной высоты для всего района (дам/100 км), где  $k$  – расстояние между узлами со значениями  $x_1^j, x_2^j$ , деленное на 100;

–  $x_4^j$  – направление условного градиента геопотенциальной высоты района, угол (град.) между направлением от узла со значением  $x_2^j$  к узлу со значением  $x_1^j$  с направлением на север;

–  $x_5^j = (H_1^j + H_2^j + H_3^j + H_4^j - 4H_0^j)/\delta^2$  – лапласиан [2] в заданном пункте (узел 0);  $\delta$  – шаг сетки, условно принимается 250 км;

–  $x_6^j = [(H_1 - H_3)^2 + (H_2 - H_4)^2]^{0.5} / (2\delta / 100)$  – условный градиент геопотенциальной высоты (дам/100 км) в заданном пункте (узел 0);

–  $x_7^j = \arctg [(H_1 - H_3) / (H_2 - H_4)]$  – направление условного градиента геопотенциальной высоты в заданном пункте, град.;

–  $x_8^j, x_9^j$  – соответственно направление (град.) и скорость ветра (м/с) в заданном пункте, в узле 0 (см. рис. 1).

<sup>1</sup>NCEP/DOE AMIP II Reanalysis. – URL: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis2.html> (дата обращения: 22.05.2023). – Текст: электронный.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В данной расчетной схеме представлено 36 параметров, имеющих различные шкалы измерений, характеризующих некоторым образом синоптическую ситуацию для пункта. Многомерный анализ с их использованием сталкивается с препятствием в практической области, поэтому есть основания преобразовать совокупность величин  $x_i^j$  к канонической совокупности величин, которых гораздо меньше. Выполнен переход к факторному пространству [7], в результате которого выделено шесть общих факторов  $f_m$ ,  $m = 1, 2, \dots, 6$ , объясняющих ~83 % общей дисперсии выборки. Таким образом, без потери информативности размерность задачи снижена до шести переменных.

Факторный анализ позволил определить факторные нагрузки, с учетом значений которых (превышающих  $|0,7|$  [7]) можно дать факторам следующую интерпретацию:

$-f_1$  – фактор обобщенного градиента геопотенциальной высоты и скорости ветра в заданном пункте на изобарических уровнях 1000, 850 гПа (~31,6 % общей дисперсии признаков); основную нагрузку оказывают переменные  $x_3, x_6, x_9$  уровней 1000, 850 гПа;

$-f_2$  – фактор распределения максимума и минимума геопотенциальной высоты по территории (~18,2 % общей дисперсии признаков); основная нагрузка переменных  $x_1, x_2$  всех изобарических уровней;

$-f_3$  – фактор направления обобщенного градиента давления (~16,1 % дисперсии признаков); основная нагрузка переменных  $x_4, x_7$  всех уровней;

$-f_4$  – фактор направления скорости ветра в пункте (~7,5 % общей дисперсии); основная нагрузка переменной  $x_8$  на всех уровнях;

$-f_5$  – фактор обобщенного градиента геопотенциальной высоты и скорости ветра в заданном пункте на уровнях 700, 500 гПа (~5,8 % общей дисперсии); нагрузка переменных  $x_3, x_6, x_9$  уровней 700, 500 гПа;

$-f_6$  – фактор вихря скорости в пункте (~3,8 % общей дисперсии признаков); основная нагрузка  $x_5$  на всех рассматриваемых уровнях.

Полезным средством, позволяющим оценить компактность используемых параметров, является их визуализация (двумерное отображение на некоторых осях), для чего проведена процедура многомерного неметрического шкалирования [7], которая сводит пространство рассматриваемых признаков к двум размерностям (рис. 2).

