Научная статья
Original article
УДК 631.6:551.506:519.23
doi: https://doi.org/10.55186/2413046X_2026_11_11_165
edn: JNOLYS

# СТАТИСТИЧЕСКАЯ КОРРЕКЦИЯ МЕТЕОДАННЫХ ERA5 НА ПРИМЕРЕ СУХОСТЕПНОГО ПОВОЛЖЬЯ

# STATISTICAL CORRECTION OF ERA5 METEOROLOGICAL DATA: A CASE STUDY OF THE DRY STEPPE REGION OF THE VOLGA BASIN

**Кижаева Вера Евгеньевна,** кандидат сельскохозяйственных наук, ведущий научный сотрудник, Волжский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации, Энгельс, Саратовская область, Россия, E-mail: ave.61@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5319-3112

**Туктаров Рамиль Ренатович,** инженер-программист, Волжский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации, Энгельс, Саратовская область, Россия, E-mail: im.whereiscapslock@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0009-0005-3791-445X

**Kizhaeva Vera Evgenievna,** Candidate of Agricultural Sciences (PhD), Leading Researcher, Volga Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation, Engels, Saratov Region, Russia, E-mail: ave.61@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5319-3112

**Tuktarov Ramil Renatovich,** Software Engineer, Volga Research Institute of Hydraulic Engineering and Land Reclamation, Engels, Saratov Region, Russia, E-mail: im.whereiscapslock@gmail.com, ORCID: https://orcid.org/0009-0005-3791-445X

**Аннотация.** В работе проведена оценка эффективности различных подходов к устранению систематических смещений суточных значений температуры воздуха и осадков из набора данных ERA5 для их корректного применения в агрометеорологических расчётах. Использованы данные пяти метеорологических станций сухостепного Поволжья за период 2005–2025 гг., а также соответствующие им по координатам и датам данные реанализа ERA5. Данные ограничены тёплым периодом года (апрель–октябрь). Оценка расхождений выполнена по метрикам ME, MAE, RMSE, коэффициенту корреляции Пирсона, отношению стандартных отклонений и критерию KGE. Для коррекции показателей температуры использованы методы аддитивного сдвига, линейной регрессии и масштабирования дисперсии; для сумм осадков – методы линейного масштабирования, локального масштабирования интенсивности и квантильного отображения. Для оценки надёжности была проведена кросс-валидация по схеме исключения одного года. В данных ERA5 выявлено систематическое занижение максимальных суточных температур и завышение ложных слабых осадков почти вдвое относительно данных фактических наблюдений. Коррекция температуры практически полностью устранила систематический сдвиг и снизила суточную ошибку RMSE до 33%, при этом метод масштабирования дисперсии наиболее полно сохранил естественный размах колебаний. Для осадков метод LOCI восстановил реальную частоту дождливых дней и снизил погрешность сезонного слоя до менее чем +1%, но повысил суточную ошибку. Выявлены систематические расхождения между реанализом и фактическими данными: занижение максимальных значений температур воздуха, сезонных сумм осадков и завышение числа дней с осадками. Коррекция температуры эффективно устраняет систематическое смещение и снижает суточную ошибку, при этом для задач, чувствительных к экстремумам, предпочтителен метод масштабирования дисперсии. При коррекции осадков наилучшие

результаты по нормализации частоты и интенсивности за счёт фильтрации ложных слабых осадков показал метод LOCI.

