

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 551.583

doi: 10.26907/2542-064X.2024.1.126-144

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ БИОКЛИМАТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ЦЕНТРАЛЬНОГО ЧЕРНОЗЕМЬЯ

Ж.А. Буряк, О.В. Крымская, А.А. Крымская, Э.А. Терехин

*Белгородский государственный национальный исследовательский университет,
г. Белгород, 308015, Россия*

Аннотация

Исследование посвящено анализу биоклиматического потенциала (БКП) (по С.А. Сапожниковой) и агроклиматических характеристик территории Центрального Черноземья (включая Орловскую область) и выявлению пространственно-временных тенденций их изменчивости с 1980 по 2021 г. В начале XXI в. по сравнению с концом XX в. установлен повсеместный рост БКП на 10%, сумм активных температур – на 13%, продолжительности периода активной вегетации – на 6%. Установлено смещение поясов сумм активных температур и гидротермического коэффициента (ГТК). Изотерма 3000 °С сместилась к северу и проходит по Белгородской и Воронежской областям. По гидротермическим условиям значительная часть Центрального Черноземья перешла из зоны обеспеченного увлажнения ($1.3 \geq \text{ГТК} > 1$) в статус засушливой зоны ($1 \geq \text{ГТК} > 0.7$). В целом для Центрального Черноземья рост БКП сопряжен с существенным увеличением сумм активных температур при определенном снижении влагообеспеченности.

Ключевые слова: бонитет климата, ГТК, теплообеспеченность, коэффициент увлажнения, изменения климата, пространственная модель, географическая информационная система (ГИС), Центрально-Черноземный район.

Введение

На фоне глобальной тенденции к потеплению климата [1] на территории России рост среднегодовых температур происходит примерно в 3 раза интенсивнее [2] – на 0.49 °С за 10 лет. Вместе с этим происходит изменение агроклиматических условий и биоклиматического потенциала территории [3]. Неблагоприятным следствием глобального потепления для сельскохозяйственного растениеводства является повышение засушливости климата на значительной территории России. В земледельческой зоне страны за последние 20 лет повсеместно растет теплообеспеченность периода активной вегетации сельскохозяйственных культур на фоне увеличения его продолжительности. По прогнозам на основе различных климатических сценариев [4], к концу XXI в. при общем росте биоклиматического потенциала ожидается снижение продуктивности культур из-за засушливости на 16–18%. Также наблюдается рост экстремальных гидрометеорологических явлений, представляющих опасность в том числе для сельского хозяйства [5]. На Европейской

территории России растет частота атмосферных засух [6], прогнозируется дальнейший рост аридизации юга сельскохозяйственной зоны страны [7]. Увеличение частоты засух наблюдается не только в регионах с прогнозируемым снижением количества осадков, но и в областях, где количество осадков растет [8]. С другой стороны, на фоне общего снижения осадков теплого периода для лесостепной зоны Европейской территории России увеличивается повторяемость эрозионно-опасных ливней [9], что усиливает риск развития водной эрозии почв – главной угрозы деградации сельскохозяйственных земель страны.

Скорость изменения агроклиматических условий может быть настолько стремительной, что сама концепция статического агроклиматического районирования может потерять свою актуальность из-за постоянных перемен [10]. Отмечаемые климатические изменения диктуют настоятельную необходимость разработки долгосрочного агроэкономического планирования и его учета в государственной сельскохозяйственной политике страны для обеспечения успешной адаптации агропроизводителей к новым условиям растениеводства. Для прогнозирования урожайности культур и оценки рисков ведения сельского хозяйства по всему миру разрабатываются специализированные модели агроклиматических условий [11], например, «Климат–Почва–Урожай» для России [12, 13], *AgriClim* для Центральной Европы [10] и др. Использование глобальных моделей климатических изменений (например, из числа моделей *CMIP6*) при определенной калибровке достаточно надежно воспроизводит пространственные особенности распределения агроклиматических характеристик [14, 15]. Математическое моделирование позволяет рассчитать вероятность наступления неблагоприятных метеорологических ситуаций и дать обоснованный прогноз состояния агроклиматических ресурсов [16], помогающий своевременно принять меры по адаптации сельского хозяйства к глобальным изменениям климата и повысить его устойчивость.

Пространственный анализ климатических условий, особенно для обширной площади России, дополняет общую картину их изменений во времени, позволяет более глубоко понять механизмы пространственных закономерностей этого процесса. Под задачи пространственного климатического моделирования разрабатываются географические информационно-вычислительные системы локального и глобального уровней [17, 18]. Геоинформационные технологии являются необходимым инструментом научных исследований и для агроклиматологии, находя все большее применение в прикладных региональных отечественных исследованиях и агроклиматическом мониторинге [19–21].

Целью данного исследования является анализ биоклиматического потенциала и агроклиматических характеристик территории Центрального Черноземья (включая Орловскую область) и выявление пространственно-временных тенденций их изменчивости.

1. Материалы и методы

1.1. Территория исследования и источники данных. Анализ изменчивости биоклиматического потенциала проводили для шести областей юга Центральной России – Орловской, Липецкой, Тамбовской, Курской, Белгородской,

Воронежской, основная часть которых входит в Центрально-Черноземный экономический район страны (рис. 1). Далее при упоминании о нем мы будем употреблять обобщающее название «Центральное Черноземье».

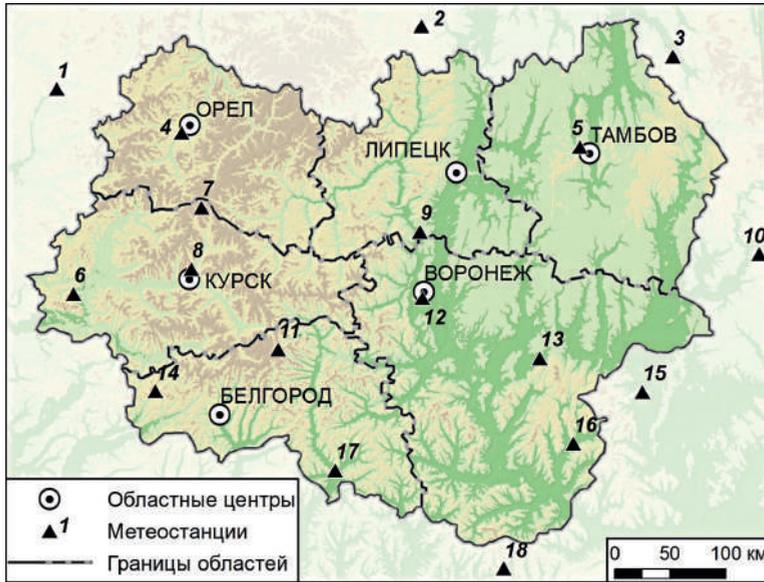


Рис. 1. Территория исследования. Номерами обозначены метеостанции: 1 – Брянск город; 2 – Павелец; 3 – Земетчино; 4 – Орел; 5 – Тамбов; 6 – Рыльск; 7 – Поньжи; 8 – Курск; 9 – Конь-Колодезь; 10 – Росташи; 11 – Богородицкое-Фенино; 12 – Воронеж город; 13 – Каменная Степь; 14 – Готня; 15 – Урюпинск; 16 – Калач; 17 – Валуйки; 18 – Чертково

