

Климатические изменения на территории Приволжского федерального округа в XX—XXI веках и их последствия для агросферы

Ю. П. Переведенцев*, К. М. Шангалинский*,
Н. А. Мирсаева*, А. А. Николаев*, Т. Р. Аухадеев*,
В. В. Гурьянов*, Б. Г. Шерстюков**

Рассмотрена пространственно-временная изменчивость основных климатических показателей на территории Приволжского федерального округа в XX—XXI вв. Выявлена общая тенденция повышения температуры воздуха, показан неоднородный характер изменения количества атмосферных осадков. На примере Казани с использованием 40 климатических моделей проекта СМIP6 для четырех антропогенных сценариев рассмотрен ход температуры до конца XXI в. Дана оценка динамики агроклиматических ресурсов на территории округа: продолжительности вегетационного периода, сумм положительных температур и осадков, фотосинтетической радиации. Установлена корреляция между колебаниями температуры в регионе с индексами атмосферной циркуляции (NAO, AO, SCAND, EAWR). Для территории Татарстана дана оценка степени засушливости и переувлажненности с использованием агроклиматических показателей: индекса сухости Буддыко, гидротермического коэффициента Селянинова, индекса увлажненности Сапожниковой. Показано, что наблюдается тенденция увеличения продолжительности вегетационного периода, его теплообеспеченности и роста засушливости в регионе в летний период. Дана статистическая оценка зависимости урожайности яровой пшеницы от агроклиматических показателей на территории Республики Татарстан.

Ключевые слова: климатические изменения, корреляция, температура воздуха, атмосферные осадки, агроклиматические показатели, урожайность.

DOI: 10.52002/0130-2906-2023-9-86-99

1. Введение

Приволжский федеральный округ (ПФО) относится к числу наиболее развитых регионов России. Здесь производится четверть промышленной и сельскохозяйственной продукции страны. Площадь ПФО составляет 1037,0 тыс. км² (6,1% территории Российской Федерации), население — 28,8 млн. чел. (19,82% населения страны). Сельскохозяйственное производство наиболее развито в центральной и южной частях округа, где наблю-

* Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт экологии и природопользования; e-mail: urgeved@krfu.ru (Переведенцев Юрий Петрович).

**Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации — Мировой центр данных.

даются более благоприятные природные и климатические условия для растениеводства и животноводства. В регионе с момента образования Метеорологической обсерватории при Казанском университете (1812 г.) ведутся систематические метеорологические наблюдения, что нашло свое отражение в многочисленных научных публикациях [6]. К числу первых крупных климатических исследований территории Среднего Поволжья относится монография [2], в которой с использованием материалов наблюдений до 1960-х годов дана оценка влияния циркуляции атмосферы, радиации и состояния подстилающей поверхности на температурно-влажностный режим региона.

В более поздней работе [8] описаны основные характеристики климата и их пространственно-временные изменения в ПФО в 1966—2009 гг. в условиях глобального потепления. В работах [11—13] рассмотрены региональные изменения климата на фоне процессов, происходящих в Северном полушарии, с учетом влияния атмосферной циркуляции. Из более современных исследований следует отметить публикации [7, 9], в которых проанализированы особенности климатических и агроклиматических изменений, происходящих на территории ПФО и в Республике Татарстан в последние десятилетия.

Цель статьи — рассмотреть динамику климатических и агроклиматических ресурсов в ПФО в период 1966—2021 гг. и показать зависимость урожайности зерновых культур от конкретных метеорологических факторов на примере Республики Татарстан.

2. Материалы и методы

В качестве исходных данных в работе использованы ежемесячные данные наблюдений 17 метеостанций, равномерно расположенных на территории ПФО, из фонда ВНИИГМИ-МЦД в период 1966—2021 гг., а также результаты ежедневных наблюдений за 1966—2021 гг. на 13 метеостанциях Республики Татарстан. Для оценки ряда агроклиматических показателей и связей между температурой воздуха и индексами атмосферной циркуляции взяты данные реанализа ERA5. Расчет характеристик солнечной радиации выполнен с использованием данных сайта <https://power.larc.nasa.gov/> за 1983—2020 гг. Индексы атмосферной циркуляции были взяты из базы данных <https://crudata.uea.ac.uk/>.

Многолетние данные подвергались статистической обработке. Находились средние значения, средние квадратические отклонения (СКО), коэффициенты наклона линейного тренда (КНЛТ), коэффициенты корреляции между метеопараметрами и индексами атмосферной циркуляции.

Выделение низкочастотного компонента в метеорологических рядах осуществлялось с помощью низкочастотного фильтра Поттера с точкой отсечения 15 лет и более. Достоверность результатов оценивалась с помощью критерия Фишера.

Даты устойчивого перехода средней суточной температуры (ССТ) воздуха через 0, 5, 10 и 15°C весной и осенью, продолжительность периодов, когда ССТ превышала указанные пороговые значения, суммы температур определялись по методике Д. А. Педя [5].

Для оценки увлажненности региона рассчитывались индексы сухости Будыко, гидротермический коэффициент Селянинова и коэффициент увлажнения Сапожниковой по формулам, приведенным в работе [3].

Интенсивность фотосинтетически активной радиации (ФАР) рассчитывалась по формуле из работы [1].

3. Результаты и обсуждение

Согласно работе [1], определяющее значение для развития растений имеет коротковолновая радиация в интервале длин волн $\lambda = 0,38—0,71$ мкм, называемая фотосинтетически активной радиацией, она является одним из важнейших факторов продуктивности сельскохозяйственных культур.

