



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2026. Т. 26, вып. 3. С. 184–196

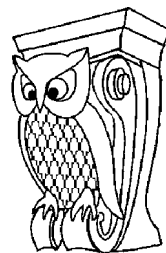
Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences, 2026, vol. 26, iss. 3, pp. 184–196

<https://geo.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1819-7663-2026-26-3-184-196>, EDN: QOYUDM

Научная статья

УДК 551.583.1



Изменения основных климатических и агроклиматических показателей на территории Республики Татарстан в период 1966–2025 гг.

Ю. П. Переведенцев, Т. Р. Аухадеев, Н. А. Мирсаева[✉], А. А. Николаев, А. Д. Янгиров

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Россия, 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, д. 18

Переведенцев Юрий Петрович, доктор географических наук, профессор кафедры метеорологии, климатологии и экологии атмосферы, yureved@kpfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3181-6227>

Аухадеев Тимур Ринатович, кандидат географических наук, доцент кафедры метеорологии, климатологии и экологии атмосферы, TRAuhadeev@kpfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6818-7794>

Мирсаева Надежда Александровна, кандидат географических наук, заведующий кафедрой метеорологии, климатологии и экологии атмосферы, NAMirsaeva@kpfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7123-9121>

Николаев Александр Анатольевич, кандидат географических наук, доцент кафедры метеорологии, климатологии и экологии атмосферы, Aleksandr.Nikolaev@kpfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8555-8745>

Янгиров Айдар Динарович, аспирант кафедры метеорологии, климатологии и экологии атмосферы, биотехнологии и природопользования, aydar.yangirov.00@mail.ru

Аннотация. Цель настоящей статьи дать оценку изменений основных климатических показателей в условиях современного потепления на территории Республики Татарстан (РТ) в период 1966–2025 гг. в интересах агросферы. В результате статистической обработки 60-летних данных наблюдений на 14 метеостанциях выявлен ряд закономерностей в распределении основных климатических характеристик, что позволило оценить тенденции современных климатических изменений в регионе. Кроме того, рассчитаны потоки приходящей солнечной радиации, включая фотосинтетическую активную радиацию (ФАР), даты перехода среднесуточных температур через 0, 5, 10 и 15°C весной и осенью и сумму положительных температур вегетационного периода. Использование известных индексов (Будыко, Селянинова, Педя и Саложниковой) позволило оценить степень засушливости и увлажненности региона. По методу Мезенцева рассчитывались характеристики испаряемости и испарения на территории РТ. В результате выполненного исследования было показано, что на территории РТ потепление климата в последние десятилетия особенно заметно в зимний период (в январе скорость повышения температуры воздуха достигает 0.86°C/10 лет), средняя по территории продолжительность вегетационного периода составляет 140 суток (растет со скоростью 1.6 суток/10 лет), по расчетам индексов увлажненности и засушливости выявлена тенденция роста засушливости в вегетационный период, что происходит на фоне роста суммы положительных температур (на 75.8°C/10 лет). Дана оценка влияния циркуляционных осцилляций на изменчивость метеорологических параметров. Показано, что согласно прогнозным оценкам по ансамблю климатических моделей проекта CMIP6, температура воздуха в регионе будет расти до конца XXI века (годовая примерно на 2°C по «мягкому» сценарию и на 5°C по «жесткому»). Выявлена прямая (положительная) зависимость урожайности яровой пшеницы от осадков периода май–июнь и обратная (отрицательная) от температуры июня.

Ключевые слова: температура воздуха, осадки, солнечная радиация, вегетационный период, корреляция, тенденции

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и Академии наук Республики Татарстан по проекту № 26-27-20001.

Для цитирования: Переведенцев Ю. П., Аухадеев Т. Р., Мирсаева Н. А., Николаев А. А., Янгиров А. Д. Изменения основных климатических и агроклиматических показателей на территории Республики Татарстан в период 1966–2025 гг. // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2026. Т. 26, вып. 3. С. 184–196. <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2026-26-3-184-196>, EDN: QOYUDM
Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Changes in the main climatic and agro-climatic indicators in the territory of the Republic of Tatarstan in the period 1966–2025

Yu. P. Perevedentsev, T. R. Aukhadееv, N. A. Mirsaeva[✉], A. A. Nikolaev, A. D. Yangirov

Kazan (Volga Region) Federal University, 18 Kremlevskaya St., Kazan 420008, Russia

Yuri P. Perevedentsev, yureved@kpfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3181-6227>

Timur R. Aukhadееv, TRAuhadeev@kpfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6818-7794>

Nadezhda A. Mirsaeva, NAMirsaeva@kpfu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7123-9121>

Aleksandr A. Nikolaev, Aleksandr.Nikolaev@kpfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8555-8745>

Aydar D. Yangirov, aydar.yangirov.00@mail.ru



Abstract. The purpose of this article is to assess changes in key climatic parameters under conditions of current global warming in the Republic of Tatarstan (RT) for the period 1966–2025, for the benefit of the agricultural sector. Statistical processing of 60 years of observation data from 14 meteorological stations revealed a number of patterns in the distribution of key climatic characteristics, enabling an assessment of current climate change trends in the region. In addition, the fluxes of incoming solar radiation, including photosynthetically active radiation (PAR), the dates when average daily temperatures cross 0, 5, 10, and 15°C in spring and autumn, and the sum of positive temperatures during the growing season have been calculated. The use of well-known indices (Budyko, Selyaninov, Pedyu, and Sapozhnikova) made it possible to assess the degree of aridity and humidity in the region. The Mezentsev method was used to calculate evaporation and transpiration characteristics for the RT. The study showed that climate warming in the RT in recent decades has been particularly noticeable in winter (in January, the air temperature increase rate reaches 0.86°C/10 years). The average length of the growing season across the territory is 140 days (increasing at a rate of 1.6 days/10 years). Calculations of humidity and aridity indices revealed a trend toward increasing aridity during the growing season, which occurs against a backdrop of an increase in the sum of positive temperatures (by 75.8°C/10 years). An assessment is made of the influence of circulation oscillations on the variability of meteorological parameters. It is shown that, according to forecast estimates from the CMIP6 climate model ensemble, air temperatures in the region will increase until the end of the 21st century (annual by approximately 2°C under the “mild” scenario and by 5°C under the “hard” scenario). A direct (positive) dependence of spring wheat yield on precipitation in the May–June period and an inverse (negative) dependence on June temperature was revealed.

Keywords: air temperature, precipitation, solar radiation, growing season, correlation, trends

Acknowledgements: This study was supported by a grant from the Russian Science Foundation and the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan under project No. 26-27-20001.

For citation: Perevedentsev Yu. P., Aukhadeev T. R., Mirsaeva N. A., Nikolaev A. A., Yangirov A. D. Changes in the main climatic and agro-climatic indicators in the territory of the Republic of Tatarstan in the period 1966–2025. *Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences*, 2026, vol. 26, iss. 3, pp. 184–196 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2026-26-3-184-196>, EDN: QOYUDM

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

Введение

Согласно данным метеонаблюдений с середины 1970-х гг. началась вторая волна глобального потепления климата, обусловленная, по мнению экспертов МГЭИК, ростом содержания в атмосфере парниковых газов преимущественно антропогенного происхождения [1]. Так, содержание CO₂ в 2020 г. на станции Мауна Лоа составило порядка 420 млн⁻¹, т. е. доиндустриальный уровень (280 млн⁻¹) превышен в полтора раза. Это рекордное содержание CO₂ в течение последнего миллиона лет [2].

Антропогенное изменение климата проявило себя в изменениях статистики экстремальных погодных и климатических явлений: нарастает частота и сила таких событий, как волны тепла, обильные осадки, засухи, тропические циклоны и др. [3].

Все это создает определенные риски для функционирования природных и социально-экономических систем, к числу которых относится и сельскохозяйственное производство. Так, в [4] отмечается, что ущерб от климатических катастроф выражается в значительных материальных потерях, разрушении инфраструктуры, снижении урожайности сельскохозяйственных культур и росте угроз для здоровья и жизни населения. Анализ современных климатических изменений в регионах России и их последствий для агросферы посвящены специальные выпуски журнала «Метеорология и гидрология» (№ 9–10, 2023 г.).