Исследуемые области входят в число передовых аграрных регионов страны, обладают уникальными почвенно-климатическими ресурсами, обеспечивающими стабильное производство конкурентоспособной сельскохозяйственной продукции. Занимая площадь 192.5 тыс. км² (примерно 1% от территории страны), они включают 13% всех посевных площадей, входят в двадчатку лидеров по урожайности зерновых и технических культур и приносят значительную часть дохода от растениеводства страны [23]. В среднем в структуре посевных площадей наибольшая доля приходится на зерновые и зернобобовые культуры (~58%) [24]. Перечисленные факторы определяют ключевую роль Центрального Черноземья в аграрном секторе страны и важность мониторинга агроклиматических условий региона.

Территория исследования расположена в средней и южной частях Среднерусской возвышенности и на Окско-Донской равнине в условиях умеренно-континентального климата. Для региона характерна высокая доля сельскохозяйственных угодий и доля пашни, которая составляет более 50% общей площади [25]. Территория характеризуется разнообразием сочетаний природных и антропогенных факторов, влияющих на структуру, степень сельскохозяйственной освоенности, способность к самовосстановлению ландшафтов региона.

Для Центрального Черноземья меридиональная южная климатическая эпоха (с 1998 г. по настоящее время) характеризуется наибольшей нестабильностью внутригодового режима осадков с тенденцией их дефицита в летний период и участвовавшей повторяемостью метеорологических экстремумов [26].

Информационной основой исследования выступали открытые данные суточных наблюдений за температурой воздуха и атмосферными осадками в 1980–2021 гг. [27] для 12 метеорологических станций сети Росгидромета в пределах территории исследования. Для корректной интерполяции и пространственного анализа были привлечены данные еще 6 соседних метеостанций. В полученном массиве метеоданных для трех метеостанций (Конь-Колодезь, Калач и Павелец) были обнаружены пропуски по количеству осадков за 1–3 месяца в 1980, 1981, 1991 и 1995 гг. Ряды были восстановлены по ближайшим объектам-аналогам (при коэффициенте корреляции временных рядов более 0.7) с использованием линейной регрессионной модели.

1.2. Агроклиматические показатели и биоклиматический потенциал.

Обеспечение продовольственной безопасности страны в рамках реализации национального проекта по развитию агропромышленного комплекса невозможно без объективной оценки общей потенциальной продуктивности земли, формирующейся в первую очередь под влиянием температуры, увлажнения и инсоляции. Показатель, характеризующий это понятие, был назван П.И. Колосковым [28] биоклиматическим потенциалом (БКП).

Оценке продуктивности природных условий с учетом климата, почв и рельефа в различных сочетаниях посвящены работы многих отечественных агроклиматологов. Стоит отметить, что понятие «биоклиматический потенциал» не является устоявшимся. Разными авторами даются различные варианты данного термина и его трактовки: «биоклиматический потенциал» [28, 29], «сельскохозяйственный бонитет климата» [30], «сельскохозяйственная продуктивность климата» [31], «сельскохозяйственный потенциал климата» [32] и др.

БКП составляет система агроклиматических и агрометеорологических показателей (теплообеспеченность, увлажненность, неблагоприятные явления). Он может быть выражен количественно в виде балла или объема продукции на единицу площади, характеризующего потенциальную биологическую продуктивность агроэкосистем (климатически обусловленную урожайность). Существуют различные методики расчета балла БКП. Так, он может быть выражен через статистическую меру близости неограниченного набора агроклиматических показателей [33] или рассчитан по определенному соотношению показателей по заданным формулам [29, 30].

В настоящей работе для оценки сельскохозяйственной продуктивности климата выбран показатель, разработанный С.А. Сапожниковой [30]. Комплексное влияние тепло- и влагообеспеченности на урожайность зерновых культур учитывается с помощью показателя сельскохозяйственного бонитета климата (биоклиматического потенциала) (B_k), который количественно равен условному урожаю яровых зерновых культур при данном сочетании тепла и влаги. При этом величина БКП (в баллах) определяется произведением суммы активных температур за период вегетации и бонитировочного балла увлажнения и рассчитывается по формуле 1:

$$B_k = 0.01 \times \varepsilon \times \sum T_{10}, \quad (1)$$

где ε – бонитировочный балл увлажнения, количественно равный осредненной урожайности тех же культур (в ц/га), приходящейся на единицу обеспеченного

теплом периода ($\sum T_{10} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$) при данном увлажнении, $\sum T_{10}$ – сумма активных температур за период со среднесуточной температурой выше $10 \text{ }^\circ\text{C}$.

Значение ε определяется на основании коэффициента увлажнения (КУ):

$$\varepsilon = -1.7\text{КУ}^2 + 3.7\text{КУ} - 0.28 \quad (2)$$

$$\text{КУ} = \frac{0.5P_x + P_T}{0.18\sum T_{10}}, \quad (3)$$

где P_x и P_T – сумма осадков холодного и теплого периодов года, а $0.18\sum T_{10}$ – испаряемость за год (по работе [34]).

Выбор именно этой методики среди других вариантов расчета БКП обусловлен несколькими причинами. Во-первых, в отличие от методики расчета БКП по Д.И. Шашко [29], где используются средние суточные значения дефицита влажности воздуха, отсутствующие в свободном доступе, B_k определяется по данным о температуре воздуха и осадках суточной размерности, имеющимся по всем выбранным метеостанциям региона исследования. Во-вторых, КУ учитывает осадки теплого и холодного периодов, но последние входят с меньшим удельным весом. Это обстоятельство выгодно отличает метод оценки влагообеспеченности по С.А. Сапожниковой от гидротермического коэффициента Селянинова, где учитываются только осадки периода активной вегетации, и метода Шашко, в котором для этого сопоставляются годовые суммы осадков и суммы средних суточных значений дефицита влажности воздуха. Также в основу расчета B_k положена оценка тепло- и влагообеспеченности урожая зерновых культур, составляющих основу продовольственной безопасности России.

Условия увлажнения дополнительно оценивали с помощью других показателей: индекса сухости Будыко (ИС) и гидротермического коэффициента Селянинова (ГТК):

$$\text{ИС} = \frac{0.8\sum T_{10}}{P} \quad (4)$$

$$\text{ГТК} = \frac{P_{10}}{0.1\sum T_{10}}, \quad (5)$$

где P – сумма годовых осадков, P_{10} – сумма осадков за период со среднесуточной температурой выше $10 \text{ }^\circ\text{C}$.