Фотосинтетически активная радиация в данной работе рассчитана для периода превышения SST значений 5 и 10°C, так как средние суточные значения температуры воздуха начала и окончания вегетации у озимых и ранних яровых зерновых культур составляют около 5°C, а у поздних яровых — около 10°C. Таким образом осуществляется привязка ФАР к этапам вегетационного периода зерновых культур. Ее распределение по территории ПФО, согласно данным рис. 1, имеет зональный характер. В период, когда SST > 5°C, суммы ФАР уменьшаются с юга на север от 1720 до 1260 МДж/м², а в период активной вегетации (SST > 10°C) — от 1600 до 1080 МДж/м². Из этого следует, что в вегетационный период большая часть территории ПФО достаточно обеспечена необходимой для растениеводства солнечной энергией. Ранее пространственно-временное распределение продолжительности солнечного сияния по территории рассмотрено в работе [8].

Для выявления основных особенностей годового и сезонного распределения температуры воздуха и атмосферных осадков по территории ПФО в период 1966—2021 гг. рассчитан ряд статистических характеристик по данным 17 метеостанций (таблицы приведены на сайте журнала www.mig-journal.ru). Как следует из полученных данных, значения средней многолетней годовой температуры воздуха уменьшаются с юго-запада (станция Маркс вблизи г. Саратов) на северо-восток (станция Нырб) от 6,9 до 0,5°C. В центре округа они составляют 3,0—4,7°C, с запада на восток понижаются от 5,4 до 3,7°C. Самые низкие значения температуры отмечаются в районе Бугульминско-Белебеевской возвышенности, в горных районах Башкортостана и на северо-востоке Пермского края. Годовые изотермы направлены с северо-запада на юго-восток.

В зимний период средняя многолетняя температура повышается от -14,5°C на северо-востоке до -7,7°C на юго-западе. В зимние месяцы в условиях отрицательного радиационного баланса западные районы ПФО в большей степени подвержены отепляющему влиянию Северной Атлантики, что создает заметные перепады температуры между западными и восточными районами. Так, осредненная за зиму температура на станции Пенза (запад ПФО) равна -8,8°C, а на станции Уфа (восток ПФО) она понижается до -12,2°C. Наиболее низкий температурный фон наблюдается на северо-востоке региона. Так, средняя за зиму температура на станции Нырб составляет -14,5°C.

Весной происходит быстрое повышение температуры, она повсеместно имеет положительное значение и возрастает от 1,2°C на северо-востоке до 7,4°C в южных районах.

Летом в условиях максимального радиационного нагрева изотермы имеют зональный характер. Средняя многолетняя температура возрастает в этот период от 15,1°C (станция Нырб) до 21,5°C (станция Маркс), т. е. зональный перепад составляет 6,4°C.

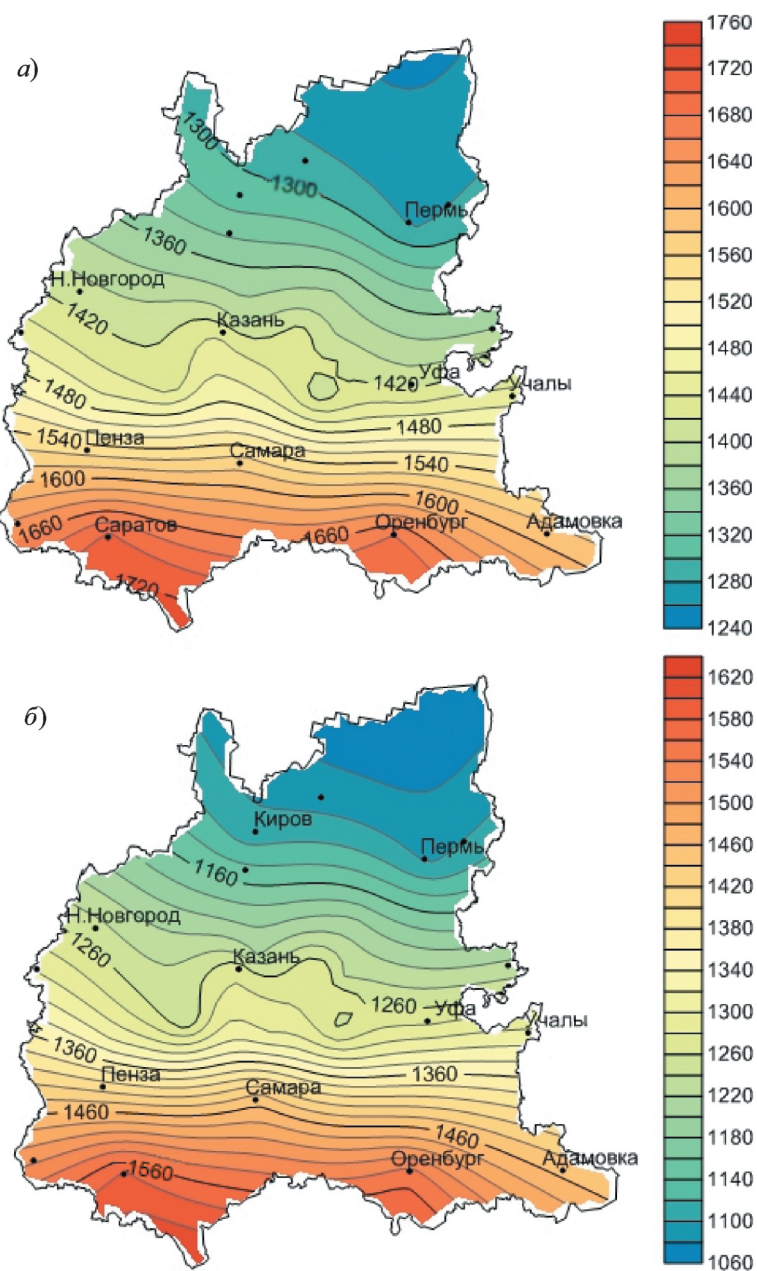


Рис. 1. Распределение по территории Приволжского федерального округа средних многолетних сумм фотосинтетически активной радиации ($MДж/м^2$) в периоды со средней суточной температурой $>5^{\circ}C$ (а) и $>10^{\circ}C$ (б).

