

Кластерный анализ климатических характеристик для районирования территории в условиях изменения климата на примере Алтайского края

В.Н. Копылов, Д.С. Федоров*

Сибирский региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт,
Россия, 630099, Новосибирск, ул. Советская, 30

*Адрес для переписки: kvn88@mail.ru

Реферат. Представлены результаты сравнительного анализа климатического районирования Алтайского края по трём временным периодам: раннему (1927-1975 гг.), современному (1976-2024 гг.) и полному (1927-2024 гг.) периодам наблюдений на основе данных 31 метеорологической станции с применением методов многомерной статистики. Рассчитано 42 климатических показателя, включая характеристики температуры воздуха и осадков, а также климатические индексы континентальности Конрада, аридности де Мартона и увлажнения Высоцкого-Иванова. Применён алгоритм k-средних с оценкой качества методом силуэтного анализа и индекса согласованности ARI. Установлено значительное потепление климата между ранним и современным периодами: среднегодовая температура воздуха возросла с $1.51 \pm 0.60^\circ\text{C}$ до $2.92 \pm 0.73^\circ\text{C}$ ($+1.41^\circ\text{C}$), годовая сумма осадков увеличилась с 400 ± 104 мм до 452 ± 116 мм ($+52$ мм), индекс континентальности Конрада снизился с 53.2 до 50.1 (-3.1). Выявлены различия в структуре климатического районирования: для раннего и современного периодов оптимально выделение двух климатических районов (силуэт 0.351 и 0.319, ARI 0.236 и 0.199 соответственно), тогда как для полного периода – трёх районов (силуэт 0.266, ARI 0.201). Формирование третьего переходного района при интегральном анализе за весь период отражает усложнение пространственной организации климата. Горно-предгорные территории демонстрируют максимальное увлажнение (495-555 мм/год), степные районы характеризуются максимальным потеплением и дефицитом влаги (325-377 мм/год). Первые две главные компоненты объясняют 75-79% дисперсии климатических характеристик во всех периодах. Картографический анализ подтвердил пространственную согласованность выделенных кластеров с традиционным агроклиматическим районированием. Результаты обосновывают необходимость периодической актуализации климатического районирования и могут быть использованы для разработки адаптационных стратегий для регионов и отраслей экономики.

Ключевые слова. Климатическое районирование, изменения климата, континентальность климата, временная динамика, кластерный анализ, метод k-средних, силуэтный анализ, Алтайский край.

Cluster analysis of climatic characteristics for territorial zoning in the context of climate change: a case study of the Altai Krai

V.N. Kopylov, D.S. Fedorov*

Siberian Regional Scientific Research Hydrometeorological Institute,
30, Sovetskaya str., 630099, Novosibirsk, Russian Federation

*Correspondence address: *kvn88@mail.ru*

Abstract. The paper presents results of a comparative analysis of climatic zoning in Altai Krai across three time periods: early (1927-1975), modern (1976-2024), and full (1927-2024) observation periods based on data from 31 meteorological stations using multivariate statistical methods. A total of 42 climatic indicators were calculated, including air temperature and precipitation characteristics, as well as Conrad's continentality index, de Martonne's aridity index, and Vysotsky-Ivanov's moisture index. The k-means clustering algorithm was applied with quality assessment using silhouette analysis and the Adjusted Rand Index (ARI). Significant climate warming was established between the early and modern periods: mean annual air temperature increased from $1.51 \pm 0.60^\circ\text{C}$ to $2.92 \pm 0.73^\circ\text{C}$ ($+1.41^\circ\text{C}$), annual precipitation increased from 400 ± 104 mm to 452 ± 116 mm ($+52$ mm), and Conrad's continentality index decreased from 53.2 to 50.1 (-3.1). Differences in climatic zoning structure were identified: two climatic zones are optimal for the early and modern periods (silhouette 0.351 and 0.319, ARI 0.236 and 0.199 respectively), while three zones are optimal for the full period (silhouette 0.266, ARI 0.201). The emergence of a third transitional zone in the integral analysis over the entire period reflects the increasing complexity of spatial climate organization. Mountain-foothill areas demonstrate maximum moisture (495-555 mm/year), while steppe areas are characterized by maximum warming and moisture deficit (325-377 mm/year). The first two principal components explain 75-79% of the variance in climatic characteristics across all periods. Cartographic analysis confirmed the spatial consistency of identified clusters with conventional agroclimatic zoning. The results justify the need for periodic updating of climatic zoning and can be used to develop adaptation strategies for regions and economic sectors.

Keywords. Climatic zoning, climate change, climate continentality, temporal dynamics, cluster analysis, k-means method, silhouette analysis, Altai Krai.

Введение

Климатическое районирование представляет собой фундаментальную задачу физической географии и климатологии, имеющую важное прикладное значение для сельского хозяйства, планирования землепользования и оценки климатических рисков (Алисов, 1969; Кислов, 2011). Алтайский край, расположенный в переходной зоне между умеренно континентальным климатом Западной Сибири и резко континентальным климатом Центральной Азии,

характеризуется высокой пространственной неоднородностью климатических условий (Агроклиматические ресурсы..., 1971; Кирста и др., 2002).

Традиционные подходы к климатическому районированию, разработанные в середине XX века (Берг, 1938; Воейков, 1884), базировались преимущественно на экспертных оценках и качественном анализе ограниченного набора климатических показателей. Современные возможности многомерного статистического анализа позволяют перейти к объективным количественным методам районирования с использованием полного спектра климатических характеристик (Айвазян и др., 1989; Харман, 1972).

Кластерный анализ как метод выделения однородных групп объектов получил широкое применение в климатологических исследованиях (Wilks, 2011). Его преимуществами являются объективность классификации, возможность обработки больших массивов данных и получение количественных оценок качества районирования (Everitt et al., 2011).

Методы кластерного анализа успешно применяются для климатического районирования различных регионов мира, включая выделение зон с однородными климатическими изменениями методом *k*-средних, иерархическую кластеризацию на главных компонентах и метод Уорда (Carvalho et al., 2016; Praene et al., 2019). Для территории Западной Сибири данные подходы использовались для оценки температурно-влажностных условий вегетационного периода и классификации климатических изменений (Поляков, Кужевская, 2012; Паромов и др., 2017), а также для анализа смещения границ ландшафтных зон вследствие потепления (Виноградова, Титкова, 2025). Кластеризация климатических трендов температуры и осадков, по данным более 1450 метеостанций России за период 1987-2021 гг., позволила выделить 15 кластеров с однородными паттернами долгопериодных изменений и обосновать уточнение климатического районирования на основе тенденций изменения климата, включая экстремальные значения (Лавров, Стерин, 2024). Однако для Алтайского края комплексный анализ климатического районирования с применением современных методов многомерной статистики и оценкой временной динамики по различным периодам ранее не проводился.

Современные изменения климата требуют переосмысления существующих схем климатического районирования с учётом новых данных наблюдений (IPCC, 2021; Третий оценочный доклад..., 2022). Особую актуальность это приобретает для регионов интенсивного сельскохозяйственного использования, к которым относится Алтайский край. Цель исследования – разработка объективной методики климатического районирования территории на основе кластерного анализа и верификация полученной схемы районирования с использованием современных данных метеорологических наблюдений на примере Алтайского края.

Методы и материалы

Исследование основано на данных наблюдений на метеорологических станциях Росгидромета на территории Алтайского края за период 1927-2024 гг.

Использованы месячные средние температуры воздуха и месячные суммы осадков. Пропуски данных составляют менее 5% и восполнены методом линейной интерполяции для отдельных месяцев, что делает их однородными по всем периодам наблюдений. Пространственное распределение станций обеспечивает репрезентативность выборки для физико-географических районов края.

Для выявления временной динамики климатического районирования анализ проводился по трём временным периодам:

- ранний период наблюдений (РПН, Early Observation Period – EOP; 1927-1975 гг.) – исторический период до начала интенсивных климатических изменений;

- современный период наблюдений (СПН, Modern Observation Period – MOP; 1976-2024 гг.) – период выраженного глобального потепления;

- полный период наблюдений (ППН, Full Observation Period – FOP; 1927-2024 гг.) – интегральная характеристика климата за весь доступный период.

