

Агроклиматический мониторинг и современные тенденции изменения агроклиматических ресурсов в сопредельных областях России и Казахстана

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

¹⁾ Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии,
Россия, 249038, Калужская обл., г. Обнинск, пр. Ленина, д. 82

²⁾ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Евразийский центр по продовольственной безопасности,
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1

* Адрес для переписки: vnp2003@bk.ru

Реферат. Представлены результаты мониторинга агроклиматических ресурсов на территории основных зернопроизводящих сопредельных областей России и Казахстана за период с 1976 по 2024 годы. Мониторинг осуществлялся на основе имитационной системы «Климат-Почва-Урожай» с использованием данных наблюдений по температуре приземного воздуха и суммам осадков месячного разрешения. Все оценки получены по данным 17 метеорологических станций на территории России и 8 станций в Северном Казахстане. Приведены обновлённые оценки трендов термических и влажностных ресурсов. Показано, что оценки скорости роста показателей теплообеспеченности в макрорегионе остаются положительными, но значительно ниже, чем по России в целом. В отдельных пунктах наблюдений зафиксирован статистически значимый рост весенних осадков. Значимых тенденций изменений в летних осадках не выявлено. Приведены результаты агроклиматического мониторинга в 2024 году, включая ожидаемые оценки климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы и биоклиматического потенциала в макрорегионе. Показано, что при наблюдаемых изменениях климата агроклиматический потенциал макрорегиона остаётся значительным.

Ключевые слова. Изменение климата, тепло- и влагообеспеченность, Центральная Азия, урожайность, яровая пшеница.

Agroclimatic monitoring and current trends in agroclimatic resources in the neighboring regions of Russia and Kazakhstan

V.N. Pavlova^{1),2)}, A.A. Karachenkova¹⁾, V.A. Romanenkov²⁾*

¹⁾ All-Russian Research Institute of Agricultural Meteorology,
82, Lenina str., 249038, Obninsk, Russian Federation

²⁾ Lomonosov Moscow State University, Eurasian Center for Food Security,
1, Leninskie Gory, 119991, Moscow, Russian Federation

* Correspondence address: vnp2003@bk.ru

Abstract. The article presents the results of monitoring agroclimatic resources in the main grain-producing adjacent regions of Russia and Kazakhstan for the period from 1976 to 2024. The monitoring was carried out on the basis of the Climate-Soil-Yield simulation system using surface air temperature and total precipitation with a monthly resolution. The estimates were obtained based on data from 17 meteorological stations in Russia and 8 stations in the Northern Kazakhstan. Updated estimates of thermal and humidity resource trends were provided. It was shown that the estimates of the growth rate for sum of active temperatures in the macroregion remain positive, but significantly lower than in Russia as a whole. At some observation points, a statistically significant increase in spring precipitation was recorded. No significant trends in summer precipitation were revealed. The paper presents the results of agroclimatic monitoring in 2024, including expected estimates of the climate-depended yield of spring wheat and the bioclimatic potential in the macroregion. It was shown that despite the observed changes, the agroclimatic potential of the macroregion remains significant.

Keywords. Climate change, heat and moisture supply, Central Asia, crop yield, spring wheat.

Введение

Зафиксированные изменения климата последних десятилетий оказывают воздействие на все сферы экономической деятельности, и в наибольшей степени это затрагивает агросферу, а именно производство сельскохозяйственных культур (Доклад о климатических рисках ..., 2017; Павлова и др., 2022). Для максимального использования положительных и нейтрализации возможных отрицательных последствий необходимы достоверные количественные оценки влияния изменений климата на современные агроклиматические ресурсы (Сиротенко, Павлова, 2012; Павлова и др., 2020б). Такие оценки могут быть получены с помощью аппарата имитационного моделирования, позволяющего выполнить комплексный анализ изменений климатических, почвенных и агротехнических характеристик с учётом региональных особенностей систем земледельства (Pavlova et al., 2020; Павлова и др., 2020а).

Большая часть пахотных земель, где яровые зерновые являются основной сельскохозяйственной культурой, расположены на территориях с континентальным климатом, которые потенциально более подвержены снижению урожайности пшеницы, чем влажные климатические зоны. На фоне изменчивости погодных условий, роста экстремальности климата и возрастающей зависимости от этих факторов продуктивности сельскохозяйственных культур актуальность аналитических и количественных оценок агроклиматических условий отдельного (текущего) сельскохозяйственного года с течением времени только возрастает. И в то же время оценки тенденций изменений агроклиматических показателей и динамики продуктивности сельскохозяйственных культур важны с точки зрения перспектив зерновой отрасли на ближние и среднесрочные временные интервалы (Богданович и др., 2021; Павлова, Карачёнова, 2023).

В данной работе продолжается проведенное ранее исследование (Павлова и др., 2023; Продовольственные системы ..., 2023). Рассматриваются территории основных зернопроизводящих сопредельных областей России и Казахстана в период с 1976 по 2024 гг. Юго-западные области макрорегиона, Саратовская и Оренбургская области, заняты зоной неустойчивых урожаев, межгодовая изменчивость которых составляет от 0.3 до 0.4, а в отдельных районах до 0.5. В целом, в почвенно-климатических условиях южной части Западной и Восточной части (Алтайский край, Новосибирская область), а также Урала изменчивость урожаев зерновых снижается, это зона умеренно-неустойчивых урожаев. Риски недоборов урожаев яровой пшеницы, оцененные в 1991-2000 гг. для данного региона, показывают, что для Саратовской и Оренбургской областей они составляют 55-60%, для Алтайского края и Челябинской области – до 20%, для Курганской, Омской и Новосибирской областей – 12-16% (Продовольственные системы ..., 2023). Среди зернопроизводящих областей Казахстана наибольшие риски фиксируются в Костанайской и Акмолинской областях. Основной причиной роста рисков является увеличение повторяемости засух, а совместное проявление засухи и высоких температур усиливает их негативный эффект (Schierhorn et al., 2020). Как показано в работе (Pavlova et al., 2014), неустойчивость урожаев обусловлена совместным влиянием короткого вегетационного периода, снижения содержания доступной влаги и повышенного теплового стресса в годы, неблагоприятные для возделывания яровых культур. В результате валовый сбор пшеницы в Казахстане изменялся за 30-летие от менее 4 до почти 20 млн т в урожайном 2011 году (Romanovska et al., 2024).

На основе изучения линейных тенденций температуры и осадков в 2004-2014 гг. за период середина мая – конец июля и их связи с урожайностью в Северном Казахстане возможное снижение урожайности пшеницы к 2050 г. может составить до 0.18 т/га (Islyami et al., 2020). Оценки связаны с ожидаемым повышением максимальных температур в Акмолинской и Костанайской областях, если не изменится количество выпадающих за этот период осадков. При росте количества весенних осадков неблагоприятные последствия повышения температур могут быть частично компенсированы. Одной из возможных стратегий адаптации, рассматриваемых в (Islyami et al., 2020), будет более ранний посев. Использование 70-летнего временного ряда 1950-2020 гг. для Северного Казахстана показало, что линейные тренды среднегодовой температуры составили в среднем 0.31°C за десятилетие, при этом тенденции осадков к росту были незначимыми (Karatajev et al., 2022). Урожаи пшеницы в данном исследовании для большинства областей Казахстана обнаруживали тесную корреляцию со стандартизированным индексом осадков и эвапотранспирации SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index) в марте, июне и июле, наиболее важными месяцами для развития культуры являются июнь и июль. SPEI при определении засухи использует как осадки, так и потенциально возможное испарение (Черенкова, Золотокрылин, 2016). Наиболее сильные засухи, затронувшие более 50% территории Казахстана, выявлены в 1998, 2010 и 2012 гг. при использовании индекса SPEI (Karatajev

et al., 2022). Сочетание факторов роста температуры в вегетационный период, изменение характера осадков и большая подверженность водному стрессу в условиях будущего климата способны оказать значительное влияние на снижение производства пшеницы в исследуемом макрорегионе (Teleubay et al., 2024).