В частности, ранее авторами настоящей статьи были проанализированы особенности климатических и агроклиматических изменений, происходящих как на территории Приволжского федерального округа [5], так и в Республике Татарстан (РТ) [6].

Цель настоящей статьи – дать комплексную оценку изменений основных климатических и агроклиматических показателей, рассчитанных по данным 14 метеостанций РТ в период 1966–2025 гг., и их последствий для агросферы.

Методы и материалы

В качестве исходных данных в работе использованы результаты ежедневных метеонаблюдений в 1966–2025 гг. на 14 метеостанциях РТ (фонд ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД»), расположение которых представлено на рис. 1. Радиационные характеристики и данные по облачности рассчитывались по материалам сайта¹. Индексы атмосферной циркуляции были взяты из базы данных².

Выбор периода 1966–2025 гг. обусловлен наибольшей полнотой данных наблюдений в регионе (8 сроков за сутки). Дополнительно рассматривались два подпериода 1966–1995 и 1996–2025 гг., так как согласно рекомендациям ВМО с целью оценки изменчивости климата приняты 30-летние базовые периоды. В каждый из подпериодов входит по 25 лет из указанных базовых периодов ВМО (83%), что позволяет исследовать изменения климата в конце XX

¹NASA Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER) : [сайт] URL: <https://power.larc.nasa.gov/> (дата обращения: 10.05.2026)

²Climatic Research Unit Data Sets : [сайт]. URL: <https://www.uea.ac.uk/groups-and-centres/climatic-research-unit/data> (дата обращения: 15.04.2026).

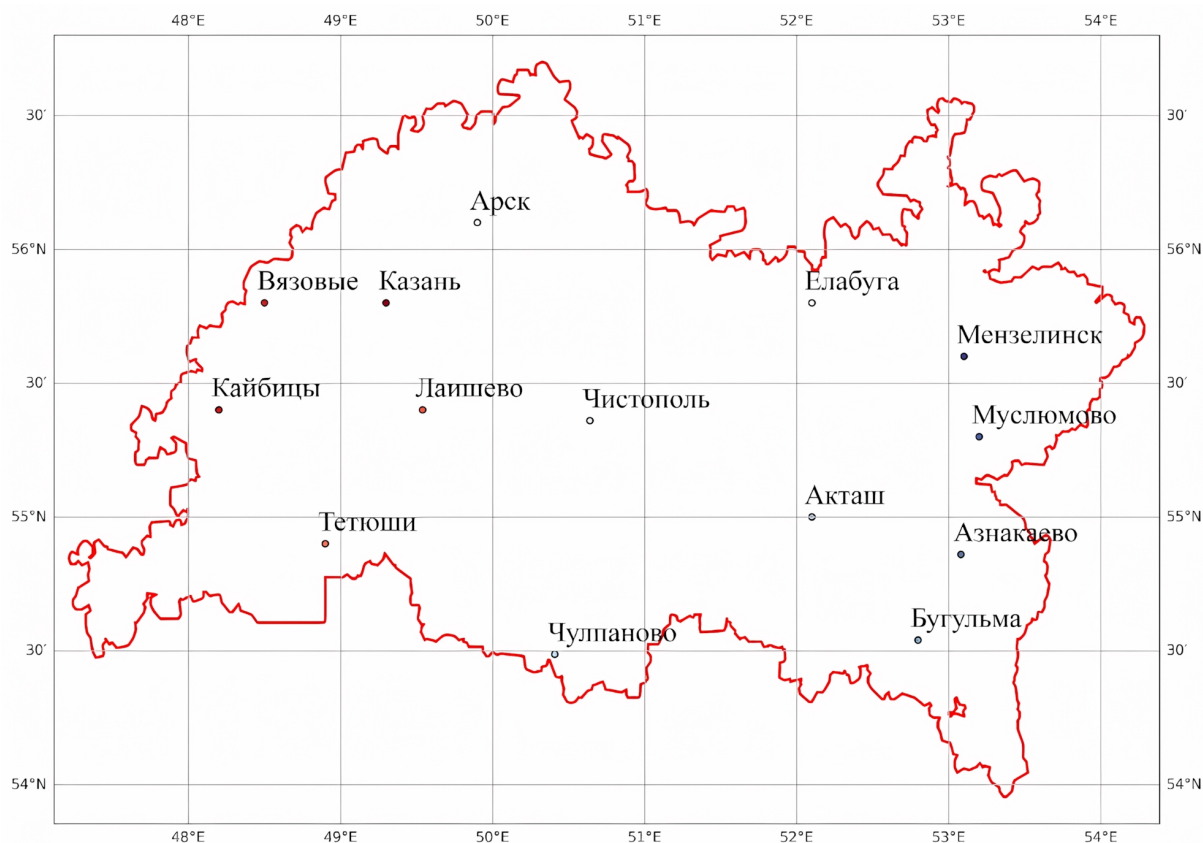


Рис. 1. Расположение метеостанций на территории РТ

и начале XXI в. Осреднение по территории соответствует осреднению по 14 метеостанциям, различия между которыми не столь велики.

Многолетние данные подвергались статистической обработке. Находились средние значения, средние квадратические отклонения (СКО), коэффициенты наклона линейных трендов (КНЛТ) метеовеличин, коэффициенты корреляции (r) между отдельными метеопараметрами и индексами атмосферной циркуляции, а также между температурой воздуха и атмосферными осадками, с одной стороны, урожайностью сельскохозяйственных культур, с другой. Достоверность результатов оценивалась с помощью известных статистических методов. Так, рассчитанные коэффициенты корреляции при объеме выборки $n = 30$ и $n = 60$ лет и 95%-ном уровне значимости достоверны при значениях 0.36 и 0.25 соответственно [7].

Рассчитывался ряд агроклиматических характеристик: продолжительность вегетационного периода, сумма положительных температур, индексы сухости и увлажнения, тренды и др.

По методике Педя [8] определялись даты устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха (ССТ) через 0, 5, 10 и 15°C

весной и осенью и продолжительность периодов, превышающих указанные ССТ.

Для характеристики увлажненности территории рассчитывались индексы Педя (S), индекс сухости (ИС) Будыко, гидротермический коэффициент (ГТК) Селянинова и коэффициент увлажнения (КУ) Сапожниковой [9]:

$$S = \frac{\Delta T}{\delta_T} - \frac{\Delta R}{\delta_R}, \quad (1)$$

$$\text{ИС} = \frac{0.18 \sum T_{>10^\circ}}{R_{\text{I-XII}}}, \quad (2)$$

$$\text{ГТК} = \frac{R_{\text{VI-VIII}}}{0.1 \sum T_{\text{VI-VIII}}}, \quad (3)$$

$$\text{КУ} = \frac{0.5 R_{\text{X-III}} + R_{\text{IV-IX}}}{0.18 \sum T_{\text{IV-IX}}}, \quad (4)$$

где T – среднесуточная температура; °C, R – сумма осадков, мм; ΔT и δ_R – аномалии среднемесячных температур и атмосферных осадков; δ_T и δ_R – СКО температуры и осадков.

Для расчета испарения E в теплый период года использовался эмпирический метод В. С. Мезенцева [10], согласно которому:

$$E = e \cdot R, \quad e = I(1 + I^n)^{-\frac{1}{n}}, \quad (5)$$
$$I = \frac{E_0}{R}, \quad E_0 = 6.72 T_0.$$



Здесь E_0 – испаряемость, мм; T_0 – сумма положительных среднемесячных значений температуры; R – количество осадков; $n = 3.8$ – эмпирический показатель, полученный в результате обработки фактических данных.

Расчет коэффициента увлажнения для вегетационного периода рассчитывался по формуле E/E_0 .

Отметим, что ежемесячные значения испаряемости E_0 можно определять также по методу Н. Н. Иванова [11].