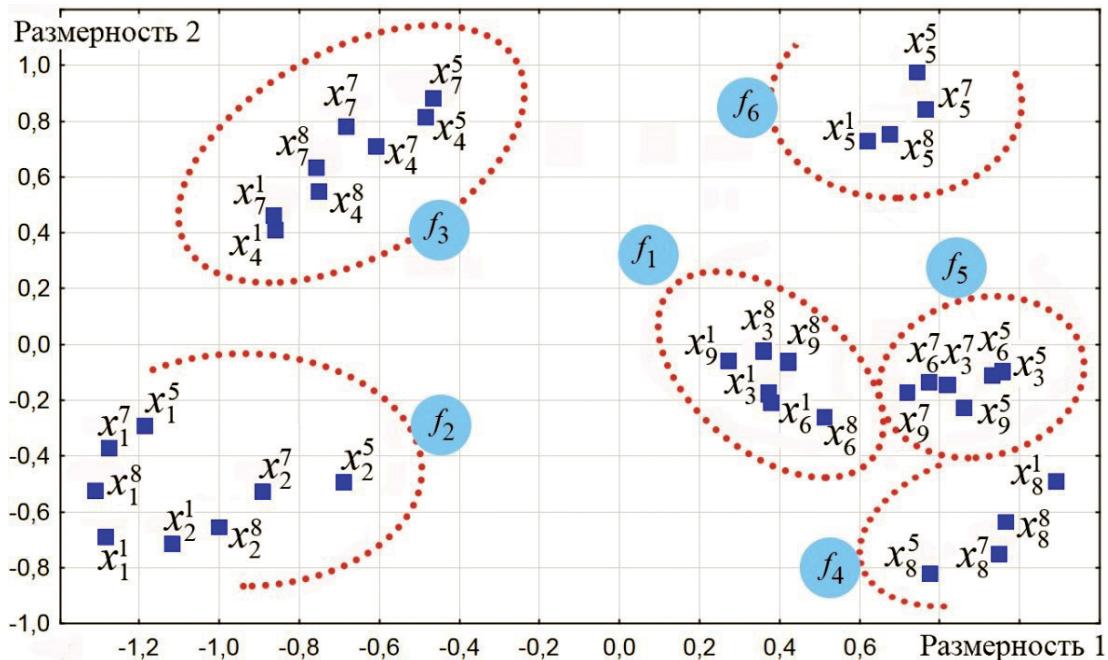


Рис. 2. Отображение на плоскости метрических шкал рассматриваемых признаков синоптических объектов  
[Fig. 2. Displaying considered features of synoptic objects on the plane of metric scales]

Как следует из рисунка 2, первичные признаки синоптических объектов образуют компактные группы, соответствующие выделенным общим факторам, что подтверждает корректность построения факторной модели.

Таким образом, построенная факторная модель является моделью новых некоррелированных переменных, которые включают в себя наиболее существенные черты исходных признаков, учитывают их взаимосвязи и являются их линейной комбинацией. В некотором

смысле выделенные общие факторы  $f_m$ ,  $m = 1, 2, \dots, 6$ , можно считать причинами, а измеряемые признаки синоптических объектов – следствиями [7].

На базе введенных параметров  $x_i^j$  проведена простая типологизация общей совокупности синоптических объектов многолетнего зимнего сезона: выявление выраженных «сгустков», «клusterов» этих объектов в анализированном многомерном пространстве и построение правила отнесения нового объекта к одному из выявленных типов. Процедура многомер-

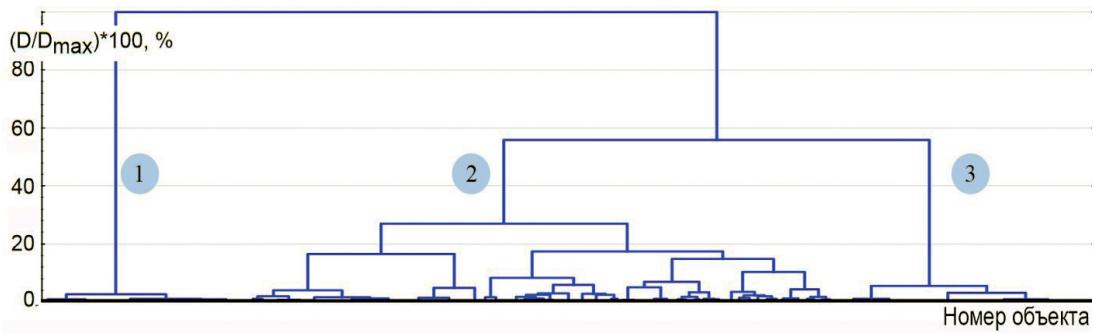


Рис. 3. Дерево иерархической кластеризации синоптических объектов  
[Fig. 3. Hierarchical clustering tree of synoptic objects]

