

ДИНАМИКА АГРОКЛИМАТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ НА ЮГЕ ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ КЛИМАТА

В.Н. Павлова^{1,2}, В.А. Романенков², А.А. Карачёнова¹

¹ *Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии, Обнинск, vnpr2003@bk.ru*

² *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Аграрный центр, Москва, romanenkov@soil.msu.ru*

Аннотация: проведена оценка благоприятных и неблагоприятных последствий наблюдаемого изменения климата за 1991-2020 гг. относительно предшествующего тридцатилетия (1961-1990 гг.) в степной и лесостепной зоне европейской части России, и оценено их влияние на климатообусловленную урожайность пшеницы. Снижение урожайности на 10-20%, прежде всего, яровых зерновых культур обусловлено снижением запасов доступной влаги в вегетационный период и увеличением повторяемости засух.

Ключевые слова: изменение климата, климатически обусловленная урожайность, яровая и озимая пшеница, тепло- и влагообеспеченность.

Актуальность. Тенденция к потеплению, наблюдающаяся в течение последних десятилетий, не ослабляет внимания к исследованиям, связанным с погодно-климатическими факторами, изменением климата и агроклиматических ресурсов и их составляющей – продуктивности продовольственных культур.

Мировые посевные площади важнейшей зерновой культуры – пшеницы – занимают 216 млн га, средняя урожайность составляет 3,5 т/га, а общий объём производства – 765 млн т [1]. Ожидается, что изменение климата окажет большое влияние на мировое производство пшеницы: на каждый 1 °С повышения температуры мировые урожаи пшеницы могут снизиться на 4-6% при неизменной посевной площади на территории стран Восточной Европы и отсутствии принципиального улучшения в агротехнологиях. Комплекс генетических признаков сорта, влияющих на ранние дружные всходы, устойчивость к температурным стрессам и удлинённый вегетационный период совместно с оптимизацией условий азотного питания определяют адаптационный потенциал данной культуры. Влияние глобального изменения климата на производство пшеницы изучалось достаточно подробно с использованием разнообразных подходов, включая динамическое

моделирование, но лишь немногие рассматривали реализацию стратегии адаптации [1, 2]. Развивающиеся страны могут быть сравнительно более подвержены влиянию изменения климата, но обладают большим потенциалом роста продуктивности из-за большого нереализованного потенциала урожайности.

Адаптация к изменению климата и повышение способности адаптироваться к засухам стали главными приоритетами европейского сельского хозяйства. В целом, влияние агроклиматических факторов объясняет от 12 до 67% изменчивости урожайности пшеницы, являясь значимым для 90% посевных площадей пшеницы в Европе в период 1993-2017 гг. [3]. Считается, что производство яровой пшеницы в средних и высоких широтах может возрасти за счёт увеличения вегетационного периода. Тем не менее, тепловой стресс является отрицательным фактором, приводящим к резкому снижению урожайности [4].

Россия является одной из ведущих стран-производителей пшеницы в мире. С одной стороны, продолжающееся потепление вызывает изменения частоты и интенсивности экстремальных явлений погоды (засухи, переувлажнения и др.) и, как следствие, увеличение площадей сельскохозяйственных угодий, непригодных для возделывания зерновых культур. С другой стороны, рост продолжительности вегетационного периода из-за потепления вызывает сдвиг ареалов возделывания сельскохозяйственных культур, в том числе изменение северной границы пахотных земель и потенциальных площадей возделывания пшеницы [5]. В ряде работ рассматривается значительный потенциал роста урожайности богарной пшеницы в России, в то же время существуют публикации, оценивающие возможность только частичного снятия стресса за счёт сортосмены и оптимизации питания растений [1, 4]. Принятый план адаптации [6] направлен на ослабление и предотвращение негативных последствий изменений климата в сельском хозяйстве и в других отраслях экономики, вероятность которых велика без принятия эффективных мер противодействия.

Целью данной работы является оценка изменения агроклиматических ресурсов, в том числе климатически обусловленной урожайности в климатический период 1991-2020 гг. в основных регионах возделывания яровых зерновых культур на европейской части России.