**Abstract.** This study evaluates the effectiveness of different approaches to correcting systematic biases in daily air temperature and precipitation from the ERA5 dataset for use in agrometeorological calculations. Data from five weather stations in the dry-steppe Volga region for 2005–2025 were used, with ERA5 reanalysis data matched to the stations by coordinates and dates. The analysis was restricted to the warm season (April – October). Discrepancies were assessed using mean error (ME), mean absolute error (MAE), root mean square error (RMSE), the Pearson correlation coefficient, the ratio of standard deviations, and the Kling–Gupta efficiency (KGE). Temperature was corrected using additive shift, linear regression, and variance scaling; precipitation was corrected using linear scaling, local intensity scaling (LOCI), and quantile mapping. Robustness was assessed by leave-one-year-out cross-validation. ERA5 systematically underestimated maximum daily temperatures and overestimated the frequency of spurious light precipitation by nearly a factor of two relative to observations. Temperature correction almost completely eliminated the systematic bias and reduced the daily RMSE by up to 33%, with variance scaling best preserving the range of variability. For precipitation, LOCI restored the observed frequency of wet days and reduced the error in seasonal totals to below +1%, but increased the daily error. The reanalysis systematically underestimates maximum air temperatures and seasonal precipitation totals and overestimates the number of wet days. Temperature correction removes the systematic bias and reduces daily error, and variance scaling is preferable for extreme-sensitive applications. For precipitation, LOCI performed best in normalizing frequency and intensity by filtering spurious light precipitation.

**Ключевые слова:** метеорологические данные, коррекция систематических расхождений, реанализ метеорологических данных, сухостепное Поволжье, температура воздуха, атмосферные осадки

**Keywords:** meteorological data, correction of systematic discrepancies, meteorological data reanalysis, dry steppe region of the Volga, air temperature, atmospheric precipitation

**Введение**. Для эффективного управления продукционным процессом, в частности с помощью орошения, необходимо своевременно получать подробную климатическую информацию для расчёта агрометеорологических показателей, что особенно актуально для засушливых регионов. Установка собственной сети метеорологических станций или использование оперативных данных с наземных пунктов наблюдения не всегда доступны ввиду высокой экономической затратности. В этих условиях в качестве доступной альтернативы становится актуальным использование данных климатического реанализа. Одним из подходящих вариантов, ввиду наличия открытого доступа к информации и непрерывности её во времени, является набор данных глобального климатического реанализа ERA5 Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) [9]. Оперативные данные предварительной версии ERA5T публикуются с задержкой в пять суток, следовательно, эти показатели ориентированы в первую очередь на расчёты, опирающиеся на накопленные данные: например, дифференцирование норм орошения или оценку накопленного дефицита влаги. Уточнённые с помощью статистической коррекции метеоданные ERA5 позволят использовать более валидное информационное обеспечение в технологиях возделывания сельскохозяйственных культур.

Важно учитывать, что данные такого реанализа являются усреднёнными по расчётной ячейке сетки ~ 30 км, поэтому влияние локальных особенностей рельефа на данные будет неизбежно сглажено. Следовательно, использование данных ERA5 без предварительной оценки и коррекции систематических расхождений может искажать итоговые рассчитанные агрометеорологические показатели [1-3, 5].

Для уточнения данных реанализа применяют различные методы статистической коррекции: от простого аддитивного сдвига до нелинейного квантильного отображения. Итоговая эффективность коррекции зависит не только от выбранного метода, но и локальных особенностей региона, типа корректируемых данных, а также цели коррекции.

В связи с этим, целью настоящего исследования являлось изучение систематических расхождений суточных данных ERA5, сопоставление различных методов коррекции показателей температуры воздуха и осадков во времени на примере аридной зоны Поволжья, а также оценка надёжности исследуемых методов.

**Материалы и методы**. В исследовании были использованы суточные значения минимальной, средней и максимальной температуры воздуха, а также сумм осадков за тёплые периоды многолетнего интервала наблюдения 2005–2025 гг., соответствующие периодам вегетации и активного водопотребления сельскохозяйственных культур. Фактические данные были получены из автоматизированной информационной системы обработки режимной информации (АИСОРИ), принадлежащей Всероссийскому научно-исследовательскому институту гидрометеорологической информации – Мировому центру данных (ВНИИГМИ-МЦД). Данные реанализа ERA5 получены с помощью API-запросов к открытому сервису Open-Meteo (с указанием параметров models=era5 и timezone=Europe%2FMoscow) [10].