ной кластеризации проведена по методу иерархической (древовидной) классификации. В качестве меры сходства объектов используется Евклидово расстояние  $D$  [7]. Судя по представленному на рисунке 3 графическому отображению дерева кластеризации, в общей выборке имеются три достаточно различных кластера (ветви).

Выявленные кластеры объектов удобно представить на плоскостях полученных факторов (рис. 4, 5). При этом визуализация отдельных кластеров отмечается только на плоскостях с фактором  $f_3$ , на других плоскостях разделения групп не наблюдается. Можно заключить, что основной вклад в дискриминацию объектов вносит фактор  $f_3$  – направления обобщенного градиента.

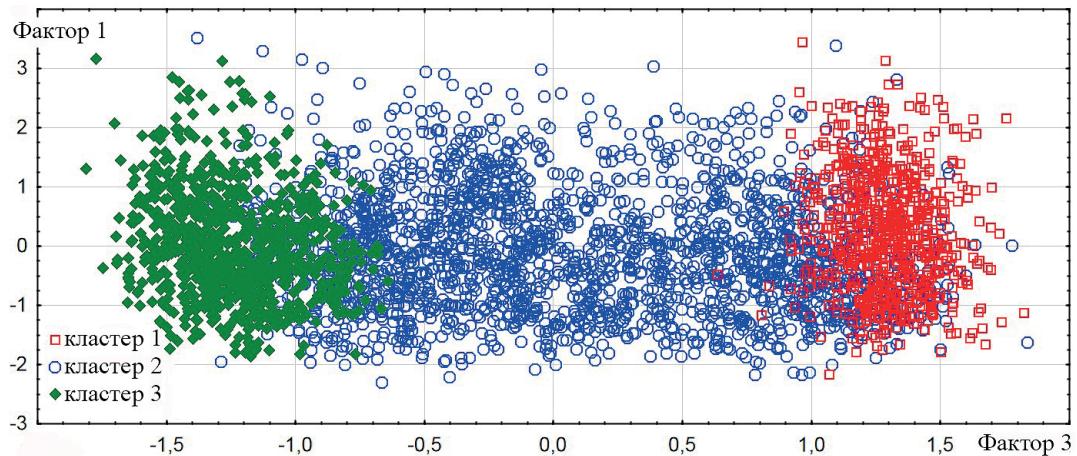


Рис. 4. Отображение выделенных кластеров синоптических объектов на плоскости факторов  $f_1, f_3$   
[Fig. 4. Displaying selected clusters of synoptic objects on the plane of factors  $f_1, f_3$ ]