Для расчетов был написан макрос на языке *VBA MS Excel*, который рассчитывает даты устойчивого перехода среднесуточной температуры воздуха через $0 \text{ }^\circ\text{C}$ (начало весны, начало зимы), $5 \text{ }^\circ\text{C}$ (начало и конец периода вегетации), $10 \text{ }^\circ\text{C}$ (начало и конец периода активной вегетации), $15 \text{ }^\circ\text{C}$ (начало и конец лета), суммы активных температур, суммы осадков за год и период активной вегетации, ГТК и ИС.

Картографирование и пространственный анализ выполнены с использованием программного обеспечения *ArcGIS* (ESRI, США), включая модули *Spatial Analyst* и *Geostatistical Analyst*. Для интерполяции точечных данных использовали метод сплайна с натяжением. Расчет средневзвешенных значений агроклиматических параметров для отдельных областей Центрального Черноземья выполнен с использованием зональной статистики растров интерполированных значений этих показателей.

2. Результаты

2.1. Временная изменчивость. Биоклиматический потенциал региона на основной продолжительности анализируемого периода характеризовался отчетливой тенденцией к росту (рис. 2). С начала 1980-х гг. БКП в среднем увеличивался на 1 балл в 10 лет. С 2015 г. темпы роста БКП стабилизировались, а за последние три года наблюдалось снижение этого параметра до уровня начала 2000-х гг.

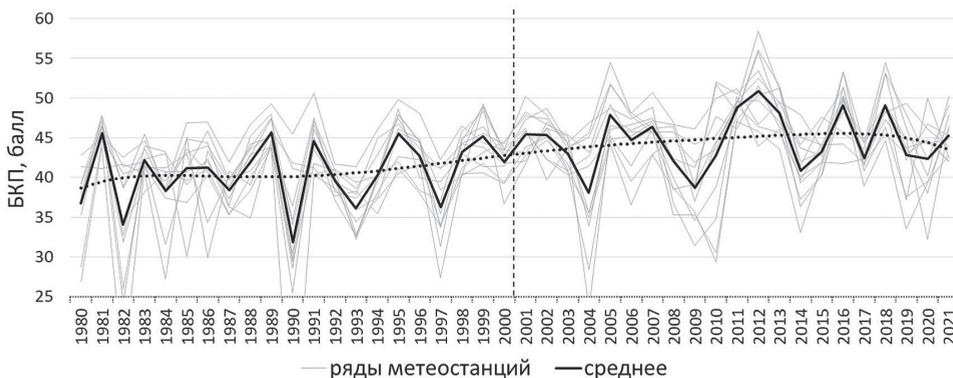


Рис. 2. Динамика биоклиматического потенциала Центрального Черноземья в 1980–2021 гг.

Разностная интегральная кривая БКП (рис. 3), показывающая накопленное отклонение от среднего значения, с 2001 г. меняет свое направление, что говорит об изменении характера процесса роста. Дисперсионный анализ двух полученных выборок (I – 1980–2000 гг. и II – 2001–2021 гг.) показывает достоверные отличия их БКП ($p \ll 0.05$) со средними значениями 40.6 ± 1.9 и 44.6 ± 2.3 соответственно. Между рассматриваемыми периодами БКП вырос на 10%.

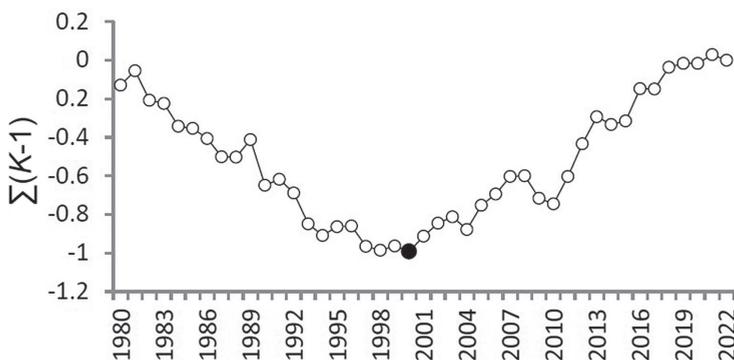


Рис. 3. Разностная интегральная кривая биоклиматического потенциала

Параметры теплообеспеченности и увлажненности вносят разный весомый вклад в расчет БКП – он в 14 раз более чувствителен к изменению суммы активных температур, нежели к режиму осадков. Согласно методике расчета B_k (1–3), при росте ΣT_{10} на 10% B_k увеличивается на столько же, а при аналогичном росте КУ – лишь на 0.7%. Поэтому были проанализированы изменения по выделенным периодам как составляющих БКП, так и отдельных агроклиматических показателей (табл. 1).

Табл. 1

Изменчивость агроклиматических характеристик с 1980–2000 гг. по 2001–2021 гг.

Показатель	Среднее значение				Периоды отличаются	<i>p</i> -значение (< 0.05)
	40 лет	1980–2000	2001–2021	Δ , %		
ΣT_{10} , °C	2489 ± 154	2329 ± 151	2856 ± 159	+13	да	4×10^{-5}
P_{10} , мм	274 ± 27	277 ± 31	271 ± 25	-2	нет	0.89
N_{10} , дни	163 ± 6	159 ± 7	168 ± 6	+6	да	7×10^{-4}
B_k , балл	42.8 ± 1.9	40.6 ± 1.9	44.6 ± 2.3	+10	да	1×10^{-4}
КУ	0.95 ± 0.13	1.03 ± 0.15	0.87 ± 0.12	-15	да	0.009
ГТК	1.07 ± 0.15	1.35 ± 0.18	0.96 ± 0.12	-18	да	0.002
ИС	0.88 ± 0.13	0.82 ± 0.14	0.93 ± 0.13	+15	да, незначительно	0.04

Обозначения: ΣT_{10} – сумма активных температур, P_{10} – сумма осадков за период активных температур, N_{10} – продолжительность периода активных температур, B_k – биоклиматический потенциал, КУ – коэффициент увлажнения по Сапожниковой, ГТК – гидротермический коэффициент, ИС – индекс сухости.

Режим осадков за период активной вегетации в рассматриваемом временном интервале не имел устойчивого тренда к изменению (коэффициент детерминации $R^2 = 0.03$), средние значения по выделенным периодам существенно не отличаются. Внутригодовое распределение осадков также не показывает долгосрочных тенденций к временному изменению. Можно отметить, что за последние 10 лет наблюдается снижение доли осадков теплого периода по сравнению с холодным на 8%, что согласуется с общими оценками для Центрального федерального округа [2].