Перечень задействованных в исследовании метеорологических станций с указанием координат, индексов Всемирной метеорологической организации и особенностей климатических условий, представлен в таблице 1.

**Таблица 1.** Метеорологические станции

| Индекс ВМО | Название станции | Координаты (широта; долгота) | Особенности климатических условий |
|---|---|---|---|
| 34391 | Александров Гай | 50°2′; 48°6′ | Сухостепная/полупустынная зона; высокие потребности в орошении |
| 34880 | Астрахань | 46°3′; 47°9′ | Характеризует южную границу сухостепной и полупустынной зоны Нижнего Поволжья с интенсивным орошаемым земледелием |
| 35121 | Оренбург | 51°7′; 55°1′ | Отражает восточную часть сухостепного пояса и обеспечивает учет континентальности климата |
| 34172 | Саратов | 51°6′; 46° | Наиболее точно отражает климатические условия центральной части Правобережья и Заволжья |
| 34646 | Цимлянск | 47°6′; 42°1′ | Отражает юго-западную границу сухостепной зоны и специфику увлажнения Цимлянского водохранилища и Нижнего Дона |

Перед проведением расчётов была выполнена фильтрация некорректных значений и пропусков, а также проведена проверка на соответствие суточных границ. Для оценки расхождений между данными были использованы такие метрики, как среднее смещение (ME), средняя абсолютная ошибка (MAE), среднеквадратическая ошибка (RMSE), коэффициент корреляции Пирсона (r), а также отношение стандартных отклонений (α), рассчитываемые по формулам:

$$ME = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^{n} (m_i - o_i), \quad (1)$$

$$MAE = \left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^{n} |m_i - o_i|, \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^{n} (m_i - o_i)^2}, \quad (3)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n} (m_i - \bar{m})(o_i - \bar{o})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n} (m_i - \bar{m})^2 \sum_{i=1}^{n} (o_i - \bar{o})^2}} \quad (4)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (m_i - \bar{m})^2}{\sum_{i=1}^{n} (o_i - \bar{o})^2}} \quad (5)$$

где n – число суток в выборке, $m_i$ и $o_i$ – значения данных ERA5 и АИСОРИ соответственно, $\bar{m}$ и $\bar{o}$ – выборочные средние арифметические значений данных ERA5 и АИСОРИ соответственно.

Для сумм осадков дополнительно рассчитывался критерий эффективности Клинга-Гупты, учитывающий одновременно корреляцию, отношение стандартных отклонений и отношение средних, по формуле:

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\alpha-1)^2 + (\beta-1)^2}, \quad (6)$$

где r – коэффициент корреляции Пирсона, α – отношение стандартных отклонений, β – отношение средних [4].

В связи с особенностями ERA5, заключающимися в усреднении значений по ячейке сетки, для оценки ошибок по суммам осадков были применены следующие дополнительные метрики: вероятность обнаружения (POD), доля ложных тревог (FAR), систематическая ошибка частоты (FBI) и критерий точности прогноза (ETS).

Для исключения эффекта переобучения и оценки надёжности методов была применена перекрёстная проверка по схеме исключения одного года (leave-one-year-out). Поправочные коэффициенты рассчитывались для оставшихся лет, после чего применялись к исключённому году. Проверка была циклически повторена для всех лет периода 2005-2025 гг.

**Результаты и обсуждение.** Предварительная проверка показала наличие пропусков в наблюдениях менее 0,05% от общего количества дней, а также отсутствие расхождения показаний ERA5 и АИСОРИ во времени. Исследование проведено по показателям температур воздуха и атмосферных осадков.