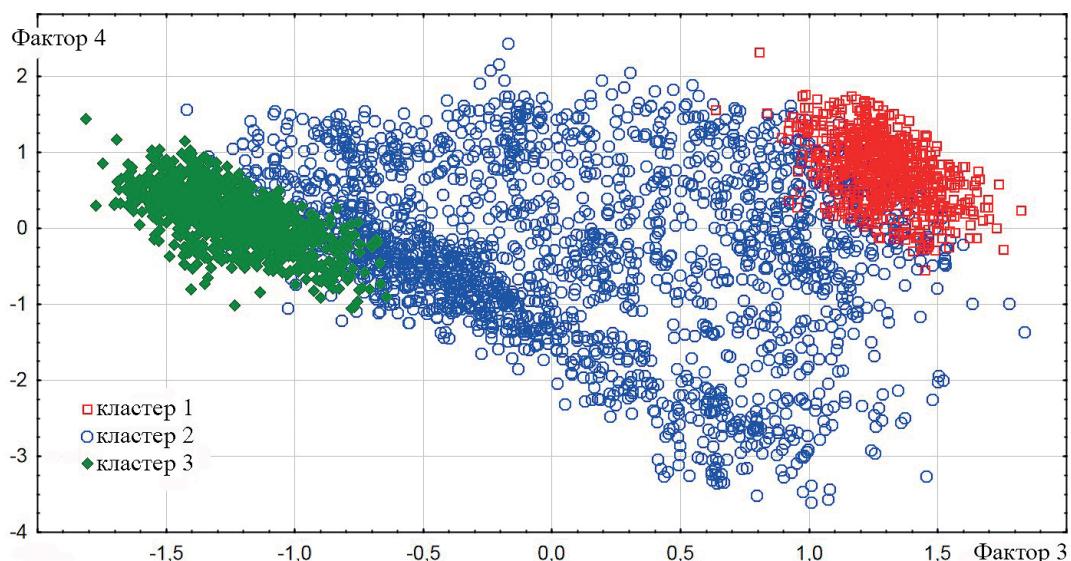


Рис. 5. Отображение выделенных кластеров синоптических объектов на плоскости факторов  $f_3, f_4$   
[Fig. 5. Displaying selected clusters of synoptic objects on the plane of factors  $f_3, f_4$ ]

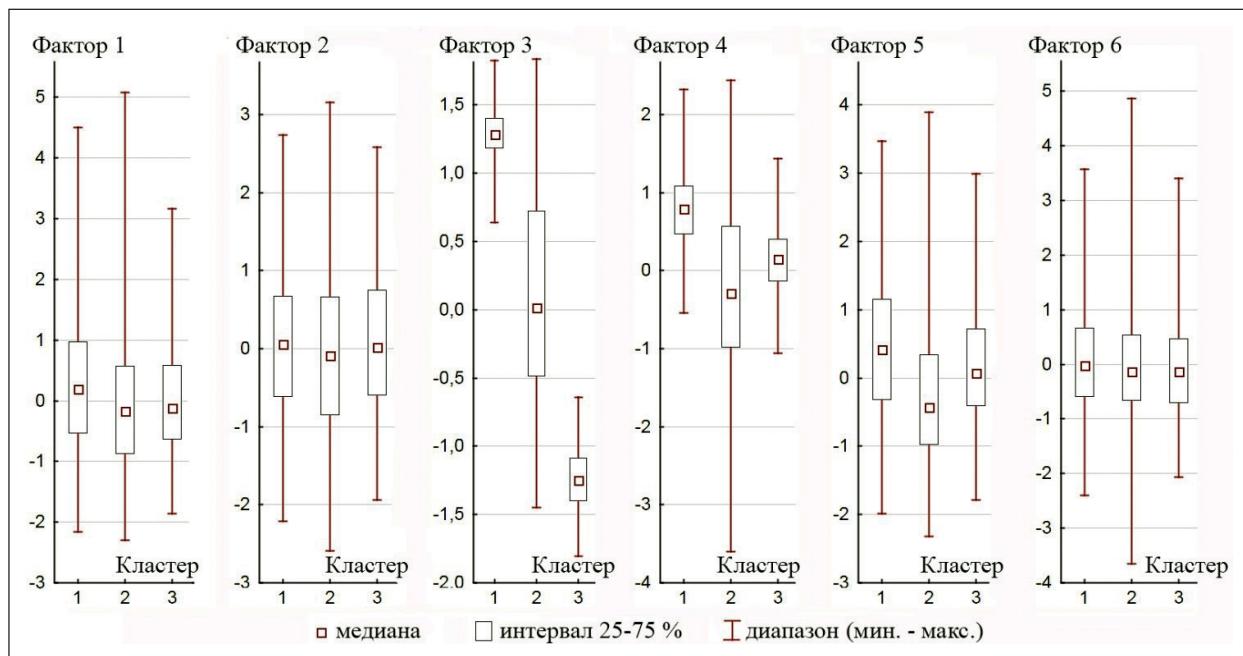


Рис. 6. Сравнение статистических характеристик факторов в разных кластерах  
[Fig. 6. Comparison of statistical characteristics of factors in different clusters]