Установлена наиболее сильная связь изменения БКП с ростом суммы активных температур (коэффициент детерминации $R^2 = 0.42$) (рис. 4). Для сравниваемых периодов ΣT_{10} выросли на 13%, а продолжительность периода активной вегетации – на 9 дней. Это привело к росту биоклиматического потенциала на 10% и снижению КУ и ГТК на 15 и 18% соответственно. По гидротермическим условиям значительная часть Центрального Черноземья перешла из зоны обеспеченного увлажнения ($1.3 \geq \text{ГТК} > 1$) в статус засушливой зоны ($1 \geq \text{ГТК} > 0.7$).

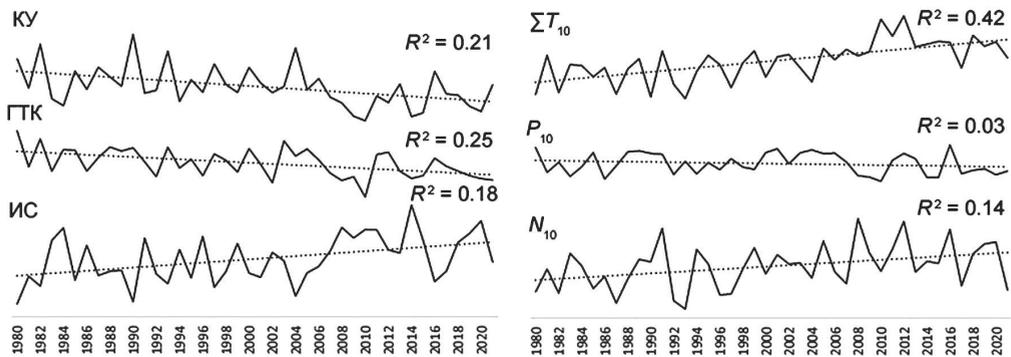


Рис. 4. Изменчивость агроклиматических параметров во времени (нормализованные значения). КУ – коэффициент увлажнения по Сапожниковой, ГТК – гидротермический коэффициент, ИС – индекс сухости, ΣT_{10} – сумма активных температур, P_{10} – сумма осадков за период активных температур, N_{10} – продолжительность периода активных температур

2.2. Пространственная изменчивость. Большинство агроклиматических показателей по средним значениям для Центрального Черноземья демонстрируют выраженные тренды изменения во времени (см. табл. 1, рис. 4). Анализ этих трендов по отдельным метеостанциям региона исследования показывает согласованные однонаправленные пространственные изменения по всем параметрам, кроме осадков. Однако величины изменений могут существенно отличаться, достигая для отдельных метеостанций 20%. Распределение показателей по областям Центрального Черноземья представлено в табл. 2. В пределах изучаемой территории наблюдается неоднородность распределения условий теплообеспеченности и увлажненности, которую лучше всего отражает картографирование.

На рис. 5 представлено сравнение особенностей распределения БКП, осредненного за разные периоды.

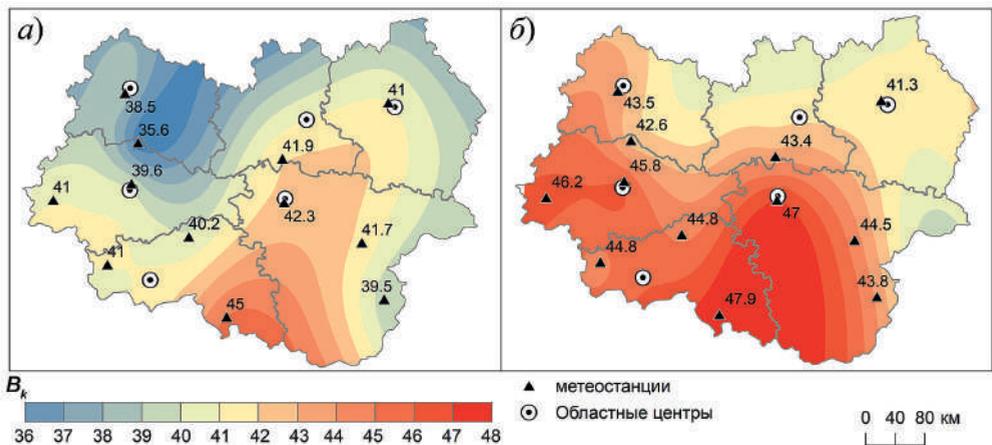


Рис. 5. Пространственное распределение биоклиматического потенциала (B_k) в Центральном Черноземье: а) в 1980–2000 гг.; б) в 2001–2021 гг.

Наблюдается не только повсеместный рост БКП, но и изменение его пространственного тренда. В период 1980–2000 гг. рост БКП происходил по территории Центрального Черноземья в юго-восточном направлении на 7–8 баллов. В следующие 20 лет направление роста БКП сменилось на юго-западное, в Воронежской области изменчивость БКП возросла на 25%, в Тамбовской, наоборот, приобрела более равномерный характер распределения. К началу 2020-х гг. в южных областях средний балл БКП равнялся 45.4, в северных – 42.1. Наибольший рост БКП наблюдался в Орловской и Курской областях – на 13%, наименьший, в среднем на 4%, – в Тамбовской.

Суммы активных температур также показывают повсеместный рост на 9–15% (рис. 6, а). В западной части исследуемой территории рост происходит интенсивнее. К настоящему времени изотерма 3000 °С сместилась к северу и проходит по Белгородской и Воронежской областям. Ближе к их южным границам ΣT_{10} превышает 3200 °С. Средняя продолжительность периода активной вегетации для Белгородской и Воронежской областей превысила 170 дней, а в среднем по территории этот период увеличился на 6%. Причем для северных областей прирост идет активнее, «выравнивая» продолжительность периода активной вегетации для всего региона (рис. 6, б).