Цель данной работы – представить результаты агроклиматического мониторинга в масштабе субъектов (краёв, областей, республик) и отдельных реперных метеостанций (МС) на территории макрорегиона, включающего области южного Урала, юга Западной Сибири, а также Оренбургскую и Саратовскую области и территорию Северного Казахстана. Процесс потепления здесь идет более медленными темпами относительно других территорий земледельческой зоны.

Материалы и методы

Используются ряды наблюдений по температуре приземного воздуха и сумме осадков месячного разрешения с 1961 по 2024 гг. из подмножества базы данных «Климат», поддерживаемой ФГБУ «ИГКЭ» (Доклад об особенностях климата ..., 2024, 2025) и агрометеорологические данные по фазам развития сельскохозяйственных культур из программного комплекса обработки гидрометеорологической информации «Прометей». Всего 17 МС на территории России и 8 МС на территории Казахстана (рис. 1).



Рисунок 1. Картограмма размещения метеостанций на территории сопредельных областей России и Северного Казахстана

Figure 1. Map of the location of meteorological stations in the territory of adjacent regions of Russia and Northern Kazakhstan

Агроклиматический мониторинг для территории земледельческой зоны осуществляется с использованием имитационной системы «Климат-Почва-Урожай» (Сиротенко, 1991; Pavlova et al., 2024). Выходной набор показателей включает характеристики тепло- и влагообеспеченности, показатели продуктивности в точках наблюдений, в том числе классические агрометеорологические показатели, а также оценки тенденций их изменений, аномалии относительно заданного периода, ранжирование по степени экстремальности.

Последующее картографирование (визуализация) результатов расчётов показателей выполняется на основе ГИС QGIS.

Оценка агроклиматических показателей в 2024 г. выполнена по стационарным данным сети наблюдений на территории земледельческой зоны России. Аномалии агроклиматических показателей определялись относительно нормы – среднего значения за период 1991-2020 гг. Аномалии показателей термического и влажностного режима сельскохозяйственных культур в 2024 г., рассчитанные в точках наблюдений и осредненные по субъектам РФ в пределах условной земледельческой зоны, представлены в масштабе федеральных округов в (Доклад об особенностях климата ..., 2025).

Результаты и обсуждение

Теплообеспеченность сельскохозяйственных культур

Средняя аномалия температуры зимы по земледельческой зоне России в 2024 году составила -0.2°C , т. е. зима была умеренно холодной. На территории макрорегиона, относящейся к России, холоднее на $0.7\text{--}1.4^{\circ}\text{C}$ по сравнению с климатической нормой было в Курганской и Челябинской областях. На остальной части территории наблюдались незначительные положительные аномалии температуры воздуха, которые составили от $+0.1$ (Омская область) до $+0.9^{\circ}\text{C}$ (Алтайский край). В Северном Казахстане температура зимы была выше нормы. Максимальные отклонения составили $+2.2^{\circ}\text{C}$ в Карагандинской и Абайской областях, а минимальные, менее $+1.0^{\circ}\text{C}$, в Северо-Казахстанской и Восточно-Казахстанской областях (табл. 1).

В весенний период средняя температура воздуха максимально превысила норму на $1.3\text{--}1.5^{\circ}\text{C}$ в Саратовской области и Алтайском крае, а на территории Северного Казахстана – в Карагандинской, Абайской и Восточно-Казахстанской областях – на 1.3 , 1.9 , 2.2°C соответственно. Аномалии, не превышающие 1.0°C , наблюдались на большей части территории России и Казахстана и были близки к средней по земледельческой зоне России аномалии температуры воздуха ($+0.9^{\circ}\text{C}$).

Аномалия летней температуры в 2024 г., осреднённая по всей земледельческой зоне России, составляет $+1.3^{\circ}\text{C}$. В рассматриваемом макрорегионе аномалии также положительные и охватывают диапазон от $+0.1$ до $+1.8^{\circ}\text{C}$. Максимальная аномалия температуры воздуха июля как самого тёплого месяца наблюдалась в Саратовской области ($+2.0^{\circ}\text{C}$) и в восточной части макрорегиона – в Новосибирской области ($+1.2^{\circ}\text{C}$) и Алтайском крае ($+1.6^{\circ}\text{C}$) и в Восточно-Казахстанской ($+1.5^{\circ}\text{C}$) и Абайской ($+1.6^{\circ}\text{C}$) областях Казахстана (табл. 1). Отрицательная аномалия июля была незначительной в отдельных областях.

Возобновление вегетации (переход через 5°C весной) наблюдалось значительно раньше среднемноголетней даты, аномалии составили от -1 до -15 суток на территории России и от -6 до -9 суток на территории Казахстана. В первых по рангу по посевным площадям озимых зерновых культур, в Сара-

товской и Оренбургской областях, начало вегетации отмечалось ранее сред-
немноголетней даты практически на декаду. В Алтайском крае, где посевные
площади озимых динамично растут, возобновление вегетации наблюдалось в
ранние сроки, на 8 дней ранее среднемноголетней даты.

Таблица 1. Аномалии показателей термического режима в 2024 г. относительно средних
значений за 1991-2020 гг. на территории сопредельных областей России и Казахстана

Table 1. Anomalies of thermal regime indicators in 2024 relative to average values for 1991-2020
in the territory of adjacent regions of Russia and Kazakhstan

Область / край	Средняя температура воздуха (Т), °С						Т _{Т>5} , °С	Т _{зери.} , °С	Дата перехода весной, сут., через		Продолжи- тельность периода, сут., с Т		Сумма темпера- тур, °С	
	зима	весна	лето	осень	январь	июль			5°С	10° С	>5	>10	>5	>10
Россия														
Саратовская	0.5	1.3	1.6	2.1	-1.3	2.0	1.0	-0.2	-9	-17	13	24	420	510
Оренбургская	0.4	0.2	0.1	0.8	-1.1	-0.3	-0.4	-0.9	-9	-16	11	17	110	150
Челябинская	-1.4	0.8	0.2	0.5	-2.0	0.2	-0.7	-1.0	-15	17	14	-15	50	-200
Курганская	-0.7	0.5	0.3	0.7	-0.9	0.3	-0.7	-1.2	-12	18	10	-16	20	-220
Омская	0.1	-0.2	0.9	0.9	0.6	0.4	-0.1	0.5	-1	12	2	-12	0	-90
Новосибирская	0.4	0.1	1.5	0.5	1.5	1.2	0.2	0.8	-2	8	2	-9	70	-10
Алтайский	0.9	1.5	1.6	0.2	2.3	1.6	0.1	0.3	-8	3	9	-10	130	5
Россия (земл. зона)	-0.2	0.9	1.3	1.9	-0.8	1.5	0.6	0.1	-6	-3	10	10	260	270
Казахстан														
Зап.- Казахстанская	1.1	0.7	0.8	1.5	-0.8	0.7	0.3	-0.6	-6	-14	10	18	250	320
Актюбинская	1.7	1.0	0.1	0.9	1.5	-0.5	-0.3	-1.0	-8	-14	11	15	130	160
Костанайская	1.2	0.1	0.2	0.1	1.1	-0.1	-0.4	-1.2	-8	-10	7	9	20	20
Сев.- Казахстанская	0.4	-0.2	0.3	-0.2	1.1	0.0	-0.6	-0.7	-9	13	6	-16	-30	-230
Акмолинская	1.2	0.2	0.6	0.0	2.0	0.7	-0.5	-0.7	-9	3	9	-8	30	-120
Павлодарская	1.4	0.6	1.2	0.2	2.6	1.3	-0.3	-0.5	-8	5	9	-12	60	-110
Карагандинская	2.2	1.3	1.0	0.7	3.8	0.2	-0.5	-0.1	-6	-10	15	7	240	160
Абайская	2.2	1.9	1.8	0.7	5.6	1.6	0.1	0.6	-8	-5	16	5	310	230
Вост.- Казахстанская	0.9	2.2	1.6	0.9	4.6	1.5	-0.1	-0.1	-9	-4	19	-5	270	90

Примечание. Обозначения: Т_{Т>5} – средняя температура воздуха за тёплый период года
(Т>5°С); Т_{зерн.} – средняя температура воздуха за период вегетации яровых
зерновых культур.