Осенью значения температуры на территории ПФО ниже, чем весной, однако осредненная за три осенних месяца температура сохраняет положительный знак. Самое низкое значение температуры осенью отмечается на станции Ныроб ($0,4^{\circ}C$), самое высокое — на станции Маркс ($6,9^{\circ}C$).

Величина среднего квадратического изменения температуры воздуха (СКО), характеризующая межгодовую изменчивость, колеблется на территории ПФО в следующих пределах: для среднего значения за год изменяется от 1,0 до 1,2°C, для зимы от 2,4 до 3,2°C, для весны от 1,4 до 2,0°C, для лета от 1,2 до 1,6°C, для осени от 1,4 до 1,6°C, т. е. территориальные различия не столь велики. Изменчивость температуры наибольшая зимой и минимальна летом.

Анализ распределения годовых и сезонных значений коэффициентов наклонного тренда b по территории ПФО, рассчитанных для всех 17 станций за 1966—2021 гг., показал, что годовые значения b , имеющие положительный знак, изменяются по территории в небольших пределах: от 0,33°C/10 лет (юго-восток, станция Зерносовхоз Озерный) до 0,50°C/10 лет (станция Казань). Наибольшие положительные значения b отмечаются в зимние месяцы. Величина b возрастает с 0,49°C/10 лет на юго-востоке ПФО до 0,80°C/10 лет на северо-западе (станция Лальск). В целом по всей территории в зимний сезон происходит значительное потепление. Тенденция повышения температуры сохраняется и в остальные сезоны. Однако скорость потепления заметно меньше, чем зимой. Так, весной величина b изменяется в пределах округа от 0,19 до 0,38°C/10 лет, летом от 0,17 до 0,45°C/10 лет и осенью от 0,23 до 0,43°C/10 лет. Линейные тренды температуры статистически значимы на 5%-ном уровне при значении коэффициента детерминации $R^2L = 3\%$, таким образом, на большинстве станций отмеченные тенденции ее повышения значимы (см. данные на сайте www.mig-journal.ru).

Для оценки будущих значений температуры воздуха в Казани использованы результаты ансамблевых расчетов по 40 климатическим моделям, выполненных для четырех основных сценариев проекта CMIP6: ssp126, ssp245, ssp370, ssp585, соответствующих величине глобального антропогенного радиационного воздействия, достигаемого в 2100 г., равной 2,6; 4,5; 7,0 и 8,5 Вт/м² соответственно. В соответствии с современной тенденцией увеличения концентрации CO₂ в атмосфере, наиболее вероятным сценарием является ssp245 (концентрация CO₂ возрастет до ~600 млн⁻¹ к концу XXI в.). Расчеты выполнены как в целом для периода 2021—2100 гг., так и последовательно по 20-летним подпериодам: 2021—2040, 2041—2060, 2061—2080 и 2081—2100 гг.

Согласно оценкам, в зимний период потепление будет происходить более высокими темпами, чем в летний. По наиболее вероятному сценарию ssp245 в заключительный 20-летний период XXI в. (2081—2100 гг.) по сравнению с 2021—2040 гг. повышение температуры воздуха по сезонам и за год составит 2,9°C зимой, 2,4°C весной, 2,1°C летом, 2,2°C осенью и 2,4°C за год. Более высокие темпы потепления ожидаются в случае осуществления наиболее жесткого сценария (ssp585), однако его реализация маловероятна. В этом случае в конце столетия годовая температура в Казани возрастет на 5,5°C, а в зимний период — на 6,6°C. Следует отметить, что между изменениями температуры в Казани и в других частях ПФО существует тесная связь, поэтому полученные результаты отражают общую ситуацию в регионе, что потребует в будущем внесения коррективов в перечень культивируемых сельскохозяйственных культур.

Режим атмосферных осадков в ПФО характеризуется следующими значениями. Годовая сумма осадков, средняя за 56 лет (1966—2021 гг.),

изменяется по территории ПФО от 272 мм (станция Зерносовхоз Озерный) до 661 мм (станция Киров) (см. данные на сайте www.mig-journal.ru). Наибольшее их количество выпадает в северной части округа, а наименьшее — на юге и юго-востоке. Согласно работам [8, 9], локальные области осадков формируются в районах наветренных склонов Бугульминско-Белебеевской и Приволжской возвышенностей, Северных и Вятских Увалов, Уфимского плоскогорья и др. В зимний период в южных районах осадков выпадает заметно меньше, чем в северных: так, на станции Зерносовхоз Озерный их всего 48 мм, в Самаре 141 мм, на станции Киров 133 мм. Распределение осадков по территории неравномерно, в отличие от распределения температуры. Весной количество осадков несколько меньше, чем зимой (их сумма за весенний период изменяется от 69 мм на юго-востоке до 126 мм на северо-востоке). Наибольшее количество осадков повсеместно выпадает в летний период — от минимального значения 94 мм на юго-востоке (станция Зерносовхоз Озерный) до 234 мм (станция Пермь). На северо-западе и северо-востоке ПФО осадков заметно больше, чем в центре и особенно на юге. Осенью осадков по всей территории ПФО выпадает больше, чем весной, особенно в северной части округа.