В качестве базового (эталонного) для верификации результатов кластерного анализа использовано климатическое районирование, принятое в классическом агроклиматическом справочнике (Агроклиматические ресурсы..., 1971). Это районирование (далее – классическое) включает три района: район 1 – горно-предгорный (8 метеорологических станций: Бийск, Бийск-Зональная, Заринск, Солонешное, Тогул, Троицкое, Целинное, Чарышское); район 2 – лесостепной переходный (16 станций: Алейск, Баево, Барнаул, Горняк, Змеиногорск, Камень-на-Оби, Краснощеково, Мамонтово, Поспелиха, Ребриха, Тальменка, Усть-Калманка, Усть-Чарышская, Хабары, Шелаболиха, Шипуново); район 3 – степной (8 станций: Благовещенка, Волчиха, Ключи, Кулунда, Родино, Рубцовск, Славгород, Угловское). В классическом районировании учтены данные 32 метеорологических станций.

Метеорологические наблюдения на станциях Алтайского края начаты в разные периоды: наиболее ранние данные имеются по станции Змеиногорск (с 1927 г.), массовое развитие сети произошло в 1936 г. (10 станций: Алейская, Волчиха, Бийск-Зональная, Камень-на-Оби, Ключи, Рубцовск, Славгород, Тогул, Хабары, Родино), значительное расширение наблюдательной сети осуществлено в период 1955-1960 гг. (15 станций: Баево, Заринск, Краснощеково, Кулунда, Ребриха, Солонешное, Тальменка, Угловское, Мамонтово, Поспелиха, Шелаболиха, Барнаул, Усть-Чарышская, Целинное, Благовещенка, Троицкое, Чарышское), что совпадает с активным освоением целинных земель в регионе. Для ряда станций (Усть-Калманка, Шипуново, Горняк) использованы имеющиеся данные с 1967, 1974 и 1989 гг. соответственно. Различие в длительности рядов наблюдений учтено при анализе временной динамики климатических характеристик: для раннего периода (1927-1975 гг.) использованы данные 29 станций, для современного (1976-2024 гг.) и полного (1927-2024 гг.) периодов – всех 31 станций.

В данном исследовании использованы данные 31 станции, для каждой из которых рассчитан комплекс из 42 климатических характеристик.

Температурные показатели (11 характеристик) включают среднегодовую температуру воздуха, сезонные температуры (зимняя, весенняя, летняя, осенняя), годовую амплитуду температуры, абсолютные минимум и максимум, средние минимальные и максимальные температуры.

Характеристики увлажнения (9 показателей) включают среднемесячные и сезонные суммы осадков, годовую сумму осадков и коэффициент вариации осадков.

Климатические индексы (3 показателя) рассчитывались по следующим формулам. Индекс континентальности Конрада (Conrad, 1946):

$$K = (1.7 \times A_T / \sin \varphi) - 20.4,$$

где A_T – годовая амплитуда температуры ($^{\circ}\text{C}$), φ – географическая широта (рад).

Индекс аридности де Мартона (De Martonne, 1926):

$$T_a = P_{200} / T_{200} + 10,$$

где P_{200} – годовая сумма осадков (мм), T_{200} – среднегодовая температура ($^{\circ}\text{C}$).

Индекс увлажнения Высоцкого-Иванова (Высоцкий, 1900):

$$T_y = P_{200} / (0.0018 \times (T_{200} + 25)^2),$$

где коэффициент 0.0018 учитывает региональные особенности испарения.

Тренды изменений (4 показателя) рассчитаны методом линейной регрессии за период 2015-2024 гг.: тренды температуры и осадков ($^{\circ}\text{C}/\text{год}$ и $\text{мм}/\text{год}$) с оценкой статистической значимости (p-value) и коэффициента детерминации (R^2).

Прочие показатели (14 характеристик) включают сумму активных температур выше 10°C , продолжительность периода с температурой выше 10°C , гидротермический коэффициент Селянинова и биоклиматический потенциал.

Для кластеризации использовано 11 ключевых показателей: среднегодовая температура, зимняя и летняя температуры, годовая амплитуда температуры, годовая сумма осадков, зимние и летние осадки, индекс континентальности Конрада, индекс аридности де Мартона, ГТК Селянинова и биоклиматический потенциал. Эти показатели отражают основные климатообразующие факторы. Остальные характеристики используются для интерпретации выделенных климатических районов.

Применялся алгоритм k-средних кластеризации (MacQueen, 1967) с анализом вариантов от 2 до 5 кластеров. Качество кластеризации оценивалось силуэтным коэффициентом (Rousseeuw, 1987), индексом согласованности ARI (Adjusted Rand Index) (Hubert, Arabie, 1985) для сравнения с классическим районированием, анализом главных компонент (Jolliffe, Cadima, 2016) для снижения размерности данных. Предварительно данные были стандартизированы методом z-преобразования. Иерархическая кластеризация методом Уорда (Ward, 1963) использовалась для визуализации структуры климатических различий.

Анализ главных компонент (Principal Component Analysis, PCA) применялся для снижения размерности данных и визуализации результатов кластеризации. Главные компоненты выделялись методом сингулярного разложения корреляционной матрицы стандартизированных климатических показателей. Данные предварительно стандартизировались методом z-преобразования для обеспечения сопоставимости показателей с различными единицами измерения.

Статистические расчеты и графические построения выполнены средствами языка программирования Python. Картографическая визуализация результатов районирования выполнена в геоинформационной системе QGIS. Для каждого временного периода построены карты распределения станций по кластерам с наложением административных границ районов Алтайского края.

Результаты

Динамика климатических характеристик по временным периодам

Сравнительный анализ климатических данных Алтайского края по трём временным периодам выявил существенную трансформацию климатических условий региона. На рис. 1 представлены по периодам среднегодовые значения температуры воздуха и суммы осадков с диапазонами их изменения, а также индекс континентальности Конрада.

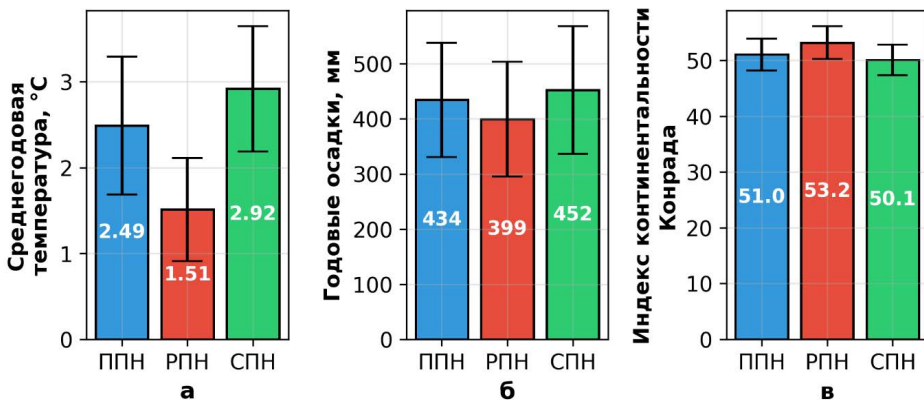


Рисунок 1. Динамика климатических характеристик по периодам
(а) среднегодовая температура воздуха; (б) среднегодовые суммы осадков; (в) индекс континентальности Конрада

Figure 1. Dynamics of climatic characteristics by period
(a) average annual air temperature; (b) average annual precipitation amounts; (c) Conrad's continentality index

Среднегодовая температура воздуха демонстрирует устойчивую тенденцию к потеплению. В РПН она составляла $1.51 \pm 0.60^\circ\text{C}$, в СПН повысилась до $2.92 \pm 0.73^\circ\text{C}$, что представляет собой увеличение на 1.41°C (93% от исходного значения). За ППН среднее значение составило $2.49 \pm 0.80^\circ\text{C}$. Изменение температурного режима характеризуется увеличением вариабельности: стандартное отклонение возросло с 0.60°C в РПН до 0.73°C в СПН и 0.80°C за ППН.