Табл. 2

Изменение агроклиматических показателей* по периодам для областей Центрального Черноземья

Область	$\Sigma T_{10}, ^\circ\text{C}$		$P_{10}, \text{мм}$		$N_{10}, \text{дни}$		$B_k, \text{балл}$		КУ		ГТК		ИС	
	I**	II**	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
		$\Delta, \%$		$\Delta, \%$		$\Delta, \%$		$\Delta, \%$		$\Delta, \%$		$\Delta, \%$		$\Delta, \%$
Белгородская	2621	2961	268	276	167	175	42.3	46.4	0.99	0.86	1.1	0.97	0.84	0.94
		+13	+3	+5	+5	+6	+8	+10	-13	-14	-13	-12	-12	+12
Воронежская	2707	3049	254	260	164	173	41.9	45.1	0.88	0.76	0.99	0.84	0.96	1.07
		+13	+2	+4	+4	+6	+8	+13	-14	-14	-16	-15	-15	+11
Курская	2448	2770	297	287	159	166	39.6	44.7	1.16	0.97	1.31	1.05	0.71	0.83
		+13	-3	+7	+7	+4	+7	+13	-18	-18	-16	-20	-20	+17
Липецкая	2420	2726	259	243	152	162	39.6	42.4	1.03	0.84	1.16	0.95	0.82	0.99
		+13	-6	+7	+7	+7	+7	+7	-18	-18	-18	-18	-18	+21
Орловская	2293	2601	281	282	149	160	37.7	42.7	1.18	1.02	1.37	1.12	0.71	0.8
		+13	0	+7	+7	+7	+13	+13	-14	-14	-14	-18	-18	+13
Тамбовская	2516	2787	243	234	154	165	39.7	41.4	0.94	0.77	1.05	0.88	0.89	1.07
		+11	-4	+7	+7	+7	+4	+4	-18	-18	-16	-16	-16	+20
Среднее значение***	2501	2816	267	264	158	167	40.1	43.8	1.03	0.87	1.16	0.97	0.82	0.95
		+13	-1	+6	+6	+6	+9	+9	-16	-16	-17	-17	-17	+16

Обозначения: * ΣT_{10} – сумма активных температур, P_{10} – сумма осадков за период активных температур, N_{10} – продолжительность периода активных температур, B_k – биоклиматический потенциал, КУ – коэффициент увлажнения по Саложниковой, ГТК – гидротермический коэффициент, ИС – индекс сухости.

** I – период с 1980 по 2000 г., II – период с 2001 по 2021 г. *** Средние значения могут отличаться от представленных в табл. 1 из-за различных методик расчета: для табл. 1 обрабатывались данные метеостанций, а для табл. 2 – данные пространственной интерполяции.

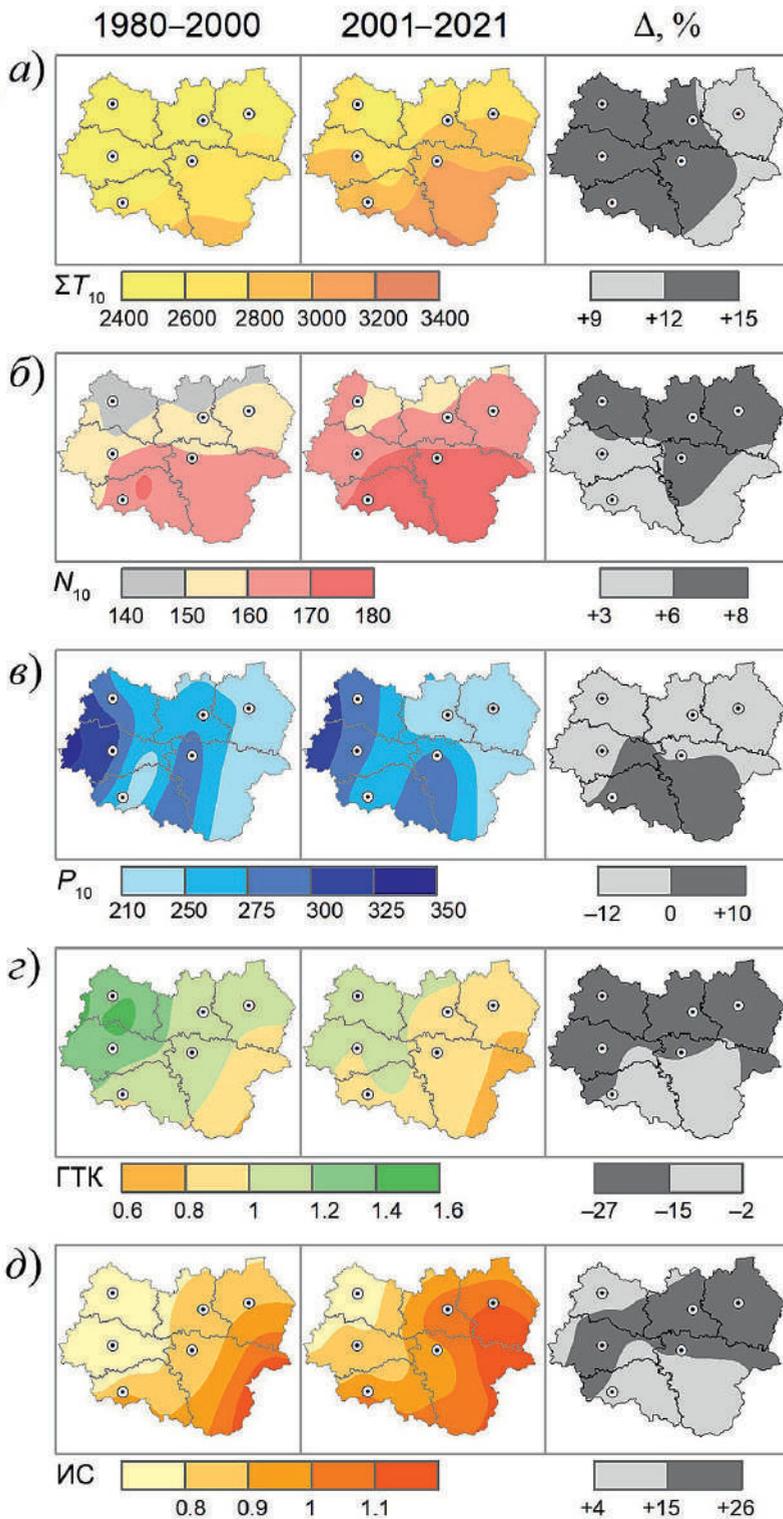


Рис. 6. Пространственная изменчивость агроклиматических параметров: а) суммы температур периода активной вегетации (ΣT_{10}); б) продолжительности периода активной вегетации (N_{10}); в) суммы осадков периода активной вегетации (P_{10}); г) гидротермического коэффициента (ГТК); д) индекса сухости (ИС). Точками обозначены областные центры

Наибольшая пространственная неоднородность характерна для осадков теплого периода (P_{10}) (рис. 6, в). Разница по территории для них варьирует от -12 до $+10\%$. Так, сумма осадков теплого периода в Белгородской области увеличилась на 8 мм ($+3\%$), а в Липецкой снизилась на 16 мм (-6%). В целом для севера Центрального Черноземья характерна тенденция к снижению данного параметра, для юга – к росту. Столь неравномерная изменчивость условий увлажнения может привести к разнонаправленным тенденциям урожайности даже в пределах одного субъекта РФ, не говоря о более обширных территориях.

Гидротермический коэффициент, как и коэффициент увлажнения, повсеместно снижается для всей территории (рис. 6, з). Наиболее быстрое падение ГТК в среднем на $18-20\%$ характерно для Курской, Тамбовской и Липецкой областей. Граница ГТК = 1 за последние двадцать лет сместилась на 200 км к северо-западу. Рост температур привел к смещению поясов ГТК, а изменение увлажненности – к изменению их формы.

