

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-4-96-113>

УДК 551.85

Агроклиматические условия на территории Республики Татарстан в период 1966–2021 гг.

**Ю.П. Переведенцев¹, В.Н. Павлова², К.М. Шанталинский¹,
Н.А. Мирсаева¹, А.А. Николаев¹, М.Ш. Тагиров³**

¹Казанский (Приволжский) федеральный университет, г. Казань, Россия;

²Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии, г. Обнинск, Россия;

³ФГБНУ "Татарский НИИ СХ РАСХН", г. Казань, Россия
ypereved@kpfu.ru

Рассматривается состояние агроклиматических ресурсов Республики Татарстан в период 1966–2021 гг. С использованием ежедневных данных метеонаблюдений на 13 метеостанциях, расположенных на территории Республики Татарстан, и данных реанализа рассчитывались радиационные характеристики (прямая, суммарная и фотосинтетическая радиация), сумма положительных температур активной фазы вегетационного периода (период с превышением среднесуточной температуры 10 °С), даты перехода среднесуточной температуры через 10 °С весной и осенью (для ст. Казань, ЦГМС даты перехода среднесуточной температуры через 0, 5, 10 и 15 °С), продолжительность вегетационного периода. Дана характеристика степени засушливости и переувлажненности региона с использованием индекса сухости Будыко, гидротермического коэффициента Сеянинова (ГТК), индекса увлажненности Сапожниковой. Дана оценка биологической эффективности климата. Выявлена значимая тенденция роста засушливости в республике с 1976 года.

Ключевые слова: солнечная радиация, среднесуточная температура воздуха, вегетационный период, сумма положительных температур, тенденция климатических изменений, индексы сухости и переувлажненности

Agroclimatic conditions in the Republic of Tatarstan during 1966-2021

**Yu.P. Perevedentsev¹, V.N. Pavlova², K.M. Shantalinsky¹,
N.A. Mirsaeva¹, A.A. Nikolaev¹, M.Sh. Tagirov³**

¹Kazan (Volga Region) Federal University, Kazan, Russia;

²All-Russian Research Institute of Agricultural Meteorology, Obninsk, Russia;

³Tatar Research Institute of Agriculture, Kazan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Kazan, Russia
ypereved@kpfu.ru

The state of agroclimatic resources in the Republic of Tatarstan during 1966–2021 is considered. Using daily meteorological observations at 13 meteorological stations located on the territory of the Republic of Tatarstan and reanalysis data, the radiation characteristics (direct, total, and photosynthetic radiation), the sum of positive temperatures of the active phase of the growing season (the period average daily temperatures above 10 °C), the dates of 10°C average daily temperature crossing in spring and autumn (for Kazan

CGMS station, the dates of 0, 5, 10 and 15 °C average daily temperature crossing), the duration of the growing season are calculated. The characterization of the degree of aridity and waterlogging of the region is given using the Budyko dryness index, Selyaninov hydrothermal coefficient, and Sapozhnikova moisture index. An assessment of the biological effectiveness of the climate is given. A significant trend toward the aridity growth in the republic since 1976 has been revealed.

Keywords: solar radiation, average daily air temperature, growing season, sum of positive temperatures, climate change trend, dryness and waterlogging indices

Введение

Республика Татарстан относится к числу наиболее развитых в промышленном и сельскохозяйственном отношении субъектов Российской Федерации, ее площадь составляет 68 тыс. км², население 3773 тыс. человек. Основными сельскохозяйственными культурами являются зерновые, зернобобовые и картофель, условия развития и созревания которых зависят напрямую от климатических факторов – света, тепла и влаги. Следует отметить, что изучение климатических условий и климатических ресурсов республики является приоритетным направлением климатологов Казанского университета на протяжении многих десятилетий. Этой теме посвящены монографии и многочисленные научные статьи, среди которых [3, 4, 9–13].

В ряде работ, посвященных изучению агроклиматических условий Приволжского федерального округа, также содержатся агроклиматические оценки по Республике Татарстан (далее – РТ) [1, 7, 14–16].

Таким образом, тема является актуальной для аграрного сектора РТ.

Цель настоящей статьи – рассмотреть динамику агроклиматических ресурсов Татарстана в период 1966–2021 гг., большая часть которого приходится на активную фазу потепления климата.

Методы и материалы

В качестве исходных данных в работе использовались результаты ежедневных метеорологических наблюдений на 13 метеостанциях РТ (рис. 1) из фонда ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», данные наблюдений метеостанции Казань, университет. Для расчета радиационных характеристик региона использовались данные актинометрических наблюдений на метеостанциях Казань, университет и Вязовые, а также данные реанализа (<https://power.larc.nasa.gov/>) за 1983–2020 годы.

Исходные данные подвергались статистической обработке: находились средние значения, средние квадратические отклонения (СКО), линейные тренды температуры и осадков, нормированные аномалии температуры воздуха и атмосферных осадков. Выделение низкочастотного компонента (НЧК) в рядах осуществлялось с помощью низкочастотного фильтра Поттера с точкой отсечения 15 лет и более. Достоверность результатов оценивалась с помощью известных статистических методов.

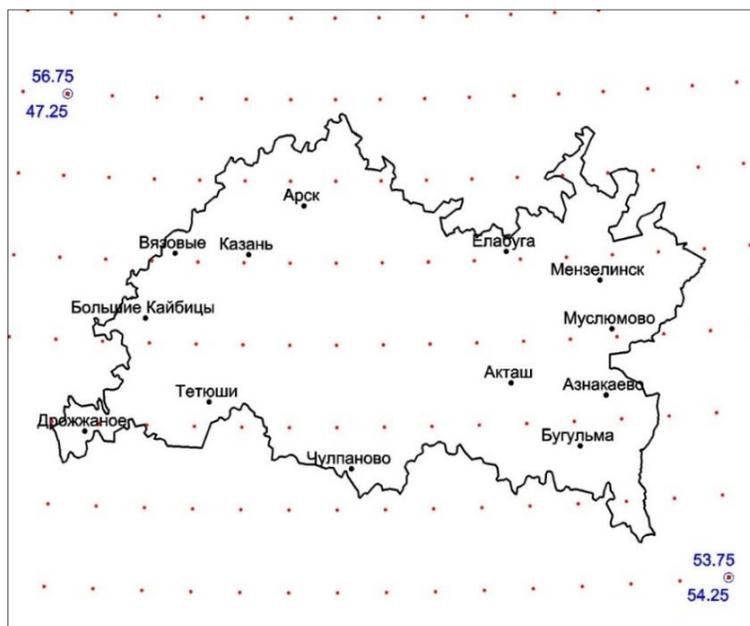


Рис. 1. Расположение метеорологических станций на территории Республики Татарстан.

Fig. 1. Location of meteorological stations in the Republic of Tatarstan.

С целью оценки условий теплого периода, когда биосферные процессы протекают наиболее активно, рассчитывались следующие характеристики: продолжительность вегетационного периода, сумма температур, индексы сухости и увлажнения, тренды и др.