Кроме того, сравнение статистических распределений факторов для выявленных кластеров с использованием непараметрических критерев Смирнова-Колмогорова и Манна-Уитни (не требующих предпосылки закона распределения рассматриваемых характеристик) [6] показало статистически значимое (на уровне значимости 0,05) различие:

- в группах 1, 2 – всех факторов;
- в группах 1, 3 – кроме фактора  $f_2$ ;

$$\begin{aligned} C_1 &= -6,596 + 0,778f_1 + 0,057f_2 + 5,846f_3 + 2,175f_4 + 1,099f_5 + 0,220f_6, \\ C_2 &= -0,717 - 0,121f_1 - 0,082f_2 + 0,045f_3 - 0,461f_4 - 0,333f_5 - 0,014f_6, \\ C_3 &= -4,248 - 0,342f_1 + 0,137f_2 - 4,706f_3 - 0,687f_4 - 0,125f_5 - 0,141f_6. \end{aligned} \quad (1)$$

При отнесении объекта к определенному типу (классу) используется следующее решающее правило: при реализации условий ортогональных факторов ( $f_1, f_2, \dots, f_6$ ) объект циркуляции относится к типу  $j$  ( $j = 1, 2, 3$ ), для которого классификационная функция  $C_j$  (1) принимает максимальное значение.

По величине модуля коэффициента перед каждым фактором функций (1) можно также отметить, что наибольший вклад в дискриминацию групп 1 и 3 типа оказывает фактор  $f_3$  (обобщенного направления градиента давления).

Оценку устойчивости классификации можно характеризовать частотой ошибочной классификации

– в группах 2, 3 – кроме фактора  $f_6$ .

На рисунке 6 представлены мода, интервал попадания 50 % наблюдений, минимальное и максимальное значения факторов в разных кластерах.

В продолжение типологизации проведен дискриминантный анализ [7]. Построены классификационные функции принадлежности синоптического объекта к 1, 2 или 3 типу (классу):

(полной) [7]. В данном случае она составила 0,14 (при общей выборке  $n = 3612$ ), при этом можно положить, что полученная группировка не случайна и отражает существенные свойства внутренней структуры синоптических объектов. В таблице приведены данные по устойчивости отнесения синоптических объектов к определенному классу.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная методика типологизации синоптических ситуаций определенного сезона в заданном районе может способствовать повышению качества метеорологического обеспечения функционирования раз-

Таблица

Матрица сопряженности случаев кластеризации и расчетной классификации  
[Table. Matrix of conjugacy of clustering and computational classification cases]

| Кластер / Cluster | Расчет класса / Class calculation |      |      | Доля корректной классификации, % / Percentage of correct classification, % |
|-------------------|-----------------------------------|------|------|--|
|                   | 1                                 | 2    | 3    |  |
| 1                 | 709                               | 0    | 0    | 100,0  |
| 2                 | 249                               | 1528 | 226  | 76,3   |
| 3                 | 0                                 | 16   | 884  | 98,2   |
| Сумма             | 958                               | 1544 | 1110 | 86,4   |

личных метеозависимых организационно-технических систем. Использование ортогональных факторов в качестве предикторов и выделенных типов синоптических объектов позволит качественно отражать особенности атмосферной циркуляции над рассматриваемой территорией в схемах прогнозов, в различных моделях климатической системы.

Достоверность полученных результатов исследования обоснована привлечением большого объема исходных данных, применением классических методов прикладной статистики анализа многомерного статистического материала, использованием программной реализации расчетных алгоритмов.

Продолжением данного исследования может стать анализ метеорологических условий (по данным приземных наблюдений), соответствующих выявленным типам (кластерам) циркуляционных процессов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дзерзевский Б.Л. *Избранные труды: Общая циркуляция атмосферы и климат*. Москва: Наука, 1975. 288 с.
2. Зверев А.С. *Синоптическая метеорология и основы предвычисления погоды*. Ленинград: Гидрометеорологическое издательство, 1968. 776 с.
3. Костарев С.В., Русин И.Н. Использование автоматической типизации синоптической ситуации для условной

верификации численных прогнозов погоды в Пермском крае // *Географический вестник – Geographical bulletin*, 2021, № 1 (56), с. 68-80.