Фотосинтетическая активная радиация (ФАР) находилась по формуле [12, с. 159]:

$$\sum Q_{\text{ФАР}} = 0.43 \sum S' + 0.57 \sum D, \quad (6)$$

где $\sum Q_{\text{ФАР}}$ – суммарная ФАР, МДж/м², $\sum S'$ – сумма прямой солнечной радиации, МДж/м², $\sum D$ – сумма рассеянной радиации, МДж/м².

Статистическая значимость линейного тренда оценивалась с помощью критерия Стьюдента и по величине квадрата коэффициента корреляции R^2 (коэффициент детерминации). Тенденция изменения метеовеличины считалась статистически значимой, если ее уровень достоверности был равен или превысил 95% ($p \geq 0.95$). При объеме выборки 50 лет и более это соответствует величине $R^2 > 0.08$. Чем больше R^2 , тем больше статистическая значимость длительных однонаправленных изменений [13].

Результаты

Остановимся вначале на анализе результатов расчета средних значений температуры воздуха, относительной влажности, атмосферных осадков и атмосферного давления для центральных месяцев сезонов года, а также значений коэффициентов наклона линейного тренда (КНЛТ), как для всего 60-летнего периода, так и для более «раннего» подпериода (1966–1995 гг.) и более «позднего» подпериода (1996–2025 гг.), что позволило оценить современные тенденции потепления климата.

Так, в январе температура воздуха, осредненная за 60 лет, меняется по территории РТ от -12.79°C (ст. Муслумово) до -11.31°C (ст. Казань). Средняя температура воздуха в январе -12.06°C . При этом КНЛТ в среднем составляет $0.86^\circ\text{C}/10$ лет (максимальное значение КНЛТ на ст. Казань равно $0.96^\circ\text{C}/10$ лет). В апреле средняя температура воздуха составляет 5.42°C (КНЛТ = $0.31^\circ\text{C}/10$ лет), в июле она достигает 19.64°C (КНЛТ = $0.34^\circ\text{C}/10$ лет) и в октябре составляет 4.05°C (КНЛТ = $0.57^\circ\text{C}/10$ лет). В среднем за год по территории РТ температура равна 4.07°C (КНЛТ = $0.45^\circ\text{C}/10$ лет) (табл. 1). Для подпериода 1996–2025 гг. осредненные по РТ показатели температурного режима заметно повысились и составляют в среднем: в январе -10.99°C , в апреле 5.65°C , в июле

20.33°C , в октябре 4.97°C и в год 4.71°C . Наибольший прирост температуры относительно подпериода 1966–1995 гг. происходит в январе (2.14°C). В апреле температура воздуха повысилась на 0.46°C , в июле на 1.38°C , в октябре на 1.84°C и за год на 1.28°C .

Согласно табл. 1, для периода 1966–2025 гг. распределение атмосферных осадков, осредненное по территории РТ, по центральным месяцам сезонов таково: в январе их выпадает 33.87 мм (КНЛТ = 1.74 мм/10 лет), в апреле 31.37 мм (КНЛТ = 1.20 мм/10 лет), в июле 59.51 мм (КНЛТ = -2.07 мм/10 лет), в октябре 49.27 мм (КНЛТ = -0.68 мм/10 лет) и в целом за год 499.43 мм (КНЛТ = 3.77 мм/10 лет). Если рассматривать более поздний подпериод 1996–2025 гг., то выявляется небольшой прирост количества осадков относительно более раннего подпериода 1966–1995 гг.: в январе на 4.02 мм, в апреле на 1.27 мм, в июле и октябре, наоборот, их количество уменьшается соответственно на 9.96 и 1.36 мм, в целом же за год происходит небольшой прирост количества осадков на 13.49 мм. Таким образом, происходит заметное уменьшение количества осадков лишь в июле, что способствует росту засушливости в регионе.

Рассмотрение показателей относительной влажности воздуха f показывает, что величина f во все центральные месяцы сезонов и в целом за год, за исключением января, имеет слабую тенденцию к уменьшению. Распределение f , осредненное по территории РТ за весь период, таково: в январе $\bar{f} = 82.4\%$ (КНЛТ = $0.14\%/10$ лет), в апреле $\bar{f} = 68.9\%$ (КНЛТ = $-1.99\%/10$ лет), в июле $\bar{f} = 69.2\%$ (КНЛТ = $-0.74\%/10$ лет), в октябре $\bar{f} = 79.7\%$ (КНЛТ = $-0.50\%/10$ лет) и в среднем за год $\bar{f} = 75.6\%$ (КНЛТ = $-0.50\%/10$ лет). В более поздний подпериод (1996–2025 гг.) во все центральные месяцы и в целом за год происходит уменьшение величины $\bar{f}$. Так, КНЛТ среднегодовой $\bar{f}$ составляет $-1.62\%/10$ лет, а величина $\bar{f} = 74.7\%$.

Анализ результатов расчета характеристик атмосферного давления P показывает, что в январе и апреле давление уменьшается, а в июле и октябре растет, но в целом за год прослеживается тенденция его уменьшения. Распределение средних месячных величин P , осредненных по территории РТ за 60 лет, таково: в январе $\bar{P} = 1020.4$ гПа (КНЛТ = -0.58 гПа/10 лет), в апреле $\bar{P} = 1017.1$ гПа (КНЛТ = -0.51 гПа/10 лет), в июле $\bar{P} = 1010.8$ гПа (КНЛТ = 0.11 гПа/10 лет), в октябре $\bar{P} = 1018.2$ гПа (КНЛТ = 0.38 гПа/10 лет) и в среднем за год $\bar{P} = 1017.1$ гПа (КНЛТ = -0.24 гПа/10 лет). Отмечается годовой ход атмосферного давления с максимумом зимой



Таблица 1

Распределение среднемесячной температуры воздуха T и сумм атмосферных осадков R на территории РТ в период 1966–2025 гг.

Станция	Месяцы								Среднегодо- вое значение	
	I		IV		VII		X			
	<i>T</i>	КНЛТ	<i>T</i>	КНЛТ	<i>T</i>	КНЛТ	<i>T</i>	КНЛТ	<i>T</i>	КНЛТ
Температура воздуха, °C										
Арск	–12.17	0.93	4.98	0.33	19.51	0.39	3.65	0.60	3.83	0.50
Елабуга	–12.02	0.93	5.62	0.32	20.03	0.36	4.12	0.59	4.24	0.48
Вязовые	–11.40	0.88	5.56	0.29	19.86	0.40	4.33	0.58	4.42	0.48
Казань	–11.31	0.96	5.77	0.42	20.14	0.47	4.48	0.64	4.61	0.56
Мензелинск	–12.74	0.88	5.10	0.28	19.58	0.35	3.75	0.57	3.73	0.45
Лаишева	–11.57	0.76	5.21	0.33	19.96	0.30	4.45	0.53	4.38	0.41
Чистополь	–12.23	0.88	5.09	0.41	19.47	0.35	3.87	0.66	3.87	0.49
Кайбицы	–11.39	0.86	5.63	0.28	19.48	0.35	4.25	0.57	4.29	0.46
Муслюмово	–12.79	0.84	5.73	0.25	19.79	0.28	4.06	0.53	3.93	0.40
Акташ	–12.23	0.89	5.81	0.28	19.60	0.29	4.12	0.52	4.09	0.41
Азнакаево	–12.54	0.82	5.37	0.30	19.31	0.32	3.68	0.51	3.76	0.41
Тетюши	–11.59	0.82	5.32	0.31	19.57	0.38	4.35	0.59	4.24	0.46
Бугульма	–12.51	0.79	4.94	0.30	18.93	0.31	3.37	0.57	3.51	0.40
Чулпаново	–12.30	0.82	5.77	0.27	19.70	0.27	4.28	0.48	4.04	0.19
Среднее по РТ	–12.06	0.86	5.42	0.31	19.64	0.34	4.05	0.57	4.07	0.45
Атмосферные осадки, мм										
Арск	39.67	4.26	34.35	1.59	63.24	–1.89	49.28	–0.09	523.21	7.80
Елабуга	39.65	1.68	33.74	0.52	63.24	–4.64	52.28	–1.92	535.13	–1.45
Вязовые	33.45	2.91	32.24	1.14	63.01	0.11	46.62	1.05	485.12	12.76
Казань	41.02	4.30	34.93	0.73	68.14	0.09	52.89	0.72	557.78	12.62
Мензелинск	29.84	1.47	27.67	0.65	58.94	–2.73	47.02	–1.16	471.78	2.82
Лаишева	41.19	–0.70	34.13	0.48	58.84	0.64	56.29	–0.07	541.26	0.46
Чистополь	30.64	–0.52	31.00	0.54	55.96	–1.18	50.97	–0.88	488.33	–2.04
Кайбицы	32.18	3.26	32.36	1.50	58.15	0.69	46.22	–0.47	480.48	10.21
Муслюмово	28.35	1.82	25.98	1.34	58.34	–4.67	43.93	–1.02	448.93	3.06
Акташ	34.95	2.32	29.86	1.44	55.88	–3.51	47.56	–1.89	490.17	4.12
Азнакаево	32.80	1.17	29.74	2.18	58.43	–5.92	48.45	–1.41	498.64	1.76
Тетюши	30.89	2.17	32.76	2.81	55.27	–0.19	48.88	0.55	484.55	7.90
Бугульма	28.89	–0.17	30.40	2.23	65.41	–5.15	52.29	–1.82	512.59	–3.00
Чулпаново	30.64	0.37	30.10	–0.31	51.17	–0.28	47.14	–1.10	473.99	–4.23
Среднее по РТ	33.87	1.74	31.37	1.20	59.51	–2.07	49.27	–0.68	499.43	3.77