Временная изменчивость количества атмосферных осадков оценивалась с помощью коэффициента вариации C_v . Величина C_v годовых сумм осадков уменьшается с юго-востока на северо-восток от 23 до 13%, по сезонам величина C_v изменяется в следующих пределах: зимой от 38% (станция Оренбург) до 24% (станция Лальск), весной от 46% (станция Зерносовхоз Озерный) до 28% (станция Лальск), летом от 47% (станция Оренбург) до 30% (станция Киров), осенью от 39% (станция Перелюб) до 24% (станция Пермь). Таким образом, в летний сезон изменчивость количества осадков более заметна, чем в другие сезоны.

Для сельского хозяйства представляет большой интерес информация о временной тенденции изменения сумм осадков. Анализ рассчитанных значений линейных трендов показал, что годовые суммы осадков на большей части территории ПФО, особенно в его северной части, возрастают. Максимальная скорость зафиксирована на станции Нырб (41,22 мм/10 лет). Однако на ряде станций (в основном в южной части ПФО) отмечается уменьшение количества осадков со скоростью от $-2,93$ мм/10 лет (станция Пенза) до $-14,51$ мм (станция Саранск). Зимой значения b изменяются от $0,28$ мм/10 лет (станция Оренбург) до $11,87$ мм/10 лет (станция Нырб). Слабое уменьшение осадков отмечается на станциях Ижевск и Бугульма (от $-0,32$ до $-1,64$ мм/10 лет). Весной скорости изменения количества осадков невелики, на двух станциях (Лальск и Саранск) значения b отрицательные; на остальных станциях происходит небольшой прирост сумм осадков от $3,12$ мм/10 лет (станция Зерносовхоз Озерный) до $11,08$ мм/10 лет (станция Перелюб). Летом в северной части округа количество осадков растет со скоростью, достигающей $13,09$ мм/10 лет (станция Лальск), а в центре и в южной части ПФО обнаруживается отрицательная тенденция, что создает условия для усиления засушливости (на станции Самара $b = -10,31$ мм/10 лет). Осенью эта тенденция усиливается: на 12 станциях из 17 величина b отрицательная. Так, на станции Саранск $b = -6,88$ мм/10 лет, и лишь на северных станциях тенденция изменения сумм осадков положительная (на станции Нырб $b = 12,39$ мм/10 лет). В целом распределение коэффициента b по территории округа имеет достаточно пятнистый характер в отличие от распределения температуры. Кро-

ме того, необходимо отметить, что согласно рассчитанным значениям R^2L отрицательные тенденции статистически незначимы.

Для характеристики агроклиматического режима ПФО по данным ре-анализа ERA5 за 1966—2021 гг. был рассчитан ряд показателей, приведем их распределение по территории региона.

Продолжительность периода со средней суточной температурой воздуха, превышающей 0°C , возрастает от 185 дней на крайнем северо-востоке до 245 дней на крайнем юго-западе, т. е. перепад составляет 60 дней. Продолжительность периода с $\text{CCT} > 5^{\circ}\text{C}$ изменяется в том же направлении от 145 до 200 дней, продолжительность фазы активной вегетации с $\text{CCT} > 10^{\circ}\text{C}$ возрастает от 95 дней на крайнем северо-востоке до 165 дней на крайнем юго-западе (рис. 2б). Летом средняя суточная температура 15°C отмечается на северо-востоке 70 дней, а на юго-западе — 135 дней. Естественно, что весной переход CCT через 0, 5, 10 и 15°C начинается раньше на юго-западе и позднее всего заканчивается на северо-востоке.

Средняя годовая сумма среднесуточных температур более 0°C уменьшается по территории ПФО с юго-запада на северо-восток от 3500 до 2000 $^{\circ}\text{C}$ (величина КНЛТ убывает соответственно в регионе от 70 до 56 $^{\circ}\text{C}/10$ лет). Средняя годовая сумма CCT больше 5°C уменьшается с юго-запада на северо-восток от 3400 до 1900 $^{\circ}\text{C}$ (величина КНЛТ уменьшается в том же направлении со скоростью от 70 до 58 $^{\circ}\text{C}/10$ лет). Средняя сумма CCT больше 10°C уменьшается в том же направлении от 3100 до 1500 $^{\circ}\text{C}$ со скоростью от 66 до 58 $^{\circ}\text{C}/10$ лет (рис. 2а). Сумма $\text{CCT} > 15^{\circ}\text{C}$ в летний период уменьшается с юго-запада от 2600 до 900 $^{\circ}\text{C}$ со скоростью от 60 до 44 $^{\circ}\text{C}/10$ лет.

Сумма отрицательных значений температуры (ниже 0°C) возрастает с юго-запада на северо-восток ПФО по модулю от 1000 до 1800 $^{\circ}\text{C}$. При этом модуль суммы значений $\text{CCT} < -15^{\circ}\text{C}$, характеризующих наиболее холодную часть зимы, значительно возрастает с юго-запада на северо-восток: от 400 до 1060 $^{\circ}\text{C}$. Значения КНЛТ указывают на уменьшение суммы отрицательных температур со скоростью до 86 $^{\circ}\text{C}/10$ лет, что свидетельствует о потеплении климата.