**Результаты исследований по показателям температур воздуха**

Сопоставление данных продемонстрировало изначально высокий коэффициент корреляции: от 0,97 до 0,996 в зависимости от метеостанции. При этом наиболее близкое совпадение выявлено у средних температур, в то время как минимальные и максимальные показывают систематические

ошибки примерно вдвое больше. На четырёх станциях из пяти данные реанализа занижают максимальную температуру, в то время как знак смещения минимальной различается от станции к станции. Наибольшие расхождения по всем трём переменным выявлены по Саратову. Значения некоторых метрик погрешности суточных данных температуры воздуха до и после коррекции представлены в таблице 2.

**Таблица 2.** ME и RMSE до и RMSE после коррекции по методу масштабирования дисперсии

| **Название станции** | **Переменная** | **Среднее смещение (ME), °C** | **Среднеквадратическая ошибка** | |
|---|---|---|---|---|
| | | | **(RMSE) до, °C** | **(RMSE) после, °C** |
| Саратов | $T_{min}$ | -0,92 | 1,90 | 1,60 |
| | $T_{ср.}$ | -0,87 | 1,32 | 0,93 |
| | $T_{max}$ | -1,66 | 2,30 | 1,53 |
| Александров Гай | $T_{min}$ | +0,51 | 1,65 | 1,57 |
| | $T_{ср.}$ | +0,05 | 0,78 | 0,778 |
| | $T_{max}$ | -1,15 | 1,85 | 1,42 |
| Цимлянск | $T_{min}$ | -0,56 | 1,62 | 1,50 |
| | $T_{ср.}$ | +0,35 | 0,92 | 0,81 |
| | $T_{max}$ | +0,38 | 1,75 | 1,56 |
| Астрахань | $T_{min}$ | -0,20 | 1,37 | 1,36 |
| | $T_{ср.}$ | -0,12 | 0,71 | 0,68 |
| | $T_{max}$ | -0,70 | 1,40 | 1,15 |
| Оренбург | $T_{min}$ | -0,12 | 1,55 | 1,55 |
| | $T_{ср.}$ | +0,06 | 0,80 | 0,78 |
| | $T_{max}$ | -0,46 | 1,50 | 1,40 |

В ходе исследования было протестировано три метода коррекции:

– Аддитивный сдвиг: сдвигает весь ряд на фиксированную величину, равную разнице средних за месяц;

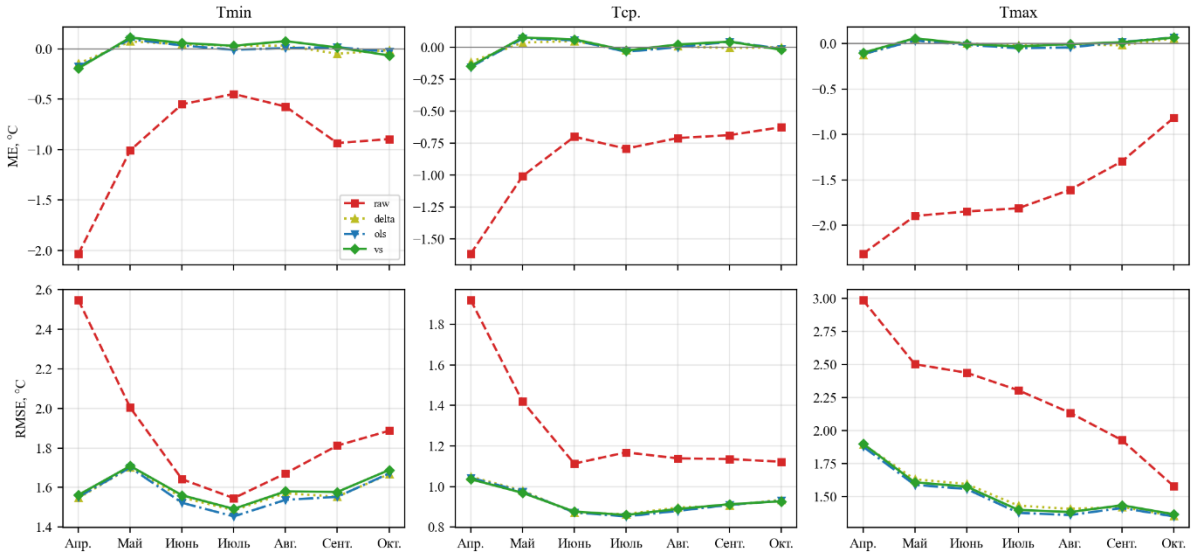
– Линейная регрессия: подбирает наклон и сдвиг по классическому методу наименьших квадратов;