Объекты и методы исследования. Территория исследования включает степную и лесостепную зоны на европейской части России (ЕЧР), где исторически возделываются зерновые культуры, яровые и озимые. Рассматриваются крупные макрорегионы: центрально-чернозёмные области (ЦЧО), юг Приволжского ФО (ПФО) и Южный ФО (ЮФО), включая Ставропольский край.

Используются данные о температуре приземного воздуха и сумме осадков месячного разрешения на 134 метеорологических станциях за период с 1961 по 2020 г. Данные Росстата по урожайности и посевным площадям по отдельным субъектам также охватывают период с 1961 по 2020 г.

Для оценки изменений агроклиматических ресурсов выбраны агроклиматические показатели, характеризующие вегетационный период основных зерновых культур – яровой и озимой пшеницы (температура воздуха средняя за вегетационный период и сумма осадков), а также интегральный показатель – климатически обусловленная урожайность.

Основным методологическим подходом в работе является использование технологии мониторинга климата и агроклиматических ресурсов на основе имитационной системы «Климат-Почва-Урожай» (КПУ) [7, 8]. Имитационная система КПУ представляет собой набор программных модулей для моделирования динамики и роста сельскохозяйственных культур. Ядро системы – динамическая модель Погода-Урожай [9]. Система также включает модули предварительной обработки данных о погоде и климате, а также стохастическую модель для дезагрегации данных за 10-дневные или месячные периоды в суточные.

Обсуждение результатов. Теплообеспеченность. Мониторинг климатических полей температуры воздуха и атмосферных осадков свидетельствует, что основной тенденцией последних десятилетий остаётся тенденция к потеплению и связанные с этим рост теплообеспеченности и продолжительности тёплого периода года ($T > 5\text{ }^{\circ}\text{C}$) и периода активной вегетации сельскохозяйственных культур ($T > 10\text{ }^{\circ}\text{C}$) повсеместно в земледельческой зоне. В степной и лесостепной зоне ЕЧР скорость роста суммы активных температур воздуха самая высокая в земледельческой зоне и колеблется в диапазоне от $\sim 180\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет на юге ПФО до $\sim 230\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет в ЦЧО и южных областях ЕЧР. Рост температуры воздуха сопровождается тенденцией к росту продолжительности периода активной вегетации, составляющему от 8 до 12 сут. относительно периода 1961-1990 гг. Даты всходов яровых зерновых культур наблюдаются на 3-7 сут. ранее (табл. 1).

Значимое изменение средней температуры вегетационного периода яровой пшеницы наблюдается на всей исследуемой территории (рис. 1). Известно, что в урожайные годы температура периода от всходов до созревания в среднем ниже $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ [10]. Основная особенность высокоурожайных лет – отсутствие резкого, хотя бы кратковременного повышения температуры воздуха. Температурный режим не только определяет продолжительность вегетации пшеницы, но и прямо влияет на продуктивность, особенно когда температура выходит за рамки минимально и максимально допустимых для нормального роста и развития растений. Высокая температура и недостаток влаги в репродуктивный период (фазы от цветения до созревания) является причиной череззерницы и пустоколосости, приводящие к значительным потерям урожая, но при достаточном увлажнении почвы она благоприятствует росту.

Средняя температура вегетационного периода яровой пшеницы от периода 1961-1990 к 1991-2020 гг. максимально повысилась на юге ПФО ($+0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$), где яровой клин составляет основную часть посевных площадей. Высокая степень чувствительности урожаев яровой пшеницы к повышению температуры вегетационного периода характерна для южных областей ПФО.

Таблица 1

Изменения показателей термического режима за вегетационный период яровой и озимой пшеницы в 1991-2020 гг. относительно 1961-1990 гг.