Примечание. КНЛТ для температуры в °C/10 лет, для осадков в мм/10 лет.

и минимумом летом. Более поздний подпериод показал, что атмосферное давление уменьшается и в июле (КНЛТ = –1.21 гПа/10 лет).

Таким образом, в целом по годовым показателям в период 1966–2025 гг. на территории РТ температура воздуха и атмосферные осадки растут, а относительная влажность и давление воздуха уменьшаются. Это обусловлено более весомым вкладом годового прироста температуры в относительную влажность по сравнению

с ростом осадков, что следует из вышеприведенных оценок.

Рассмотрим влияние атмосферной циркуляции на метеорологические величины по сезонам года. Для этого привлекались данные о наиболее важных циркуляционных модах, перечисленных в примечании к табл. 2. Рассчитывались коэффициенты корреляции r соответственно между температурой воздуха, относительной влажностью, атмосферными осадками, атмосферным давлением, с одной стороны, и ин-



дексами циркуляции атмосферы, с другой, для периодов 1966–2025 гг., 1966–1995 гг. и 1996–2025 гг. Анализ полученных коэффициентов корреляции r показал, что для периода 1966–2025 гг. зимой наиболее тесные положительные связи обнаруживаются между температурой воздуха и колебанием NAO ($r = 0.65$). Блокинг SCAND, напротив, способствует понижению температуры ($r = -0.58$). В то же время Скандинавский блокинг оказывает большое влияние на атмосферное давление по территории РТ, способствуя его росту зимой ($r = 0.71$). В летний период наиболее эффективно действует осцилляция EA/WR, способствуя понижению температуры воздуха ($r = -0.69$). Зимой это колебание приводит к понижению давления ($r = -0.64$). Явление Эль-Ниньо оказывает слабое воздействие на наш регион, лишь летом коэффициент корреляции между индексом SOI и температурой воздуха достигает значения 0.36. Что касается других периодов, то выделяется повышение связи между температурой и NAO зимой в период 1966–1995 ($r = 0.73$), атмосферным давлением и EA/WR также зимой в этот же период ($r = -0.76$).

Достоверные связи обнаруживаются между относительной влажностью воздуха и колебаниями NAO и SCAND зимой ($r = 0.36$; $r = -0.48$ соответственно) с колебанием EA/WR летом ($r = 0.46$). Атмосферные осадки зимой хорошо коррелируют с индексом SCAND ($r = -0.47$), что естественно, давление растет, осадки уменьшаются. Летом достоверная связь возникает с колебанием EA/WR ($r = 0.37$). Обнаруженные связи физически вполне объяснимы.

Согласно данным, приведенным в табл. 2, циркуляционные моды избирательно воздействуют на различные метеорологические величины в зависимости от сезона года.

Рассмотрим распределение по территории РТ потоков приходящей суммарной солнечной радиации, максимальные значения которых достигаются в летний период. Так, в июле суммарная радиация возрастает с северо-запада от 637 до 660 МДж/м² на юге РТ. При этом скорость ее роста возрастает с 5 МДж/м²/10 лет (северо-запад РТ) до 17 МДж/м²/10 лет на юго-востоке РТ, что согласуется с поведением общей облачности, которая, наоборот, уменьшается в летний период (в июле со скоростью от -0.04 до -0.17 балла/10 лет). Определяющее значение для жизнедеятельности растений принадлежит коротковолновой радиации в интервале длин волн ($\lambda = 0.38...0.71$ мкм), называемой ФАР (рис. 2). Солнечная постоянная составляет 1375 Вт/м², из них 420 Вт/м² приходится на ФАР. При этом 85% ФАР поглощается растениями и менее 5% усваивается в процессе фотосинтеза [12].

Величина ФАР за вегетационный период возрастает с северо-запада РТ на юг с 1424

до 1458 МДж/м². Различия по территории невелики. При этом в рассматриваемый период происходит уменьшение ФАР по всей территории РТ со скоростью от -23.5 МДж/м² на северо-западе до -35.5 МДж/м² на северо-востоке, что обусловлено ослаблением рассеянной радиации как составной части ФАР из-за уменьшения общей облачности в вегетационный период.

Таблица 2

Корреляция между метеорологическими величинами, осредненными по территории РТ, и циркуляционными модами в период 1966–2025 гг.

Индекс	Сезон			
	Зима	Весна	Лето	Осень
Температура воздуха				
NAO	0.65	-0.25	-0.20	-0.01
SOI	-0.10	-0.07	0.36	0.08
EA/WR	0.04	-0.32	-0.69	-0.59
EA	0.28	0.14	0.37	0.25
PNA	0.22	-0.23	0.16	0.16
SCAND	-0.58	-0.41	-0.11	-0.15
Относительная влажность				
NAO	0.36	0.37	0.11	0.17
SOI	-0.18	-0.12	-0.35	-0.17
EA/WR	0.19	0.11	0.46	0.33
EA	0.21	-0.21	-0.28	-0.19
PNA	0.23	0.26	-0.21	-0.22
SCAND	-0.48	0.15	-0.01	-0.24
Атмосферные осадки				
NAO	0.05	0.17	0.07	0.03
SOI	0.07	0.16	-0.26	-0.05
EA/WR	0.16	0.32	0.37	0.40
EA	0.24	0.23	-0.20	-0.23
PNA	-0.03	-0.29	-0.20	-0.22
SCAND	-0.45	-0.31	-0.04	-0.36
Атмосферное давление				
NAO	-0.36	-0.06	0.02	-0.04
SOI	0.20	-0.05	0.20	0.02
EA/WR	-0.64	-0.38	-0.28	-0.37
EA	-0.26	-0.34	0.01	0.12
PNA	-0.06	0.24	0.13	0.18
SCAND	0.71	0.61	0.25	0.54

Примечание. NAO – Северо-Атлантическое колебание; SOI – Эль-Ниньо – Южное колебание; EA/WR – Восточная Атлантика – Западная Россия; EA – Восточная Атлантика; PNA – Северо-Тихоокеанская осцилляция; SCAND – Скандинавское колебание.