Продолжительность тёплого периода года (Т>5°С) на территории земле-
дельческой зоны России в целом превышала среднемноголетние значения и
аномалия составила +10 суток. В данном макрорегионе вегетационный
период длился на 9-14 суток дольше, а период активной вегетации (Т>10°С)

был на 9-16 суток короче, за исключением юго-западных областей – Оренбургской и Саратовской.

В тёплый период года ($T > 5^{\circ}\text{C}$) значительные положительные аномалии суммы температур воздуха за период вегетации отмечались только на территории Саратовской области ($+420^{\circ}\text{C}$). На остальной территории российских областей аномалии этого показателя были значительно ниже, от 0 до $+130^{\circ}\text{C}$, что значительно ниже, чем по территории земледельческой зоны в целом ($+260^{\circ}\text{C}$).

На большей части территории наблюдались отрицательные аномалии средней температуры воздуха за вегетационный период яровых зерновых культур (от даты всходов до уборки) от -0.1°C в Восточно-Казахстанской и Карагандинской областях до -1.2°C в Курганской и Костанайской областях (табл. 1, $T_{\text{зерн.}}$) вследствие значительного сдвига фенологических фаз на более ранние сроки. Только в Алтайском крае, Омской, Новосибирской и Абайской областях зафиксированы положительные аномалии – до $+0.8^{\circ}\text{C}$ (табл. 1).

На рис. 2 представлены картосхемы пространственного распределения значений суммы температур выше 10°C в 2024 г. и за климатический период 1991-2020 гг. Можно видеть, что в целом напряженность термического режима в 2024 г. была ниже среднееголетнего уровня, за исключением территории Саратовской и Оренбургской областей.

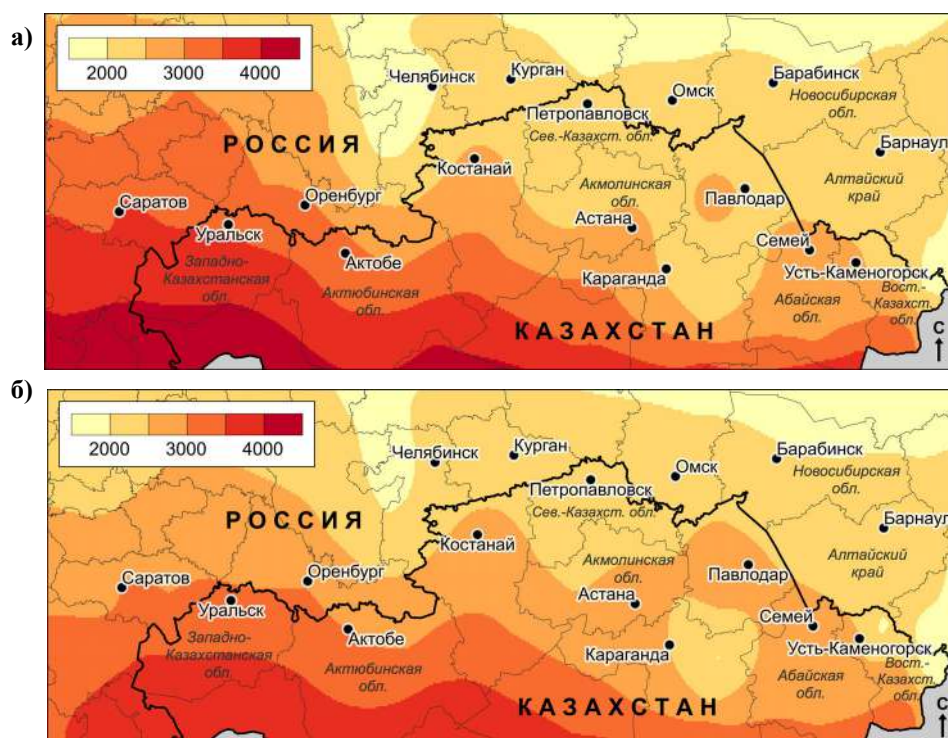


Рисунок 2. Сумма температур выше 10°C , $^{\circ}\text{C}$: а) за 2024 г. и б) средние значения за 1991-2020 гг.

Figure 2. Sum of temperatures above 10°C , $^{\circ}\text{C}$: а) in 2024, б) average for 1991-2020

Влагообеспеченность сельскохозяйственных культур

Оценка увлажнённости территории осуществлялась на основе следующих показателей: сумма осадков по сезонам года, за тёплый период года ($R_{T>5}$) и за период вегетации яровых зерновых культур от даты всходов до уборки ($R_{\text{зерн.}}$); гидротермический коэффициент Г.Т. Селянинова (ГТК); индекс сухости М.И. Будыко (ИС) (Селянинов, 1958; Чирков, 1986; Будыко, 1971). Аномалии показателей влажностного режима в 2024 г. относительно 1991-2020 гг. на исследуемой территории представлены в табл. 2.

Таблица 2. Аномалии показателей влажностного режима в 2024 г. относительно 1991-2020 гг. на территории сопредельных областей России и Казахстана

Table 2. Anomalies of humidity indicators in 2024 relative to 1991-2020 in the territory of adjacent regions of Russia and Kazakhstan

Область / край	Сумма осадков, %					R _{T>5} , %	R _{зерн.} , %	ГТК _{май-авг.} , ед.	ИС, ед.
	зима	весна	лето	осень	год				
Россия									
Саратовская	33	-52	-22	-19	-15	-31	-44	-0.24	0.44
Оренбургская	68	9	112	-48	37	52	32	0.52	-0.40
Челябинская	36	12	74	-36	33	53	83	0.93	-0.29
Курганская	63	48	30	-28	24	27	43	0.46	-0.32
Омская	50	26	49	-6	32	40	62	0.54	-0.28
Новосибирская	49	55	22	36	34	40	-6	0.21	-0.34
Алтайский	43	53	13	11	26	32	38	0.27	-0.23
Россия (земл. зона)	21	-2	9	-13	3	1	-2	0.05	0.07
Казахстан									
Зап.-Казахстанская	59	-24	-1	-17	2	-14	-25	-0.04	0.01
Актюбинская	58	-10	107	-8	36	58	47	0.28	-0.70
Костанайская	48	-24	-13	-20	-4	16	18	0.02	0.35
Сев.-Казахстанская	70	14	72	-9	39	54	55	0.59	-0.45
Акмолинская	86	56	47	26	50	52	32	0.41	-0.59
Павлодарская	74	101	16	64	51	60	49	0.34	-0.62
Карагандинская	11	-14	12	1	4	40	50	0.03	-0.02
Абайская	39	4	31	21	24	36	27	0.11	-0.33
Вост.-Казахстанская	51	19	27	-6	21	36	26	0.18	-0.21

Примечание: $R_{T>5}$ – сумма осадков за тёплый период года ($T>5^{\circ}\text{C}$);
 $R_{\text{зерн.}}$ – сумма осадков за период вегетации яровых зерновых культур;
ГТК_{май-авг.} – гидротермический коэффициент Селянинова за май-август;
ИС – индекс сухости Будыко.

Количество выпавших осадков за период вегетации яровых зерновых культур в 2024 г. в среднем по территории земледельческой зоны России было близко к среднему за период 1991-2020 гг., но значительно разнилось по регионам. Благоприятные агроклиматические условия по увлажнённости наблюдались в вегетационный период зерновых культур практически на всей территории макрорегиона. В весенний период осадков выпало выше среднего за 1991-2020 гг. от 9% в Оренбургской области до 55% в Новосибирской области, а в летний – от 13% в Алтайском крае до 112% в Оренбургской области. Исключение составила Саратовская область, где весной выпала половинная норма осадков, а в летний период – на 22% меньше нормы.

