



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2024. Т. 24, вып. 3. С. 167–171

*Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences*, 2024, vol. 24, iss. 3, pp. 167–171

<https://geo.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1819-7663-2024-24-3-167-171>, EDN: FRPQMK

Научная статья  
УДК 551.50:633.1

## Статистический анализ изменения температуры воздуха по данным многолетних наблюдений Метеорологической обсерватории имени В. А. Михельсона РГАУ – МСХА



А. А. Быстров<sup>1</sup>✉, А. И. Белолубцев<sup>1</sup>, И. А. Кузнецов<sup>1</sup>, И. А. Охлопков<sup>1</sup>, Ю. А. Спирин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Российский государственный аграрный университет МСХА имени К. А. Тимирязева, Россия, 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 12

<sup>2</sup>Институт географии РАН, Россия, 117312, г. Москва, ул. Вавилова, д. 37

Быстров Андрей Алексеевич, аспирант, ассистент кафедры метеорологии и климатологии, [Dywarana@gmail.com](mailto:Dywarana@gmail.com), AuthorID: 1155753

Белолубцев Александр Иванович, доктор сельскохозяйственных наук, профессор, заведующий кафедрой метеорологии и климатологии, [abelolyubcev@rgau-msha.ru](mailto:abelolyubcev@rgau-msha.ru), <https://orcid.org/0000-0002-3562-9330>, AuthorID: 272616

Кузнецов Иван Андреевич, аспирант, ассистент кафедры метеорологии и климатологии, и. о. директора метеорологической обсерватории имени В. А. Михельсона, [meteostation@rgau-msha.ru](mailto:meteostation@rgau-msha.ru), AuthorID: 1203167

Охлопков Иван Александрович, аспирант, ассистент кафедры метеорологии и климатологии, [okhlopkov.meteo@rgau-msha.ru](mailto:okhlopkov.meteo@rgau-msha.ru), <https://orcid.org/0000-0002-6543-7364>, AuthorID: 1158971

Спирин Юрий Александрович, кандидат географических наук, научный сотрудник лаборатории гидрологии, [spirin.yuriy@rgau-msha.ru](mailto:spirin.yuriy@rgau-msha.ru), <https://orcid.org/0000-0003-3481-9666>, AuthorID: 887382

**Аннотация.** Целью исследования является оценка динамики изменения показателей температуры воздуха и ее влияния на агрономические системы на основе многолетних наблюдений Метеорологической обсерватории имени В. А. Михельсона Российского государственного аграрного университета МСХА имени К. А. Тимирязева (РГАУ – МСХА). **Материалы и методы.** С помощью программы Mathcad были построены графики изменения среднегодовых температур с использованием многочлена аппроксимации третьего порядка, графики теоретической нормальной плотности распределения и нормальной функции распределения температур, а также графики внутригодового распределения температуры за 30 лет. **Результаты исследования и их обсуждение.** Рассчитаны величины относительной погрешности среднегодовых температур, выполнена проверка нормального распределения среднегодовых температур по критерию Пирсона, после чего была найдена величина вероятности отклонения эмпирических частот попадания в интервалы от теоретических частот. **Заключение.** В результате исследований установлен существенный рост среднегодовых показателей температуры воздуха на фоне общего сокращения продолжительности холодного периода. Повышение температуры за период 1961–1990 гг. составил 0.9 °С, что существенно выше средних значений по земному шару. Результаты исследования отображают общую тенденцию потепления в условиях глобального изменения климата и могут использоваться для улучшения прогнозирования погодных условий, а также оптимизации технологических процессов в растениеводстве.

**Ключевые слова:** температура воздуха, оперативная климатическая норма, историческая климатическая норма, внутригодовое распределение температур, функция распределения среднегодовых температур

**Для цитирования:** Быстров А. А., Белолубцев А. И., Кузнецов И. А., Охлопков И. А., Спирин Ю. А. Статистический анализ изменения температуры воздуха по данным многолетних наблюдений Метеорологической обсерватории имени В. А. Михельсона РГАУ – МСХА // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2024. Т. 24, вып. 3. С. 167–171. <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2024-24-3-167-171>, EDN: FRPQMK