– Масштабирование дисперсии: одновременно выравнивает и среднюю температуру и отношение стандартных отклонений.

Все методы показали снижение систематической ошибки, однако наименьший эффект продемонстрировал аддитивный сдвиг. Наименьшую

RMSE показал метод линейной регрессии с α в диапазоне 0,97-0,99. В случае масштабирования дисперсии α составило 1,00, но RMSE оказалась до 0,04 °C больше, чем у линейной регрессии.

Полученные поправочные коэффициенты и динамика ME и RMSE на примере Саратова приведены на рисунке 1 и в таблице 3, соответственно.




raw – данные ERA5 без коррекции; delta – коррекция методом аддитивного сдвига;
ols – коррекция методом линейной регрессии; vs – коррекция методом масштабирования дисперсии

**Рисунок 1.** ME и RMSE по месяцам до и после коррекции (Саратов)

**Таблица 3.** Поправочные коэффициенты для метода линейной регрессии (Саратов)

| **Месяц** | **Поправочные коэффициенты*** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **$T_{min}$: a** | **$T_{min}$: b** | **$T_{ср.}$: a** | **$T_{ср.}$: b** | **$T_{max}$: a** | **$T_{max}$: b** |
| Апрель | 1,85 | 1,07 | 1,12 | 1,06 | 2,25 | 1,01 |
| Май | 0,69 | 1,03 | 0,62 | 1,02 | 2,56 | 0,97 |
| Июнь | 0,41 | 1,01 | 0,39 | 1,02 | 2,37 | 0,98 |
| Июль | 0,28 | 1,01 | 1,13 | 0,99 | 2,94 | 0,96 |
| Август | 0,66 | 0,99 | 1,11 | 0,98 | 2,47 | 0,97 |
| Сентябрь | 0,17 | 1,08 | 0,29 | 1,03 | 0,90 | 1,02 |
| Октябрь | 0,51 | 1,12 | 0,19 | 1,06 | 0,68 | 1,01 |

* - применимы к формуле:

$$T_{\text{корр}} = a + b \times T_{ERA5}, \quad (7)$$

где $T_{корр}$ – скорректированное значение температуры воздуха, $T_{ERA5}$ – исходное значение реанализа, a и b – поправочные коэффициенты.

Отдельно было проверено поведение ошибки на скорректированных данных во времени: при расчётном периоде 2005-2018 гг. и тестовом 2019-2025 гг., снижение RMSE сохранилось, но для $T_{max}$ появилось остаточное смещение от +0,05 до +0,38 °C с течением времени. Следовательно, коэффициенты, рассчитанные по многолетнему периоду, целесообразно периодически пересчитывать по скользящему окну последних лет.

**Результаты исследований по показателю атмосферных осадков**

Сопоставление данных показало, что реанализ искажает структуру суточных осадков на всех пяти станциях однотипно:

– дней со слабыми осадками (0,1-1 мм) в ERA5 в 1,6-2,5 раз больше, чем в АИСОРИ;

– частота дней с осадками 1 мм и более завышена на 10-21%;

– средняя интенсивность дня с осадками занижена на 15-28%;

– сезонные суммы осадков занижены на 2-14%.

Подобное искажение объясняется усреднением показателя по ячейке сетки. Так, прошедший локальный дождь отражает серию ложных слабых осадков на близлежащие территории внутри ячейки сетки.