На территории Казахстана условия увлажнённости распределялись неравномерно по территории: в отдельных областях, Западно-Казахстанской, Актюбинской, Костанайской и Карагандинской, в весенний период наблюдался дефицит осадков (~20%). В северных и западных областях выпавшие осадки превысили норму на 10-100%. В целом за вегетационный период, как показывают оценки индекса сухости Будыко, увлажнённость была значительно выше среднееголетних значений (аномалии в диапазоне -0.21...-0.70), за исключением территории Костанайской области (аномалия +0.35). Пространственное распределение по территории индекса сухости Будыко в 2024 г. и за период 1991-2020 гг. можно видеть на картосхеме (рис. 3).

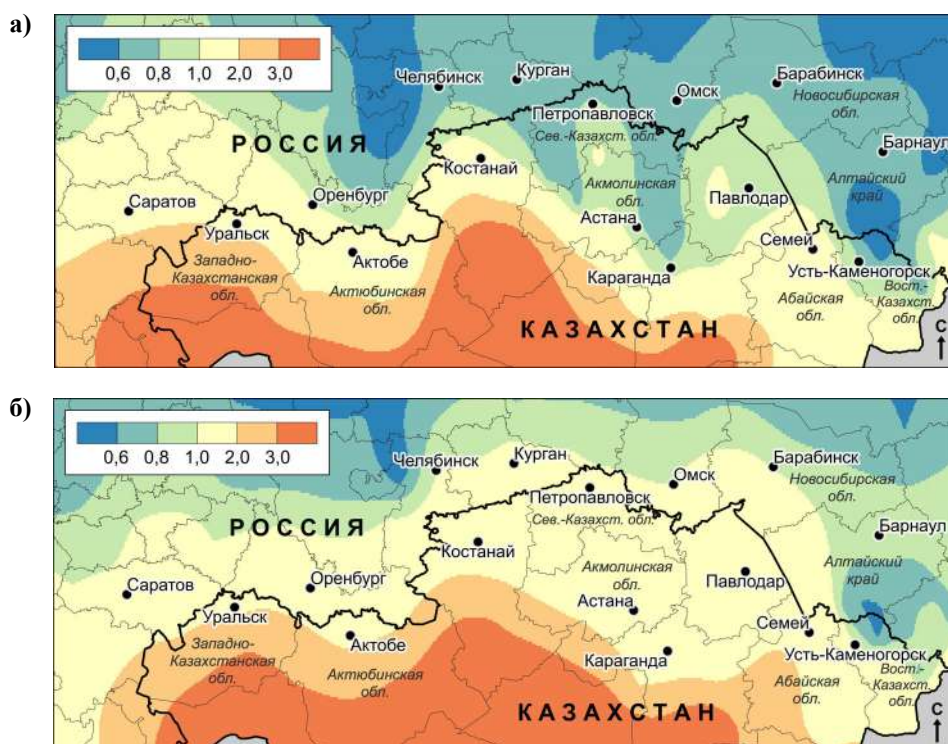


Рисунок 3. Индекс сухости М.И. Будыко: а) за 2024 г. и б) средние значения за 1991-2020 гг.

Figure 3. Budyko Dryness Index: a) in 2024, b) average for 1991-2020

Запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы в 2024 г. весной на дату возобновления вегетации и вплоть до даты колошения зерновых культур были достаточными во всех сельскохозяйственных районах рассматриваемой территории и колебались в диапазоне от 84 мм (МС Омск) до 159 мм (МС Барнаул) (табл. 3). Следует отметить высокий уровень увлажнённости почвы и мае. В июне влагозапасы снизились до критического уровня (50 мм и менее) на территории макрорегиона, за исключением Челябинской и Новосибирской областей и Алтайского края. В июле дефицит увлажнённости наблюдался уже на территории всех областей. Локально, в отдельных районах, почвенная засуха могла достигать критерия опасного агрометеорологического явления «Засуха почвенная». На дату сева озимых, в августе и сентябре, запасы влаги в пахотном слое почвы были недостаточными по данным МС Саратов и Курган (менее 10 мм), на остальной территории – удовлетворительными и хорошими (МС Барабинск, Оренбург, 22-26 мм).

Таблица 3. Запасы продуктивной влаги в метровом и пахотном слоях почвы в 2024 г. Расчёты выполнены для ряда МС в имитационной системе «Климат-Почва-Урожай»

Table 3. Available moisture storage in upper meter and arable soil layers in 2024. Calculations were performed for the selected metstations in the simulation system "Climate-Soil-Yield"

Метеостанция	Запасы продуктивной влаги, мм, в слое					
	0-100 см				0-20 см	
	возобновление вегетации	май	июнь	июль	август	сентябрь
Саратов	152	54	39	38	8	9
Оренбург	137	63	34	26	26	13
Челябинск	127	108	58	40	11	14
Курган	94	85	50	38	9	11
Омск	84	78	37	46	13	16
Барабинск	130	114	55	42	22	30
Барнаул	159	136	73	45	15	15

Примечание. Серым выделены ячейки таблицы с запасами влаги 50 мм и менее в слое 0-100 см и 10 мм и менее в слое 0-20 см.

Тенденции изменения агроклиматических показателей

Теплообеспеченность. Рост теплообеспеченности тёплого периода года ($T > 5^{\circ}\text{C}$) и периода активной вегетации ($T > 10^{\circ}\text{C}$) сельскохозяйственных культур фиксируется повсеместно в макрорегионе. Оценки коэффициента линейного тренда для суммы активных температур воздуха и суммы температур выше 5°C свидетельствуют, что скорость роста этого показателя в западных областях региона (Саратовская и Оренбургская области) выше, чем в восточных областях (табл. 4, рис. 4). Скорость роста этого показателя на востоке региона в интервале $50-60^{\circ}\text{C}/10$ лет, что ниже, чем по России в среднем ($\sim 90^{\circ}\text{C}/10$ лет). На этом фоне сохраняется положительная тенденция к росту

продолжительности вегетационного периода ($T > 5^{\circ}\text{C}$) и периода активной вегетации ($T > 10^{\circ}\text{C}$). Продолжительность вегетационного периода с большей скоростью увеличивается в Саратовской, Оренбургской и Западно-Казахстанской областях (~5 сут./10 лет) и с меньшей на остальной территории (~2-3 сут./10 лет).

Таблица 4. Оценки линейных трендов показателей термического и влажностного режимов за период 1976-2024 гг. на территории сопредельных областей России и Казахстана

Table 4. Linear trends estimates of thermal and humidity conditions for the period 1976-2024 in the territory of adjacent regions of Russia and Kazakhstan

Область / край	Средняя температура воздуха (Т), °C/10 лет		Дата перехода через 5°C весной, сут./10 лет	Продолжительность периода Т>5°C, сут./10 лет	Сумма температур , °C/10 лет		Сумма осадков, мм/10 лет		ГТК май-авг, ед./10 лет	ИС, ед./10 лет
	весна	лето			>5	>10	весна	лето		
Россия										
Саратовская	**0.5	**0.6	** -1.9	**4.9	**120	106	3.4	-11.2	** -0.06	**0.08
Оренбургская	**0.6	*0.5	* -1.6	*4.3	*102	92	**7.9	-4.8	-0.02	0.05
Челябинская	**0.4	0.2	-1.2	*2.1	**46	46	1.6	1.1	-0.01	0.02
Курганская	**0.5	0.2	-1.2	2.6	**61	61	*5.4	-4.8	-0.03	0.03
Омская	**0.6	0.1	** -2.0	**3.3	**53	44	4.6	5.4	0.02	0.00
Новосибирская	**0.7	0.1	** -2.0	**2.8	**47	42	1.1	2.0	0.00	0.00
Алтайский	**0.7	**0.2	** -2.0	**2.8	**49	38	3.8	-1.2	-0.02	0.00
Казахстан										
Зап.-Казахстанская	**0.6	0.6	** -2.1	**5.3	**128	**112	*5.0	-3.8	-0.02	0.07
Актюбинская	**0.7	0.3	** -2.0	**4.4	**95	**84	1.9	-2.2	-0.01	0.10
Костанайская	**0.7	0.1	-1.6	**3.2	**59	**51	0.8	-2.1	-0.01	0.28
Сев.-Казахстанская	**0.6	0.1	* -1.2	2.1	*38	*35	**6.0	1.2	0.01	0.00
Акмолинская	**0.8	0.1	** -1.8	**3.3	**61	**57	1.1	3.3	0.00	0.00
Павлодарская	**0.7	0.1	** -1.8	**3.1	**48	39	2.2	3.4	0.00	-0.02
Карагандинская	**0.8	**0.2	** -2.3	**3.9	**67	**55	-0.5	0.7	0.00	0.04
Абайская	**0.7	0.2	** -2.6	**3.9	**65	**53	1.8	0.8	-0.01	-0.02
Вост.-Казахстанская	**0.7	**0.3	** -2.0	**3.4	*59	*39	0.7	3.8	0.00	0.00

Примечание. *, ** – 1% и 5% уровень статистической значимости соответственно.