Годовая сумма осадков также продемонстрировала тенденцию к увеличению. В РПН средняя сумма осадков составляла 400 ± 104 мм, в СПН она возросла до 452 ± 116 мм, что соответствует приросту на 52 мм (13.2%). За ППН среднее значение составило 434 ± 104 мм. Важно отметить увеличение межгодовой изменчивости осадков: стандартное отклонение возросло с 104 мм до 116 мм в СПН, что указывает на нарастание нестабильности режима увлажнения.

Индекс континентальности Конрада показал обратную динамику: в РПН он достигал максимального значения 53.2, что свидетельствует о более резко континентальном характере климата. В СПН индекс снизился до 50.1, а за ППН составил 51.1. Снижение континентальности на 3.1 единицы (5.8%) связано с более интенсивным ростом зимних температур по сравнению с летними, что приводит к уменьшению годовой амплитуды температур.

Анализ линейных трендов за последнее десятилетие (2015-2024 гг.) выявил статистически значимое ($p < 0.05$) потепление на трёх станциях: Ключи ($+1.16^\circ\text{C}/10$ лет, $R^2 = 0.516$), Кулунда ($+1.02^\circ\text{C}/10$ лет, $R^2 = 0.589$) и Шипуново ($+12.65^\circ\text{C}/10$ лет, $R^2 = 0.496$). Для осадков значимые отрицательные тренды отмечены на станциях Ключи (-783.8 мм/10 лет, $R^2 = 0.624$) и Кулунда (-564.1 мм/10 лет, $R^2 = 0.609$). Станция Ребриха демонстрирует положительный тренд осадков ($+223.5$ мм/10 лет, $p = 0.050$).

На большинстве станций (26 из 31) тренды за 10-летний период статистически незначимы ($p > 0.05$) вследствие высокой межгодовой изменчивости климатических характеристик. Средний тренд температуры по всем станциям составляет $+0.99^\circ\text{C}/10$ лет, средний тренд осадков – -62 мм/10 лет.

Результаты кластерного анализа по временным периодам

Кластерный анализ выявил характерные особенности структуры климатического районирования в различных временных периодах (рис. 2). Оптимальное количество кластеров определялось по максимуму комбинированного показателя, учитывающего силуэтный коэффициент (максимальная компактность и разделенность кластеров) и индекс ARI (максимальное согласие с классическим районированием). Оптимальные решения отмечены на рисунке звёздочками.

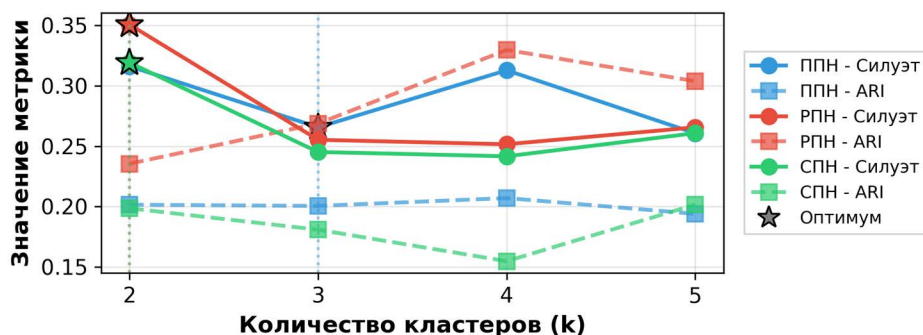


Рисунок 2. Оптимальное количество кластеров и качество кластеризации по периодам

Figure 2. Optimal number of clusters and clustering quality across periods

Для РПН и СПН оптимально выделение двух климатических районов с силуэтными коэффициентами 0.351 и 0.319 и индексами ARI 0.236 и 0.199 соответственно. Двухчастная структура отражает устойчивую дихотомию между влажным предгорным юго-востоком и засушливым степным северо-западом.

Для ППН оптимально выделение трёх климатических районов (силуэт 0.266, ARI 0.201). Формирование третьего переходного района при интегральном анализе отражает усложнение пространственной структуры климата, выявляемое при осреднении за длительный интервал, включающий различные этапы развития климатической системы.

Характеристика климатических районов

РПН. Район 1 (13 станций: Змеиногорск, Чарышское, Краснощеково, Солонешное, Усть-Калманка, Бийск-Зональная, Троицкое, Ребриха, Целинное, Барнаул, Тогул, Тальменка, Заринск) – горно-предгорный и лесостепной район с повышенным увлажнением. Среднегодовая температура $1.42 \pm 0.63^\circ\text{C}$, годовая сумма осадков 495 ± 69 мм, индекс континентальности Конрада 50.62 ± 2.05 . Район 2 (16 станций: Угловское, Рубцовск, Волчиха, Пospelиха, Шипуново, Ключи, Кулунда, Родино, Алейская, Мамонтово, Благовещенка, Славгород, Бaeво, Шелаболиха, Хабары, Камень-на-Оби) – степной северо-западный район с резко континентальным климатом и дефицитом увлажнения. Среднегодовая температура $1.59 \pm 0.58^\circ\text{C}$, годовая сумма осадков 325 ± 55 мм, индекс континентальности Конрада 55.28 ± 1.60 – максимальный по всем выделенным районам.

СПН. Район 1 (6 станций: Змеиногорск, Чарышское, Краснощеково, Солонешное, Усть-Чарышская, Тогул) – горно-предгорный район с максимальным увлажнением. Среднегодовая температура $2.82 \pm 0.68^\circ\text{C}$, годовая сумма осадков 555 ± 89 мм – максимальное значение по всем районам и периодам. Индекс континентальности Конрада 47.96 ± 2.47 – минимальный, что указывает на смягчение климата под влиянием орографического фактора. Район 2 (25 станций: Горняк, Угловское, Рубцовск, Волчиха, Пospelиха, Шипуново, Ключи, Кулунда, Родино, Алейская, Мамонтово, Благовещенка, Славгород, Ребриха, Бaeво, Шелаболиха, Барнаул, Хабары, Камень-на-Оби, Усть-Калманка, Бийск-Зональная, Троицкое, Целинное, Тальменка, Заринск) – степной и лесостепной район с дефицитом влаги. Среднегодовая температура $2.99 \pm 0.78^\circ\text{C}$ – максимальная по всем районам, годовая сумма осадков 377 ± 56 мм, индекс континентальности Конрада 51.62 ± 1.68 .

ППН. Анализ выявил оптимальность трёхкластерного решения. Район 1 (8 станций: Горняк, Краснощеково, Усть-Калманка, Шипуново, Усть-Чарышская, Целинное, Барнаул, Заринск) – переходный центральный лесостепной район со среднегодовой температурой $3.08 \pm 1.00^\circ\text{C}$ и годовой суммой осадков 449 ± 31 мм, индексом континентальности 48.95 ± 1.27 . Район 2 (16 станций: Угловское, Рубцовск, Волчиха, Пospelиха, Ключи, Кулунда, Родино, Алейская, Мамонтово, Благовещенка, Славгород, Ребриха, Бaeво, Шелаболиха, Хабары, Камень-на-Оби) – степной западный район со среднегодовой температурой $2.39 \pm 0.64^\circ\text{C}$ и годовой суммой осадков 366 ± 78 мм – минимальное

значение, индексом континентальности 53.22 ± 1.63 – максимальное значение. Район 3 (7 станций: Змеиногорск, Чарышское, Солонешное, Бийск-Зональная, Троицкое, Тогул, Тальменка) – горно-предгорный район со среднегодовой температурой $2.05 \pm 0.55^\circ\text{C}$ и годовой суммой осадков 575 ± 49 мм – максимальное значение, индексом континентальности 48.47 ± 2.59 .

Анализ главных компонент

Метод главных компонент – это метод снижения размерности данных путём выделения наиболее значимых направлений вариации. Главные компоненты – это новые переменные, представляющие линейные комбинации исходных признаков, упорядоченные по убыванию объясняемой дисперсии: первая компонента содержит максимум информации о различиях в данных, вторая – максимум из оставшейся вариативности. В данном исследовании PCA используется для сокращения коррелирующих климатических характеристик до независимого набора компонент. Анализ главных компонент показал высокую эффективность снижения размерности климатических данных во всех периодах (рис. 3-5). На рисунках показаны биplotты – графические представления многомерных данных, где станции отображаются цветными кругами, а климатические характеристики – векторами. Кумулятивная объяснённая дисперсия показывает общую долю дисперсии, объяснённую первыми k главными компонентами.