По методике [8] определялись даты устойчивого перехода средней суточной температуры воздуха (ССТ) через 0, 5, 10 и 15 °С весной и осенью, продолжительность периодов, превышающих указанные ССТ, а также суммы положительных температур.

Для характеристики увлажненности района рассчитывались индекс сухости Будыко (ИС), гидротермический коэффициент Селянинова (ГТК) и коэффициент увлажнения Сапожниковой (КУ) [5]:

$$ИС = \frac{0,18 \sum T_{>10^{\circ}C}}{R_{I-XII}}, \quad (1)$$

$$ГТК = \frac{R_{VI-VIII}}{0,1 \sum T_{VI-VIII}}, \quad (2)$$

$$КУ = \frac{0,5R_{X-III} + R_{IV-IX}}{0,18 \sum T_{IV-IX}}, \quad (3)$$

где T – среднесуточная температура, °С; R – сумма осадков, мм.

Фотосинтетическая активная радиация (ФАР) рассчитывалась по формуле [2]:

$$\Sigma Q_{\text{ФАР}} = 0,43 \Sigma S' + 0,57 \Sigma D, \quad (4)$$

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

Биологическая эффективность климата оценивалась с помощью индекса биологической эффективности климата [3]:

$$\text{БЭК} = (0,01 \Sigma T_{>10^{\circ}\text{C}}) \cdot \text{КУ}, \quad (5)$$

где КУ – коэффициент увлажнения, который находится как отношение годового количества осадков (R , мм) к годовой испаряемости (E , мм). Ежемесячные данные испаряемости находятся по формуле Н.Н. Иванова:

$$E_{\text{мес.}} = 0,0018 (25 + t)^2 (100 - f), \quad (6)$$

где t – среднемесячная температура воздуха, °С; f – среднемесячная относительная влажность воздуха, %.

Результаты

Как известно, тепло, влага и свет являются самыми необходимыми компонентами для всех растений. Рассмотрим вначале распределение в Приказанском регионе характеристик солнечной радиации (прямой и суммарной), фотосинтетической активной радиации (ФАР) и продолжительности солнечного сияния по данным станций Казань, университет и Вязовые за 1960–2020 гг., где проводятся актинометрические измерения.

На долю радиационного баланса в регионе приходится 40–45 % суммарной радиации. Средний годовой радиационный баланс в регионе составляет 1344 МДж/м². Период с положительным радиационным балансом составляет 8 месяцев, редко 7 месяцев. Переход радиационного баланса от отрицательных значений к положительным происходит в марте или в отдельные годы в апреле. Смена знака радиационного баланса осенью отмечается в третьей декаде октября. В отдельные годы в зависимости от залегания снежного покрова может быть сдвиг времени перехода радиационного баланса через ноль.

По данным метеостанции Вязовые годовой приход прямой солнечной радиации в среднем равен 1941 МДж/м², при этом наибольшее количество радиации 364–385 МДж/м² поступает в июне и июле.

Солнце является источником энергии природных процессов. Решающее значение для жизнедеятельности растений имеет коротковолновая радиация в интервале ($\lambda = 0,38 \dots 0,71$ мкм), называемая фотосинтетически активной радиацией. ФАР является одним из важнейших факторов продуктивности сельскохозяйственных культур [2].

ФАР рассчитывалась по территории РТ по формуле (4) за период 1968–2020 гг. по данным реанализа (<https://power.larc.nasa.gov/>). В течение вегетационного периода она возрастает от 230–240 МДж/м² в апреле до 327–300 МДж/м² в июне (максимум). На рис. 2а представлено распределение по территории республики суммарных значений ФАР за период апрель–август, из которого следует, что величина ФАР возрастает с северо-запада (1428 МДж/м²) на юго-восток (1452 МДж/м²).

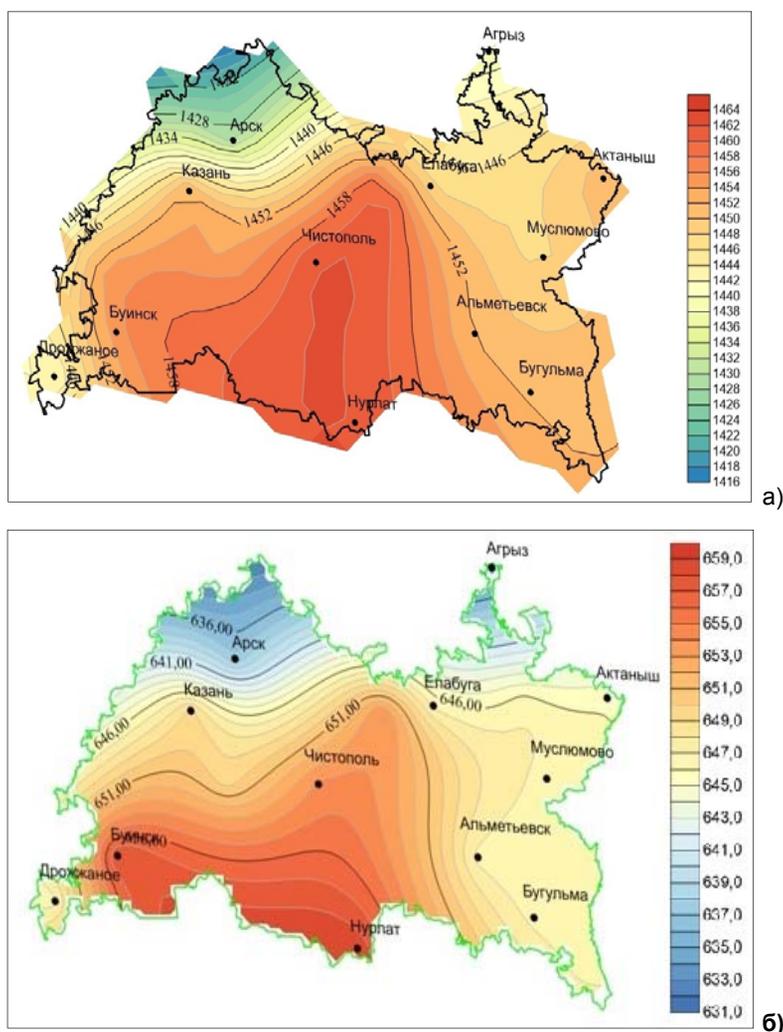


Рис. 2. Фотосинтетическая активная радиация (МДж/м²) за вегетационный период (а) и суммарная солнечная радиация (МДж/м²) в июле (б) на территории Республики Татарстан.

Fig. 2. Photosynthetic active radiation (MJ/m²) during the growing season (a) and total solar radiation (MJ/m²) in July (б) in the Republic of Tatarstan.

При этом, согласно расчетам КНЛТ (коэффициент наклона линии тренда), ФАР в апреле уменьшается со скоростью от $-3,15$ до $-10,53$ МДж/м²/10 лет, в мае и июне, наоборот, возрастает. Так, в июне значения КНЛТ меняются в пределах от $5,80$ до $16,22$ МДж/м²/10 лет, в июле вновь происходит ее уменьшение (на северо-востоке КНЛТ достигает $-15,11$ МДж/м²/10 лет). Территориальное распределение ФАР соответствует по своей структуре данным рис. 2б, где приведено распределение суммарной радиации, что вполне естественно, так как исходные данные для расчетов включают сведения о прямой и рассеянной радиации, согласно формуле (4).