Расчет коэффициентов корреляции между ФАР и метеовеличинами выявил тесные связи. Так, коэффициент корреляции с атмосферным давлением в летний период достигает 0.78. Естественно, что с ростом давления происходит

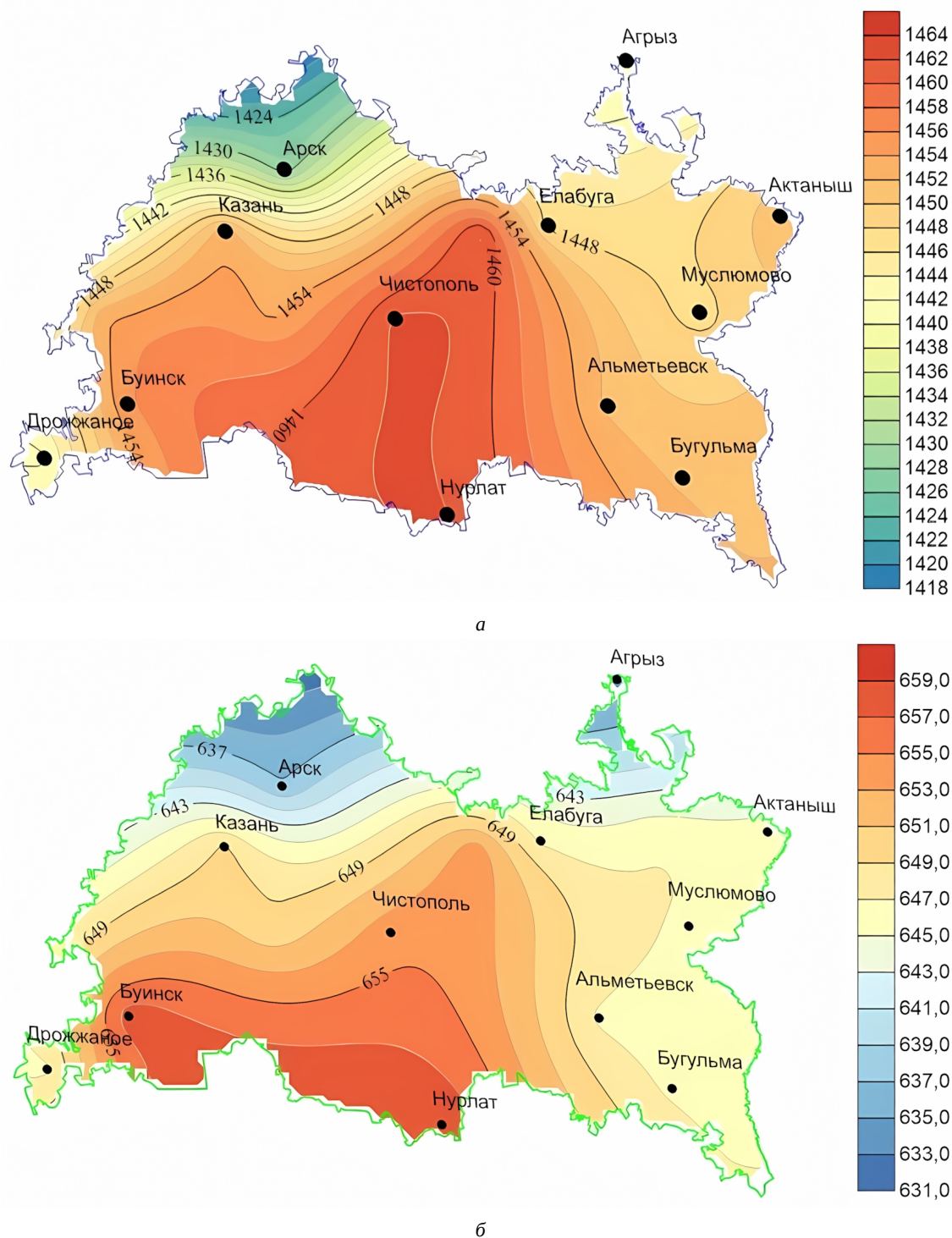


Рис. 2. Распределение фотосинтетической радиации за вегетационный период (МДж/м^2) (а) и суммарной солнечной радиации (МДж/м^2) в июле (б) на территории РТ (цвет онлайн)

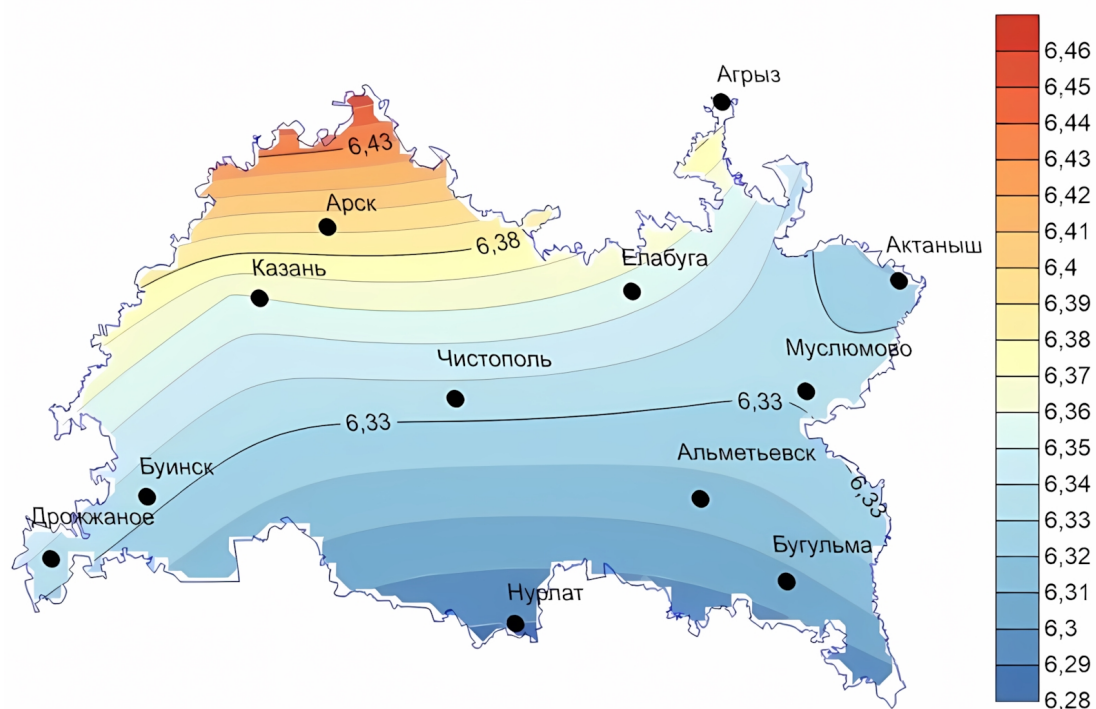
уменьшение облачности и увеличение приходящей солнечной радиации. При этом с облачностью связь ФАР отрицательная, и величина r достигает -0.86 . Как известно, облачность является самым мощным регулятором радиационного режима атмосферы и подстилающей

поверхности [14]. Анализ карт распределения облачности по территории РТ в январе показывает, что она уменьшается с 6.4 до 6.3 баллов с северо-запада на юго-восток, в июле отмечается минимальное количество облачности в годовом ходе – с севера на юг ее количе-