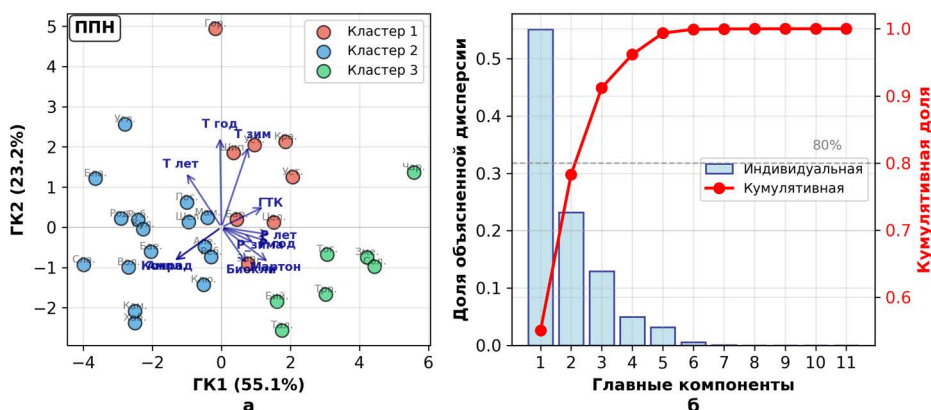


Рисунок 3. Анализ главных компонент для ППН (1927-2024 гг.): (а) биplot PCA с распределением станций по кластерам; (б) кумулятивная объяснённая дисперсия

Figure 3. Principal component analysis for FOP (1927-2024): (a) PCA biplot with station distribution by clusters; (b) cumulative explained variance

Первая главная компонента (ГК1) объясняет от 55.0% дисперсии в РПН до 56.9% в СПН, при промежуточном значении 55.1% для ППН. Эта компонента формирует основной градиент климатического разнообразия территории и характеризуется максимальными положительными нагрузками показателей увлажнения: годовых осадков (Р год), летних осадков (Р лет), зимних осадков (Р зим), индекса аридности де Мартона (Мартон) и биоклиматического потенциала (Биокли). Одновременно ГК1 имеет выраженную отри-

цательную нагрузку индекса континентальности Конрада (Конрад). Таким образом, ГК1 отражает градиент «увлажнение – континентальность»: станции с положительными значениями ГК1 характеризуются повышенным увлажнением и смягчённой континентальностью (горно-предгорный район), тогда как станции с отрицательными значениями – дефицитом влаги и резко континентальным климатом (степной район).

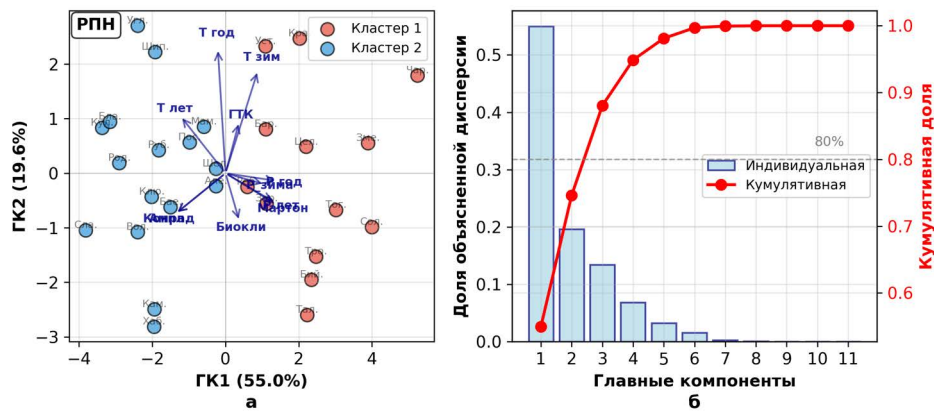


Рисунок 4. Анализ главных компонент для РПН (1927-1975 гг.): (а) биplot PCA с распределением станций по кластерам; (б) кумулятивная объяснённая дисперсия

Figure 4. Principal component analysis for EOP (1927-1975): (a) PCA biplot with station distribution by clusters; (b) cumulative explained variance

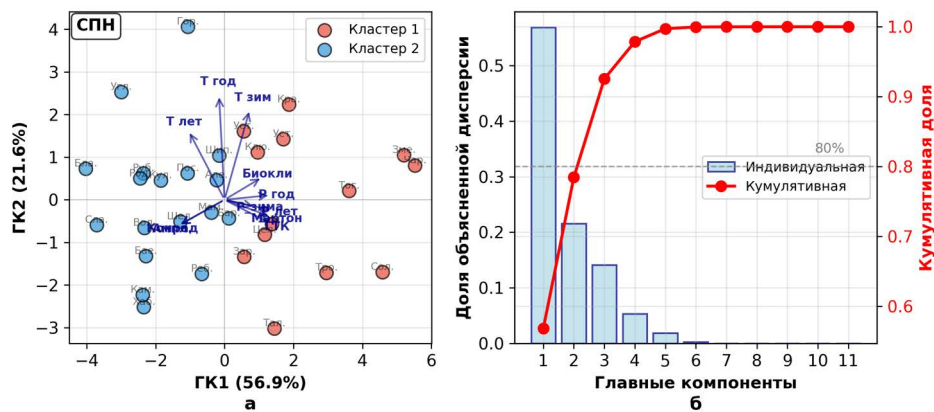


Рисунок 5. Анализ главных компонент для СПН (1976-2024 гг.): (а) биplot PCA с распределением станций по кластерам; (б) кумулятивная объяснённая дисперсия

Figure 5. Principal component analysis for MOP (1976-2024): (a) PCA biplot with station distribution by clusters; (b) cumulative explained variance

Вторая главная компонента (ГК2) объясняет от 19.6% дисперсии в РПН до 23.2% в ППН (21.6% в СПН) и определяется преимущественно температурными характеристиками: среднегодовой температурой (Т год), зимней температурой (Т зим) и летней температурой (Т лет). Векторы этих показате-

лей направлены в верхнюю часть биоплота. Дополнительный вклад в ГК2 вносит гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК). Станции с высокими положительными значениями ГК2 характеризуются более тёплым климатом, с отрицательными – более холодным.

Суммарная объяснённая дисперсия первых двух компонент составляет 74.6% для РПН, 78.3% для ППН и 78.5% для СПН. Увеличение объяснённой дисперсии от исторического к современному периоду может свидетельствовать об усилении роли основных климатических градиентов в условиях потепления, когда контрасты между влажными и засушливыми, тёплыми и холодными территориями становятся более выраженными.

Пространственное распределение станций в координатах ГК1-ГК2 демонстрирует чёткое разделение кластеров. В РПН и СПН два кластера разделяются преимущественно вдоль оси ГК1: горно-предгорные станции (кластер 1, красный) располагаются в правой части биоплота (высокие положительные значения ГК1), степные станции (кластер 2, синий) – в левой части (отрицательные значения ГК1). В ППН при трёхкластерном решении дополнительно выделяется переходный кластер (кластер 3, зелёный), занимающий промежуточное положение по оси ГК1 и характеризующийся средними значениями увлажнения.

Графики кумулятивной объяснённой дисперсии (рис. 3б-5б) показывают, что порог 80% достигается при использовании 3-4 главных компонент, однако для целей климатического районирования достаточно первых двух компонент, объясняющих основные закономерности пространственной дифференциации климата.

Иерархический кластерный анализ

Иерархический кластерный анализ подтверждает результаты k-средних кластеризации и позволяет визуализировать структуру климатических различий между станциями (рис. 6-8). Станции последовательно объединяются в кластеры на основе минимизации внутрикластерного евклидова расстояния по методу Уорда.

Для РПН и СПН дендрограммы демонстрируют чёткую двухчастную структуру с выраженной дихотомией между степными и горно-предгорными территориями. Расстояние между главными кластерами указывает на значительные климатические различия при простой пространственной организации.

Для ППН дендрограмма выявляет трёхкластерную структуру, что свидетельствует о проявлении дополнительной неоднородности при интегральном анализе. Формирование переходного центрального кластера отражает усложнение пространственной структуры климата при осреднении данных за длительный период.