Влагообеспеченность. Степень засушливости в сельскохозяйственной зоне растёт по оценкам за период 1976-2024 гг.: оценки коэффициента линейного тренда ГТК за период с мая по август (период активного роста и развития сельскохозяйственных культур) и ИС за весь тёплый период года составляют -0.03/10 лет и 0.02/10 лет соответственно. На рассматриваемой территории

тенденции изменений ИС положительные на всей территории, но статистически незначимые (табл. 4, рис. 5). Поэтому можно сделать вывод о том, что условия влагообеспеченности в макрорегионе в среднем не улучшаются и тенденции изменений носят слабо отрицательный характер. Есть обширные области, где влагообеспеченность имеет тенденцию к росту. Это территории в северной и западной частях Казахстана, а также в отдельных районах Алтайского края и Новосибирской области.



Рисунок 4. Скорость изменения (линейный тренд) суммы температур выше 10°C, °C/10 лет, за 1976-2024 гг.

Figure 4. Rate of change (linear trend) of the sum of temperatures >10°C, °C/10 years, for 1976-2024



Рисунок 5. Скорость изменения (линейный тренд) индекса сухости М.И. Будыко, ед./10 лет за период 1976-2024 гг.

Figure 5. Rate of change (linear trend) of the Budyko dryness index, units/10 years for the period 1976-2024

Обсуждение

Агроклиматическая оценка условий формирования урожайности основывается на комплексных показателях продуктивности сельскохозяйственных культур – климатически обусловленной урожайности (КОУ) и биоклиматиче-

ском потенциале (БКП). Аномалии показателей продуктивности в 2024 г. в сельскохозяйственной зоне России определяются относительно средних значений за предшествующие пять лет (как принято в статистике Росстата), с 2019 по 2023 гг. (Доклад об особенностях климата ..., 2025). Области России на границе с Казахстаном по административному признаку относятся к Приволжскому, Уральскому и Сибирскому федеральным округам (ФО).

Прежде всего, рассмотрим результаты статистического анализа рядов урожайности. В табл. 5 представлены оценки средней по области урожайности яровой пшеницы за длительный период 1991-2023 гг. (n=33) и за 2019-2023 гг. (n=5). Субъекты РФ (область, край) ранжированы по валовому сбору яровой пшеницы, как преобладающей культуре в макрорегионе.

Лидерами по посевным площадям и валовому сбору яровой пшеницы являются Алтайский край, Омская и Оренбургская области, где в среднем (2011-2020 гг.) каждый год засеивается от ~1.1 до ~2.0 млн га. В Новосибирской, Курганской и Челябинской областях посевы яровой пшеницы также занимают значительную долю пашни, на уровне 800-900 тыс. га. Исключение составляет Саратовская область, где засеивается немногим более 200 тыс. га. Общая площадь, занятая яровой пшеницей в макрорегионе, достигает ~7400 тыс. га.

Таблица 5. Статистические характеристики рядов урожайности яровой пшеницы (по данным Росстата) по субъектам РФ за период 1991-2023 и 2019-2023 гг.

Table 5. Statistical characteristics of spring wheat yield series (according to Rosstat data) by constituent entities of the Russian Federation for the period 1991-2023 and 2019-2023

Субъект РФ (край, область)	Период, гг.							
	2018- 2023	1991-2023						
	среднее, ц/га	среднее, ц/га	мини- мум, ц/га	макси- мум, ц/га	нижний квартиль, ц/га	верхний квартиль, ц/га	коэфф. вариации, %	ошибка среднего
Алтайский край	14.4	11.0	5.7	17.2	8.6	13.2	27.7	0.53
Омская	14.1	13.3	7.3	19.2	11.7	15.0	21.9	0.51
Новосибирская	18.3	13.9	7.2	22.0	11.0	15.4	25.1	0.61
Курганская	15.2	12.7	6.9	21.6	9.8	15.0	29.5	0.66
Оренбургская	8.8	8.1	1.5	15.0	6.2	10.0	40.9	0.58
Челябинская	11.9	10.8	3.0	17.5	8.0	13.5	36.5	0.69
Саратовская	15.2	10.3	1.3	21.9	6.8	13.2	47.1	0.88
Среднее по макрорегиону	14.0	11.4	4.7	19.2	8.9	13.6	32.7	0.64

В среднем по макрорегиону урожайность яровой пшеницы за последние пять лет выросла и составляет 14.0 ц/га, что превышает среднюю урожайность за тридцатилетний период на 2.6 ц/га. Существенного прироста урожайности добились в Новосибирской области – с 13.9 до 18.3 ц/га и в Саратовской области – с 10.3 до 15.2 ц/га. Максимальная урожайность (~22.0 ц/га) зафиксирована в Новосибирской, Курганской и Саратовской областях.

Минимальный прирост урожайности наблюдается в Оренбургской, Омской и Челябинской областях и составляет 0.7, 0.8 и 1.1 ц/га соответственно, т.е. практически остаётся на уровне прежних десятилетий. В неурожайные годы в Саратовской и Оренбургской областях яровых зерновых собирают меньше, чем высевается (менее 2.0 ц/га).

Коэффициенты вариации, характеризующие изменчивость урожайности, по полученным оценкам, самые низкие в Омской и Новосибирской областях и составляют соответственно 21.9 и 25.1%. Оценка верхней и нижней квартили ряда составляет от ~11.5 до 15.0 ц/га, т.е. колебание урожайности по годам в 50% случаев остаётся в достаточно узком диапазоне. Но высокая вариабельность рядов урожайности характерна для самых засушливых областей, Саратовской и Оренбургской, где коэффициент вариации превышает 40% (47.1 и 40.9% соответственно).

Синхронности неурожайных лет по территории в макрорегионе не наблюдается. Так, самый неурожайный год за последние пять лет: 2020 г. – в Алтайском крае и Челябинской области, 2023 г. – в Омской и Новосибирской областях, 2019 г. – в Саратовской области, 2021 г. – в Оренбургской области (рис. 6).

На рис. 6 представлена динамика урожайности яровой пшеницы за последние пять лет, по данным Росстата, и расчётная климатически обусловленная урожайность в районе ряда реперных точек вблизи географического центра области. В целом, по макрорегиону самым урожайным годом был 2022 г., когда урожайность по областям достигала уровня от 15.0 ц/га в Оренбургской области до 21.7 ц/га в Новосибирской области. Исключение составляет Омская область, где урожаи за последние годы стабильные – на уровне 14.0 ц/га.