Индекс сухости показывает самый высокий прирост по территории – в среднем на 16% . В целом по пространственной картине он довольно близок к распределению ГТК и увеличивается с северо-запада на юго-восток, но изменчивость по территории у него выше (рис. 6, д). Наибольший рост наблюдается в Липецкой, Тамбовской и Курской областях за счет изменения формы «поясов» этого показателя. Самыми засушливыми по-прежнему остаются Воронежская и Тамбовская области. За последние 20 лет $ИС > 1$ наблюдается уже на большей части их территорий.

3. Обсуждение

Географическое положение России обуславливает существенное влияние глобальных и локальных климатических условий на урожайность и валовые сборы основных сельскохозяйственных культур. На территории Центрального Черноземья на основе полученных результатов отмечен повсеместный рост БКП (по работе [30]) в среднем на 10% . Это согласуется с прогнозной оценкой для земледельческой зоны России [4], исходя из которой по ансамблевому варианту климатических изменений рост БКП в первой трети XXI в. вырастет на 8% . Согласно официальной статистике, средняя урожайность основных зерновых и зернобобовых культур для исследуемой территории показывает стабильный рост – за последние 20 лет она увеличилась в 2.2 раза [23, 24].

Однако рост урожайности далеко не всегда является прямым следствием увеличения БКП и благоприятности агроклиматических условий. На исследуемой территории рост БКП сопряжен с разнонаправленным изменением условий тепло- и влагообеспеченности – существенным ростом сумм активных температур при снижении осадков вегетационного периода для $1/2$ территории. Поскольку выбранная нами методика расчета БКП имеет большую чувствительность к изменениям термических условий, балл B_k может недостаточно полно отражать изменчивую специфику условий увлажнения вегетационного периода, которые в исследуемом регионе в значительной мере определяют продуктивность большинства культур.

В исследовании [35] для Европейской части России установлены негативные агроклиматические тенденции, приводящие к снижению климатически

обусловленной урожайности. Положительные тенденции фактической урожайности объясняются авторами успешной адаптацией систем землепользования к изменению климата. В первую очередь негативное влияние агроклиматических факторов компенсируется внесением удобрений [36]. За последние 20 лет объем вносимых минеральных удобрений в Центральном Черноземье вырос в 4.9 раза, а органических – в 3.5 раза [23].

По средним оценкам для Центрального федерального округа [2] с 1976 по 2021 г. скорость роста суммы активных температур $>10\text{ }^{\circ}\text{C}$ составляла $121\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет. Это согласуется с нашими оценками скоростей для юга Центрального федерального округа в $132\text{ }^{\circ}\text{C}/10$ лет. Ранее в работе [37] прогнозировалось, что для территории Центральной Европы сочетание повышения температуры воздуха с изменением количества и распределения осадков приведет к удлинению вегетационного периода и значительным сдвигам агроклиматических зон. Этот прогноз подтверждается и настоящим исследованием регионального характера, где установлено активное смещение поясов сумм активных температур и ГТК.

Столь стремительный рост температур ведет к засушливости и негативным изменениям теплового режима вегетационного периода, особенно для зерновых культур. Установлено, что для территории исследования засушливый гидротермический режим во время посева озимой пшеницы чреват снижением ее урожайности в 1.3–1.5 раза [38]. В засушливые годы последнего десятилетия потери урожайности яровой пшеницы составили от 35 до 50% [5]. С другой стороны, термические условия будут выступать как дополнительные ресурсы тепла при производстве особо ценных и дефицитных для России теплолюбивых культур – кукурузы, сои, подсолнечника и др.

Таким образом, говорить об установленной нами для Центрального Черноземья тенденции роста БКП в исключительно положительном ключе не корректно. Рост теплообеспеченности, несомненно, способствует росту сельскохозяйственного потенциала территории. Однако при дефиците увлажнения, который отмечается нами для исследуемой территории, на фоне повышения температур растут климатические риски, связанные с недостатком увлажнения почвы. Повторяемость засух в Центральном Черноземье сейчас в среднем составляет 10% [20].

Рост БКП территории не только влияет на урожайность сельскохозяйственных культур, но и определяет условия вегетации и продуктивности естественных фитоценозов. Так, в северной лесостепи Центрального Черноземья на фоне повышения теплообеспеченности территории и некоторого снижения ее влагообеспеченности отмечаются положительный тренд лесистости овражно-балочных систем [39] и рост скоростей распространения лесов на бывших лугово-пастбищных угодьях [40].

Заключение

Анализ изменчивости биоклиматического потенциала Центрального Черноземья с 1980 по 2021 г. показал его повсеместный рост в регионе на 10% в первые десятилетия XXI в. в сравнении с последними десятилетиями XX в. Установлена наиболее сильная связь изменения БКП с ростом суммы температур периода активной вегетации ($T > 10\text{ }^{\circ}\text{C}$). В начале XXI в. относительно конца XX в. этот показатель вырос на 13%, а продолжительность периода активной вегетации увеличилась на 9 дней. Простран-

ственное распределение оценок тренда роста БКП показывает различные скорости. Наиболее активные «сдвиги» характерны для западных областей – Орловской, Курской и Белгородской.

Однако не для всего Центрального Черноземья рост БКП является показателем улучшения агроклиматического режима, поскольку для 1/2 территорий он сопряжен со снижением количества осадков вегетационного периода. В целом для Центрального Черноземья степень засушливости растет, о чем свидетельствуют смещения на 200 км к северо-западу изотерм сумм активных температур и рубежа ГТК = 1. Если в конце XX в. в зону обеспеченного увлажнения и выше попадал 81% территории региона, то к 2021 г. эта доля снизилась до 34%.