Последовательность объединения станций хорошо согласуется с географическим положением и климатообразующими факторами. Горно-предгорные станции (Змеиногорск, Чарышское, Солонешное) демонстрируют высокую стабильность объединения во всех периодах, что обусловлено влия-

нием орографического фактора. Степные станции северо-запада (Кулунда, Родино, Славгород) также сохраняют постоянную принадлежность к одному кластеру.

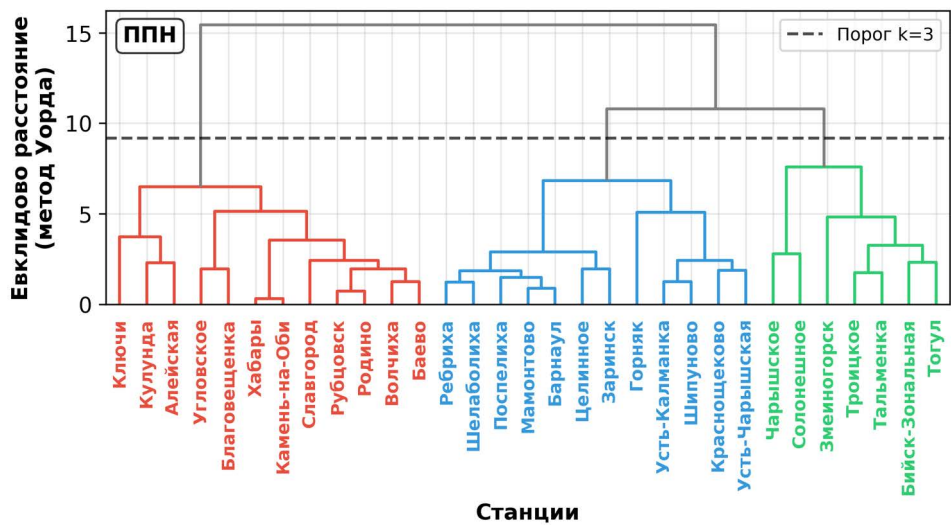


Рисунок 6. Дендрограмма иерархической кластеризации для ППН (1927-2024 гг.)
Figure 6. Hierarchical clustering dendrogram for FOP (1927-2024)

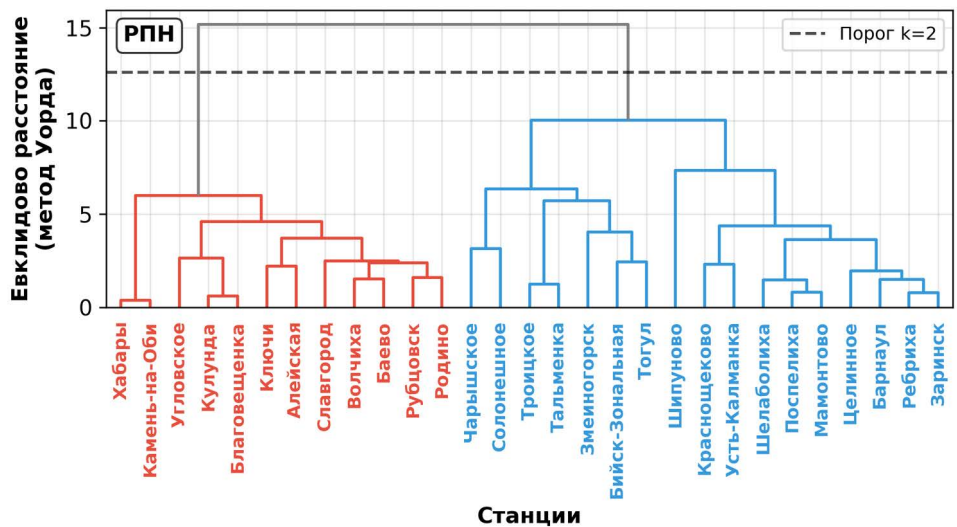


Рисунок 7. Дендрограмма иерархической кластеризации для РПН (1927-1975 гг.)
Figure 7. Hierarchical clustering dendrogram for EOP (1927-1975)

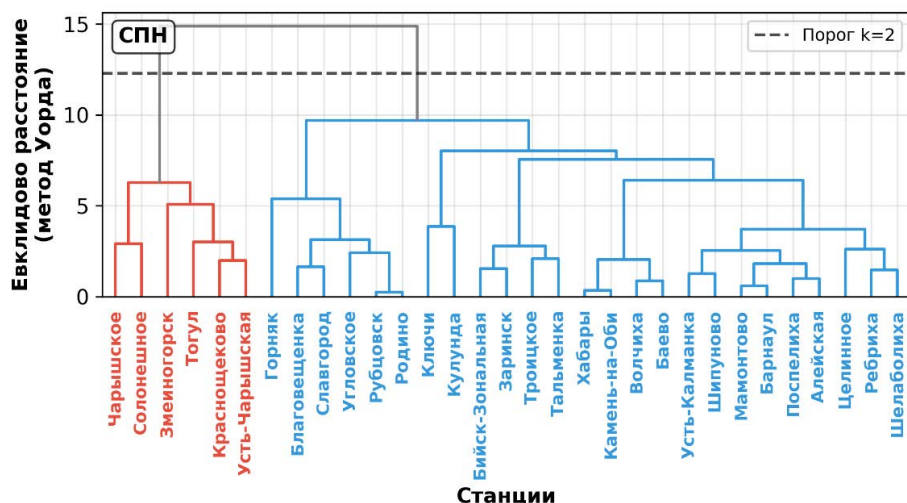


Рисунок 8. Дендрограмма иерархической кластеризации для СПН (1976-2024 гг.)

Figure 8. Hierarchical clustering dendrogram for MOP (1976-2024)

Картографический анализ климатического районирования

Картографический анализ показывает пространственное соответствие выделенных климатических районов классическому агроклиматическому районированию (рис. 9-12). Для административных районов без метеостанций кластерная принадлежность определена методом ближайшего соседа – присвоением класса ближайшей по географическому расстоянию станции с известной классификацией. Данный подход обеспечивает пространственную непрерывность и охват всей территории края.

Классическое районирование (рис. 9) характеризуется чётким зональным распределением: горно-предгорный район (кластер 1) охватывает юго-восток с повышенным увлажнением и смягчённой континентальностью; лесостепной переходный район (кластер 2) занимает центральную часть территории; степной район (кластер 3) располагается в западной и северо-западной частях края с максимальной континентальностью и дефицитом увлажнения.

В РПН (рис. 10) кластерный анализ выделяет два района, что отражает дихотомическую климатическую структуру исторического периода. Граница между кластерами проходит приблизительно по линии Камень-на-Оби – Барнаул – Рубцовск, разделяя более влажный юго-восток (495 ± 69 мм/год) и засушливый северо-запад (325 ± 55 мм/год). Двухчастная структура указывает на доминирование градиента увлажнения.

В СПН (рис. 11) также сохраняется двухкластерная структура, однако с существенно изменённым составом районов. Горно-предгорный кластер сократился до 6 станций, сохраняя ядро наиболее увлажнённых территорий (Чарышское, Солонешное, Змеиногорск, Тогул, Краснощеково, Усть-Чарышская) с максимальным увлажнением (555 ± 89 мм/год) и минимальной континентальностью (47.96). Степной и лесостепной кластер расширился до 25

станций, включая как собственно степные, так и переходные территории. Снижение силуэтного коэффициента с 0.351 до 0.319 указывает на некоторое размывание границ между районами в современный период.