Для растений большое значение имеет продолжительность солнечного сияния. По данным наблюдений на метеостанции Казань, университет фактическая продолжительность солнечного сияния варьирует от 12 до 56 % возможной продолжительности. Продолжительность солнечного сияния в Приказанском регионе в среднем составляет 1916 ч в год. Самым солнечным является период с апреля по август, когда число часов солнечного сияния достигает 231–321 ч. С сентября по октябрь происходит резкое уменьшение продолжительности солнечного сияния с 160 ч в сентябре до 92 ч в октябре. В зимний период продолжительность солнечного сияния наименьшая, она составляет 16–25 % от возможной продолжительности.

Рассмотрим основные параметры вегетационного периода, связанные с переходом ССТ через определенные пределы.

Анализ полученных результатов определения дат устойчивого перехода ССТ через значение 10 °С весной и осенью для ст. Казань, ЦГМС и остальных (12) станций РТ через 10 °С, а также продолжительности периодов с температурами выше указанных значений показал, что между станциями нет больших различий (табл. 1).

Как видно из табл. 1, весной переход ССТ через 10 °С (начало активной фазы вегетационного периода) происходит на территории РТ в мае в диапазоне от 122 суток (ст. Чулпаново) до 126 суток (ст. Арск) от начала года, а осенью этот период завершается на ст. Арск на 268 сутки от начала года, позднее на ст. Муслюмово (на 271 сутки). Таким образом, как весной, так и осенью различия между станциями невелики (до 3–4 суток). Продолжительность этого периода варьирует по территории РТ от 142 суток (ст. Арск) до 149 суток (ст. Акташ), разница составляет неделю.

Сумма положительных температур воздуха варьирует по территории РТ от 2319 °С (ст. Арск) до 2476 °С (ст. Казань, ЦГМС), сумма осадков меняется от 227 мм (ст. Кайбицы) до 262 мм (ст. Бугульма). Рост осадков на юго-востоке РТ обусловлен влиянием Бугульминско-Белебеевской возвышенности.

Рассчитанные тенденции изменения во времени рассмотренных характеристик активной фазы вегетационного периода (АФВП) показывают, что ее продолжительность на территории РТ возрастает со скоростью от

0,6 сутки/10 лет (ст. Вязовые) до 3,4 сутки/10 лет (ст. Елабуга), так как весной она имеет тенденцию к более раннему наступлению, а осенью к более позднему завершению. Сумма температур также имеет тенденцию к росту со скоростью от 51,1 °C/10 лет (ст. Вязовые) до 77,6 °C/10 лет (ст. Елабуга), что благоприятно для сельского хозяйства. Атмосферные осадки показывают менее однородную картину. Так, на ст. Бугульма они убывают со скоростью -1,9 мм/10 лет, а на ст. Вязовые растут со скоростью 5,7 мм/10 лет.

Таблица 1. Средние многолетние (1966–2021 гг.) характеристики периода со среднесуточными температурами более 10 °C

Table 1. Multiyear average (1966–2021) characteristics of the period with average daily temperatures above 10 °C

Станция	Начало периода	Конец периода	Продолжительность периода, сутки	Сумма температур, °C	Сумма осадков, мм
Арск	126	268	142	2319	239
Елабуга	123	271	148	2440	260
Вязовые	124	270	147	2424	240
Казань	123	270	148	2476	261
Мензелинск	126	269	144	2358	234
Кайбицы	123	269	147	2398	227
Муслюмово	123	271	149	2441	235
Акташ	122	270	149	2429	234
Азнакаево	124	268	145	2342	245
Тетюши	124	270	148	2421	238
Дрожжаное	124	268	144	2365	244
Бугульма	124	268	145	2315	262
Чулпаново	122	270	148	2434	235

Примечание. Начало и конец периода вычисляются в днях от начала года.

В табл. 2 представлены характеристики вегетационного периода с достаточно большим числом показателей для ст. Казань, ЦГМС (с дополнением перехода ССТ через 0, 5 и 15 °C). Как видно из табл. 2, во всех случаях, согласно рассчитанным значениям КНЛТ, все даты вегетационного периода раньше наступают и позже заканчиваются. При этом суммы температур, как и средние температуры, возрастают, в отмеченные периоды нарастают в определенной последовательности (табл. 3).

Переход средней суточной температуры воздуха через 5 °C осенью в среднем по территории РТ за период 1966–2021 гг. происходил 15 октября. Раньше всего (13 октября) температура переходила через указанное значение на востоке республики (Азнакаево, Бугульма, Мензелинск), позже (17 октября) – на западе и юге (Чулпаново, Кайбицы, Тетюши) (табл. 4).

За исследуемый период имело место увеличение даты перехода осенней средней суточной температуры воздуха через 5 °C, наиболее ярко выраженное на ст. Чулпаново, Елабуга и Арск, где значения КНЛТ указанной

величины, определяемые на уровне значимости 5 %, составляли, соответственно, 3,1, 2,7 и 2,1 дня за 10 лет. Положительные, но статистически не значимые КНЛТ наблюдались на остальных станциях РТ. Это связано с понижением температур первого десятилетия исследуемого периода, что привело к более ранним датам перехода средней суточной температуры воздуха через 5 °С в этот период.

Таблица 2. Характеристики перехода температуры через 0, 5, 10 и 15 °С на ст. Казань, ЦГМС в 1966-2021 гг.

Table 2. Characteristics of temperature transition through 0, 5, 10 and 15 °С at st. Kazan, CHMS in 1966-2021

Переход Т через значения	Характеристика	Средняя величина, дни	СКО, дни	КНЛТ, дни/10 лет	DL, дни	R ² L, %	R ² F, %
0 °С	Начало периода	91	10	-1,4	-7,8	2	18
	Конец периода	312	14	2,4	13,4	4	20
	Продолжительность	222	17	3,8	21,3	9	19
5 °С	Начало периода	110	9	-0,4	-2,2	0	8
	Конец периода	289	12	1,8	10,1	3	26
	Продолжительность	180	16	2,2	12,3	1	20
10 °С	Начало периода	123	11	-0,2	-1,1	0	8
	Конец периода	270	10	1,4	7,8	1	12
	Продолжительность	148	14	1,6	9,0	0	12
15 °С	Начало периода	148	20	-4,2	-23,5	8	16
	Конец периода	243	12	0,8	4,5	0	22
	Продолжительность	96	25	5,0	28,0	7	20

Примечание: DL – величина изменения за исследуемый период по линейному тренду; R²L – вклад в общую дисперсию линейного тренда (%); R²F – вклад в общую дисперсию низкочастотной компоненты (%).