Регион	$T_i, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$T_{VII}, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\Sigma T_5, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\Sigma T_{10}, \text{ }^{\circ}\text{C}$	Яровая пшеница				Озимая пшеница			
					$T, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$D_{\text{beg}}, \text{ сут.}$	$D_{\text{end}}, \text{ сут.}$	$N, \text{ сут.}$	$T, \text{ }^{\circ}\text{C}$	$D_{\text{beg}}, \text{ сут.}$	$D_{\text{end}}, \text{ сут.}$	$N, \text{ сут.}$
ЦЧО	2,7	1,5	253	232	0,2	-5	-7	-2	0,2	-5	-6	-2

ПФО, юг	2,5	0,9	206	180	0,4	-3	-5	-2	0,2	-3	-5	-2
ЮФО	1,3	1,2	245	235	-0,3	-7	-5	2	-0,2	-6	-4	2

Примечание. T_I , T_{VII} – средняя температура воздуха за январь, июль, соответственно; ΣT_5 , ΣT_{10} – сумма температур воздуха выше 5, 10 °С; T – средняя температура воздуха за вегетационный период (от всходов до восковой спелости); D_{beg} и D_{end} – даты начала и окончания вегетационного периода; N – продолжительность вегетационного периода.

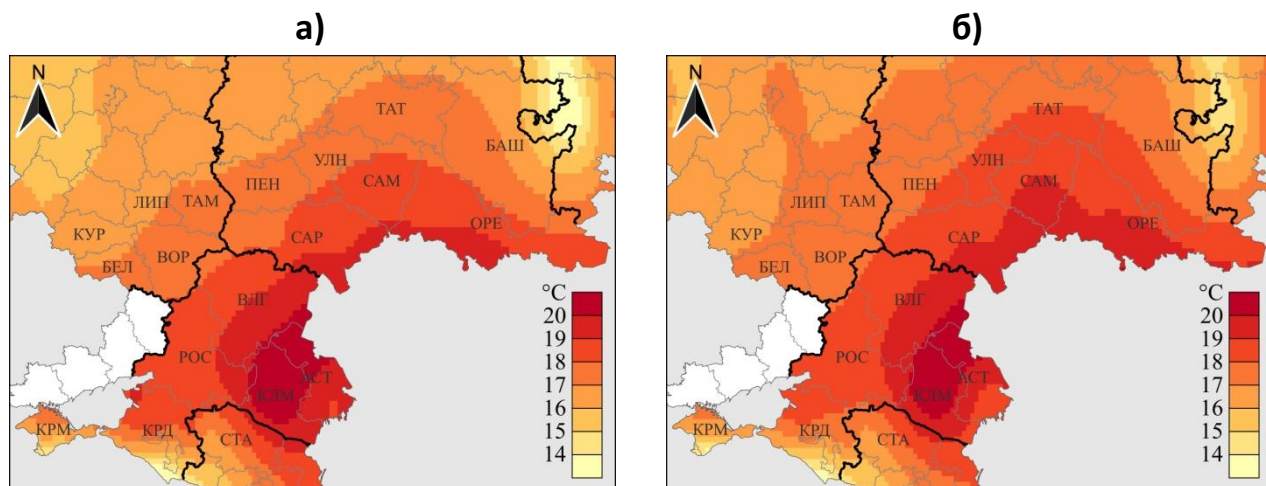


Рис. 1. Температура воздуха, средняя за вегетационный период яровой пшеницы: а) 1961-1990 гг., б) 1991-2020 гг.

Анализ показывает, что сохраняется устойчивая отрицательная корреляционная связь между температурой вегетационного периода и урожайностью яровой пшеницы для «старого» и «нового» базовых периодов. Соответствующие коэффициенты детерминации (R^2) составляют 53 и 47% (p -level < 0,0001) [2].

Наблюдаемые изменения климата проявляются в повышении температуры воздуха и в холодный период года. Основным условием размещения посевов озимых зерновых культур является благоприятные условия перезимовки. Если ограничиться оценкой тенденции температуры воздуха января, критического месяца для зимующих культур, то факт повышения температуры на 1,0-1,2 °С, свидетельствует об улучшении условий перезимовки озимой пшеницы. Потепление климата привело к значительному уменьшению числа зим с опасной для озимых культур минимальной температурой почвы ниже -10 °С. Как показали расчёты, в ЦЧО частота таких зим снизилась с 18-20 до 8-10%, а в ЮФО – с 10 до 5%. При этом растёт повторяемость «мягких» зим (с температурой января выше -5 °С) в ЦЧО – с 10-30 до 20-40% [2].