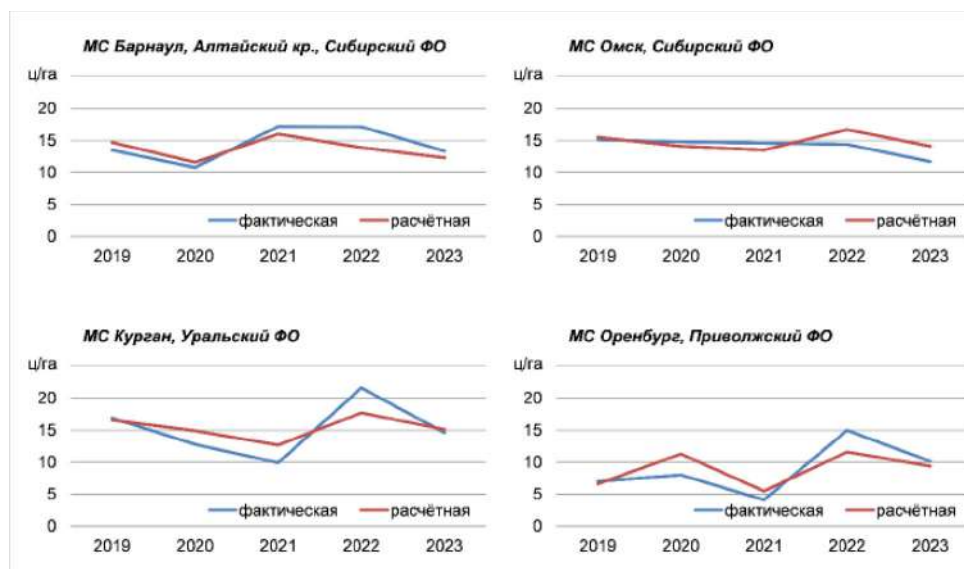


Рисунок 6. Средняя по области фактическая урожайность яровой пшеницы (по данным Росстата) и климатически обусловленная (система «Климат-Почва-Урожай») за период 2019-2023 гг.

Figure 6. Average actual yield of spring wheat in the region (according to Rosstat data) and climate-dependent yield (system "Climate-Soil-Yield") for the period 2019-2023

Обратимся к анализу ожидаемой климатически обусловленной урожайности, рассчитанной по данным наблюдений в 2024 г. В табл. 6 представлены оценки КОУ и БКП в 2024 г. по отношению к двум периодам: 2019-2023 гг. (последние пять лет) и 1991-2020 гг. (базовый период).

Таблица 6. Относительные отклонения (%) показателей продуктивности в 2024 г. от среднего за периоды 2019-2023 и 1991-2020 гг.

Table 6. Relative deviations (%) of productivity indicators in 2024 from the average for the periods: 2019-2023, 1991-2020

Субъект РФ	Климатически обусловленная урожайность яровой пшеницы, %		Биоклиматический потенциал, %	
	2019-2023	1991-2020	2019-2023	1991-2020
Саратовская область	-22	-34	-18	-25
Оренбургская область	52	8	47	24
Челябинская область	43	12	35	22
Курганская область	70	13	59	24
Омская область	19	4	27	23
Новосибирская область	-14	-21	-5	-10
Алтайский край	-14	-20	17	6

В одном из основных зернопроизводящих регионов, в **Приволжском ФО**, климатически обусловленная урожайность яровой пшеницы в 2024 г. в среднем ниже уровня предшествующего пятилетия на 10%. Исключение составляет Оренбургская область. В Оренбургской области положительные аномалии КОУ составили +52% относительно предшествующего пятилетия и +8% относительно базового климатического периода. Благоприятные агрометеорологические условия в области связаны с превышением практически на 50% количества осадков, выпавших в зимний, весенний и летний периоды, на фоне температурного режима, близкому к норме (табл. 1, 2). В Саратовской области оценки КОУ относительно двух периодов в среднем ниже, чем по Приволжскому ФО в среднем, и составили, соответственно, -22 и -34%. Такой уровень снижения можно отнести к категории «умеренного».

На территории **Уральского ФО** в среднем наблюдались положительные аномалии климатически обусловленной урожайности, +30%, относительно 2019-2023 гг. Самый высокий уровень КОУ отмечается в Челябинской и Курганской областях, где рассчитанная величина КОУ превысила уровень урожайности в 1.4 и 1.7 раза по отношению к периоду 2019-2023 гг.

На территории **Сибирского ФО** климатически обусловленная урожайность в 2024 г. в среднем ниже уровня предшествующего пятилетия на 10%. По оценкам, величина КОУ выше среднего за предшествующее пятилетие в Омской области на 19%. В других зернопроизводящих областях с большими посевными площадями, в Алтайском крае и Новосибирской области, отмечается снижение КОУ на 14%. На территории остальных субъектов округа наблюдались отрицательные аномалии (<15%) климатически обусловленной урожайности.

В среднем в 2024 г. на территории макрорегиона преобладали положительные аномалии климатически обусловленной урожайности и отрицательные аномалии, не превышающие 15% относительно среднего уровня 2019-2023 гг. (рис. 7).

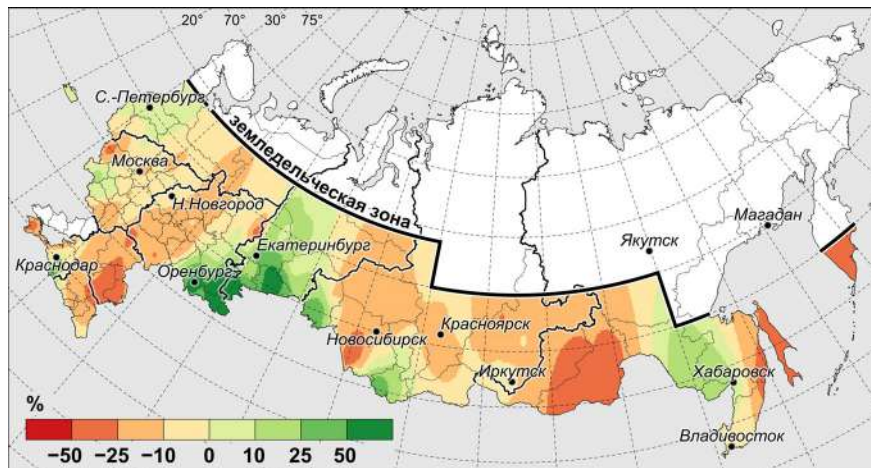


Рисунок 7. Оценка климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы, %, в 2024 г. относительно периода 2019-2023 гг.

Figure 7. Estimate of climate-dependent yield of spring wheat, %, in 2024 relative to the period 2019-2023

Биоклиматический потенциал в 2024 г. оценивается в целом по земледельческой зоне России на уровне среднего за 2019-2023 гг. (-1%), но при отмечаются значительные различия по регионам. Максимальные положительные аномалии БКП зафиксированы в Уральском ФО (+27%), а максимальные отрицательные зафиксированы в южных областях, в Южном и Северо-Кавказском ФО – -22 и -26% соответственно. В Северо-Западном, Приволжском и Сибирском ФО оценки БКП близки к среднему за предшествующие пять лет (рис. 8) (Доклад об особенностях климата ..., 2025).

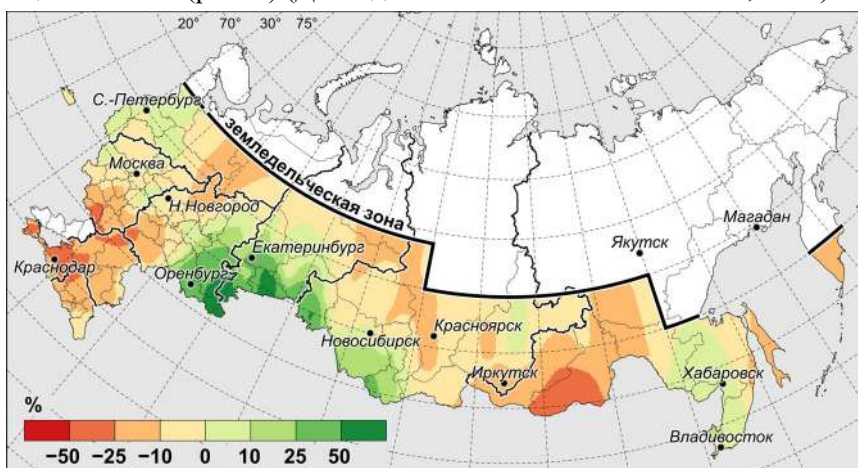


Рисунок 8. Оценка биоклиматического потенциала (%) в 2024 г. относительно периода 2019-2023 гг.