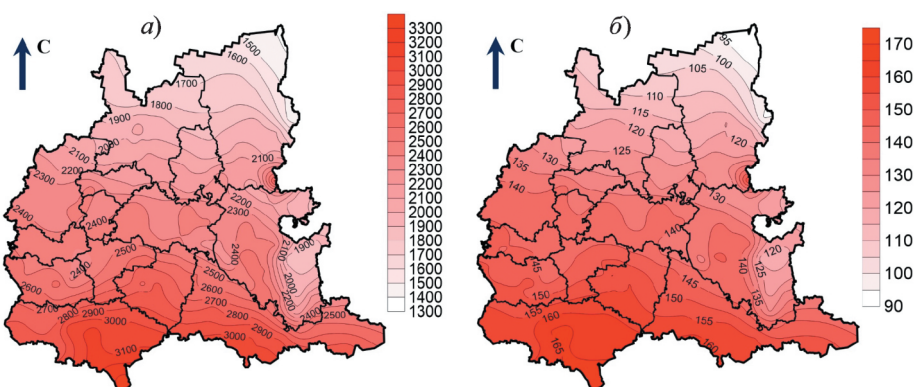


Рис. 2. Распределение на территории Приволжского федерального округа средних сумм активных температур (а) и среднего количества дней со средней суточной температурой $> 10^{\circ}\text{C}$ (б) в период 1966—2021 гг.

Для оценки вклада атмосферной циркуляции в изменения климатических показателей рассчитывались коэффициенты парной корреляции между температурой воздуха, атмосферными осадками и индексами циркуляции: североатлантическим колебанием (NAO), арктической осцилляцией (АО), колебанием Восточная Атлантика — Западная Россия (EAWR), скандинавским колебанием (SCAND).

Согласно работе [10], наблюдаемые с середины XX в. на севере Евразии изменения температуры воздуха могут быть объяснены аномалиями нескольких циркуляционных мод. Здесь с целью оценки роли атмосферной циркуляции в формировании термического режима ПФО рассчитывались коэффициенты корреляции между среднемесячными значениями температуры в узлах регулярной сетки с разрешением $0,25 \times 0,25^\circ$ (данные реанализа ERA5) и индексами циркуляции в период 1979—2021 гг. для каждого месяца (при объеме выборки $n = 43$ года и при 95%-ном уровне значимости критическое значение коэффициента корреляции равно 0,35). Результаты расчетов картированы.

Получено, что наиболее тесные положительные связи между температурой в узлах сетки и индексом NAO устанавливаются в холодный период года (декабрь — март). Изокорреляты направлены с юго-запада на северо-восток. В этот период практически вся территория ПФО за исключением юго-востока находится в зоне положительных и значимых коэффициентов корреляции. При этом наибольшие значения r отмечаются на северо-западе ПФО, и затем связи ослабевают в юго-восточном направлении. В декабре максимальное значение $r = 0,55$, в январе $r = 0,60$, в феврале $r = 0,55$, в марте $r = 0,65$. В остальные месяцы связи незначимы, а с апреля по август коэффициенты корреляции имеют отрицательный знак. Таким образом, североатлантическое колебание способствует повышению температуры воздуха на территории ПФО лишь в период декабрь — март.

С индексом АО значимые положительные связи температуры воздуха возникают также в декабре — марте (в январе r растет с северо-востока на юго-запад от 0,40 до 0,55, в феврале максимальное значение $r = 0,55$ в районе станции Киров, в марте связи наиболее тесные — они усиливаются с юго-востока на северо-запад от $r = 0,35$ до $r = 0,65$ (изокорреляты тянутся с юго-запада на северо-восток, в декабре значимые связи ($r_{\max} = 0,55$) лишь в северной части ПФО).

Коэффициенты корреляции также рассчитывались между среднемесячными значениями температуры и количеством осадков на 17 станциях ПФО и индексами атмосферной циркуляции NAO, АО, SCAND, EAWR для 1979—2021 гг. Результаты расчетов для температуры хорошо согласуются с полученными оценками по данным ERA5, однако коэффициенты корреляции между суммами осадков и индексами циркуляции оказались незначимыми.

В январе и феврале на всей территории ПФО формируется поле значимых отрицательных значений коэффициента корреляции r между температурой воздуха и индексом SCAND. Изокорреляты направлены с юго-запада на северо-восток. При этом в январе значения r возрастают с северо-запада на юго-восток от $-0,40$ до $-0,70$, а в феврале от $-0,55$ до $-0,70$ (рис. 3а). Все это свидетельствует о сильном охлаждающем влиянии скандинавского