Таблица 3. Показатели температурного режима в различные фазы вегетационного периода

Table 3. Indicators of the temperature regime in different phases of the growing season

Переход Т через значения	Характеристика	Средняя величина, °С	СКО, °С	КНЛТ, °С / 10 лет	R ² L, %	R ² F, %
0 °С	Сумма температур	2814	253	92,6	32	44
	Средняя Т периода	12,7	1,15	0,2	4	15
5 °С	Сумма температур	2713	260	87,0	26	37
	Средняя Т периода	15,1	1,18	0,3	14	29
10 °С	Сумма температур	2476	254	73,4	19	29
	Средняя Т периода	16,8	1,32	0,3	12	26
15 °С	Сумма температур	1808	486	120,1	13	25
	Средняя Т периода	18,8	1,24	0,2	8	15

Таблица 4. Характеристики перехода среднесуточных температур через 5 °С осенью**Table 4.** Characteristics of the transition of average daily temperatures over 5 °С in autumn

Станция	Среднее, дни	Средняя дата	1966–2021 гг.			1976–2021 гг.		
			КНЛТ, дни/10 лет	DL, дни	R ² L, %	КНЛТ, дни/10 лет	DL, дни	R ² L, %
Арск	287	14.10	2,11	12	5	3,72	10	17
Елабуга	287	14.10	2,77	16	9	3,64	13	16
Вязовые	289	16.10	1,43	8	1	3,21	7	13
Казань	289	16.10	1,82	10	3	4,06	8	18
Мензелинск	286	13.10	1,20	7	0	2,24	6	5
Кайбицы	290	17.10	1,36	8	0	2,93	6	10
Муслимово	289	16.10	0,93	5	-2	1,73	4	2
Акташ	288	15.10	1,54	9	2	3,27	7	14
Азнакаево	286	13.10	1,75	10	2	2,27	8	5
Тетюши	290	17.10	1,48	8	1	3,40	7	13
Дрожжаное	289	16.10	1,23	7	0	3,03	6	11
Бугульма	286	13.10	1,72	10	2	2,44	8	5
Чулпаново	290	17.10	3,09	17	13	4,27	14	19

Примечание: DL – величина изменения за исследуемый период по линейному тренду; R²L – вклад в общую дисперсию линейного тренда (%). Среднее значение (1966–2021 гг.) вычислялось в днях от начала года.

В период с 1976 по 2021 год на всех станциях указанный линейный тренд статистически значим за исключением ст. Муслимово, что связано с наиболее выраженным на этой станции фактом понижения температур на восточных станциях республики начиная с 2008 г. и сдвигом дат перехода через 5 °С на более ранние сроки.

Таким образом, сдвиг дат устойчивого перехода осенней средней суточной температуры воздуха через 5 °С от наиболее ранних, наблюдавшихся в период 1976–1985 гг., до настоящего времени в среднем по РТ составил 10 дней от 8 до 18 октября. При этом в западных районах этот сдвиг составил 11 дней (переход происходит в среднем 19 октября), а в восточных – 7 дней (переход 15 октября).

Для характеристики увлажненности территории по данным 13 метеостанций РТ рассчитывались индексы сухости Будыко, ГТК Селянинова и коэффициент увлажненности (КУ) Сапожниковой по формулам (1) – (3). Результаты расчетов за период с ССТ>10 °С представлены в табл. 5.

Как видно из табл. 5, индекс сухости в летний период меняется по территории от 2,70 (ст. Казань) до 3,16 (ст. Кайбицы), индекс ГТК от 0,96 (ст. Кайбицы) до 1,16 (ст. Бугульма), величина КУ от 0,84 (ст. Муслимово) до 1,03 (ст. Бугульма), что свидетельствует в целом о сбалансированности

прихода и расхода влаги. При этом значения КНЛТ имеют положительный знак для индекса сухости и отрицательный для ГТК и КУ, что указывает на слабую тенденцию роста засушливости в регионе.

Таблица 5. Характеристики увлажненности территории Республики Татарстан

Table 5. Moisture characteristics in the Republic of Tatarstan

Станция	Индекс сухости (лето)		ГТК		КУ	
	Среднее значение	КНЛТ, ед./10 лет	Среднее значение	КНЛТ, ед./10 лет	Среднее значение	КНЛТ, ед./10 лет
Арск	2,72	0,10	1,05	-0,2	0,91	-0,2
Елабуга	2,94	0,23	1,09	-0,2	0,92	-0,3
Вязовые	3,00	0,04	1,01	0,0	0,83	0,0
Казань	2,70	0,16	1,07	-0,4	0,92	-0,2
Мензелинск	2,86	0,15	1,00	-0,3	0,83	-0,3
Кайбицы	3,16	0,15	0,96	-0,4	0,81	-0,2
Муслюмово	3,13	0,21	0,98	-0,3	0,77	-0,2
Акташ	3,26	0,17	0,98	-0,2	0,83	-0,1
Азнакаево	3,05	0,37	1,06	-0,3	0,88	-0,2
Тетюши	2,93	0,09	1,00	-0,2	0,84	-0,1
Дрожжаное	2,81	0,11	1,05	-0,1	0,86	-0,2
Бугульма	2,87	0,38	1,16	-0,4	0,94	-0,3
Чулпаново	3,12	0,19	0,98	-0,3	0,81	-0,2

Дополнительно по данным станции Казань, ЦГМС для двух периодов 1966–2021 и 1976–2021 гг. рассчитывались коэффициенты увлажнения Сапожниковой (КУ) и гидротермический коэффициент увлажнения Селянинова (ГТК). Результаты расчетов представлены на рис. 3. Как видно из рис. 3, в обоих случаях наблюдается тенденция уменьшения рассматриваемых индексов, что свидетельствует о некотором возрастании засушливости в Татарстане.

Представленные на рис. 3 линейные тренды КУ и ГТК не значимы для периода 1966–2021 гг. и значимы для периода 1976–2021 гг. на доверительном уровне не менее 2 %. Кроме того, низкочастотные компоненты индексов имеют сходство. Следует отметить, что величина КНЛТ этих индексов в период 1976–2021 гг. втрое превышает КНЛТ, рассчитанного для периода 1966–2021 гг. Так, для периода 1966–2021 гг. КНЛТ КУ равен -0.02 ед./10 лет, КНЛТ ГТК = -0.037 ед./10 лет, а для периода 1976–2021 гг. значения КНЛТ равны, соответственно, -0.061 ед./10лет и -0.112 ед./10лет. Среднее значение КУ для периода 1966–2021 гг. равно 0.98, ГТК – 1.07. Практически величина ГТК близка к 1.0, что свидетельствует о сбалансированности прихода и расхода влаги.