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

**Statistical analysis of air temperature changes according to long-term observations of the V. A. Mikhelson Meteorological Observatory of RSAU – MTAA**

А. А. Bystrov<sup>1</sup>✉, А. I. Belolubtsev<sup>1</sup>, I. A. Kuznetsov<sup>1</sup>, I. A. Okhlopkov<sup>1</sup>, Yu. A. Spirin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, 12 Pryanishnikov St., Moscow 127434, Russia

<sup>2</sup>Institute of Geography RAS, 37 Vavilov St., Moscow 117312, Russia

Andrey A. Bystrov, [Dywarana@gmail.com](mailto:Dywarana@gmail.com), AuthorID: 1155753

Alexander I. Belolubtsev, [abelolyubcev@rgau-msha.ru](mailto:abelolyubcev@rgau-msha.ru), <https://orcid.org/0000-0002-3562-9330>, AuthorID: 272616

Ivan A. Kuznetsov, [meteostation@rgau-msha.ru](mailto:meteostation@rgau-msha.ru), AuthorID: 1203167

Ivan A. Okhlopkov, [okhlopkov.meteo@rgau-msha.ru](mailto:okhlopkov.meteo@rgau-msha.ru), <https://orcid.org/0000-0002-6543-7364>, AuthorID: 1158971

Yuri A. Spirin, [yuriy@rgau-msha.ru](mailto:yuriy@rgau-msha.ru), <https://orcid.org/0000-0003-3481-9666>, AuthorID: 887382

© Быстров А. А., Белолубцев А. И., Кузнецов И. А., Охлопков И. А., Спирин Ю. А., 2024



**Abstract. Introduction.** The purpose of the study is to assess the dynamics of changes in air temperature indicators and its impact on agronomic systems, based on long-term observations of the V. A. Mikhelson Meteorological Observatory of RSAU – MTA. **Materials and Methods.** Using the Mathcad program, graphs of changes in average annual temperatures were constructed using a third-order approximation polynomial, graphs of the theoretical normal density distribution and normal temperature distribution function, as well as graphs of intra-annual temperature distribution for 30 years. **Research results and Discussion.** The values of the relative error of average annual temperatures were calculated, the normal distribution of average annual temperatures was checked using the Pearson criterion, after which the probability of deviation of the empirical hours falling into intervals from the theoretical hours was found. **Conclusion.** As a result of the research, a significant increase in average annual air temperature was established against the background of a general reduction in the duration of the cold period. Increase in temperature over the period 1961–1990 amounted to 0.9 °C, which is significantly higher than the average values for the globe. The results of the study reflect the general trend of warming in the context of global climate change and can be used to improve the forecasting of weather conditions, as well as to optimize technological processes in crop production.

**Keywords:** air temperature, operational climate norm, historical climate norm, intra-annual temperature distribution, distribution function of average annual temperatures

**For citation:** Bystrov A. A., Belolubtsev A. I., Kuznetsov I. A., Okhlopov I. A., Spirin Yu. A. Statistical analysis of air temperature changes according to long-term observations of the V. A. Mikhelson Meteorological Observatory of RSAU – MTA. *Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences*, 2024, vol. 24, iss. 3, pp. 167–171 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2024-24-3-167-171>, EDN: FRPQMK

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

## Введение

Агрометеорологические параметры играют важную роль в агрономической практике, оказывая непосредственное влияние на рост, развитие и продуктивность сельскохозяйственных культур. Изучение динамики изменений температуры воздуха и режима осадков помогает оптимизировать производство сельскохозяйственной продукции и разрабатывать методы борьбы с климатическими рисками, позволяет прогнозировать погоду и определять оптимальные сроки посева и уборки [1–3].

Целью исследования является оценка динамики изменения показателей температуры воздуха и её влияния на агрономические системы на основе многолетних наблюдений Метеорологической обсерватории имени В. А. Михельсона РГАУ – МСХА. Статистические гипотезы, выдвигаемые в статье, позволяют лучше интерпретировать данные за указанные периоды климатических эпох, а также показывают общую тенденцию к потеплению. На фоне глобального изменения климата подтверждение полученных результатов является важным аспектом в понимании причинно-следственных связей процессов трансформации климата со всеми вытекающими последствиями. Полученные результаты позволяют качественно проанализировать характер изменения температурного фона региона за прошлые десятилетия, что позволит в будущем более грамотно и тщательно планировать ведение сельского хозяйства и разработку мелиоративных мероприятий с целью минимизации ущерба от климатических рисков.