В период с 1961 по 1990 г. основные посевные площади озимой пшеницы были сосредоточены в ЮФО, в ЦЧО и на юге ПФО (рис. 2). Плодородные

чернозёмные почвы при достаточном количестве осадков за время вегетации и относительно тёплые зимы создают благоприятные условия для получения высоких урожаев в этих регионах. За период 1991-2020 гг. по сравнению с 1961-1990 гг. в 4-5 раз увеличились посевные площади озимой пшеницы на юге ПФО – в Саратовской, Самарской и Оренбургской областях, в Республиках Татарстан и Башкортостан (рис. 3).

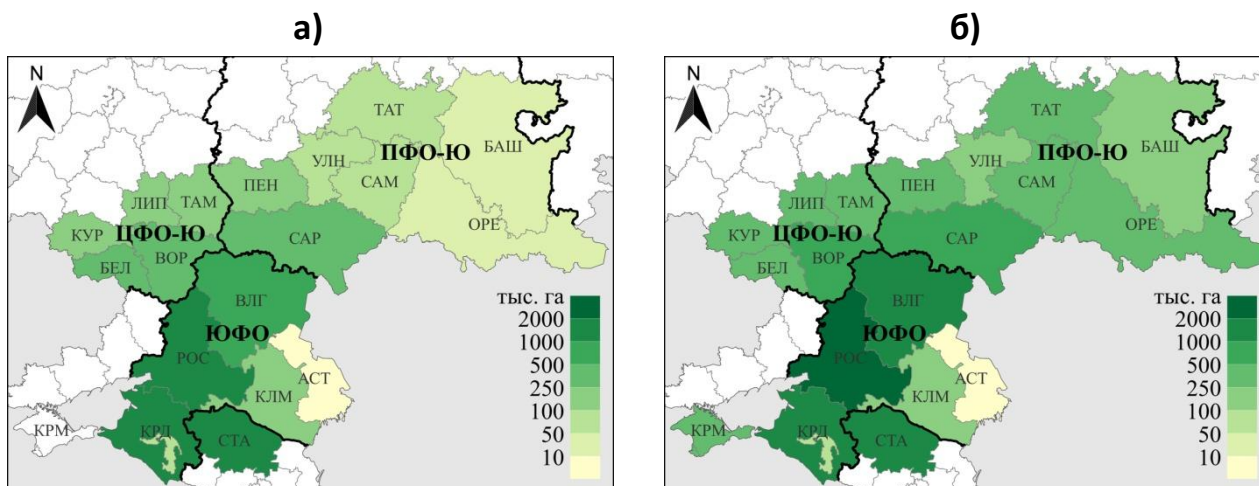


Рис. 2. Средняя посевная площадь озимой пшеницы в центре и на юге европейской части России за периоды: а) 1961-1990 гг., б) 2011-2020 гг.

Расширение посевов озимых культур можно рассматривать как эффективную меру адаптации сельского хозяйства к изменению климата. Озимая пшеница обладает значительными резервами повышения урожаев в условиях роста засушливости климата – благодаря использованию запасов влаги ранневесеннего периода и началу вегетации с даты устойчивого перехода температуры воздуха через 5°C она «обходит» условия напряжённого термического режима в июле-августе.