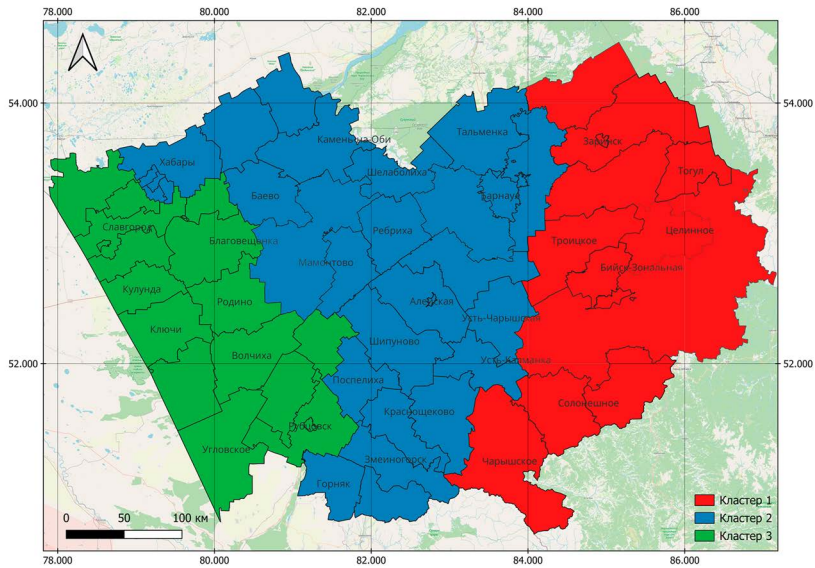


Рисунок 9. Сравнительный картографический анализ климатического районирования Алтайского края: классическое агроклиматическое районирование

Figure 9. Comparative cartographic analysis of climatic zoning in Altai Krai: classical agroclimatic zoning

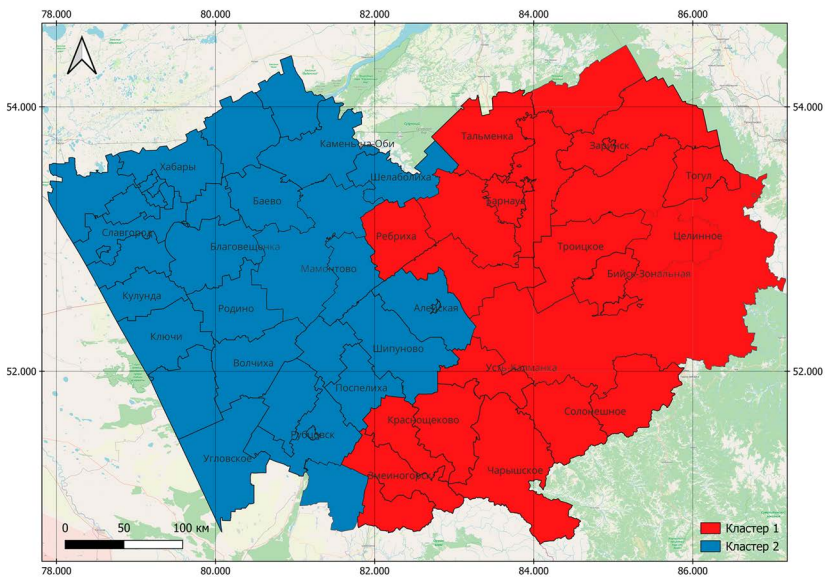


Рисунок 10. Сравнительный картографический анализ климатического районирования Алтайского края: кластеризация для РПН (1927-1975 гг.)

Figure 10. Comparative cartographic analysis of climatic zoning in Altai Krai: clustering for EOP (1927-1975)

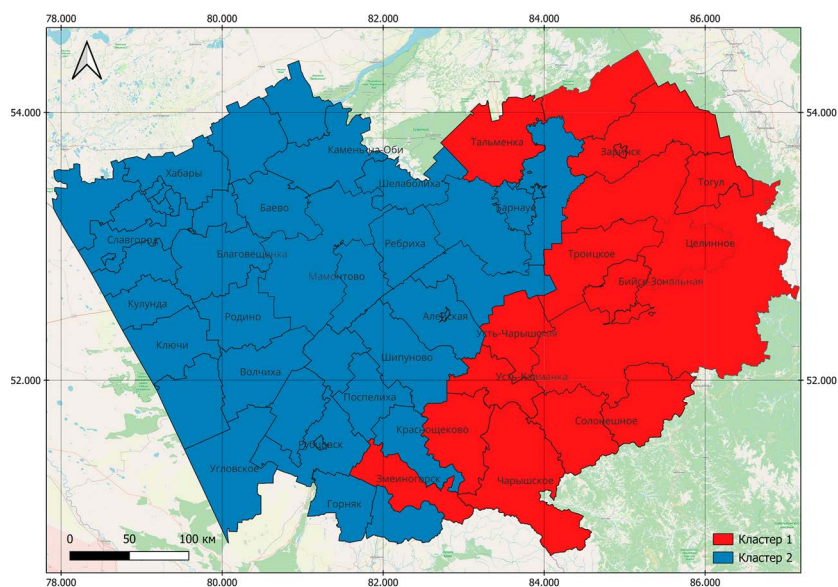


Рисунок 11. Сравнительный картографический анализ климатического районирования Алтайского края: кластеризация для СПН (1976-2024 гг.)

Figure 11. Comparative cartographic analysis of climatic zoning in Altai Krai: clustering for MOP (1976-2024)

Для ППН (рис. 12) выделяются три кластера, пространственное распределение которых отражает интегральные климатические характеристики за весь период наблюдений.

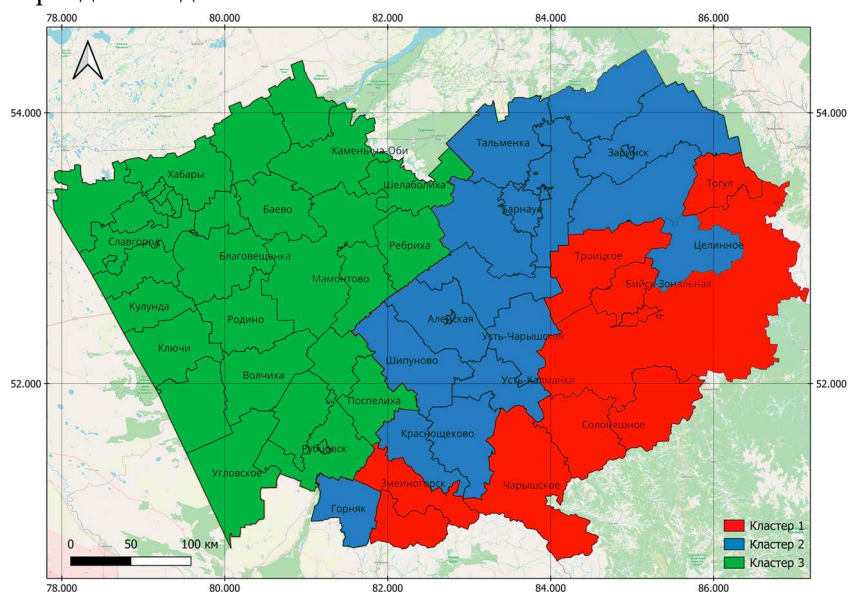


Рисунок 12. Сравнительный картографический анализ климатического районирования Алтайского края: кластеризация для ППН (1927-2024 гг.)

Figure 12. Comparative cartographic analysis of climatic zoning in Altai Krai: clustering for FOP (1927-2024)

Формирование третьего переходного района (8 станций) при интегральном анализе свидетельствует о выявлении дополнительной климатической неоднородности, не проявляющейся при анализе отдельных периодов. Индекс согласованности $ARI = 0.201$ подтверждает умеренную степень соответствия результатов кластеризации классическому районированию.

Сравнительный анализ карт районирования выявляет ключевую особенность: устойчивость двухчастной структуры (влажный юго-восток и засушливый северо-запад) в отдельных периодах при формировании трёхчастной структуры при интегральном анализе. Это обусловлено тем, что при осреднении за длительный период проявляются различия в темпах климатических изменений между отдельными территориями, формирующие переходную зону с промежуточными характеристиками.

Дискуссия

Проведённый сравнительный анализ климатического районирования Алтайского края выявил существенные изменения климатической структуры региона.

Климатические изменения и их пространственная дифференциация

Установленное повышение среднегодовой температуры на 1.41°C между РПН и СПН согласуется с общемировыми тенденциями потепления климата (IPCC, 2021) и региональными оценками для Сибири (Третий оценочный доклад..., 2022). Темпы потепления в Алтайском крае ($0.29^{\circ}\text{C}/\text{декада}$) превышают средние глобальные значения ($0.18^{\circ}\text{C}/\text{декада}$), характерные для континентальных регионов Северной Евразии (Груза и др., 2001; Катцов, Порфирьев, 2012).