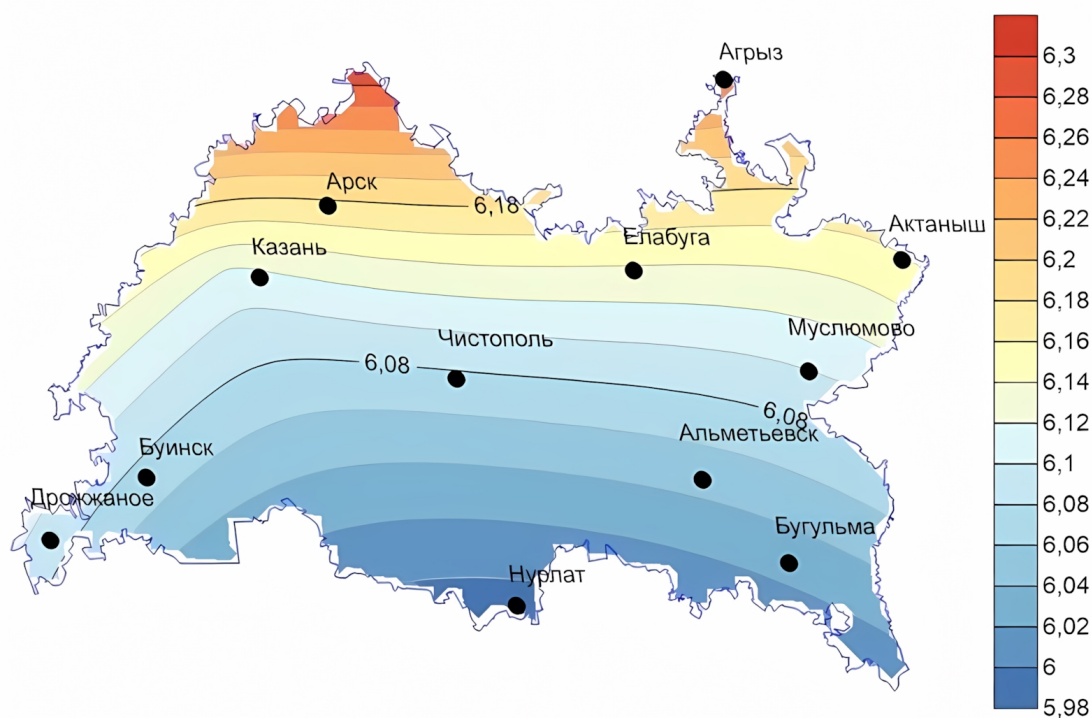


ство уменьшается с 6.2 до 5.0 баллов (рис. 3). Как следует из работ [15, 16], в зимний период увеличение количества облаков приводит к повышению температуры, а летом, наоборот, к ее понижению. Расчеты КНЛТ (баллы/10 лет)

общей облачности показали, что в холодный период (октябрь–апрель) происходит увеличение облачности, а в теплый (май–сентябрь) – ее уменьшение. В марте скорость роста облаков достигает 1.1 балла/10 лет, а в августе



а



б

Рис. 3. Распределение общей облачности (баллы) на территории РТ в январе (а) и июле (б) (цвет онлайн)



скорость уменьшения облачности максимальная (–0.3 балла/10 лет). Величина r между ФАР и температурой воздуха достигает 0.72. Следовательно, метеорологические условия на территории в последние десятилетия благоприятствуют жизнедеятельности растений.

Для оценки состояния увлажненности среды принято использовать коэффициент увлажненности $\frac{E}{E_0}$. Наши расчеты величин испарения E и испаряемости E_0 производились по методу Мезенцева. Как видно из табл. 3, значения величин E_0 , рассчитанных для периода 1966–2025 гг., изменяются от 575.2 мм (ст. Бугульма) до 620.1 мм (ст. Казань). Величина E меняется в пределах от 410.2 мм (ст. Муслумово) до 477.5 мм (ст. Казань). При этом, согласно рассчитанным значениям КНЛТ, происходит рост испарения со скоростью от 0.9 мм/10 лет (ст. Чулпаново) до 14.8 мм/10 лет (ст. Казань). В среднем по территории РТ величина E равна 437.8 мм, а величина КНЛТ составляет 7.3 мм/10 лет, т. е. испарение имеет тенденцию к росту. Величина коэффициента увлажненности меняется в пределах от 0.68 до 0.77 (среднее значение по территории РТ 0.73), КНЛТ $\frac{E}{E_0}$ имеет отрицательный знак (–0.09 ед./10 лет), что свидетельствует об уменьшении состояния увлажненности.

Для оценки увлажненности территории РТ использовались специальные индексы, рассчитанные по формулам (1)–(4). На рис. 4 представлен временной ход указанных показателей в период 1966–2025 гг., осредненных по территории РТ. Как видно из рис. 4, индекс сухости Будыко меняется в пределах от 0.59 (1978 г.) до 1.47 (1975 г.), среднее зна-

чение 0.81, СКО = 0.20. Наблюдается слабый рост этого индекса, КНЛТ = 0.007 ед./10 лет, коэффициент детерминации $R^2 = 0.0035$, т. е. линейный тренд статистически не значим. Величина ГТК, рассчитанная для летнего периода, испытывает слабую тенденцию к падению. Она меняется в пределах от 0.38 (2010 г.) до 2.05 (1978 г.) (см. рис. 4), среднее значение 1.10, СКО = 0.33. Скорость понижения ГТК составляет –0.038 ед./10 лет ($R^2 = 0.0412$). Коэффициент увлажненности КУ также испытывает слабую тенденцию к падению со скоростью –0.015 ед./10 лет ($R^2 = 0.0252$). КУ меняется в период 1966–2025 гг. в пределах от 0.46 (2010 г.) до 1.40 (1978 г.), среднее значение 0.84, СКО = 0.17. Индекс Педя в летний период меняется в пределах от –2.25 (1978 г.) до 3.59 (2010 г.). Он показывает, что летом в 1978 г. сложились условия избыточного увлажнения, а в 2010 г. – условия сильной засухи. Среднее значение $S = 0$, так как средние значения T и R находились по всему ряду, СКО = 1.14, КНЛТ = 0.20 ед./10 лет. Все четыре индекса указывают на слабую тенденцию роста засушливости на территории РТ в последние десятилетия, при этом все индексы указывают на знаковые годы – 1978 и 2010.

Рассмотрим распределение дат устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха (ССТ) через значения 0, 5, 10 и 15°C весной и осенью, а также продолжительность периодов с температурами выше указанных значений в период 1966–2025 гг. По данным метеостанций, весной переход ССТ через 0°C происходит на территории РТ в период с 30 марта по 9 апреля (средняя дата по РТ 2 апреля), переход через 5°C осуществляется в период с 22

Таблица 3

Характеристики испарения, рассчитанные по методу Мезенцева по данным метеостанций РТ в период 1966–2025 гг.

Показатель	Арск	Елабуга	Вязовые	Казань	Мензелинск	Лаишево	Чистополь	Кайбицы	Муслумово	Акташ	Азнакаево	Тетюши	Бугульма	Чулпаново	Среднее по РТ
T_0	87.3	90.8	90.6	92.3	88.1	90.9	88	89.7	90.4	90	87.4	90	85.6	90.6	89.41
E_0	586.3	609.9	609.2	620.1	592.1	610.7	591.5	602.5	607.3	604.8	587.3	605	575.2	608.7	600.76
e	0.87	0.87	0.9	0.87	0.9	0.87	0.89	0.9	0.92	0.9	0.88	0.9	0.86	0.91	0.89
I	1.16	1.19	1.3	1.14	1.3	1.17	1.25	1.3	1.4	1.29	1.23	1.3	1.18	1.33	1.25
R	52.2	535.1	485.1	557.8	471.8	541.3	488.3	480.5	448.9	490.2	498.6	484.6	512.6	474	465.79
E	447	460	432.5	477.5	420.2	464.3	430.8	428	410.2	433.9	433.1	430.8	435.4	425.9	437.83
E/E_0	0.76	0.75	0.71	0.77	0.71	0.76	0.73	0.71	0.68	0.72	0.74	0.71	0.76	0.70	0.73
КНЛТ E , мм/10 лет	12.10	5.87	13.07	14.75	6.85	3.55	4.33	11.03	5.30	6.79	5.33	9.13	3.50	0.92	7.32

Примечание. Обозначения показателей см. формулу (5).