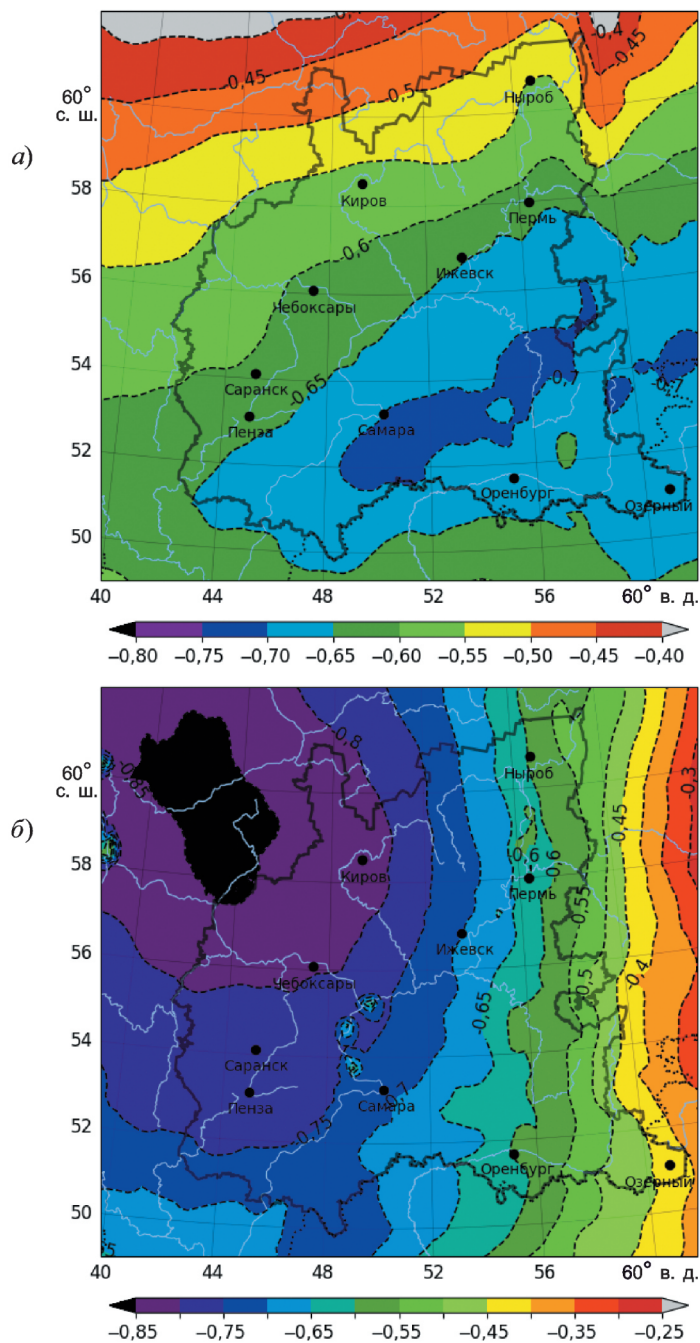


Рис. 3. Коэффициенты корреляции температуры с индексом SCAND (февраль) (а) и с индексом EAWR (май) (б).

колебания на территории ПФО в зимний период. В марте по-прежнему на юго-востоке ПФО проявляется роль SCAND ($r = -0,60$). В мае корреляция достигает значений $-0,60$ на северо-востоке ПФО, в октябре и декабре на востоке региона $r = -0,50$, в остальные месяцы коэффициенты корреляции между температурой воздуха и индексом SCAND незначимы.

Значительное воздействие на термическое состояние всего региона в теплый период (апрель — сентябрь) оказывает колебание Восточная Атлантика — Западная Россия. Коэффициенты корреляции между температурой воздуха и индексом EAWR отрицательны и достигают в этот период максимальных значений $-0,70$, $-0,75$. В качестве примера на рис. 3б показано распределение r в ПФО в мае, в остальные месяцы года связь значительно слабее. Таким образом, указанное колебание оказывает охлаждающее влияние в вегетационный период.

В центре ПФО расположена Республика Татарстан, которая 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 на территории республики являются зерновые, зернобобовые и картофель, условия развития и созревания которых зависят напрямую от климатических факторов — света, тепла и влаги.

Анализ основных параметров вегетационного периода, рассчитанных для территории Татарстана по ежедневным данным 13 метеостанций в период 1966—2021 гг., показывает, что различия между станциями невелики. Так, весной переход ССТ через 10°C происходит на территории Татарстана в мае сначала на юге (на 122-е сутки от начала года), а затем на 126-е сутки от начала года на севере. Сумма положительных температур для активной фазы вегетационного периода на территории изменяется от 2319 до 2476°C, а сумма осадков возрастает с юго-запада от 227 до 262 мм (Бугульминская возвышенность). При этом скорость прироста продолжительности вегетационного периода изменяется с запада от 0,6 до 3,4 сут/10 лет на северо-востоке. Сумма температур растет по территории со скоростью от 51,1 до 77,6°C/10 лет, сумма осадков на западе Республики Татарстан растет со скоростью 5,7 мм/10 лет, а на востоке — убывает со скоростью 1,9 мм/10 лет. В целом почвенные и климатические условия наиболее благоприятны для развития сельского хозяйства в юго-западных и южных районах республики.

Для характеристики увлажненности территории по ежедневным данным 13 метеостанций Татарстана рассчитаны индексы сухости Будыко, гидротермический коэффициент Селянинова и коэффициент увлажненности Сапожниковой по формулам работы [3]. Согласно расчетам, индекс сухости в летний период изменяется по территории от 2,70 (станция Казань) до 3,16 (станция Кайбицы), гидротермический коэффициент от 0,96 (станция Кайбицы) до 1,16 (станция Бугульма), величина коэффициента увлажненности от 0,84 (станция Муслумово) до 1,03 (станция Бугульма), что свидетельствует в целом о сбалансированности прихода и расхода влаги. При этом значения КНЛТ имеют положительный знак для индекса сухости и отрицательный для гидротермического коэффициента и коэффициента