Увеличение годовой суммы осадков на 52 мм (13.2%) сопровождается нарастанием их межгодовой изменчивости (от 104 до 116 мм), что создаёт дополнительные риски для сельского хозяйства. Снижение континентальности на 3.1 единицы индекса Конрада объясняется более интенсивным потеплением в холодный сезон, что типично для высоких широт (Шерстюков, 2008).

Структура климатического районирования

Устойчивость двухчастной структуры как в РПН, так и в СПН свидетельствует о стабильности фундаментальных климатообразующих факторов. Дихотомия между влажным горно-предгорным юго-востоком и засушливым степным северо-западом сохраняется на протяжении всего периода наблюдений.

Формирование трёхкластерной структуры при интегральном анализе за ППН отражает проявление дополнительной климатической неоднородности при осреднении за длительный период. Третий переходный район формируется из станций с различной динамикой изменений между периодами.

Станции Чарышское, Солонешное, Тогул устойчиво входят в более влажный кластер независимо от анализируемого периода, а степные станции Кулунда, Славгород, Родино стабильно относятся к засушливому кластеру,

что подтверждает ведущую роль орографического фактора и удалённости от путей переноса влаги.

Качество кластеризации и соответствие эталонному районированию

Наиболее высокий силуэтный коэффициент для РПН (0.351) указывает на чёткую дихотомию. Снижение силуэта в СПН (0.319) может свидетельствовать о размывании границ между районами в условиях потепления. Умеренные значения ARI (0.199-0.236) объясняются различием в числе кластеров: классическое районирование включает три района, тогда как для РПН и СПН оптимально два.

Картографический анализ подтвердил согласованность результатов кластеризации с географическим положением станций и климатообразующими факторами. Устойчивость границ горно-предгорного района обусловлена выраженным орографическим влиянием, тогда как состав степного и переходного районов демонстрирует определённую вариабельность между периодами.

Заключение

Сравнительный анализ климатического районирования Алтайского края позволил получить следующие результаты.

Установлено потепление на 1.41°C между РПН и СПН при увеличении годовых осадков на 52 мм (13.2%) и снижении континентальности на 3.1. Выявлено нарастание межгодовой изменчивости осадков и температуры, что указывает на увеличение климатических рисков.

Для РПН и СПН оптимальным является выделение двух климатических районов (силуэт 0.351 и 0.319 соответственно), для ППН – трёх районов (силуэт 0.266). Устойчивость двухчастной структуры свидетельствует о стабильности дихотомии между влажным горно-предгорным юго-востоком и засушливым степным северо-западом. Формирование третьего переходного района при интегральном анализе отражает накопление климатической неоднородности за длительный период.

Горно-предгорные и степные территории демонстрируют стабильность принадлежности к кластерам во всех периодах, что обусловлено влиянием орографии и удалённости от путей переноса влаги. Станции переходной зоны характеризуются вариабельностью кластерной принадлежности между периодами.

Горно-предгорный район характеризуется максимальным увлажнением (495-555 мм/год) и минимальной континентальностью (47.96-50.62). Степной северо-западный район демонстрирует максимальную континентальность (51.62-55.28) и минимальное увлажнение (325-377 мм/год). Прирост осадков отмечен в обоих районах, однако различная интенсивность потепления определяет дифференцированный отклик на климатические изменения.

Подтверждена эффективность кластерного анализа для выявления климатических границ и оценки их временной динамики. Первые две главные компоненты, выделенные методом сингулярного разложения корреляционной матрицы стандартизированных данных, объясняют 74.6-78.5% дисперсии

климатических характеристик во всех периодах, что свидетельствует о ведущей роли градиентов континентальности, увлажнения и температуры.

Картографический анализ подтвердил согласованность кластеров с классическим агроклиматическим районированием и географическим положением станций. Устойчивость горно-предгорного района и двухчастной структуры отражают влияние фундаментальных климатообразующих факторов.

Полученные результаты имеют практическое значение для актуализации регионального климатического районирования территорий, разработки стратегий адаптации для регионов и отраслей экономики к изменениям климата и совершенствования региональных климатических моделей. Устойчивость климатических границ при значительном изменении климатических характеристик требует учёта как пространственной, так и временной составляющих при планировании экономической деятельности.

Список литературы

Агроклиматические ресурсы Алтайского края (1971) Л., Гидрометеиздат, 155 с.

Айвазян, С.А., Бухштабер, В.М., Енюков, И.С., Мешалкин, Л.Д. (1989) *Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности*, М., Финансы и статистика, 607 с.

Алисов, Б.П. (1969) *Климат СССР*, М., Высшая школа, 104 с.

Берг, Л.С. (1938) *Основы климатологии*, М., Географгиз, 455 с.

Виноградова, В.В., Титкова, Т.Б. (2025) Климатические предпосылки изменений границ ландшафтных зон и подзон в Европейской части России и Западной Сибири, *Известия Российской академии наук. Серия географическая*, т. 88, № 3, с. 281-295.

Воейков, А.И. (1884) *Климаты земного шара, в особенности России*, СПб., Картографическое заведение А. Ильина, 640 с.

Высоцкий, Г.Н. (1900) О гидрологическом и лесном значении древесной растительности, *Почвоведение*, № 3, с. 1-20.

Груза, Г.В., Ранькова, Э.Я., Рочева, Э.В., Смирнов, В.Д. (2001) О неоднородности изменения температуры воздуха на территории России в конце XX столетия, *Метеорология и гидрология*, № 7, с. 5-17.

Катцов, В.М., Порфирьев, Б.Н. (2012) Климатические изменения в Арктике: последствия для окружающей среды и экономики, *Арктика: экология и экономика*, № 2 (6), с. 66-79.

Кирста, Ю.Б., Зинченко, Г.С. и др. (2002) Оценка и прогноз агроклиматического потенциала Алтайского края в условиях современных изменений климата, *Известия АлтГУ*, № 3, с. 85-90.

Кислов, А.В. (2011) *Климатология*, М., Академия, 224 с.

Лавров, А.С., Стерин, А.М. (2024) Детализация климатических трендов температуры и осадков на территории России с использованием квантильной регрессии и кластеризации, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 10, № 2, с. 219-243, doi: 10.21513/0207-2564-2024-2-219-243.

Паромов, В.В., Земцов, В.А., Копысов, С.Г. (2017) Климат Западной Сибири в фазу замедления потепления (1986-2015 гг.) и прогнозирование гидроклиматических ресурсов на 2021-2030 гг., *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, т. 328, № 1, с. 62-74.

Поляков, Д.В., Кужевская, И.В. (2012) Применение кластерного анализа для оценки температурно-влажностных условий в период активной вегетации на территории юга Западной Сибири и его связь с гидротермическим коэффициентом ГТК Селянинова, *Вестник Томского государственного университета*, № 360, с. 188-192.

Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации (2022) Под ред. В.М. Катцова, Росгидромет, Санкт-Петербург, Научные технологии, 676 с.

Харман, Г. (1972) *Современный факторный анализ*, М., Статистика, 486 с.

Шерстюков, Б.Г. (2008) *Региональные и сезонные закономерности изменений современного климата*, Обнинск, ВНИИГМИ-МЦД, 247 с.

Carvalho, M.J., Melo-Gonçalves, P., Teixeira, J.C., Rocha, A. (2016) Regionalization of Europe based on a K-Means Cluster Analysis of the climate change of temperatures and precipitation, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, vol. 94, pp. 22-28.

Conrad, V. (1946) Usual formulas of continentality and their limits of validity, *Transactions American Geophysical Union*, vol. 27, pp. 663-664.

De Martonne, E. (1926) Une nouvelle fonction climatologique: L'indice d'aridité, *La Météorologie*, vol. 2, p. 449-458.

Everitt, B.S., Landau, S., Leese, M., Stahl, D. (2011) *Cluster analysis*, John Wiley & Sons, 330 p.

Hubert, L., Arabie, P. (1985) Comparing partitions, *Journal of Classification*, vol. 2, pp. 193-218.

IPCC (2021) *Climate Change 2021: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report*, Cambridge University Press.