Figure 8. Estimates of bioclimatic potential (%) in 2024 relative to the period 2019-2023

Заключение

Результаты исследования по оценке агроклиматических ресурсов и урожая яровой пшеницы сопредельных регионов России и Северного Казахстана и анализ взаимосвязи между наблюдаемым изменением климата и урожайностью пшеницы с использованием результатов расчёта климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы с помощью системы «Климат-Почва-Урожай» и данных о фактической урожайности показывают, что на фоне умеренного потепления за последние пять лет (2019-2023 гг.) в макрорегионе отмечается рост фактической урожайности яровой пшеницы от 2.5 до 5.6 ц/га в отдельных областях по отношению к периоду 1991-2023 гг. В Оренбургской, Омской и Челябинской областях рост урожайности яровой пшеницы с 1991 г. по настоящее время практически не прослеживается (менее 1 ц/га). Наиболее динамичные темпы роста урожайности (более 3 ц/га) зафиксированы в основных зернопроизводящих областях России – Алтайском крае, Новосибирской и Курганской областях. Современное изменение агроклиматических ресурсов в основных зернопроизводящих областях России, граничащих с Северным Казахстаном, не является экстремальным, вследствие чего агроклиматический потенциал макрорегиона остается значительным.

Список литературы

- Богданович, А.Ю., Павлова, В.Н., Ранькова, Э.Я., Семенов, С.М. (2021) Влияние изменений засушливости в России в XXI веке на пригодность территорий для возделывания зерновых культур, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 7, № 1, с. 20-35, doi:10.21513/2410-8758-2021-1-20-35.
- Будыко, М.И. (1971) *Климат и жизнь*, Л., Гидрометеиздат, 472 с.
- Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации (2017) Под ред. В.М. Катцова, СПб., Росгидромет, 106 с.
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2023 год (2024) М., 104 с.
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2024 год (2025) М., 135 с.
- Павлова, В.Н., Карачёнова, А.А. (2023) Изменение агроклиматических ресурсов зернопроизводящих регионов России и продуктивности зерновых культур в новом климатическом периоде 1991-2020 гг., *Метеорология и гидрология*, № 9, с. 29-42.
- Павлова, В.Н., Карачёнова, А.А., Варчева, С.Е. (2020а) Научно-методические основы агроклиматического мониторинга региональных систем земледелия при изменении климата, *Труды регионального конкурса научных проектов. Выпуск 3*, Калуга, Калужский государственный институт развития образования, с. 61-73.
-

Павлова, В.Н., Карачёнок, А.А., Варчева, С.Е. (2020б) Региональный мониторинг агроклиматических условий формирования урожая при изменении климата, *Труды ГГО им. А.И. Воейкова*, вып. 596, с. 55-77.

Павлова, В.Н., Карачёнок, А.А., Романенков, В.А. (2023) Оценка изменений агроклиматических ресурсов в Центральной Азии и сопредельных областях России, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 9, № 3, с. 298-317, doi:10.21513/2410-8758-2023-3-298-317.

Павлова, В.Н., Пигольцина, Г.Б., Попова, Е.Н. (2022) Сельское хозяйство, *Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации*, под ред. В.М. Катцова, СПб., Научные технологии, с. 320-343.

Продовольственные системы и адаптационная политика государств Евразии в новых экономических условиях (2023) Под общ. ред. С.А. Шобы, М., ЕЦПБ, НИА-Природа, 182 с.

Селянинов, Г.Т. (1958) Принципы агроклиматического районирования территории СССР, *Вопросы агроклиматического районирования СССР*, М., Минсельхоз СССР, с. 7-14.

Сиротенко, О.Д. (1991) Имитационная система Климат-урожай, *Метеорология и гидрология*, № 4, с. 67-73.

Сиротенко, О.Д., Павлова, В.Н. (2012) Глава 5. Методы оценки влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства, *Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем*, под ред. С.М. Семенова, М., Росгидромет, с. 165-189.

Черенкова, Е.А., Золотокрылин, А.Н. (2016) О сравнимости некоторых количественных показателей засухи, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 2, с. 79-94, doi:10.21513/2410-8758-2016-2-79-94.

Чирков, Ю.И. (1986) *Агрометеорология. Учебник для студентов вузов*, под ред. И.Г. Грингофа, Л., Гидрометеиздат, 296 с.

Islyami, A., Aldashev, A., Thomas, T.S., Dunston, S. (2020) Impact of Climate Change on Agriculture in Kazakhstan, *Silk Road. A Journal of Eurasian Development* 2 (1), pp. 66-88, doi:10.16997/srjed.19.

Karatayev, M., Clarke, M., Salnikov, V., Bekseitova, R., Nizamova, M. (2022) Monitoring Climate Change, Drought Conditions and Wheat Production in Eurasia. The Case Study of Kazakhstan, *Heliyon*, vol. 8, issue 1, e08660, doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e08660.

Pavlova, V.N., Chernova, O.V., Alyabina, I.O., Romanenkov, V.A., Karachenkova, A.A. (2024) Assessment of Control Impacts on Winter Wheat Productivity under Changing Agroclimatic Resources. A Case Study for the Rostov Oblast, *Russian Meteorology and Hydrology*, vol. 49, pp. 520-530, doi:10.3103/S1068373924060062.

Pavlova, V.N., Karachenkova, A.A., Varcheva, S.E., Sinitsyn, N.M. (2020) Assessment Approach of the Spatial Wheat Cultivation Risk for the Main Cereal Cropping Regions of Russia, in Mirschel, W., Terleev, V., Wenkel, K.O. (eds) *Landscape Modelling and Decision Support. Innovations in Landscape Research*, Springer, Cham, pp. 363-382, doi:10.1007/978-3-030-37421-1_19.

Pavlova, V.N., Varcheva, S.E., Bokusheva, R., Calanca, P. (2014) Modelling the Effects of Climate Variability on Spring Wheat Productivity in the Steppe Zone of Russia and Kazakhstan, *Ecological Modelling*, vol. 277, pp. 57-67, doi:10.1016/j.ecolmodel.2014.01.014.

Romanovska, P., Undorf, S., Schauburger, B., Duisenbekova, A., Gornott, G. (2024) Human-induced climate change has decreased wheat production in northern Kazakhstan, *Environmental Research. Climate*, vol. 3, no. 3, p. 031005, doi: 10.1088/2752-5295/ad53f7.

Schierhorn, F., Hofmann, M., Adrian, I., Bobojonov, I., Müller, D. (2020) Spatially varying impacts of climate change on wheat and barley yields in Kazakhstan, *Journal of Arid Environments*, vol. 178, no. 104164, doi:10.1016/j.jaridenv.2020.104164.

Teleubay, Z., Yermekov, F., Rustembayev, A., Topayev, S., Zhabayev, A., Tokbergenov, I., Garkushina, V., Igilmanov, A., Shelia, V., Hoogenboom, G. (2024) Comparison of Climate Change Effects on Wheat Production under Different Representative Concentration Pathway Scenarios in North Kazakhstan, *Sustainability*, 16, 293, doi:10.3390/su16010293.

References

Bogdanovich, A.Yu., Pavlova, V.N., Rankova, E.Ya., Semenov, S.M. (2021) Vliyaniye izmeneniy zasushlivosti v Rossii v XXI veke na prigodnost' territorij dlya vozdeleyvaniya zernovykh kul'tur [The impact of changes in aridity in Russia in the 21st century on the suitability of territories for growing grain crops], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, vol. 7, no. 1, pp. 20-35, doi:10.21513/2410-8758-2021-1-20-35.

Budyko, M.I. (1971) *Klimat i zhizn'* [Climate and life], Leningrad, Russia, 472 p.

Doklad o klimaticheskikh riskakh na territorii Rossijskoj Federacii [Report on climate risks in the territory of the Russian Federation] (2017) In V.M. Katsov (ed.), St. Petersburg, Russia, 106 p.

Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossijskoj Federacii za 2023 god [Report on climate features in the territory of the Russian Federation for 2023] (2024) Moscow, Russia, 104 p.

Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossijskoj Federacii za 2024 god [Report on climate features in the territory of the Russian Federation for 2024] (2025) Moscow, Russia, 135 p.

Pavlova, V.N., Karachenkova, A.A. (2023) *Izmeneniye agroklimaticheskikh resursov zernoproizvodyashchikh regionov Rossii i produktivnosti zernovykh kul'tur v novom klimaticheskom periode 1991-2020 gg* [Changes in Agroclimatic Resources of Grain-producing Regions of Russia and Grain Productivity for the New Reference Period of 1991-2020], *Russian Meteorology and Hydrology*, vol. 48, pp. 755-764, doi:10.3103/S1068373923090030.

Pavlova, V.N., Karachenkova, A.A., Varcheva, S.E. (2020a) *Nauchno-metodicheskie osnovy agroklimaticheskogo monitoringa regional'nykh sistem zemledeliya pri izmenenii klimata* [Scientific and methodological foundations of agroclimatic monitoring of regional farming systems under climate change], *Trudy regional'nogo konkursa nauchnykh projektov. Vypusk 3* [Proceedings of the regional competition of scientific projects. Vol. 3.], Kaluga, Russia, pp. 61-73.

Pavlova, V.N., Karachenkova, A.A., Varcheva, S.E. (2020b) *Regional'nyy monitoring agroklimaticheskikh uslovij formirovaniya urozhaya pri izmenenii klimata* [Regional monitoring of agroclimatic conditions for crop formation under climate change], *Trudy GGO im. A.I. Voejkova* [Proceedings of A.I. Voeikov Main Geophysical Observatory], issue 596, pp. 55-77.

Pavlova, V.N., Karachenkova, A.A., Romanenkov, V.A. (2023) *Ocenka izmenenij agroklimaticheskikh resursov v Central'noj Azii i sopredel'nykh oblastyakh Rossii* [Assessment of changes in agro-climatic resources in Central Asia and adjacent areas of Russia], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, vol. 9, no. 3, pp. 298-317, doi:10.21513/2410-8758-2023-3-298-317.

Pavlova, V.N., Pygoltsina, G.B., Popova, E.N. (2022) *Sel'skoe hozyajstvo* [Agriculture], *Tretij ocenochnyy doklad ob izmeneniyakh klimata i ih posledstviyakh na territorii Rossijskoj Federacii* [Third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation], in V.M. Katsov (ed.), St. Petersburg, Russia, pp. 320-343.

Prodoval'stvennye sistemy i adaptacionnaya politika gosudarstv Evrazii v novykh ekonomicheskikh usloviyakh [Food systems and adaptation policies of Eurasian states in new economic conditions] (2023) in S.A. Shoba (ed.), Moscow, Russia, 182 p.

Selyaninov, G.T. (1958) *Principy agroklimaticheskogo rajonirovaniya territorii SSSR* [Principles of agroclimatic zoning of the territory of the USSR], *Voprosy agroklimaticheskogo rajonirovaniya SSSR* [Issues of agroclimatic zoning of the USSR], Moscow, Russia, pp. 7-14.

Sirotenko, O.D. (1991) *Imitacionnaya sistema Klimat-urozhaj* [Simulation system "Climate-Harvest"], *Meteorologiya i gidrologiya*, no. 4, pp. 67-73.

Sirotenko, O.D., Pavlova, V.N. (2012) *Glava 5. Metody ocenki vliyaniya izmenenij klimata na produktivnost' sel'skogo hozyajstva* [Chapter 5. Methods for assessing the impact of climate change on agricultural productivity], *Metody ocenki posledstvij izmeneniya klimata dlya fizicheskikh i biologicheskikh sistem* [Methods for assessing the consequences of climate change for physical and biological systems], in S.M. Semenov (ed.), Moscow, Russia, pp. 165-189.

Cherenkova, E.A., Zolotokrylin, A.N. (2016) O sravnimosti nekotorykh kolichestvennykh pokazatelej zasuhi [On the comparability of some quantitative drought indices], *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, vol. 2, pp. 79-94, doi:10.21513/2410-8758-2016-2-79-94.

Chirkov, Yu.I. (1986) *Agrometeorologiya. Uchebnik dlya studentov vuzov* [Agrometeorology. Textbook for students of higher educational institutions], in I.G. Gringof (ed.), Leningrad, Russia, 296 p.

Islyami, A., Aldashev, A., Thomas, T.S., Dunston, S. (2020) Impact of Climate Change on Agriculture in Kazakhstan, *Silk Road: A Journal of Eurasian Development*, 2 (1), pp. 66-88, doi:10.16997/srjed.19.

Karatayev, M., Clarke, M., Salnikov, V., Bekseitova, R., Nizamova, M. (2022) Monitoring Climate Change, Drought Conditions and Wheat Production in Eurasia: The Case Study of Kazakhstan, *Heliyon*, vol. 8, issue 1, e08660, doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e08660.

Pavlova, V.N., Chernova, O.V., Alyabina, I.O., Romanenkov, V.A., Karachenkova, A.A. (2024) Assessment of Control Impacts on Winter Wheat Productivity under Changing Agroclimatic Resources: A Case Study for the Rostov Oblast, *Russian Meteorology and Hydrology*, vol. 49, pp. 520-530, doi:10.3103/S1068373924060062.

Pavlova, V.N., Karachenkova, A.A., Varcheva, S.E., Sinitsyn, N.M. (2020) Assessment Approach of the Spatial Wheat Cultivation Risk for the Main Cereal Cropping Regions of Russia, in Mirschel, W., Terleev, V., Wenkel, K.O. (eds) *Landscape Modelling and Decision Support. Innovations in Landscape Research*, Springer, Cham, pp. 363-382, doi:10.1007/978-3-030-37421-1_19.

Pavlova, V.N., Varcheva, S.E., Bokusheva, R., Calanca, P. (2014) Modelling the Effects of Climate Variability on Spring Wheat Productivity in the Steppe Zone of Russia and Kazakhstan, *Ecological Modelling*, vol. 277, pp. 57-67, doi:10.1016/j.ecolmodel.2014.01.014.

Romanovska, P., Undorf, S., Schauburger, B., Duisenbekova, A., Gornott, G. (2024) Human-induced climate change has decreased wheat production in northern Kazakhstan, *Environmental Research. Climate*, vol. 3, no. 3, p. 031005, doi: 10.1088/2752-5295/ad53f7.

Schierhorn, F., Hofmann, M., Adrian, I., Bobojonov, I., Müller, D. (2020) Spatially varying impacts of climate change on wheat and barley yields in Kazakhstan, *Journal of Arid Environments*, vol. 178, article, no. 104164, doi: 10.1016/j.jaridenv.2020.104164.

Teleubay, Z., Yermekov, F., Rustembayev, A., Topayev, S., Zhabayev, A., Tokbergenov, I., Garkushina, V., Igilmanov, A., Shelia, V., Hoogenboom, G. (2024) Comparison of Climate Change Effects on Wheat Production under Different Representative Concentration Pathway Scenarios in North Kazakhstan, *Sustainability*, 16, 293, doi:10.3390/su16010293.

Статья поступила в редакцию (Received): 26.03.2025.

Статья доработана после рецензирования (Revised): 05.04.2025.

Принята к публикации (Accepted): 09.04.2025.

Для цитирования / For citation

Павлова, В.Н., Карачёнова, А.А., Романенков, В.А. (2025) Агроклиматический мониторинг и современные тенденции изменения агроклиматических ресурсов в сопредельных областях России и Казахстана, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 11, № 2, с. 178-199, doi:10.21513/2410-8758-2025-2-178-199.

Pavlova, V.N., Karachenkova, A.A., Romanenkov, V.A. (2025) Agroclimatic monitoring and current trends in agroclimatic resources in the neighboring regions of Russia and Kazakhstan, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 11, no. 2, pp. 178-199, doi:10.21513/2410-8758-2025-2-178-199.