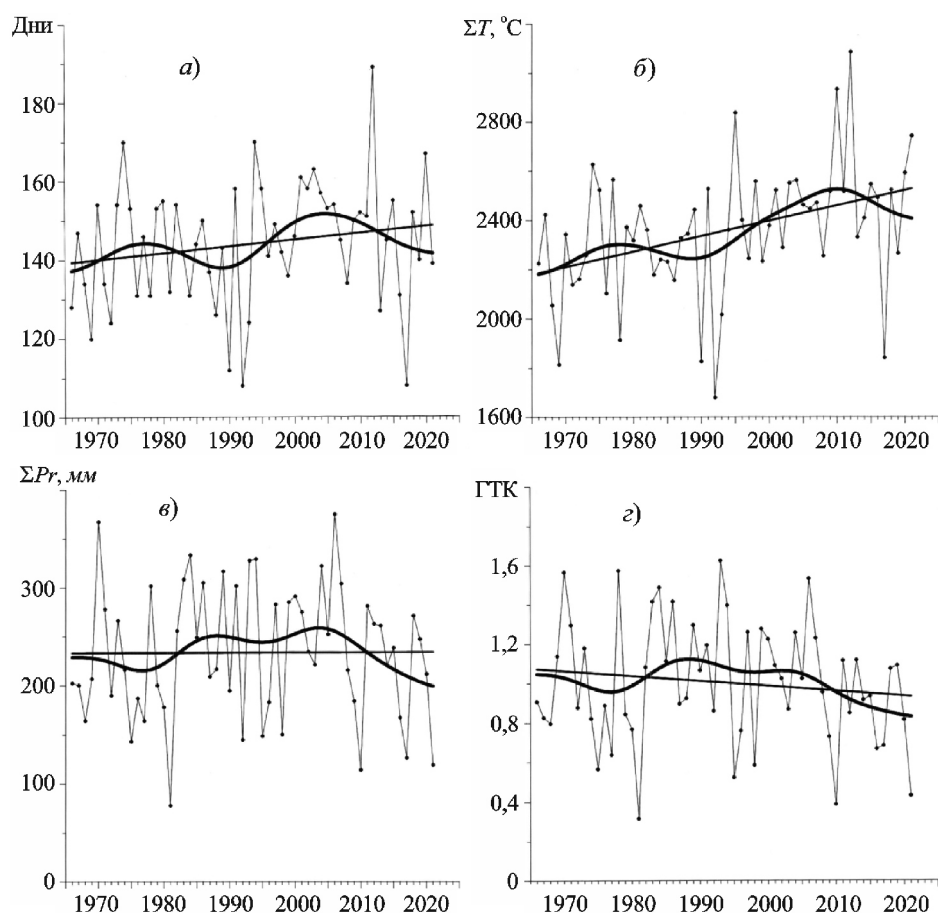


Рис. 4. Распределение низкочастотного компонента для станции Мензелинск в период с температурами более 10 С: продолжительность периода (а), сумма температур (б), сумма осадков (в) и гидротермический коэффициент (з).

увлажненности, что указывает на слабую тенденцию увеличения засушливости в регионе.

Коэффициент наклона линейного тренда индекса сухости изменяется от 0,09 до 0,38 *ед./10 лет*, КНЛТ гидротермического коэффициента повсеместно отрицательны (от -0,1 до -0,4 *ед./10 лет*), КНЛТ коэффициента увлажнения также отрицательны (от -0,1 до -0,3 *ед./10 лет*).

Для выявления низкочастотных колебаний во временных рядах рассматриваемых показателей использован фильтр Поттера для каждой из 13 метеостанций. Выявились общие особенности, присущие всем районам Республики Татарстан: продолжительность вегетационного периода достигла максимума в начале 2000-х годов, а в последующие годы она стала уменьшаться. Сумма температур достигла максимума примерно в 2010 г., в последние годы она уменьшается. Также наблюдается уменьшение сумм осадков с 2008 г. Повсеместно наблюдается уменьшение гидротермического коэффициента. Индекс сухости растет, коэффициент увлажнения

Таблица 1

Статистика урожайности A и агрометеорологических показателей в Татарстане в период 1991—2020 гг.

Показатель	A	R_{11-10}	R_{11-6}	R_{5-6}	R_{5-8}	R_6	T_{5-6}	T_5	T_6
Среднее	22,93	500,59	294,62	100,19	210,41	59,40	14,97	13,63	17,83
Медиана	23,45	513,04	290,66	102,42	202,56	56,06	15,03	13,71	17,47
СКО	7,66	75,02	51,36	34,27	49,20	27,71	1,52	2,17	2,05
Минимум	3,30	314	180	27	81	7	10,99	8,74	13,38
Максимум	36,90	632	414	164	278	112	17,68	16,78	21,28

Примечание. Пояснения приведены в тексте.

уменьшается. В качестве примера приведено распределение низкочастотного компонента по данным станции Мензелинск (рис. 4).

С целью оценки влияния метеорологических факторов на агросферу была исследована связь средней по территории Татарстана урожайности яровой пшеницы (A , ц/га) с рядом показателей температурно-влажностного режима, также осредненных по территории республики, в период 1991—2020 гг. Использовались следующие агрометеорологические показатели: сумма осадков за гидрологический год (R_{11-10}), за ноябрь — июнь (R_{11-6}), за май — июнь (R_{5-6}), за вегетационный период (R_{5-8}), среднее по Татарстану количество осадков за июнь (R_6), средняя по Татарстану температура воздуха за май — июнь (T_{5-6}), температура воздуха за май (T_5), температура воздуха за июнь (T_6). Временные ряды урожайности яровой пшеницы и агрометеорологические показатели в рассматриваемый 30-летний период были однородными.

В табл. 1 представлены статистические показатели для рассматриваемого периода, в табл. 2 — коэффициенты корреляции между рассматриваемыми характеристиками (при объеме выборки $n = 30$ и при 95%-ном уровне значимости $P = 0,05$ значимый коэффициент корреляции $r = 0,37$). Как видно, значимые положительные связи устанавливаются между урожайностью яровой пшеницы A и суммой осадков за периоды ноябрь — июнь,

Таблица 2

Корреляционная матрица урожайности A и агрометеорологических показателей в Татарстане в период 1991—2020 гг.