В данной работе выполнен статистический анализ и сравнение оперативной и исторической климатических норм с целью выявления характера изменчивости и динамики климата в условиях конкретного региона.

Результаты проведенного исследования могут быть использованы для разработки рекомендаций по эффективному и безопасному производ-

ству сельскохозяйственной продукции, охране окружающей среды и адаптации отраслей экономики к изменению климата. На основании данных об изменении средних значений температур возможно создание более точных климатических прогнозов, улучшение системы анализа и прогноза агрометеорологических параметров, оптимизации производственного процесса, условий роста, развития и продуктивности сельскохозяйственных растений [4–6].

## Материалы и методика исследований

Исследования проводились на базе Метеорологической обсерватории имени В. А. Михельсона и полевой опытной станции РГАУ – МСХА. На полях селекционного севооборота возделываются различные зерно-пропашные культуры, в числе которых озимая тритикале и озимая пшеница, картофель и др.

Территория полевой станции характеризуется умеренно континентальным климатом с выраженными признаками сезонности. Среднегодовая температура составляет 6,4 °C, при этом самым холодным месяцем является январь, а самым теплым – июль. Вегетационный период здесь длится от 100 до 150 дней, а количество выпадающих атмосферных осадков в течение года находится в пределах от 610 до 710 мм, с большей их частью, приходящейся на летний период [7].

В работе использованы статистические методы для анализа данных в программной среде Mathcad и Excel. Построены графики, которые отображают динамику среднегодовой температуры за 30 лет, с использованием многочлена аппроксимации третьего порядка был определен общий тренд в росте температуры за прошедшие десятилетия. Кроме того, были построены графики теоретической нормальной плотности распределения и нормальной функции распределения температуры, а также внутригодового распределения температуры за тот же пери-



од с целью проверки статистических гипотез на предмет корректности использования данных для анализа изменения температуры в разные климатические эпохи. Была рассчитана относительная погрешность среднегодовых температур и произведена проверка нормального распределения этих температур с помощью критерия Пирсона. Затем была определена вероятность отклонения эмпирических частот попадания в интервалы от теоретических частот.

### Результаты исследования и их обсуждение

Статистический анализ изменения среднегодовой температуры и распределения среднемесячных ее значений в годовом ходе за период с 1961 по 1990 г. выполнен с использованием многолетнего ряда наблюдений Метеорологической обсерватории имени В. А. Михельсона. Проведен анализ роста средних значений температуры как внутри года, так и в целом за исследуемые периоды климатических эпох.

На первом этапе рассчитаны значения среднегодовых температур воздуха за 1961–1990 гг. и определен многочлен аппроксимации третьего порядка (линейный тренд) (рис. 1).

В изучаемый период температура приземного слоя воздуха, превышающая отметки 0°C и 5°C, наблюдалась в течение семи месяцев, больше 10°C – пяти месяцев. Значение среднегодовой температуры за 30 лет с 1961 по 1990 г. составляет 5,2°C. Многочлен аппроксимации третьего порядка был построен для более точного отображения линии тренда и в данном случае указывает на рост температурного фона для данного региона на 0,9°C, что подтверждает общую тенденцию к росту температуры воздуха [8].

Осреднение по температурам трех и пяти смежных лет (скользящая средняя величина) ис-

пользуется для сглаживания временных рядов и выявления долгосрочных тенденций изменения климата. Это позволяет устранить краткосрочные колебания и шумы в данных, чтобы выделить более общую картину изменения климата на протяжении длительного периода.

Для более детального анализа осредненных данных, помимо графического анализа изменения среднегодовой температуры, линейного тренда и многочленов аппроксимации, был проведен расчет относительной погрешности данных многолетней среднегодовой температуры. Для этого были посчитаны вспомогательные средние годовые температуры, выполнена смещенная и несмещенная оценка коэффициента автокорреляции между смежными членами ряда, рассчитаны средние и случайные квадратические отклонения, а также коэффициент вариации.