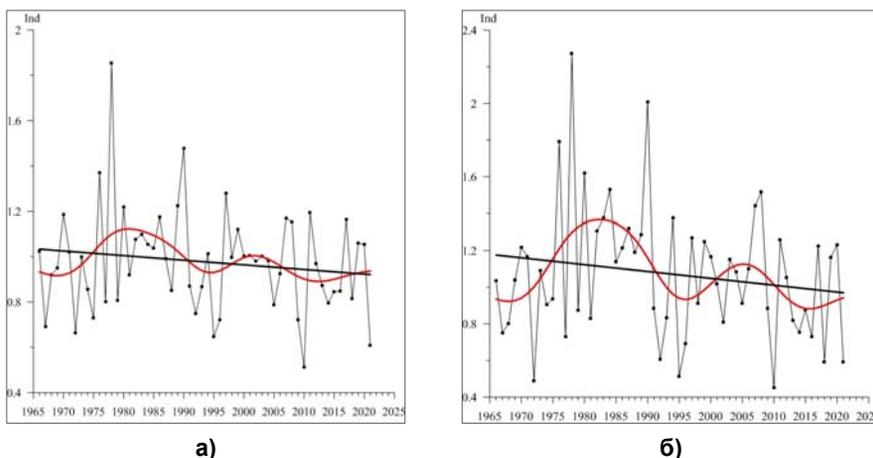


Рис. 3. Многолетний ход коэффициента увлажнения Сапожниковой (а) и гидротермического коэффициента увлажнения Селянинова (б) в Казани.
Fig. 3. Long-term behavior of Sapozhnikova's moisture coefficient (a) and Selyaninov's hydrothermal moisture coefficient (b) in Kazan.

Представляет также практический интерес анализ результатов расчета индекса биологической эффективности климата по формуле (5). Предварительно рассчитывались годовая испаряемость и коэффициент увлажнения. Результаты расчетов представлены в табл. 6.

Таблица 6. Индекс биологической эффективности климата
Table 6. Climate Biological Efficiency Index

Станция	Годовая испаряемость, мм		Коэффициент увлажнения		БЭК	
	Среднее значение	КНЛТ, мм/10 лет	Среднее значение	КНЛТ, ед./10 лет	Среднее значение	КНЛТ, ед./10 лет
Арск	601,63	3,08	0,92	-0,004	20,80	-0,029
Елабуга	647,18	3,47	0,88	-0,005	21,00	-0,043
Вязовые	640,76	2,86	0,78	-0,001	18,59	0,012
Казань	666,17	3,98	0,87	-0,004	21,10	-0,018
Мензелинск	632,45	3,29	0,77	-0,004	17,87	-0,037
Кайбицы	601,76	2,31	0,80	-0,001	19,03	0,020
Муслюмово	605,55	2,84	0,77	-0,003	18,39	-0,022
Акташ	619,36	2,63	0,83	-0,002	19,82	-0,012
Азнакаево	635,36	1,87	0,82	-0,002	18,76	0,013
Тетюши	623,55	2,24	0,80	-0,001	19,09	0,038
Дрожжаное	642,43	1,98	0,80	-0,003	18,37	-0,020
Бугульма	643,15	2,34	0,85	-0,004	19,12	-0,026
Чулпаново	588,05	1,44	0,85	-0,003	20,19	-0,019

Как видно из табл. 6, годовая испаряемость изменяется по территории РТ в пределах 589,54–667,8 мм и имеет повсеместную тенденцию к росту (от 1,31 до 3,83 мм/10 лет), так как растет температура, а КУ, наоборот, понижается. Его средние значения варьируют от 0,77 до 0,92. Индекс БЭК, характеризующий экологический фон, меняется по территории РТ в пределах 17,85–21,15. Оптимальное значение БЭК порядка 22. Следовательно, значения БЭК для ряда станций достаточно близки к оптимальному [3].

Для иллюстрации межгодовой изменчивости рассмотренных показателей АФВП строились рисунки для каждой из станций. На рис. 4 в качестве примера приведен многолетний ход этих показателей, линейные тренды и низкочастотные компоненты с точкой отсечения 15 лет для ст. Вязовые.

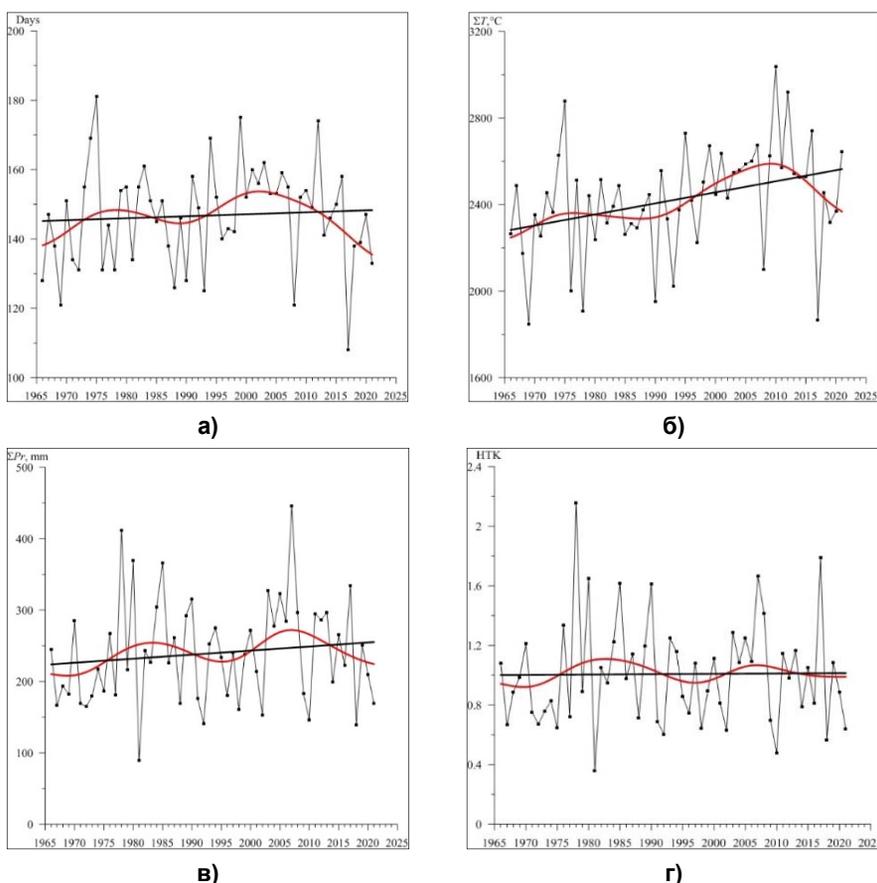


Рис. 4. Многолетний ход показателей АФВП: продолжительность периода (а); сумма температур (б); сумма осадков (в); гидротермический коэффициент (г) на ст. Вязовые.

Fig. 4. The long-term course of the APGS indicators: duration of the period (a); sum of temperatures (б); sum of precipitation (в); hydrothermal coefficient (г) at st. Vязovye.

Как видно из рис. 4а, согласно линейному тренду в период 1966–2021 гг. наблюдается слабый рост продолжительности АФВП, однако НЧК показывает его заметное сокращение с 2012 г. из-за более раннего завершения осенью. Данные рис. 4б показывают заметный рост суммы температур: согласно линии тренда, лишь в самом конце рассматриваемого периода (2015–2021 гг.) по кривой НЧК наблюдается ее уменьшение. Сумма осадков (рис. 4в) имеет слабую тенденцию к росту в летний период. Согласно линии НЧК, максимум в 1982 и 2007 гг., в последние годы происходит их уменьшение. Гидротермический коэффициент (рис. 4г) имеет слабую (незначимую) тенденцию к уменьшению, согласно линии тренда. Кроме того, следует отметить, что в рассматриваемый период индекс сухости Будыко и индекс увлажнения Сапожниковой почти не меняются. Величина годовой испаряемости имеет тенденцию к заметному росту, а коэффициент увлажнения, наоборот, понижается. В связи с этим индекс биологической эффективности климата практически не меняется.