Jolliffe, I.T., Cadima, J. (2016) Principal component analysis: a review and recent developments, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 374, no. 2065, p. 20150202.

MacQueen, J. (1967) Some methods for classification and analysis of multivariate observations, *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, vol. 1, p. 281-297.

Praene, J.P., Malet-Damour, B., Radanielina, M.H., Fontaine, L., Rivière, G. (2019) GIS-based approach to identify climatic zoning: A hierarchical clustering on principal component analysis, *Building and Environment*, vol. 164, art. 106330.

Rousseeuw, P.J. (1987) Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 20, pp. 53-65.

Ward, J.H. (1963) Hierarchical grouping to optimize an objective function, *Journal of the American Statistical Association*, vol. 58, no. 301, pp. 236-244.

Wilks, D. (2011) *Statistical methods in the atmospheric sciences*, Academic Press, 676 p.

References

Agroklimaticheskie resursy Altajskogo kraya [Agroclimatic resources of Altai Krai] (1971) Gidrometeoizdat, Leningrad, Russia, 155 p.

Ajvazyan, S.A., Buhshtaber, V.M., Enyukov, I.S., Meshalkin, L.D. (1989) *Prikladnaya statistika: Klassifikatsiya i snizhenie razmernosti* [Applied statistics: Classification and dimensionality reduction], Finansy i statistika, Moscow, Russia, 607 p.

Alisov, B.P. (1969) *Klimat SSSR* [Climate of the USSR], Vysshaya shkola, Moscow, Russia, 104 p.

Berg, L.S. (1938) *Osnovy klimatologii* [Fundamentals of climatology], Geografiz, Moscow, Russia, 455 p.

Vinogradova, V.V., Titkova, T.B. (2025) Klimaticheskie predposylki izmeneniy granits landshaftnykh zon i podzon v Evropeyskoy chasti Rossii i Zapadnoy Sibiri [Climatic prerequisites for changes in the boundaries of landscape zones and subzones in the European part of Russia and Western Siberia], *Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Seriya geograficheskaya*, vol. 88, no. 3, pp. 281-295.

Gruza, G.V., Ran'kova, E.Ya., Rocheva, E.V., Smirnov, V.D. (2001) O neodnorodnosti izmeneniya temperatury vozduha na territorii Rossii v konce XX stoletiya [On the heterogeneity of air temperature changes in Russia at the end of the 20th century], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 7, pp. 5-17.

Harman, G. (1972) *Sovremennyy faktornyy analiz* [Modern factor analysis], Statistika, Moscow, Russia, 486 p.

Katsov, V.M., Porfir'ev, B.N. (2012) Klimaticheskie izmeneniya v Arktike: posledstviya dlya okruzhayushchej sredy i ekonomiki [Climate changes in the Arctic: consequences for environment and economy], *Arktika: ekologiya i ekonomika*, no. 2(6), pp. 66-79.

Kirsta, Yu.B., Zinchenko, G.S., et al. (2002) Ocenka i prognoz agroklimaticheskogo potentsiala Altajskogo kraya v usloviyah sovremennykh izmenenij klimata [Assessment and forecast of agroclimatic potential of Altai Krai

under modern climate change], *Izvestiya AltGU* [Izvestiya of Altai State University], no. 3, pp. 85-90.

Kislov, A.V. (2011) *Klimatologiya* [Climatology], Akademiya, Moscow, Russia, 224 p.

Lavrov, A.S., Sterin, A.M. (2024) Detalizatsiya klimaticheskikh trendov temperatury i osadkov na territorii Rossii s ispol'zovaniem kvantil'noy regressii i klasterizatsii [Detailing climate trends of temperature and precipitation in Russia using quantile regression and clustering], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, vol. 10, no. 2, pp. 219-243, doi: 10.21513/0207-2564-2024-2-219-243.

Paromov, V.V., Zemtsov, V.A., Kopysov, S.G. (2017) Klimat Zapadnoy Sibiri v fazu zamedleniya potepleniya (1986-2015 gg.) i prognozirovanie gidroklimaticheskikh resursov na 2021-2030 gg. [Climate of Western Siberia in the phase of warming slowdown (1986-2015) and forecasting of hydroclimatic resources for 2021-2030], *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, vol. 328, no. 1, pp. 62-74.

Polyakov, D.V., Kuzhevskaya, I.V. (2012) Primenenie klasternogo analiza dlya otsenki temperaturno-vlazhnostnykh usloviy v period aktivnoy vegetatsii na territorii yuga Zapadnoy Sibiri i ego svyaz' s gidrotermicheskim koeffitsientom GTK Selyaninova [Application of cluster analysis to assess temperature-moisture conditions during the active vegetation period in the south of Western Siberia and its relation to Selyaninov's hydrothermal coefficient], *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta*, no. 360, pp. 188-192.

Sherstyukov, B.G. (2008) *Regional'nye i sezonnye zakonomernosti izmenenij sovremennogo klimata* [Regional and seasonal patterns of modern climate changes], VNIIGMI-MCD, Obninsk, Russia, 247 p.

Tretij ocenochnyj doklad Rosgidrometa ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossijskoj Federacii [The third assessment report on climate change and its consequences in the territory of the Russian Federation] (2022) In V.M. Kattsov (ed.), Roshydromet, Science-intensive Technologies, Saint Petersburg, Russia, 676 p.

Voeikov, A.I. (1884) *Klimaty zemnogo shara, v osobennosti Rossii* [Climates of the Earth, especially Russia], Kartograficheskoe zavedenie A. Il'ina, St. Petersburg, Russia, 640 p.

Vysotskij, G.N. (1900) O gidrologicheskom i lesnom znachenii drevesnoj rastitel'nosti [On the hydrological and forest significance of woody vegetation], *Pochvovedenie* [Pedology], no. 3, pp. 1-20.

Carvalho, M.J., Melo-Gonçalves, P., Teixeira, J.C., Rocha, A. (2016) Regionalization of Europe based on a K-Means Cluster Analysis of the climate change of temperatures and precipitation, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, vol. 94, pp. 22-28.

Conrad, V. (1946) Usual formulas of continentality and their limits of validity, *Transactions American Geophysical Union*, vol. 27, pp. 663-664.

De Martonne, E. (1926) Une nouvelle fonction climatologique: L'indice d'aridité, *La Météorologie*, vol. 2, p. 449-458.

Everitt, B.S., Landau, S., Leese, M., Stahl, D. (2011) *Cluster analysis*, John Wiley & Sons, 330 p.

Hubert, L., Arabie, P. (1985) Comparing partitions, *Journal of Classification*, vol. 2, pp. 193-218.

IPCC (2021) *Climate Change 2021: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report*, Cambridge University Press.

Jolliffe, I.T., Cadima, J. (2016) Principal component analysis: a review and recent developments, *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, vol. 374, no. 2065, p. 20150202.

MacQueen, J. (1967) Some methods for classification and analysis of multivariate observations, *Proceedings of the Fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability*, vol. 1, p. 281-297.

Praene, J.P., Malet-Damour, B., Radanielina, M.H., Fontaine, L., Rivière, G. (2019) GIS-based approach to identify climatic zoning: A hierarchical clustering on principal component analysis, *Building and Environment*, vol. 164, art. 106330.

Rousseeuw, P.J. (1987) Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis, *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 20, pp. 53-65.

Ward, J.H. (1963) Hierarchical grouping to optimize an objective function, *Journal of the American Statistical Association*, vol. 58, no. 301, pp. 236-244.

Wilks, D. (2011) *Statistical methods in the atmospheric sciences*, Academic Press, 676 p.

Статья поступила в редакцию (Received): 20.04.2026.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 10.05.2026.

Принята к публикации (Accepted): 27.05.2026.

Для цитирования / For citation

Копылов, В.Н., Федоров, Д.С. (2026) Кластерный анализ климатических характеристик для районирования территории в условиях изменения климата на примере Алтайского края, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 12, № 3, с. 362-383, doi:10.24412/2410-8758-2026-3-362-383.

Kopylov, V.N., Fedorov, D.S. (2026) Cluster analysis of climatic characteristics for territorial zoning in the context of climate change: a case study of the Altai Krai, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 12, no. 3, pp. 362-383, doi:10.24412/2410-8758-2026-3-362-383.