Следующим этапом является проверка ряда на достаточную продолжительность путем расчета относительной погрешности многолетней среднегодовой температуры [9]:

$$\epsilon = \frac{\Delta T_S}{T_S} \cdot 100 = 4.59,$$

где  $\Delta T_S$  – случайные среднеквадратические погрешности выборочных средних значений,  $T_S$  – вспомогательные значения среднегодовой температуры.

Так как значение не превышает 10%, можно считать, что период наблюдений за среднегодовыми температурами наблюдаемого периода с 1961 по 1990 г. достаточен для формирования закона распределения [9].

По уравнению Гаусса [10, с. 8–32] выполнено построение теоретической нормальной плотности распределения среднегодовых температур (рис. 2).

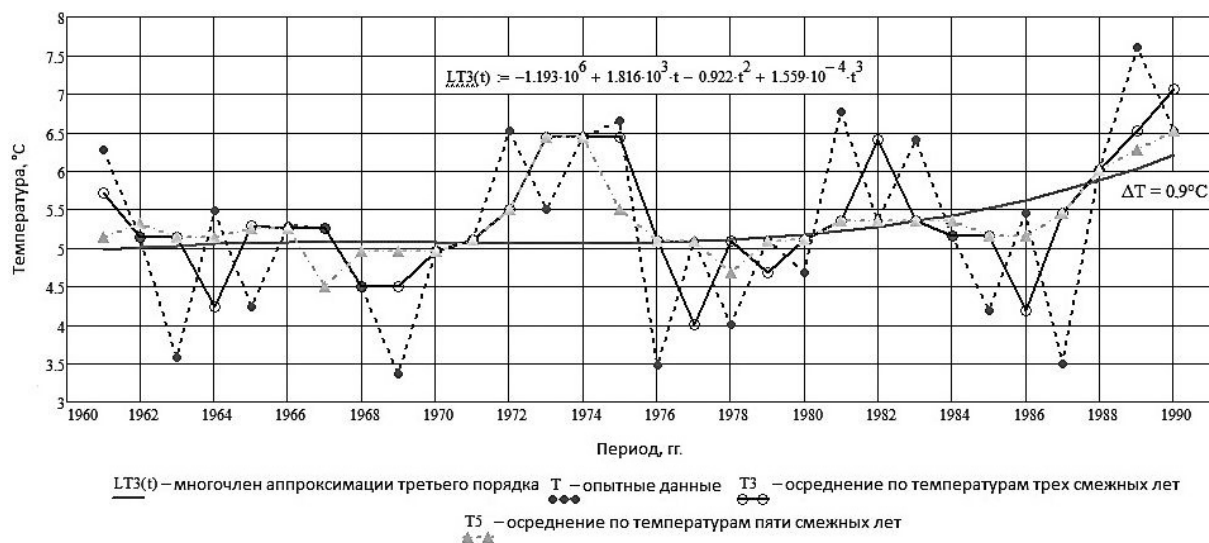


Рис. 1. Среднегодовые температуры за период с 1961 по 1990 г.

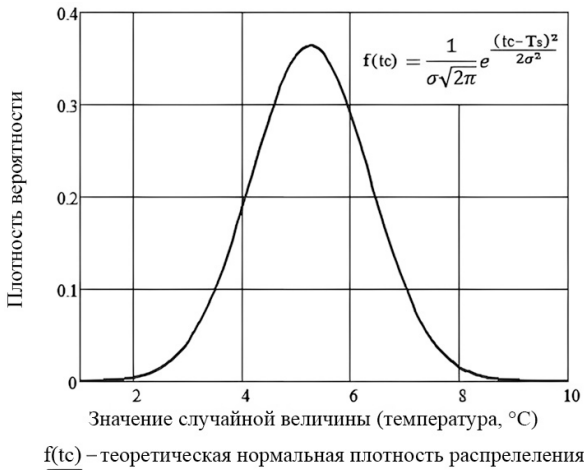


Рис. 2. Теоретическая нормальная плотность распределения среднегодовых температур за период с 1961 по 1990 г.