Для коррекции осадков также было поочередно применено три метода:

– Линейное масштабирование: умножает все суточные осадки месяца на поправочный коэффициент;

– LOCI (локальное масштабирование интенсивности): находит порог и обнуляет все осадки ниже него, а оставшиеся осадки масштабирует до нужного объёма [7, 8];

– Квантильное отображение: преобразует всё статистическое распределение осадков ERA5 в распределение АИСОРИ на основе перцентилей. В отличие от вышеперечисленных методов, требует хранение таблицы квантилей вместо двух параметров [6].

Характеристики суточных осадков показаны в таблице 4.

**Таблица 4.** Характеристики суточных осадков

| Показатель | ERA5 | Методы коррекции осадков | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Линейное масштабирование | LOCI | Квантильное отображение |
| Отклонение сезонной суммы, % | -14…-2 | +0,2…+0,6 | +0,8…+2,0 | -0,2…+4,4 |
| Отношение числа дней с осадками ≥ 1 мм (ERA5/АИСОРИ) | 1,10-1,21 | 1,08-1,21 | 0,98-0,99 | 0,99 |
| Доля дней с ложными слабыми осадками (0,1-1 мм), %* | 14,1-16,9 | 13,2-16,0 | 0 | 6,7-11,0 |
| Изменение RMSE сезонных сумм к исходному, % | — | 0…+5 | +9…+15 | +11…+22 |
| Изменение RMSE суточных сумм к исходному, % | — | +1…+5 | +9…+17 | +11…+21 |
| POD (≥ 1 мм) | 0,62–0,73 | 0,62–0,73 | 0,57–0,66 | 0,57–0,67 |
| FAR (≥ 1 мм) | 0,39–0,46 | 0,39–0,49 | 0,33–0,43 | 0,33–0,42 |
| ETS (≥ 1 мм) | 0,35–0,41 | 0,34–0,40 | 0,35–0,42 | 0,36–0,42 |
| ETS (≥ 10 мм) | 0,18–0,27 | 0,18–0,29 | 0,19–0,30 | 0,20–0,28 |
| KGE сезонных сумм | 0,61–0,74 | 0,65–0,76 | 0,68–0,77 | 0,68–0,75 |

* - доля дней с осадками 0,1-1 мм в данных АИСОРИ составила от 6,4% до 10,5% в зависимости от станции.

Кривая обеспеченности суточных осадков на примере Саратова показана на рисунке 2.