Показатель	A	R_{11-10}	R_{11-6}	R_{5-6}	R_{5-8}	R_6	T_{5-6}	T_5	T_6
A	1,00	0,35	0,54	0,75	0,48	0,59	-0,52	-0,23	-0,62
R_{11-10}		1,00	0,85	0,59	0,65	0,38	-0,02	-0,36	-0,29
R_{11-6}			1,00	0,69	0,46	0,52	0,11	-0,26	-0,42
R_{5-6}				1,00	0,76	0,84	0,10	-0,38	-0,61
R_{5-8}					1,00	0,54	0,01	-0,38	-0,48
R_6						1,00	0,29	-0,15	-0,57
T_{5-6}							1,00	0,82	0,79
T_5								1,00	0,30
T_6									1,00

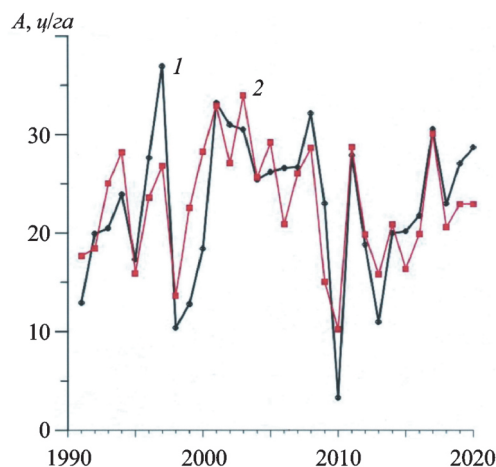


Рис. 5. Средняя урожайность на территории Республики Татарстан яровой пшеницы: 1 — фактическая, 2 — восстановленная по уравнению регрессии.

май — июнь, за весь вегетационный период, суммой осадков за июнь. Выявлена отрицательная значимая зависимость между урожайностью яровой пшеницы и температурой июня. По результатам множественного корреляционного анализа между урожайностью и агрометеорологическими показателями было построено уравнение множественной регрессии, которое устанавливает зависимость урожайности от суммы осадков за май — июнь и температуры в июне:

$$A = 27,18 + 0,26 R_{5-6} - 0,98T_6.$$

Это уравнение описывает 57% общей дисперсии. На рис. 5 представлены данные о фактической урожайности яровой пшеницы в Татарстане за 1991—2020 гг. и восстановленной по уравнению регрессии. Фактические и рассчитанные значения урожайности хорошо согласуются между собой, что позволяет использовать полученное уравнение в практических оценках.

Рассчитывалась также парная корреляция между значениями фотосинтетически активной радиации и урожайностью яровой пшеницы в период 1991—2020 гг. Коэффициенты корреляции оказались значимыми и отрицательными для периода апрель — июнь (r принимает соответственно значения $-0,53$; $-0,55$; $-0,41$). Следовательно, повышенный радиационный фон в весенний период не способствует формированию высоких урожаев яровой пшеницы.

4. Заключение

В заключение можно отметить следующие положения. На всей территории ПФО происходит потепление климата во все сезоны года, особенно

заметное в зимне-весенний период. Согласно антропогенному сценарию ssp245, ожидается повышение средней годовой температуры в Казани к концу XXI в. на 2,4°C. Вместе с тем отмечаются сложная картина распределения атмосферных осадков и четко выраженная тенденция к засушливости в летне-осенний период на значительной территории ПФО. Выявлена роль атмосферной циркуляции в колебаниях температуры воздуха. Наиболее эффективными оказались моды NAO, AO, SCAND, EAWR. Связь осадков с перечисленными циркуляционными осцилляциями не обнаружилась. Показана зависимость урожайности зерновой пшеницы от суммы атмосферных осадков в период май — июнь и температуры июня.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда и Кабинета министров Республики Татарстан в рамках научного проекта № 22-27-20080.

Литература

1. Грингоф И. Г., Пасечнюк А. Д. Агрометеорология и агрометеорологические наблюдения. — СПб, Гидрометеоздат, 2005, 552 с.
2. Колобов Н. В. Климат Среднего Поволжья. — Казань, Изд-во Казанского ун-та, 1968, 252 с.
3. Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. /Под ред. С. М. Семенова. — М., Росгидромет, 2012, 508 с.
4. Павлова В. Н. Агроклиматические ресурсы и продуктивность сельского хозяйства России при реализации новых климатических сценариев в XXI в. — Труды ГГО, 2013, вып. 569, с. 20—37.
5. Педь Д. А. Об определении дат устойчивого перехода температуры воздуха через определенные значения. — Метеорология и гидрология, 1951, № 10, с. 38—39.
6. Переведенцев Ю. П., Мирсаева Н. А. Становление и развитие метеорологических наблюдений и климатических исследований в Казанском университете. — Фундаментальная и прикладная климатология, 2021, т. 7, № 4, с. 5—25.
7. 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, с. 96—113.
8. Переведенцев Ю. П., Соколов В. В., Наумов Э. П. и др. Климат и окружающая среда Приволжского федерального округа. — Казань, Казанский ун-т, 2013, 274 с.
9. Переведенцев Ю. П., Шерстюков Б. Г., Шанталинский К. М., Гурьянов В. В., Аухадеев Т. Р. Климатические изменения в Приволжском федеральном округе в XIX—XXI веках. — Метеорология и гидрология, 2020, № 6, с. 36—46.
10. Попова В. В. Современные изменения климата на севере Евразии как проявление вариаций крупномасштабной циркуляции. — Фундаментальная и прикладная климатология, 2018, № 1, с. 84—111.
11. Perevedentsev Y. P. and Shantalinskii K. M. Changes in the near-surface surface air temperature the Northern Hemisphere during the period of 1850–2014. — Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Ser. Estestvennye Nauki, 2015, vol. 157, No. 3, pp. 8—19.
12. Perevedentsev Y. P., Vereshchagin M. A., Naumov E. P., and Shantalinskii K. M. Long-term variations in main characteristics of the hydrometeorological Volga basin regime. — Russ. Meteorol. Hydrol., 2001, No. 10, pp. 9—15.
13. Perevedentsev Y. P., Vereshchagin M. A., Naumov E. P., Shantalinsky K. M., and Nikolaev A. A. Regional display of the modern climate warming in tropo- and stratospheres of the Northern Hemisphere. — Izv. Akad. Nauk. Ser. Geogr., 2005, No. 6, pp. 6—16.