В агрометеорологии важное значение придается показателям самого холодного (январь) и теплого (июль) месяцев года. В табл. 7 представлено распределение средних многолетних значений температуры воздуха и атмосферных осадков по этим месяцам.

Как видно из табл. 7, в январе по территории РТ температура самая высокая на ст. Дрожжаное ($-11,24^{\circ}\text{C}$), а самая низкая на ст. Муслумово ($-12,86^{\circ}\text{C}$), т. е. различие составляет $1,62^{\circ}\text{C}$. Величина СКО изменяется в пределах $3,78-4,48^{\circ}\text{C}$. При этом повсеместно отмечается рост январских температур со скоростью от $0,8^{\circ}\text{C}/10$ лет (ст. Бугульма) до $1,0^{\circ}\text{C}/10$ лет (ст. Арск). В июле средняя температура возрастает от $18,9^{\circ}\text{C}$ (ст. Бугульма) до $20,04^{\circ}\text{C}$ (ст. Казань). Величина СКО меняется по территории РТ в пределах $1,78-2,01^{\circ}\text{C}$. Так же как и в январе, июльские температуры имеют тенденцию к росту на всех станциях (КНЛТ меняется от $0,3$ до $0,5^{\circ}\text{C}/10$ лет). Однако в зимний период процесс потепления идет более интенсивно.

Атмосферные осадки варьируют в январе по территории РТ от $28,19$ мм (ст. Дрожжаное) до $40,11$ мм (ст. Казань, ЦГМС). Межгодовая изменчивость значительна. СКО меняется от $12,90$ до $17,96$ мм. При этом на большинстве станций отмечается тенденция роста осадков со скоростью от $0,6$ до $3,4$ мм/10 лет и лишь на 3-х станциях (Дрожжаное, Бугульма, Чулпаново) их количество уменьшается со скоростью до $1,3$ мм/10 лет. В июле количество осадков заметно возрастает, и их сумма меняется от $52,91$ мм (ст. Чулпаново) до $68,32$ мм (ст. Казань, ЦГМС). Межгодовая изменчивость сильно возрастает относительно зимних значений и достигает $44,47$ мм (ст. Вязовые). При этом на большинстве станций отмечается тенденция уменьшения количества осадков с максимальной скоростью на ст. Бугульма (КНЛТ = $-0,6$ мм/10 лет). Лишь на станциях Дрожжаное и Чулпаново происходит увеличение количества осадков со скоростью до $1,2$ мм/10 лет. Таким образом, если в январе происходит потепление и

прирост атмосферных осадков, что хорошо для перезимовки озимых культур, то в июле на фоне роста температур количество осадков уменьшается, что может создать неблагоприятную среду для ряда сельскохозяйственных культур.

Таблица 7. Характеристики температуры января и июля на территории Республики Татарстан в 1966–2021 гг.

Table 7. Characteristics of January and July temperatures in the Republic of Tatarstan in 1966–2021

Станция	Январь					Июль				
	<i>Av</i>	<i>Rms</i>	<i>A</i>	R^2L	R^2F	<i>Av</i>	<i>Rms</i>	<i>A</i>	R^2L	R^2F
Температура										
Арск	-12,27	4,05	0,10	12	28	19,44	2,01	0,04	6	17
Елабуга	-12,16	4,09	0,10	11	26	19,94	1,95	0,03	4	15
Вязовые	-11,49	4,02	0,09	11	27	19,77	1,97	0,04	7	20
Казань	-11,41	4,00	0,10	14	29	20,04	2,01	0,05	11	22
Мензелинск	-12,82	4,15	0,10	10	27	19,53	1,94	0,04	6	15
Кайбицы	-11,48	4,07	0,09	10	28	19,41	1,89	0,04	6	19
Муслюмово	-12,86	4,48	0,09	8	26	19,74	1,82	0,03	3	14
Акташ	-12,35	4,23	0,09	9	25	19,55	1,86	0,03	2	13
Азнакаево	-12,60	4,10	0,09	9	26	19,26	1,85	0,03	5	15
Тетюши	-11,69	3,99	0,09	9	26	19,49	1,89	0,04	7	19
Дрожжаное	-11,24	3,85	0,08	8	25	19,24	1,97	0,03	4	18
Бугульма	-12,59	3,78	0,08	10	26	18,88	1,97	0,03	3	13
Чулпаново	-12,39	4,24	0,09	8	24	19,65	1,78	0,03	2	14
Осадки										
Арск	38,23	16,03	0,33	7	18	64,90	33,98	-0,03	-4	8
Елабуга	38,07	17,57	0,08	-3	8	63,18	34,03	-0,49	2	23
Вязовые	32,92	13,18	0,28	8	17	63,05	44,47	0,00	-4	14
Казань	40,11	17,04	0,47	17	26	68,32	32,59	-0,10	-3	13
Мензелинск	28,86	14,36	0,05	-3	10	59,79	29,18	-0,31	-1	25
Кайбицы	32,01	15,02	0,34	10	18	54,77	34,30	-0,01	-4	17
Муслюмово	27,48	12,90	0,12	-1	11	59,83	32,90	-0,48	2	14
Акташ	33,73	14,73	0,15	-1	10	55,43	30,85	-0,37	0	13
Азнакаево	32,18	15,88	0,06	-3	4	58,59	37,55	-0,61	3	17
Тетюши	29,73	15,59	0,11	-2	15	55,60	33,49	-0,02	-4	17
Дрожжаное	28,19	14,91	-0,11	-2	27	64,75	41,82	0,10	-4	8
Бугульма	28,70	17,96	-0,13	-2	10	64,59	36,63	-0,64	4	20
Чулпаново	29,68	15,50	-0,06	-3	9	52,91	31,90	0,12	-3	16

Примечание. *Av* – средние значения (°С и мм); *Rms* – среднее квадратическое отклонение (°С и мм); *A* – коэффициент наклона линейного тренда (°С и мм/10 лет); R^2L – вклад в общую дисперсию линейного тренда (%); R^2F – вклад в общую дисперсию низкочастотной компоненты (%).

Для оценки условий перезимовки озимых культур построен каталог аномальности зим по методике А.В. Мещерской [6] (рис. 5), согласно которой интегральный показатель аномальности зим определяется по формуле:

$$\alpha = \frac{1}{N} \sum_{K=1}^N \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta t_I}{\sigma_I} + \frac{\Delta t_{II}}{\sigma_{II}} \right)_K, \quad (7)$$

где N – число метеостанций (13); $\frac{\Delta t_I}{\sigma_I}$, $\frac{\Delta t_{II}}{\sigma_{II}}$ – нормированные аномалии температуры воздуха по станциям (K) за январь и февраль; σ_I , σ_{II} – СКО температуры. При $\alpha < -0,9$ на Европейской территории России южнее 60° с. ш. зима считается экстремально холодной, а при $\alpha > 1,0$ – экстремально теплой.