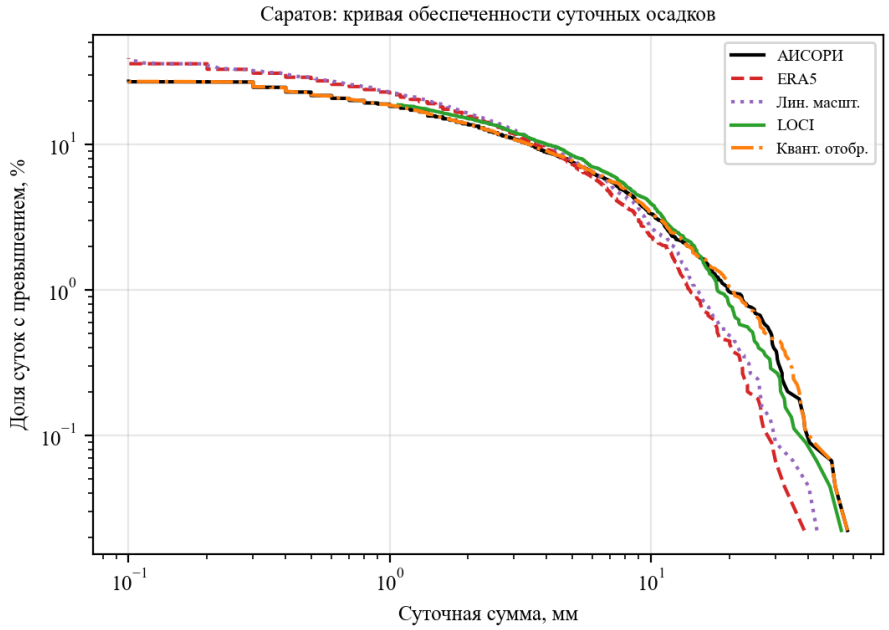



**Рисунок 2.** Кривая обеспеченности суточных осадков (Саратов)

На основании полученных данных, отражённых в таблице 4 и на рисунке 2 можно сделать вывод о том, что все три метода уменьшают систематическое смещение сезонных сумм осадков, однако увеличивают среднесуточную ошибку: это известное свойство подобных методов объясняется тем, что коррекция завышает не только фактически прошедшие локальные дожди, но и ложные слабые осадки [6].

Линейное масштабирование точнее остальных методов сохраняет суммы осадков, но не корректирует частоту как фактических, так и ложных дождливых дней.

LOCI обнуляет осадки ниже заданного порога, что исключает ложные осадки и делает этот метод предпочтительным в том случае, если наиболее важно скорректировать частоту и интенсивность осадков.

Квантильное отображение сохраняет ложные осадки и воспроизводит распределение осадков в целом, но при этом демонстрирует наибольшие ошибки в суточных и декадных суммах, а редкие экстремальные ливни часто либо сильно занижает, либо завышает.

**Выводы.** Сопоставление реанализа и фактических данных выявило характерные для аридной зоны Поволжья систематические расхождения: занижение максимальной суточной температуры воздуха, занижение сезонных сумм осадков, завышение общего числа дождливых дней.

Рекомендуемая методика помесячной коррекции температуры воздуха практически полностью устраняет систематическое смещение и снижает суточную ошибку до 33% в зависимости от станции. Метод линейной регрессии обеспечивает минимальную суточную ошибку RMSE, но занижает дисперсию ряда. Метод масштабирования дисперсии сохраняет естественный размах суточных колебаний, что делает его предпочтительным для задач, чувствительных к значениям минимальных и максимальных температур.

Все протестированные методы коррекции уменьшают сезонное смещение, но увеличивают RMSE из-за особенностей данных реанализа. В вопросе коррекции частоты и интенсивности осадков метод локального масштабирования интенсивности оказался оптимальным за счёт отсечения ложных слабых осадков и восстановления нормального соотношения дождливых дней.

Практическое использование данного метода возможно при моделировании продукционного процесса с созданием базы данных температур воздуха и атмосферных осадков для дифференцирования режимов орошения на планируемую урожайность и формирования надежного информационного обеспечения технологий возделывания сельскохозяйственных культур.

## Список источников

1. Головинов Е. Э., Васильева Н. А. Сравнение многолетних метеорологических характеристик по данным реанализа и наземных наблюдений на территории Московской области // Мелиорация и гидротехника. 2022. Т. 12, № 3. С. 92–105. DOI: 10.31774/2712-9357-2022-12-3-92-105.

2. Пространственно-временная изменчивость ошибки воспроизведения осадков реанализом ERA5 на территории России / В. Ю. Григорьева, Н. Л. Фролова, М. Б. Киреева [и др.] // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2022. Т. 86, № 3. С. 435–446. DOI: 10.31857/S2587556622030062.

3. Салугин А. Н., Балкушкин Р. Н. О применении искусственных нейронных сетей для моделирования водопотребления // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2021. № 1. С. 70–84. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-1-5.

4. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: implications for improving hydrological modelling / H. V. Gupta, H. Kling, K. K. Yilmaz, G. F. Martinez // Journal of Hydrology. 2009. Vol. 377, iss. 1–2. P. 80–91. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.08.003.

5. Dyukarev E. Comparison of Artificial Neural Network and Regression Models for Filling Temporal Gaps of Meteorological Variables Time Series // Applied Sciences. 2023. Vol. 13, iss. 4. Art. 2646. DOI: 10.3390/app13042646.