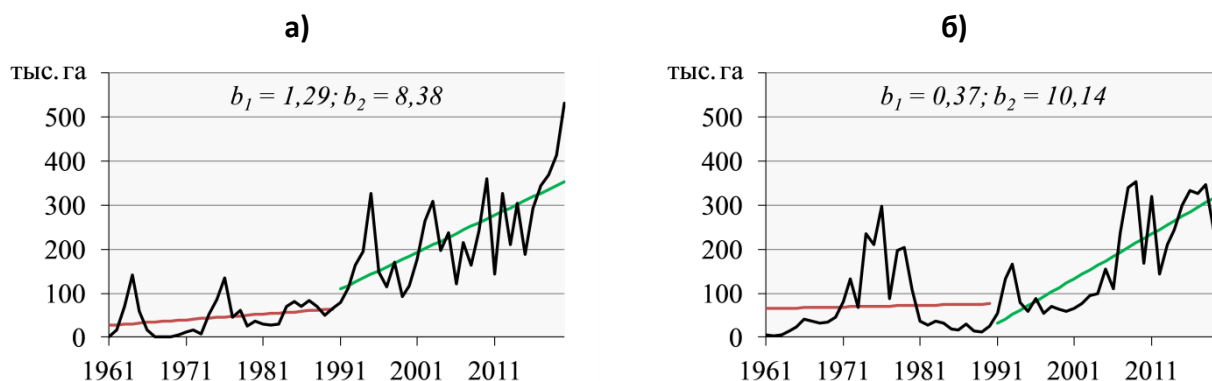


Рис. 3. Динамика посевной площади озимой пшеницы в Оренбургской области (а) и Республике Татарстан (б) за 1961-2020 гг. и коэффициенты линейного тренда b (тыс. га/год): b_1 – период 1961-1990 гг. и b_2 – период 1991-2020 гг.

Влагообеспеченность. Показателем степени неблагоприятности агроклиматических условий для возделывания сельскохозяйственных культур может служить оценка повторяемости засух ($ГТК \leq 0,6$). Повторяемость засух на исследуемой территории в период 1991-2020 гг. варьирует значительно: от 20-30% в ЦЧО (~2-3 случая за 10 лет) до ~60-70% в среднем и нижнем Поволжье (~6-7 случаев за 10 лет).

Самые продолжительные засухи зафиксированы в последнее десятилетие нового климатического периода – в 2010, 2014 и 2018 г., а их продолжительность достигала практически 4-х месяцев, например, в Оренбургской области в 2014 г.

Изменение климатически обусловленной урожайности. В ЦЧО в последние десятилетия наблюдается усиление негативного влияния изменения климата, проявившееся в скачкообразном снижении климатически обусловленной урожайности до уровня 75% в 2011-2020 гг. относительно 1961-1990 гг. На этой территории изменение климата увеличивает риск снижения урожайности, прежде всего, яровых зерновых культур, в результате уменьшения доступной влаги в вегетационный период. В то же время, благоприятные условия увлажнения осеннего периода и заметное уменьшение повторяемости лет с вымерзанием озимых смягчает отрицательные последствия роста засушливости климата и являются благоприятными факторами для озимых зерновых культур.

В южных областях ПФО климатически обусловленная урожайность яровой пшеницы в 1991-2020 гг. составила $85 \pm 5,9\%$ от уровня 1961-1990 гг. (табл. 2). Климатические изменения в регионе проявились в росте теплообеспеченности при возрастании повторяемости засух. К положительным последствиям относится улучшение условий перезимовки зерновых культур.

Таблица 2

Климатически обусловленная урожайность яровой пшеницы за период 1991-2020 гг. и в динамике по десятилетиям относительно 1961-1990 гг. Расчёты в имитационной системе «Климат-Почва-Урожай»

Регион	Оценка урожайности, %, за период, гг.			
	1991-2020	1991-2000	2001-2010	2011-2020
Центральный ФО, юг	$85 \pm 4,1$	90	91	75
Приволжский ФО, юг	$85 \pm 5,9$	90	91	73
Южный ФО (включая Ставропольский край)	$91 \pm 4,3$	105	89	80

В ЮФО и Ставропольском крае наблюдается постепенное снижение климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы от 105% в 1991-2000 гг. до 80% в 2011-2020 гг. (табл. 2). Продолжительные интенсивные засухи, зафиксированные в 2012, 2013 и 2018 г. внесли основной отрицательный

вклад в эту оценку. В целом, климатические изменения в ЮФО проявляются в возрастании продолжительности и интенсивности жаркой погоды. Происходит небольшое уменьшение осадков летом при одновременном увеличении интенсивности ливневых осадков, возрастает засушливость в летний период.