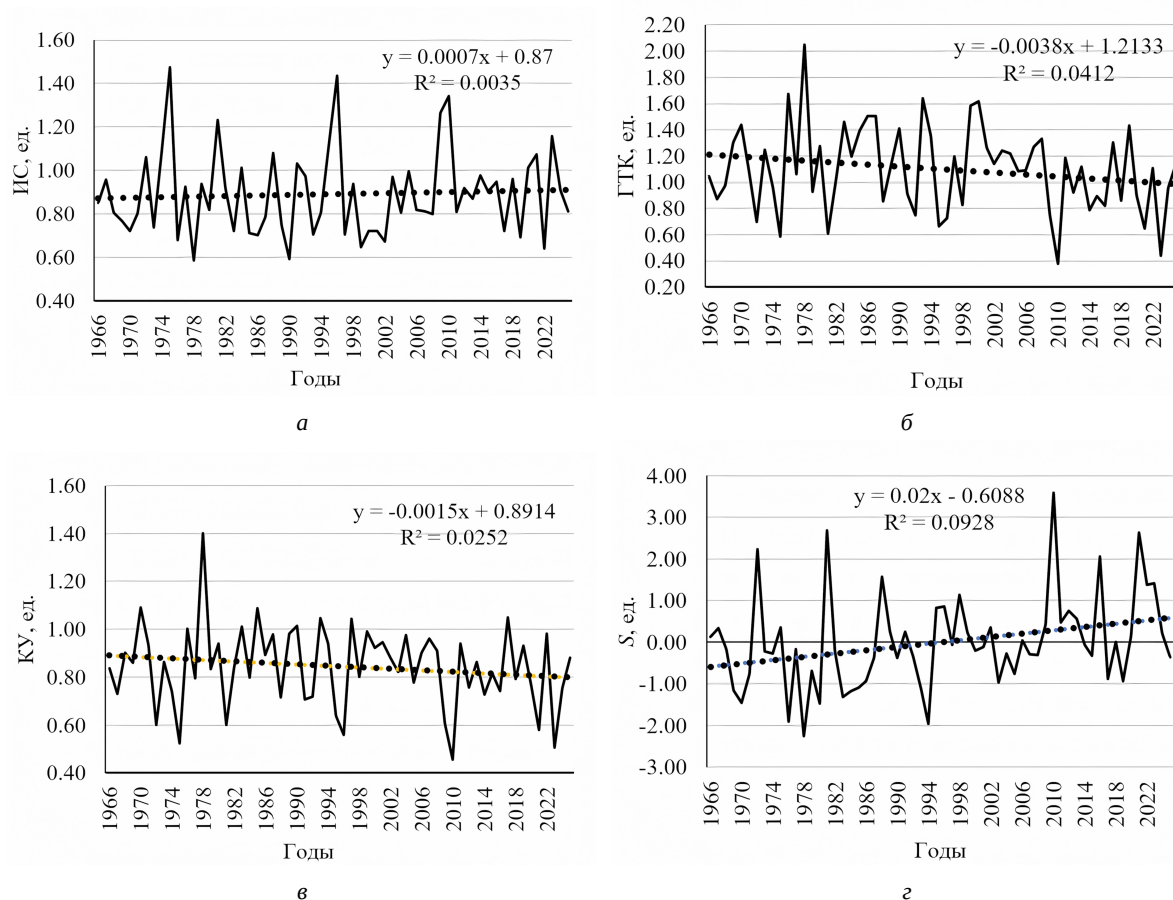


Рис. 4. Временной ход характеристик увлажненности в летний сезон на территории РТ в период 1966–2025 гг.: а – индекс сухости; б – индекс ГТК; в – индекс коэффициента увлажненности; г – индекс Педя

по 26 апреля (среднее значение 23 апреля), переход через 10°C – в период с 9 по 13 мая (среднее значение 10 мая), переход через 15°C – в период с 29 мая по 2 июня (среднее значение 31 мая).

Осенью в среднем по территории РТ переход SST через 15°C происходит 1 сентября, через 10°C – 27 сентября, через 5°C – 16 октября и через 0°C – 10 ноября.

Поскольку рассматриваемые показатели между метеостанциями не имеют больших различий, то приводим значения продолжительности периодов с температурами выше 0, 5, 10 и 15°C – осредненными по территории РТ. Эти периоды равны соответственно 222, 176, 140 и 93 суткам. Как видно, продолжительность активной фазы вегетационного периода ($\text{CST} > 10^{\circ}\text{C}$) значительна (140 суток). При этом его продолжительность растет со скоростью 1.6 суток/10 лет.

К числу наиболее важных показателей теплообеспеченности сельскохозяйственных культур относится сумма активных температур за период, в котором CST воздуха $\geq 10^{\circ}\text{C}$. Как видно из данных, приведенных в табл. 4,

сумма активных температур в период 1966–2025 гг. меняется по территории РТ от 2294.6°C (ст. Бугульма) до 2480.0°C (ст. Казань). Среднее значение составляет 2397.9°C . В более ранний подпериод 1966–1995 гг. сумма положительных температур была заметно меньше, чем в более поздний 1996–2025 гг. подпериод. Ее прирост составил от 195.0°C (ст. Чулпаново) до 331.3°C (ст. Казань). СКО суммы активных температур для всего периода меняется в пределах от 246.6°C (ст. Чулпаново) до 296.7°C (ст. Казань), значения КНЛТ сумм активных температур в период 1966–2025 гг. меняются от $59.0^{\circ}\text{C}/10$ лет (ст. Чулпаново) до $101.6^{\circ}\text{C}/10$ лет (ст. Казань), что свидетельствует о заметном росте сумм активных температур в РТ за последние десятилетия. В среднем по территории РТ КНЛТ = 75.8°C .

Как следует из данных, приведенных в табл. 4, происходит заметный прирост суммы активных температур в более поздний подпериод (1996–2025 гг.) по сравнению с более ранним (1966–1995 гг.) на 247.3°C , при этом КНЛТ этого показателя в поздний подпериод составляет $97.8^{\circ}\text{C}/10$ лет.



Таблица 4

Сумма активных температур на метеостанциях РТ для различных периодов

Станция	Среднее значение по подпериодам, °С			СКО суммы активных температур по подпериодам, °С			КНЛТ, °С/10 лет, суммы активных температур по подпериодам		
	1966–2025 гг.	1966–1995 гг.	1996–2025 гг.	1966–2025 гг.	1966–1995 гг.	1996–2025 гг.	1966–2025 гг.	1966–1995 гг.	1996–2025 гг.
Арск	2328.5	2190.4	2466.5	278.2	264.6	219.1	86.2	24.7	112.6
Елабуга	2436.9	2304.7	2569.2	278.2	267.9	222.5	78.8	6.1	102.8
Вязовые	2431.9	2291.1	2572.7	275.9	261.1	213.6	84.9	6.4	109.2
Казань	2480.0	2314.3	2645.7	296.7	265.6	227.6	101.6	9.7	139.9
Мензелинск	2362.1	2236.7	2487.5	271.0	270.1	209.7	77.2	27.3	88.5
Лаишева	2442.7	2326.9	2558.6	265.4	260.5	218.4	72.9	18.0	101.9
Чистополь	2361.3	2227.1	2495.5	281.7	269.7	226.7	84.3	3.4	134.4
Кайбицы	2403.7	2284.5	2522.9	263.3	266.3	201.7	74.9	19.0	103.4
Муслюмово	2427.5	2326.1	2528.9	253.3	262.6	200.8	61.2	28.7	55.6
Акташ	2414.0	2312.3	2515.6	265.8	266.2	226.8	63.3	6.6	93.1
Азнакаево	2332.6	2218.9	2446.3	259.7	253.4	215.0	66.3	18.2	57.4
Тетюши	2423.7	2293.4	2554.0	276.7	272.5	215.4	81.0	23.6	102.8
Бугульма	2294.6	2179.5	2409.7	275.8	279.1	222.3	69.2	7.5	86.1
Чулпаново	2430.8	2333.3	2528.3	246.6	253.1	200.0	59.0	0.2	82.0
Среднее по РТ	2397.9	2274.2	2521.5	270.6	265.2	215.7	75.8	14.2	97.8

Будущие изменения температуры воздуха и атмосферных осадков на примере метеостанции Казань, Опорная были оценены с использованием результатов ансамблевых расчетов по 30 климатическим моделям проекта CMIP 6.

Как видно из табл. 5, при умеренном сценарии (ssp245) температура воздуха к концу XXI в. (период 2081–2100 гг.) возрастет по сравнению с периодом 2021–2040 гг. в январе на 2.42°С, в апреле на 2.12°С, в июле на 2.16°С, в октябре на 1.75°С и в целом за год на 2.05°С. Согласно жесткому сценарию (ssp585), эти изменения

будут более значительными. Так, в январе температура воздуха повысится на 6.11°С, а в год – на 5.05°С.