4. Метод автоматизированной типизации синоптических ситуаций для разработки прогнозов опасных и неблагоприятных для авиации метеорологических явлений / Н.О. Моисеева, Л.Ю. Белоусова, А.Н. Ефременко, А.С. Подчасский // *Сборник тезисов докладов XV Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, ИКИ РАН, 2017, с. 192.

5. Моисеева Н.О., Ременсон В.А., Румянцева Е.А. Применение методов синоптической климатологии в автоматизированных системах статистической интерпретации выходной продукции прогностических гидродинамических моделей атмосферы // Ученые записки РГГМУ, 2016, № 44, с. 157-164.

6. Поллард Дж. *Справочник по вычислительным методам статистики* / перевод с английского. Москва: Финансы и статистика, 1982. 344 с.

7. *Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности: справочное издание* / С.А. Айвазян, В.М. Бухштабер, И.С. Еноков, Л.Д. Мешалкин. Москва: Финансы и статистика, 1989. 607 с.

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Поступила в редакцию: 17.04.2024  
Принята к публикации: 20.02.2025

UDC 551.515:311

ISSN 1609-0683

DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2025/1/108-114>

## Typologisation of Synoptic Objects of the Area in Terms of Applied Statistics

V.S. Shuvakin<sup>1</sup>✉, L.M. Akimov<sup>2</sup>, E.V. Balakin<sup>3</sup>, Yu.V. Shipko<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Military Educational and Scientific Centre of the Air Force «Air Force Academy named after professor N.E. Zhukovskiy and Yu.A. Gagarin», Russian Federation  
(54A, Starykh Bolshevikov Str., Voronezh, 394064)

<sup>2</sup>Voronezh State University, Russian Federation  
(1, Universitetskaya Sq., Voronezh, 394018)

<sup>3</sup>Central Scientific Research Institute of the Air Force  
(4 b., 12A, Petrovsko-Razumovskaya Ave., Moscow, 127083)

**Abstract.** The purpose is to develop a methodology for revealing the internal structure of the mesoscale atmospheric circulation on the basis of the typologisation of synoptic situations of a certain season in a target area.

**Materials and methods.** The initial information are the data of the NCEP/DOE AMIP-II reanalysis of atmospheric parameters. The methods of applied statistics are used: factor, cluster and discriminant analyses.

**Results and discussion.** The factor model of the climatic population of synoptic objects is constructed taking into account their vertical structure; statistically different groups of circulation objects are identified (on the example of the winter season of the Voronezh point area).

**Conclusions.** The methodology of typologisation of mesoscale synoptic situations for a certain season and a target area has been developed.

**Key words:** typologisation, synoptic object, isobaric level, geopotential height, factor analysis, cluster.

**For citation:** Shuvakin Y.V., Akimov L.M., Balakin V.S., Shipko Yu. V. Typologisation of Synoptic Objects of the Area in Terms of Applied Statistics. *Vestnik Voronezskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Geografia. Geokologiya*, 2025, no. 1, pp. 108-114 (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2025/1/108-114>