Заключение. Изменение климата в климатическом периоде 1991-2020 гг. проявилось в росте термических и снижении влажностных ресурсов в степной и сухостепной зоне ЕЧР, что привело к снижению климатически обусловленной урожайности зерновых культур. Самое значительное её понижение отмечается в южных областях Приволжского ФО ($85 \pm 5,9\%$). Полученные в исследовании количественные оценки тенденций и пространственные закономерности изменения климатически обусловленной урожайности зерновых культур на примере яровой пшеницы, отражают особенности изменения агроклиматических ресурсов в основных регионах её возделывания на ЕЧР и могут служить основой для научного обоснования разрабатываемых мер адаптации зернового комплекса России к изменению климата.

Библиографический список

1. Morgounov A., Sonder K., Abugalieva A., Bhadauria V., Cuthbert R.D., Shamanin V. et al. Effect of climate change on spring wheat yields in North America and Eurasia in 1981-2015 and implications for breeding // PLoS ONE. 2018. № 13(10): e0204932.

2. Павлова В.Н., Карачёноква А.А. Изменение агроклиматических ресурсов зернопроизводящих регионов России и продуктивности зерновых культур в новом климатическом периоде 1991-2020 гг. // Метеорология и гидрология. 2023. № 9. С. 29-42.

3. Pinke Z., Decsi B., Jámbor A., Kardos M.K., Kern Z., Kozma Z., Ács T. Climate change and modernization drive structural realignments in European grain production // Scientific Reports. 2022. № 12:7374.

4. Pequeno D.NL., Hernandez-Ochoa I.V., Reynolds M. et al. Climate impact and adaptation to heat and drought stress of regional and global wheat production // Environ. Res. Lett. 2021. № 16:054070.

5. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме // СПб.: Научные технологии. 2022. 124 с.

6. Национальный план мероприятий первого этапа адаптации к изменениям климата на период до 2022 года, утвержденный распоряжением Правительства Российской Федерации от 25 декабря 2019 г. № 3183-р. [Электронный ресурс] // Правительство России. URL: <http://static.government.ru>

</media/files/OTrFMr1Z1sORh5NIx4gLUsdgGHyWIAqy.pdf> (дата обращения 01.02.2024).

7. Сиротенко О.Д. Имитационная система Климат-Урожай // Метеорология и гидрология. 1991. № 4. С. 67-73.

8. Pavlova V.N., Karachenkova A.A., Varcheva S.E., Sinitsyn N.M. Assessment approach of the spatial wheat cultivation risk for the main cereal cropping regions of Russia / In: Landscape Modelling and Decision Support. W. Mirschel, V.V. Terleev and K.-O. Wenkel (eds.) // Springer Nature. 2020. P. 363-382.

9. Сиротенко О.Д. Математическое моделирование водно-теплового режима и продуктивности агроэкосистем. Л.: Гидрометеиздат. 1981. 167 с.

10. Бараев А.И., Бакаев Н.М., Веденеева М.Л. и др. Яровая пшеница / Под общей ред. А.И. Бараева. М.: Колос. 1978. 429 с.

DYNAMICS OF AGROCLIMATIC RESOURCES IN THE SOUTH OF THE EUROPEAN PART OF RUSSIA UNDER CLIMATE CHANGE

V.N.Pavlova, V.A.Romanenkov, A.A.Karachenkova

All-Russian Institute of Agricultural Meteorology, Obninsk, vnp2003@bk.ru

Lomonosov Moscow State University, Agrarian Center, Moscow,

romanenkov@soil.msu.ru

Summary: The favorable and unfavorable consequences of the observed climate change for 1991-2020 relative to the previous thirty years (1961-1990) in the steppe and forest-steppe zones in the European part of Russia were assessed, as well as their impact on climate-dependent wheat yield. A 10-20% yield decrease, primarily for spring grain crops, is due to a decrease in available moisture reserves during the growing season and an increase in the frequency of droughts.

Keywords: climate change, climate-dependent yield, spring and winter wheat, heat and moisture availability.