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-27-00291.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Литература

1. Pörtner H.-O., Roberts D.C., Tignor M.M.B., Polozzanska E., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Löschke S., Möller V., Okem A., Rama B. (Eds.) *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. 3056 p. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>.
2. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 г. М.: Росгидромет, 2022. 104 с.
3. Иванов А.Л., Кирюшин В.И. Глобальные изменения климата и прогноз рисков в сельском хозяйстве России. М.: Россельхозакадемия, 2009. 518 с.
4. Павлова В.Н. Агроклиматические ресурсы и продуктивность сельского хозяйства России при реализации новых климатических сценариев в XXI в. // Труды Главной геофизической обсерватории имени А.И. Воейкова. 2013. № 569. С. 20–37.
5. Доклад о климатических рисках на территории Российской Федерации / под ред. В.М. Катцова. СПб.: Главная геофизическая обсерватория имени А.И. Воейкова, 2017. 106 с.
6. Глобальный климат и почвенный покров России: проявления засухи, меры предупреждения, борьбы, ликвидация последствий и адаптационные мероприятия (сельское и лесное хозяйство): национальный доклад / под ред. Р.С.-Х. Эдельгериева. М.: Издательство МБА, 2021. Т. 3. 700 с. <https://doi.org/10.52479/978-5-6045103-9-1>.
7. Золотокрылин А.Н., Черенкова Е.А., Туткова Т.Б. Аридизация засушливых земель Европейской части России и связь с засухами // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2020. Вып. 84, № 2. С. 207–217. <https://doi.org/10.31857/S258755662002017X>.
8. Устойчивость земледелия и риски в условиях изменения климата (резюме коллективной монографии) / под ред. А.Л. Иванова, И.Б. Ускова. СПб.: Салезианский центр имени Дона Боско, 2009. 95 с.
9. Chizhikova N., Yermolaev O., Golosov V., Mukharamova S., Saveliev A. Changes in the regime of erosive precipitation on the European part of Russia for the period 1966–2020 // *Geosciences*. 2022. V. 12, No 7. Art. 279. <https://doi.org/10.3390/geosciences12070279>.
10. Trnka M., Eitzinger J., Semerádová D., Hlavinka P., Balek J., Dubrovský M., Kubu G., Štěpánek P., Thaler S., Možný M., Žalud Z. Expected changes in agroclimatic

- conditions in Central Europe // *Clim. Change*. 2011. V. 108, No 1–2. P. 261–289. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0025-9>.
11. *Baier W.* Agroclimatic modeling: An overview: Ch. 6 // *Cusack D.F.* (Ed.). *Agroclimate Information for Development: Reviving the Green Revolution. Pt. 2: The science and its use. Sect. A: Agroclimatic models and information systems.* New York, NY: Routledge, 2022, pp. 57–82. <https://doi.org/10.4324/9780429049323-11>.
 12. *Израэль Ю.А., Сиротенко О.Д.* Моделирование влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства России // *Метеорология и гидрология*. 2003. № 6. С. 5–17.
 13. *Сиротенко О.Д., Абашина Е.В., Павлова В.Н.* Динамика климатообусловленных изменений теплообеспеченности, увлажненности и продуктивности сельскохозяйственной зоны России // *Труды ВНИИСХМ*. СПб.: Гидрометеиздат, 2013. Вып. 38. С. 41–53.
 14. *Лемешко Н.А., Евстигнеев В.П., Морозов А.П., Русаков В.А.* Применимость данных МОЦАО для оценки агроклиматических условий отдельных территорий // *Системы контроля окружающей среды*. 2021. Вып. 3, № 45. С. 23–30. <https://doi.org/10.33075/2220-5861-2021-3-23-30>.
 15. *Li Z., Liu W., Ye T., Chen S., Shan H.* Observed and CMIP6 simulated occurrence and intensity of compound agroclimatic extremes over maize harvested areas in China // *Weather Clim. Extremes*. 2022. V. 38. Art. 100503. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100503>.
 16. *Жуков В.А., Святкина О.А.* Стохастическое моделирование и прогноз агроклиматических ресурсов при адаптации сельского хозяйства к региональным изменениям климата на территории России // *Метеорология и гидрология*. 2000. № 1. С. 100–109.
 17. *Trouet V., Van Oldenborgh G.J.* KNMI Climate Explorer: A web-based research tool for high-resolution paleoclimatology // *Tree-Ring Res.* 2013. V. 69, No 1. P. 3–13. <https://doi.org/10.3959/1536-1098-69.1.3>.
 18. *Fick S.E., Hijmans R.J.* WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas // *Int. J. Climatol.* 2017. V. 37, No 12. P. 4302–4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>.
 19. *Шайхулмарданова Л.В., Гурьянов В.В., Переведенцев Ю.П.* Изменение климатических условий на территории Приволжского федерального округа в XIX – XXI вв. // *Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки*. 2018. Т. 160, кн. 3. С. 531–541.
 20. *Павлова В.Н., Караченкова А.А., Варчева С.Е.* Региональный мониторинг агроклиматических условий формирования урожая при изменении климата // *Труды Главной геофизической обсерватории имени А.И. Воейкова*. 2020. № 596. С. 55–77.
 21. *Буряк Ж.А., Терехин Э.А.* Геоинформационное моделирование пространственно-временной изменчивости агроклиматических условий // *Региональные геосистемы*. 2020. Т. 44, № 3. С. 333–342.
 22. *Братков В.В., Савинова С.В., Ключин П.В., Керимов И.А., Бекмурзаева Л.Р.* Картографирование современной изменчивости агроклиматических условий Северного Кавказа // Юг России: экология, развитие. 2021. Вып. 16, № 4. С. 173–181. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2021-4-173-181>.
 23. *Регионы России. Социально-экономические показатели. 2022: стат. сб.* М.: Росстат, 2022. 1122 с.
 24. *Головин А.А., Курасова И.И.* Оценка эффективности управления земельными ресурсами Центрально-Черноземного региона // *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. 2014. № 5. С. 20–24.
 25. *Косолапов В.М., Трофимов И.А., Трофимова Л.С., Яковлева Е.П.* Агрolandшафты Центрального Черноземья. Районирование и управление. М.: Наука, 2015. 198 с.