Теоретическая плотность распределения среднегодовых температур используется для описания вероятностных характеристик показателя температуры, позволяет оценить вероятность появления определенных значений среднегодовых температур и использовать эту информацию для принятия решений в различных областях, зависящих от климата, а также дает возможность оценить вероятность возникновения экстремальных температурных условий, что может быть важно для планирования сельскохозяйственных работ или разработки мер по адаптации к изменению климата. На основании полученной теоретической плотности распределения основное количество значений случайных температур находится в пределах 60% с ярко выраженными максимальными значениями плотности вероятности от 0.3, что говорит о нормальности распределения показателей.

На основе проведенной оценки на предмет достаточности продолжительности временного ряда наблюдений за температурой [11] была построена нормальная функция распределения и эмпирические данные среднегодовых температур, представленные на рис. 3.

Нормальная функция распределения среднегодовых температур используется для описания вероятностной структуры данных и проверки гипотезы. Функция часто применяется в статистическом анализе полученной информации, так как многие естественные явления описываются нормальным распределением. Следовательно, применительно к ним можно использовать статистические методы, основанные на указанной функции, для анализа и принятия решений на их основе.

Приведенный график позволяет оценить вероятность того, что среднегодовая температура будет находиться в определенном диапазоне значений. Он также позволяет подтвердить гипотезу о нормальности распределения данных.

Это важно, так как многие статистические методы предполагают нормальное распределение данных, иначе могут потребоваться альтернативные методы анализа.

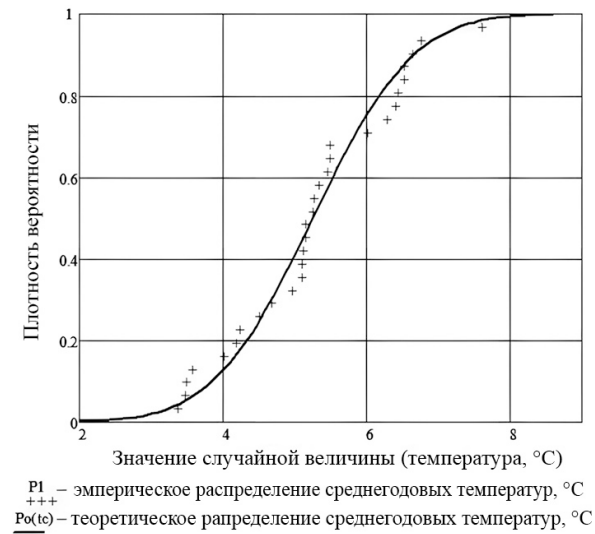


Рис. 3. Нормальная функция распределения и эмпирические данные среднегодовых температур за период с 1961 по 1990 г.

Критерием Пирсона была проверена гипотеза о нормальном распределении среднегодовых температур [12]:

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^4 \frac{(Nh_j - Nt_j)^2}{Nt_j} = 0.76,$$

где  $Nh_j$  – наблюдаемое количество элементов в группе,  $Nt_j$  – ожидаемое количество элементов (средние годовые температуры).

Далее была найдена величина вероятности отклонения эмпирических частот попадания в интервалы от теоретических частот по формуле распределения [12]:

$$pk = 1 - \text{pchisq}(\chi^2, 3) = 0.85,$$

где  $\text{pchisq}$  – функция распределения и число степеней (в данном случае),  $\chi^2$  – значение, заданное в уравнении.

Полученное значение  $pk$  представляет вероятность отклонения эмпирических частот от теоретических и является индикатором того, что сдвиг произошел в результате закономерных факторов. Данные отклонения могут являться свидетельством увеличивающегося влияния глобального потепления на климат.

### Заключение

Результаты исследования показали, что в Московском регионе происходят значимые изменения в годовом распределении температур, которые могут быть связаны как с естественными климатическими факторами, так и с антропогенным воздействием на климатическую систему.



Особенностью проведенных обсерваторией длительных наблюдений в течение исследуемого 30-летнего периода стал существенный рост среднегодовых показателей температуры воздуха на фоне общего сокращения продолжительности холодного сезона. Рост температур за рассматриваемый период существенно выше средних значений в среднем по земному шару. Особенно стоит отметить ускоряющийся устойчивый характер потепления за последние три десятилетия (1961–1990 гг.) – на 0.9 °С. Однако необходимо учитывать, что фактор «городского острова тепла» вносит свои коррективы в данную динамику и требует дальнейших исследований на предмет установления связей между застройкой и температурным фоном в пределах обсерватории. Помимо этого стоит отметить, что в условиях смены климатических эпох с изменением средних показателей температуры экстремальные отметки могут быть уже в пределах новой климатической нормы.