© Shuvakin Y.V., Akimov L.M., Balakin V.S., Shipko Yu. V., 2025

✉ Yevgeniy V. Shuvakin, e-mail: argentina\_85@mail.ru



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

REFERENCES

1. Dzerdzevskiy B.L. *Izbrannye trudy: Obshchaya cirkulyaciya atmosfery i klimat* [Selected works: Total atmospheric circulation and climate]. Moscow: Science, 1975. 288 p. (In Russ.)
2. Zverev A.S. *Sinopticheskaya meteorologiya i osnovy predvychisleniya pogody* [Synoptic meteorology and the basics of weather forecasting]. Leningrad: Hydrometeorological publishing house, 1968. 776 p. (In Russ.)
3. Kostarev S.V., Rusin I.N. Ispol'zovanie avtomaticheskoy tipizacii sinopticheskoy situacii dlya uslovnnoj verifikacii chislennyh prognozov pogody v Permskom krae [The use of automated synoptic typing for conditional verification of numerical weather prediction in the Perm region], *Geographical bulletin*, 2021, no. 1 (56), pp. 68-80. (In Russ.)
4. Metod avtomatizirovannoj tipizacii sinopticheskikh situacij dlya razrabotki prognozov opasnyh i neblagopriyatnyh dlya aviacii meteorologicheskikh yavlenij [Method of automated typing of synoptic situations to develop forecasts of hazardous and unfavorable meteorological phenomena for aviation] / N.O. Moiseeva, L.Y. Beloysova, A.N. Efremenko, A.S. Podchasny. *Sbornik tezisov dokladov XV Vserossiskoy otkrytoj konferensii «Sovremennye problemy distancionnogo zondirovaniy Zemli iz kosmosa», IKI RAN*, 2017, pp. 192. (In Russ.)
5. Moiseeva N.O., Remenson V.A., Rymiynceva E.A. Primenenie metodov sinopticheskoy meteorologii v avtomatizirovannyh sistemah statisticheskoy interpretacii vygodnoj produkciyi prognosticheskikh gidrodinamicheskikh modelej atmosfery [Application of synoptic climatology methods in automated systems of statistical interpretation of output products of prognostic hydrodynamic models of atmosphere]. *Uchyonye zapiski RGGMU*, 2016, no. 44, pp. 157-164. (In Russ.)
6. Pollard J. *Spravochnik po vychislitel'nym metodam statistiki* [A handbook of numerical and statistical techniques] / perevod s angliyskogo. Moscow: Finansy i statistika, 1982. 344 p. (In Russ.)
7. Prikladnay statistika: Klassifikacia i snizhenie razmernosti [Applied statistics: Classification and dimensional reduction] / S.A. Aivazyn, V.M. Buhshtaber, I.S. Enukov, L.D. Meshalkin. Moscow: Finansy i statistika, 1989. 607 p. (In Russ.)

**Conflict of interests:** The authors declare no information of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Received: 17.04.2024

Accepted: 20.02.2025

Шувакин Евгений Витальевич

Кандидат технических наук, докторант Военного учебно-научного центра Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-1719-9592, e-mail: argentina\_85@mail.ru

Акимов Леонид Мусамудинович

Кандидат географических наук, доцент, заведующий кафедрой природопользования факультета географии, геоэкологии и туризма Воронежского государственного университета, г. Воронеж, Российская Федерация, ORCID: 0000-0003-0749-1976, e-mail: akl63@bk.ru.

Балакин Владимир Станиславович

Кандидат географических наук, начальник научно-исследовательской лаборатории, Центральный научно-исследовательский институт Военно-воздушных сил, г. Москва, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-7332-2946, e-mail: balakin69vs@gmail.com.

Шипко Юрий Владимирович

Кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории, Центральный научно-исследовательский институт Военно-воздушных сил, г. Москва, Российская Федерация, ORCID: 0000-0002-3677-6594, e-mail: yshipko@mail.ru.

Yevgeniy V. Shuvakin

Cand. Sci. (Tech.), Doctoral Student at the Military Educational and Scientific Centre of the Air Force «Air Force Academy named after Prof. N.Ye. Zhukovskiy and Yu.A. Gagarin», Voronezh, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-1719-9592, e-mail: argentina\_85@mail.ru

Leonid M. Akimov

Cand. Sci. (Geogr.), Assoc. Prof., Head of the Department of Nature Management, Faculty of Geography, Geoecology and Tourism, Voronezh State University, Voronezh, Russian Federation, ORCID: 0000-0003-0749-1976, e-mail: akl63@bk.ru.

Vladimir S. Balakin

Cand. Sci. (Geogr.), Head of Scientific Research Laboratory, Central Scientific Research Institute of Air Force, Moscow, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-7332-2946, e-mail: balakin69vs@gmail.com.

Yuri V. Shipko

Cand. Sci. (Tech.), Assoc. Prof., Senior Researcher at the Scientific Research Laboratory, Central Scientific Research Institute of Air Force, Moscow, Russian Federation, ORCID: 0000-0002-3677-6594, e-mail: yshipko@mail.ru