6. Maraun D. Bias correction, quantile mapping, and downscaling: revisiting the inflation issue // Journal of Climate. 2013. Vol. 26, iss. 6. P. 2137–2143. DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00821.1.

7. Schmidli J., Frei C., Vidale P. L. Downscaling from GCM precipitation: a benchmark for dynamical and statistical downscaling methods // International Journal of Climatology. 2006. Vol. 26, iss. 5. P. 679–689. DOI: 10.1002/joc.1287.

8. Teutschbein C., Seibert J. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: review and evaluation of different methods // Journal of Hydrology. 2012. Vol. 456–457. P. 12–29. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.05.052.

9. The ERA5 global reanalysis / H. Hersbach, B. Bell, P. Berrisford [et al.] // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2020. Vol. 146, iss. 730. P. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.

10. Zippenfenig P. Open-Meteo.com Weather API [Software]. Zenodo, 2023. DOI: 10.5281/zenodo.7973809.

**References**

1. Golovinov E. E`., Vasil`eva N. A. Sravnenie mnogoletnix meteorologicheskix xarakteristik po danny`m reanaliza i nazemny`x nablyudenij na territorii Moskovskoj oblasti // Melioraciya i gidrotexnika. 2022. T. 12, no. 3. S. 92–105. DOI: 10.31774/2712-9357-2022-12-3-92-105 (In Russian).

2. Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost` oshibki vosproizvedeniya osadkov reanalizom ERA5 na territorii Rossii / V. Yu. Grigor`eva, N. L. Frolova, M. B. Kireeva [et al.] // Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Seriya geograficheskaya. 2022. T. 86, no. 3. S. 435–446. DOI: 10.31857/S2587556622030062 (In Russian).

3. Salugin A. N., Balkushkin R. N. O primenenii iskusstvenny`x nejronny`x setej dlya modelirovaniya vodopotrebleniya // Vodnoe xozyajstvo Rossii: problemy`, texnologii, upravlenie. 2021. no. 1. S. 70–84. DOI: 10.35567/1999-4508-2021-1-5. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: implications for improving hydrological modelling / H. V. Gupta, H. Kling, K. K. Yilmaz, G. F. Martinez // Journal of Hydrology. 2009. Vol. 377, iss. 1–2. P. 80–91. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.08.003 (In Russian).

4. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: implications for improving hydrological modelling / H. V. Gupta, H. Kling, K. K. Yilmaz, G. F. Martinez // Journal of Hydrology. 2009. Vol. 377, iss. 1–2. P. 80–91. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.08.003.

5. Dyukarev E. Comparison of Artificial Neural Network and Regression Models for Filling Temporal Gaps of Meteorological Variables Time Series // Applied Sciences. 2023. Vol. 13, iss. 4. Art. 2646. DOI: 10.3390/app13042646.

6. Maraun D. Bias correction, quantile mapping, and downscaling: revisiting the inflation issue // Journal of Climate. 2013. Vol. 26, iss. 6. P. 2137–2143. DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00821.1.

7. Schmidli J., Frei C., Vidale P. L. Downscaling from GCM precipitation: a benchmark for dynamical and statistical downscaling methods // International Journal of Climatology. 2006. Vol. 26, iss. 5. P. 679–689. DOI: 10.1002/joc.1287.
8. Teutschbein C., Seibert J. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: review and evaluation of different methods // Journal of Hydrology. 2012. Vol. 456–457. P. 12–29. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.05.052.
9. The ERA5 global reanalysis / H. Hersbach, B. Bell, P. Berrisford [et al.] // Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2020. Vol. 146, iss. 730. P. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.
10. Zippenfenig P. Open-Meteo.com Weather API [Software]. Zenodo, 2023. DOI: 10.5281/zenodo.7973809.
*© Кижаева В.Е., Туктаров Р.Р., 2026. Московский экономический журнал, 2026, № 11, 296-311.*