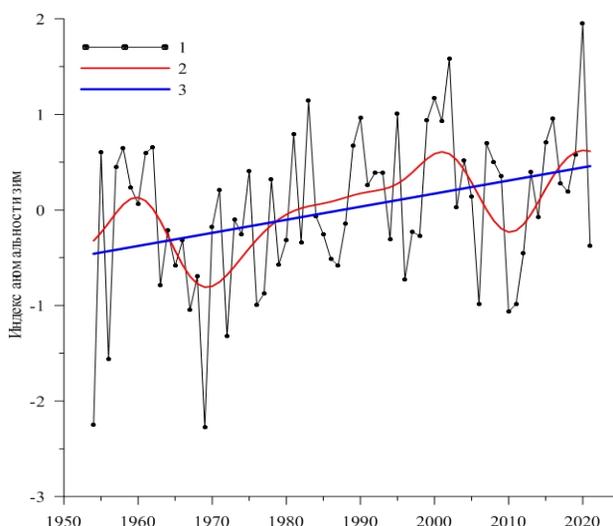


Рис. 5. Многолетний ход индекса аномальности зим на территории Республики Татарстан: 1 – исходный ряд; 2 – НЧК с периодом более 10 лет; 3 – линейный тренд.

Fig.5. The long-term course of the winter anomaly index in the Republic of Tatarstan: 1 – the initial series; 2 – the LCC with a period of more than 10 years; 3 – a linear trend.

Как следует из рис. 5, аномально холодные зимы отмечались наиболее часто в 1954–1976 гг. (в 1969 г. была самая суровая зима), в период 1977–2005 гг. (активная фаза потепления климата) суровых зим на территории РТ не наблюдалось, и лишь в период 2006–2011 гг. они вновь появились, что, вероятно, связано с паузой в глобальном потеплении. Начиная с 2012 года экстремально холодных зим не наблюдалось. При этом зима 2020 г. отмечалась как экстремально теплая. Линейный тренд величины положительный. Кривая НЧК наглядно выделяет периоды с холодными и теплыми зимами.

Выводы

1. Среднегодовые значения суммарной радиации меняются в пределах 3343–4505 МДж/м², максимум приходится на июнь (665 МДж/м²). Расчет коэффициентов наклона линейного тренда (КНЛТ) для суммарной радиации показал, что в период июнь–сентябрь отмечается тенденция ее роста с наибольшей скоростью в июне (9,58 МДж/м²/10 лет).

Величина средней многолетней суммы ФАР за период апрель – август увеличивается с северо-запада на юго-восток РТ от 1428 до 1452 МДж/м². Продолжительность солнечного сияния по данным ст. Казань, университет в летний период составляет порядка 231–321 ч. В период с июня по август наблюдается положительная тенденция изменения суммарной солнечной радиации. КНЛТ меняется в пределах от 7 до 15 МДж/м²/10 лет.

2. Переход ССТ через 10 °С весной на территории РТ происходит на 122–126 сутки от начала года, а осенью заканчивается на 268–271 сутки. Продолжительность активной фазы вегетационного периода растет со скоростью от 0,6 до 3,4 суток/10 лет за счет ее более раннего наступления весной и более позднего завершения осенью.

3. Сумма активных температур в РТ растет со скоростью 51–77 °С/10 лет; в поле атмосферных осадков, наоборот, проявляется неоднородность: по данным одних станций суммы осадков уменьшаются, а по другим – растут.

4. Анализ показателей увлажненности и засушливости (индексов Будыко, ГТК, Сапожниковой) показывает, что в целом на территории Татарстана выполняется примерное равенство между приходом и расходом влаги. Вместе с тем тренды этих показателей указывают на слабую тенденцию роста засушливости в летний период.

5. Интегральный показатель аномальности зим свидетельствует о потеплении зим в РТ в рассматриваемый период.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ и Кабинета Министров Республики Татарстан в рамках научного проекта № 22-27-20080.

Список литературы

1. Береза О.В., Страшная А.И., Лупян Е.А. О возможности прогнозирования урожайности озимой пшеницы в Среднем Поволжье на основе комплексирования наземных и спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 1. С. 20-35.

2. Грингоф И.Г., Пасечнюк А.Д. Агрометеорология и агрометеорологические наблюдения. СПб.: Гидрометеоздат, 2005. 551 с.

3. Климат Казани и его изменения в современный период / под ред. Ю.П. Переведенцева, Э.П. Наумова. Казань: Изд-во Казанск. гос. ун-та, 2006. 216 с.

4. Колобов Н.В., Муракаева С.А. Засухи на территории Татарской АССР. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1980. 140 с.

5. Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем / под ред. С.М. Семенова. М.: Росгидромет, 2012. 508 с.

6. Меццерская А.В., Голод М.П. Каталоги аномальности зим на территории России // Труды ГГО. 2015. Вып. 579. С. 129-161.

7. Павлова В.Н., Караченкова А.А. Наблюдаемые изменения климата и динамика агроклиматических ресурсов в XX–XXI столетиях на территории Приволжского федерального округа // Труды ГГО. 2016. Вып. 583. С. 112-128.
8. Педь Д.А. Об определении дат устойчивого перехода температуры воздуха через определенные значения // Метеорология и гидрология. 1951. № 10. С. 38-39.
9. Переведенцев Ю.П., Верецагин М.А., Наумов Э.П., Шанталинский К.М. Особенности проявления современного потепления климата в тропосфере Атлантико-Европейского региона // Метеорология и гидрология. 2004. № 2. С. 38-47.
10. Переведенцев Ю.П., Шерстюков Б.Г., Наумов Э.П., Верецагин М.А., Шанталинский К.М. Климатические условия и ресурсы Республики Татарстан. Казань: Изд-во Казанск. гос. ун-та. 2008. 288 с.
11. Переведенцев Ю.П., Хабутдинов Ю.Г., Гизатуллин Р.Д., Алтухова А.В. Агрометеорологические условия Приволжского федерального округа // Российский журнал прикладной экологии. 2017. Вып. 1. С. 3-8.
12. Переведенцев Ю.П., Шанталинский К.М., Шерстюков Б.Г., Николаев А.А. Долгопериодные изменения температуры воздуха в Татарстане и их сценарии в текущем столетии // Журнал Белорусского гос. ун-та. География. Геоэкология. 2019. Вып. 2. С. 94-107.
13. Переведенцев Ю.П., Давлятишин И.Д., Лукманов А.А., Мустафина А.Б. Прогнозирование урожайности яровой пшеницы по метеорологическим показателям на примере Тетюшского района Республики Татарстан // Вестник Удмуртского ун-та. Серия Биология. Науки о Земле. 2020. Т. 30. Вып. 4. С. 457-464
14. Страшная А.И., Бартаев С.А., Максименко Т.А., Чуб, О.В. Агрометеорологическая оценка состояния озимых зерновых культур в период прекращения вегетации с использованием наземных и спутниковых данных на примере Приволжского федерального округа // Труды Гидрометцентра России. 2014. Вып. 351. С. 85-107.
15. Фролов А.В., Страшная А.Н. О засухе 2010 года и ее влиянии на урожайность зерновых культур // Анализ условий аномальной погоды на территории России летом 2010 года: Сборник докладов. М.: Триада ЛТД, 2011. С. 22-31.
16. Черенкова Е.А. Сезонные осадки на территории Восточно-Европейской равнины в периоды теплых и холодных аномалий температуры поверхности Северной Атлантики // Известия РАН. Серия Географическая. 2017. № 5. С. 72-81.