#### Библиографический список

1. Моисейчик В. А. Агрометеорологические условия и перезимовка озимых культур. Л. : Гидрометеоздат, 1975. 295 с.
2. Галушин Д. А., Громов С. А., Авдеев С. М. Межгодовая динамика химического состава и кислотности атмосферных осадков на территории приморского края на период с 2011 по 2020 г. // Успехи современного естествознания. 2022. № 3. С. 42–48. <https://doi.org/10.17513/use.37790>, EDN: APQSGG
3. Быстров А. А., Белолюбцев А. И., Игонин В. Н. Влияние современных агрометеорологических условий на перезимовку озимой тритикале в условиях полевой станции РГАУ – МСХА // Вестник Удмуртского университета. Серия : Биология. Науки о Земле. 2022. Т. 32, вып. 4. С. 460–467. <https://doi.org/10.35634/2412-9518-2022-32-4-460-467>, EDN: XINCYD
4. Быстров А. А., Кузнецов И. А., Охлопков И. А., Спирин Ю. А. Основные агрометеорологические параметры 2021 года и их анализ по многолетним данным обсерватории имени В. А. Михельсона // Аграрная наука – 2022 : материалы Всероссийской конференции молодых исследователей, Москва, 22–24 ноября 2022 года / ред. В. И. Трухачев, А. В. Шитикова. М. : РГАУ – МСХА им. К. А. Тимирязева, 2022. С. 1459–1463. EDN: JARFKB
5. Белолюбцев А. И., Дронова Е. А., Асауляк И. Ф. Сценарии воздействия изменений климата на сельское хозяйство // Естественные и технические науки. 2018. № 6. С. 77–82. EDN: UUGHKQ
6. Охлопков И. А., Быстров А. А., Спирин Ю. А., Кузнецов И. А. Анализ состояния посевов на опытных полях РГАУ – МСХА на основе данных спутникового зондирования // Аграрная наука – 2022: материалы Всероссийской конференции молодых исследователей, Москва, 22–24 ноября 2022 года / ред. В. И. Трухачев, А. В. Шитикова. М. : РГАУ – МСХА им. К. А. Тимирязева, 2022. С. 1522–1525. EDN: WCMBVM
7. Белолюбцев А. И., Асауляк И. Ф. Агроклиматическое обеспечение продукционных процессов сельскохозяйственных культур в условиях центрального района Нечерноземной зоны // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2013. № 4. С. 66–84. EDN: RCLYUF
8. Перевертин К. А., Белолюбцев А. И., Дронова Е. А., Асауляк И. Ф., Кузнецов И. А., Мазиров М. А., Васильев Т. А. Влияние режима снежного покрова на агрономические риски развития розовой снежной плесени // Лёд и Снег. 2022. Т. 62, № 1. С. 75–80. <https://doi.org/10.31857/S2076673422010117>, EDN: DROIVL
9. Ларионов А. Н., Чернышёв В. В., Ларионова Н. Н. Погрешности измерения физических величин : учеб. пособие для вузов / ред. И. Г. Вальнкина. Воронеж : Воронежский государственный университет, 2009. 29 с. EDN: HGZJDX
10. Чеботарев А. М. Введение в теорию вероятностей и математическую статистику для физиков : учеб. пособие. М. : МФТИ, 2009. 247 с. EDN: QJVKDP
11. Харламова В. И. Теория вероятностей и математическая статистика. Первичная обработка статистических данных : практ. пособие для студентов ун-та. Гомель : Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, 2009. 112 с.
12. Стариченко Б. Е. Обработка и представление данных педагогических исследований с помощью компьютера : учеб.-метод. пособие. Екатеринбург : УрГПУ, 2004. 218 с. EDN: XGNZMF

Поступила в редакцию 04.04.2024; одобрена после рецензирования 17.05.2024; принята к публикации 08.08.2024; опубликована 30.09.2024

The article was submitted 04.04.2024; approved after reviewing 17.05.2024; accepted for publication 08.08.2024; published 30.09.2024