Что касается атмосферных осадков, то они также имеют тенденцию к росту: по «мягкому» сценарию прирост годовой суммы составит 25.60 мм, а при «жестком» – 45.61 мм. Июльские осадки, наоборот, имеют тенденцию к уменьшению, особенно заметную при жестком сценарии (на –7.63 мм).

Таким образом, согласно прогнозным оценкам, на фоне повышения температуры происходит уменьшение количества атмосферных

Таблица 5

Прогнозные оценки средних месячных и годовых величин температуры воздуха и атмосферных осадков в г. Казань в XXI в. при различных климатических сценариях CMIP6

Сценарий	Период (годы)	Январь	Апрель	Июль	Октябрь	Год
Температура воздуха, °С						
ssp245	2021–2040	–10.3	5.4	21.7	6.2	5.8
	2081–2100	–7.9	7.5	23.9	8.0	7.9
ssp585	2021–2040	–10.2	5.6	22.0	6.3	6.0
	2081–2100	–4.1	10.3	27.3	10.7	11.1
Атмосферные осадки, мм						
ssp245	2021–2040	51.6	49.8	58.6	55.5	641.2
	2081–2100	57.2	53.5	58.2	55.3	666.8
ssp585	2021–2040	52.3	50.3	58.1	55.3	635.6
	2081–2100	65.3	57.2	50.3	55.7	681.2



осадков в июле, что приводит к росту засушливости в вегетационный период.

Влияние агрометеорологических факторов на агроферу с использованием данных об урожайности яровой пшеницы (А, ц/га) в РТ за 1999–2025 гг. рассмотрено в работе [17], согласно которой урожайность этой культуры в Татарстане в период 2001–2020 гг. была самой высокой (около 29.0 ц/га) среди субъектов РФ.

Выводы

1. В последние десятилетия (1966–2025 гг.) на территории Республики Татарстан происходит потепление климата, особенно заметное в зимний период (в январе скорость повышения температуры воздуха достигает 0.86°C/10 лет), отмечается также годовой приrost атмосферных осадков (КНЛТ = 3.77 мм/10 лет) за исключением июля (КНЛТ = –2.07 мм/10 лет). При этом, если по годовым показателям температура и осадки растут, то относительная влажность воздуха и атмосферное давление уменьшаются.

2. С использованием рассчитанных индексов Будыко, ГТК и Педя выявлена слабая тенденция роста засушливости климата в летний период.

3. Сумма активных температур (ССТ > 10°C) изменяется на территории региона в период 1966–2025 гг. в пределах 2294.6–2480.0°C (среднее по территории значение 2397.9°C) при средней скорости прироста в 75.8°C/10 лет.

4. Корреляционный анализ выявил активную роль в сезонной изменчивости метеорологических величин следующих колебаний атмосферной циркуляции: зимой NAO и SCAND, летом EA/WR. Значимая корреляция температуры воздуха с явлением ЭНЮК отмечается лишь летом ($r = 0.36$).

5. Прогнозные оценки изменений температуры воздуха и атмосферных осадков, полученные с использованием результатов расчетов по ансамблю 30 климатических моделей проекта CMIP6, выявили значительную тенденцию роста годовой температуры к концу XXI в. – на 2.1°C по «мягкому» и на 5.0°C по «жесткому» сценарию. Атмосферные осадки также прирастут за исключением июля, где их сумма уменьшится по обоим сценариям.

В заключение отметим, что учет выявленных региональных тенденций изменения современного климата под влиянием антропогенных факторов может оказаться полезным при планировании различных сельскохозяйственных мероприятий.

Библиографический список

1. IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte V.,

- Zhai P., Pirani A., Connors S. L., Péan C., Berger S., Caud N., Chen Y., Goldfarb L., Gomis M. I., Huang M., Leitzell K., Lonnoy E., Matthews J. B. R., Maycock T. K., Waterfield T., Yelekçi O., Yu R., and Zhou B. eds.]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2021. 2391 p.
2. Мохов И. И. Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования // Вестник РАН. 2022. Т. 92, № 1. С. 3–14. <https://doi.org/10.31857/S0869587322010066>, EDN: NTZPAK
3. Данилов-Данильян В. Н., Катцов В. М., Профилев Б. Н. Экология и климат: где мы сейчас и где будем через два-три десятилетия. Общемировые тенденции // Вестник РАН. 2023. Т. 93, № 10. С. 930–941.
4. Золина О. Г., Володин Е. М., Стерин А. М. Экстремальные климатические события в условиях наблюдаемых и прогнозируемых климатических изменений // Фундаментальная и прикладная климатология. 2026. Т. 12, № 9. С. 67–129. <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2026-1-67-129>, EDN: KPWMQ
5. Переведенцев Ю. П., Шанталинский К. М., Мирсаева Н. А., Николаев А. А., Аухадеев Т. Р., Гурьянов В. В., Шерстюков Б. Г. Климатические изменения на территории Приволжского федерального округа в XX–XXI веках и их последствия для агроферы // Метеорология и гидрология. 2023. № 9. С. 86–99. <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2023-9-86-99>, EDN: PKBEVI
6. Переведенцев Ю. П., Павлова В. Н., Шанталинский К. М., Мирсаева Н. А., Николаев А. А., Тагиров М. Ш. Агроклиматические условия на территории Республики Татарстан в период 1966–2021 гг. // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2022. № 4 (386). С. 96–113. <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-4-96-113>, EDN: QNFHPM
7. Брукс К., Карузерс Н. Применение статистических методов в метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1963. 416 с.
8. Педь Д. А. Об определении дат устойчивого перехода температуры воздуха через определенные значения // Метеорология и гидрология. 1951. № 10. С. 38–39.
9. Методы оценки последствий изменений климата для физических и биологических систем / под ред. С. М. Семенова. М.: Росгидромет, 2012. 508 с.
10. Мезенцев В. С. К методике расчета суммарного испарения и характеристик увлажнения за внутригодовые периоды // Труды Омского сельскохозяйственного института (ОмСХИ). 1962. Т. 24. С. 35–54.
11. Иванов Н. Н. Об определении величин испаряемости // Изв. Всесоюзного географического общества. 1954. Т. 86, № 2. С. 189–196
12. Грингоф И. Г., Клещенко А. Д. Основы сельскохозяйственной метеорологии: в 3 т. Т. I. Потребность сельскохозяйственных культур в агрометеорологических условиях и опасные для сельскохозяйственного производства погодные условия. Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2011. 808 с.



13. Справочник эколого-климатических характеристик г. Москвы (по наблюдениям Метеорологической обсерватории МГУ) : в 2 т. Т. 1 / под ред. А. А. Исаева. М. : Изд-во МГУ, 2003. 304 с.
14. Монин А. С. Прогноз погоды как задача физики. М. : Наука, 1969. 184 с.
15. Матвеев Ю. Л. Динамико-статистическое исследование поля облаков глобального и синоптического масштабов : дис. в виде научного доклада ... д-ра физ.-мат. наук. СПб., 1996. 62 с. EDN: ZJBRQV
16. Шерстюков Б. Г. Изменения, изменчивость и колебания климата. Обнинск : ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2011. 293 с. EDN: QKLGFB
17. Павлова В. Н., Переведенцев Ю. П., Караченкова А. А., Тагиров М. Ш., Мирсаева Н. А. Оценка агроклиматических ресурсов и урожайности яровой пшеницы в Республике Татарстан // Метеорология и гидрология. 2023. № 1. С. 90–102. <https://doi.org/10.52002/0130-2906-2023-1-90-102>, EDN: HNAHVO

Поступила в редакцию 06.04.2026; одобрена после рецензирования 07.05.2026;
принята к публикации 16.06.2026; опубликована 30.09.2026

The article was submitted 06.04.2026; approved after reviewing 07.05.2026;
accepted for publication 16.06.2026; published 30.09.2026