References

1. Bereza O.V., Strashnaya A.I., Lupyay E.A. O Vozmozhnosti prognozirovaniya urozhajnosti ozimoy pshenicy v Srednem Povolzh'e na osnove kompleksirovaniya nazemnyh i sputnikovyyh dannyh [On the possibility of forecasting the yield of winter wheat in the Middle Volga region based on the integration of ground and satellite data]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Modern problems of remote sensing of the Earth from space]*, 2015, vol. 12, no. 1, pp. 20-35 [in Russ.].
2. Gringof I.G., Pasechnyuk A.D. Agrometeorologiya i agrometeorologicheskie nablyudeniya [Agrometeorology and agrometeorological observations]. Saint Petersburg, Gidrometeoizdat Publ., 2005, 551 p. [in Russ.].
3. *Klimat Kazani i ego izmeneniya v sovremennyj period* [The climate of Kazan and its changes in the modern period]/ pod red. Yu.P. Perevedentseva, E.P. Naumova. Kazan': Izd-vo Kazan. un-ta, 2006, 216 p. [in Russ.].
4. Kolobov N.V., Murakaeva S.A. Zasuhi na territorii Tatarskoj ASSR [Droughts on the territory of the Tatar ASSR]. Kazan', Izd-vo Kazan. un-ta, 1980, 140 p. [in Russ.].
5. *Metody ocenki posledstvij izmeneniya klimata dlya fizicheskikh i biologicheskikh sistem* [Methods for assessing the effects of climate change on physical and biological systems]. Pod red. S.M. Semenova. Moscow, Rosgidromet, 2012, 508 p. [in Russ.].
6. Meshcherskaya A.V., Golod M.P. Katalogi anomal'nosti zim na territorii Rossii [Catalogues of winter anomalies in Russia]. *Trudy GGO [Proceedings of Voeikov Geophysical Observatory]*, 2015, vol. 579, pp. 129-161 [in Russ.].

7. Pavlova V.N., Karachenkova A.A. Nablyudaemye izmeneniya klimata i dinamika agroklimaticheskikh resursov v XX – XXI stoletiyah na territorii Privolzhskogo federal'nogo okruga [Observed climate changes and dynamics of agro-climatic resources in the XX - XXI centuries on the territory of the Volga Federal District]. *Trudy GGO [Proceedings of Voeikov Geophysical Observatory]*, 2016, vol. 583, pp. 112-128 [in Russ.].

8. Ped' D.A. Ob opredelenii dat ustojchivogo perekhoda temperatury vozduha cherez opredelennye znacheniya [On determining the dates of a steady transition of air temperature through certain values]. *Meteorologiya i gidrologiya [Russ. Meteorol. Hydrol.]*, 1951, no. 10, pp. 38-39 [in Russ.].

9. Perevedentsev Yu.P., Vereshchagin M.A., Naumov E.P., Shantalinsky K.M. Osobennosti proyavleniya sovremennogo potepleniya klimata v troposfere Atlantiko-Evropejskogo regiona [Features of the manifestation of modern climate warming in the troposphere of the Atlantic-European region]. *Meteorologiya i gidrologiya [Russ. Meteorol. Hydrol.]*, 2004, no. 2, pp. 38-47 [in Russ.].

10. Perevedentsev Yu.P., Sherstyukov B.G., Naumov E.P., Vereshchagin M.A., Shantalinsky K.M. Klimaticheskie usloviya i resursy Respubliki Tatarstan [Climatic conditions and resources of the Republic of Tatarstan]. Kazan', Izd-vo Kazansk. un-ta, 2008, 288 p. [in Russ.].

11. Perevedentsev Yu.P., Habutdinov Yu.G., Gizatullin R.D., Altuhova A.V. Agrometeorologicheskie usloviya Privolzhskogo federal'nogo okruga [Agrometeorological conditions of the Volga Federal District]. *Rossijskij zhurnal prikladnoj ekologii [Russian Journal of Applied Ecology]*, 2017, no. 1, pp. 3-8. [in Russ.].

12. Perevedentsev Yu.P., Shantalinsky K.M., Sherstyukov B.G., Nikolaev A.A. Dolgoperiodnye izmeneniya temperatury vozduha v Tatarstane i ih scenarii v tekushchem stoletii [Long-period changes in air temperature in Tatarstan and their scenarios in the current century]. *Zhurnal Belorusskogo gos. un-ta. Geografiya. Geoekologiya [Journal of the Belarusian State University. Geography. Geoecology]*, 2019, no. 2, pp. 94-107 [in Russ.].

13. Perevedentsev Yu.P., Davlyatshin I.D., Lukmanov A.A., Mustafina A.B. Prognozirovaniye urozhajnosti yarovoj pshenicy po meteorologicheskim pokazatelyam na primere Tetyushskogo rajona Respubliki Tatarstan [Forecasting the yield of spring wheat by meteorological indicators on the example of the Tetyushsky district of the Republic of Tatarstan]. *Vestnik Udmurtskogo un-ta. Seriya Biologiya. Nauki o Zemle [Bulletin of the Udmurt University. Biology series. Earth sciences]*, 2020, vol. 30, no. 4, pp. 457-464. [in Russ.].

14. Strashnaya A.I., Bartalev S.A., Maksimenko T.A., Chub, O.V. Agrometeorologicheskoe oceneniye sostoyaniya zimnykh zernovykh kultur v Tatarstane na primere Volzhskogo federal'nogo okruga [Agrometeorological assessment of the state of winter grain crops during the termination of vegetation using ground and satellite data on the example of the Volga Federal District]. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2014, vol. 351, pp. 85-107 [in Russ.].

15. Frolov A.V., Strashnaya A.N. O zasuhe 2010 goda i ee vliyani na urozhajnost' zernovykh kultur [On the drought of 2010 and its impact on the yield of grain crops]. *Sbornik dokladov, Moscow, Triada LTD Publ.*, 2011, pp. 22-31 [in Russ.].

16. Cherenkova E.A. Sezonnnye osadki na territorii Vostochno-Evropejskoj ravniny v periody teplyh i holodnyh anomalij temperatury poverhnosti Severnoj Atlantiki [Seasonal precipitation on the territory of the East European plain during periods of warm and cold anomalies of the surface temperature of the North Atlantic]. *Izvestiya RAN. Seriya Geograficheskaya. [Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geography]*, 2017, no. 5, pp. 72-81 [in Russ.].

Поступила 24.10.2022; одобрена после рецензирования 16.11.2022;
принята в печать 29.11.2022.

Submitted 24.10.2022; approved after reviewing 16.11.2022;
accepted for publication 29.11.2022.