26. *Petin A.N., Lebedeva M.G., Krymskaya O.V., Chendev Y.G., Kornilov, A. G., Lupo A.R.* Regional manifestations of changes in atmospheric circulation in the Central Black Earth region (by the example of Belgorod region) // *Adv. Environ. Biol.* 2014. V. 8, No 10. P. 544–547.
27. Специализированные массивы данных для климатических исследований // ВНИИГМИ-МЦД. 2000. Вер. 03.08.2023. URL: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori>.
28. *Колосков П.И.* О биоклиматическом потенциале и его распределении на территории СССР // *Труды НИИАК.* 1963. Вып. 23. С. 90–111.
29. *Шашко Д.И.* Агроклиматические ресурсы СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 248 с.
30. *Сапожникова С.А.* Опыт интегральной сельскохозяйственной оценки климата территории социалистических стран Европы // *Агроклиматическое районирование пяти основных сельскохозяйственных культур на территории социалистических стран Европы.* София: Издательство Болгарской академии наук, 1976. С. 30–36.
31. *Батталов Ф.З.* Сельскохозяйственная продуктивность климата для яровых зерновых культур. Л.: Гидрометеиздат, 1980. 112 с.
32. *Зоидзе Е.К., Овчаренко Л.И.* Сравнительная оценка сельскохозяйственного потенциала климата территории РФ и степени использования ее агроклиматических ресурсов сельскохозяйственными культурами. СПб.: Гидрометеиздат, 2000. 75 с.
33. *Зоидзе Е.К., Овчаренко Л.И., Чуб О.В.* Методология оценки межгодовой динамики биоклиматического потенциала на территории Российской Федерации в условиях изменения климата // *Метеорология и гидрология.* 2010. № 1. С. 96–110.
34. *Будыко М.И.* Тепловой баланс земной поверхности. Л.: Гидрометеиздат, 1956. 256 с.
35. *Павлова В.Н., Каланка П., Караченкова А.А.* Продуктивность зерновых культур на территории Европейской России при изменении климата за последние десятилетия // *Метеорология и гидрология.* 2020. № 1. С. 78–94.
36. *Gordeev R.V., Pyzhev A.I., Zander E.V.* Does climate change influence Russian agriculture? Evidence from panel data analysis // *Sustainability.* 2022. V. 14, No 2. Art. 718. <https://doi.org/10.3390/su14020718>.
37. *Trnka M., Rötter R., Ruiz-Ramos M., Kersebaum K.C., Olesen J.E., Žalud Z., Semenov M.A.* Adverse weather conditions for European wheat production will become more frequent with climate change // *Nature Clim. Change.* 2014. V. 4, No 7. P. 637–643. <https://doi.org/10.1038/nclimate2242>.
38. *Гуреев И.И., Нитченко Л.Б., Лукьянов В.А., Прущик И.А.* Урожайность озимой пшеницы и плодородие почвы в условиях Центрально-Черноземного региона // *Достижения науки и техники АПК.* 2021. Вып. 35, № 5. С. 22–27. <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2021-10503>.
39. *Терехин Э.А.* Изменение внутризональных различий в естественном растительном покрове ландшафтов лесостепи в конце XX – начале XXI в. // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2022. Т. 19, № 1. С. 179–192. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-1-179-192>.
40. *Chendev Y.G., Hubbart J.A., Terekhin E.A., Lupo A.R., Sauer T.J., Burras C.L.* Recent afforestation in the Iowa River and Vorskla River basins: A comparative trends analysis // *Forests.* 2016. V. 7, No 11. Art. 278. <https://doi.org/10.3390/f7110278>.

Буряк Жанна Аркадьевна, кандидат географических наук, старший научный сотрудник отдела геоинформатики Федерально-регионального центра аэрокосмического и наземного мониторинга объектов и природных ресурсов

Белгородский государственный национальный исследовательский университет
ул. Победы, д. 85, г. Белгород, 308015, Россия
E-mail: buryak@bsu.edu.ru

Крымская Ольга Владимировна, кандидат географических наук, доцент кафедры географии, геоэкологии и безопасности жизнедеятельности Института наук о Земле

Белгородский государственный национальный исследовательский университет
ул. Победы, д. 85, г. Белгород, 308015, Россия
E-mail: krymskaya@bsu.edu.ru

Крымская Анна Александровна, ассистент кафедры географии, геоэкологии и безопасности жизнедеятельности Института наук о Земле

Белгородский государственный национальный исследовательский университет
ул. Победы, д. 85, г. Белгород, 308015, Россия
E-mail: krymskaya_a@bsu.edu.ru

Терехин Эдгар Аркадьевич, кандидат географических наук, старший научный сотрудник отдела геоинформатики Федерально-регионального центра аэрокосмического и наземного мониторинга объектов и природных ресурсов

Белгородский государственный национальный исследовательский университет
ул. Победы, д. 85, г. Белгород, 308015, Россия
E-mail: terekhin@bsu.edu.ru

ISSN 2542-064X (Print)

ISSN 2500-218X (Online)

UCHENYE ZAPISKI KAZANSKOGO UNIVERSITETA. SERIYA ESTESTVENNYE NAUKI

(Proceedings of Kazan University. Natural Sciences Series)

2024, vol. 166, no. 1, pp. 126–144

ORIGINAL ARTICLE

doi: 10.26907/2542-064X.2024.1.126-144

Spatiotemporal Variability of the Bioclimatic Potential in the Central Chernozem Region

Zh.A. Buryak^{}, O.V. Krymskaya^{**}, A.A. Krymskaya^{***}, E.A. Terekhin^{****}*

Belgorod State University, Belgorod, 308015 Russia

E-mail: *buryak@bsu.edu.ru, **krymskaya@bsu.edu.ru, ***krymskaya_a@bsu.edu.ru,
****terekhin@bsu.edu.ru

Received June 30, 2023; Accepted August 12, 2023

Abstract

This article examines the bioclimatic potential (BCP) (according to S.A. Sapozhnikova) and agroclimatic characteristics of the Central Chernozem Region, including the Oryol oblast, with spatiotemporal trends of their variability analyzed from 1980 to 2021. In the early 2000s, compared to the late 20th century, there was a 10% increase in the BCP, a 13% rise in the sum of active temperatures, and a 6% longer active growing season. Furthermore, shifts in the isolines of the sum of active temperatures and the hydrothermal coefficient (HTC) occurred. The active temperature isotherm of 3000°C moved northward, and it is now running through the Belgorod and Voronezh oblast. As a result of the observed hydrothermal conditions, a significant part of the Central Chernozem transitioned from the zone with sufficient moisture ($1.3 \geq \text{HTC} > 1$) to an arid zone ($1 \geq \text{HTC} > 0.7$). The overall growth of the BCP in the Central Chernozem Region can be associated with a considerable rise in the sum of active temperatures and a reduction in moisture supply.

Keywords: climate quality, hydrothermal coefficient, heat supply, moisture coefficient, climate change, spatial model, geographic information system (GIS), Central Chernozem Region

Acknowledgements. This study was supported by the Russian Science Foundation (project no. 22-27-00291).

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Figure Captions

Fig. 1. Study area. Weather stations are designated by numbers: 1 – Bryansk; 2 – Pavelets; 3 – Zemetchino; 4 – Oryol; 5 – Tambov; 6 – Rylsk; 7 – Ponyri; 8 – Kursk; 9 – Kon’-Kolodez’; 10 – Rostashi; 11 – Bogoroditskoe-Fenino; 12 – Voronezh; 13 – Kamennaya Steppe; 14 – Gotnya; 15 – Uryupinsk; 16 – Kalach; 17 – Valuyki; 18 – Chertkovo.

Fig. 2. Bioclimatic potential dynamics of the Central Chernozem Region in 1980–2021.

Fig. 3. Difference integral curve of the bioclimatic potential.

Fig. 4. Variability of the agroclimatic parameters over time (normalized values). MC – moisture coefficient according to Sapozhnikova, HTC – hydrothermal coefficient, DI – dryness index, ΣT_{10} – the sum of active temperatures, P_{10} – the sum of precipitation for the period of active temperatures, N_{10} – the length of the period of active temperatures.

Fig. 5. Spatial distribution of the bioclimatic potential (B_k) in the Central Chernozem Region: a) in 1980–2000; b) in 2001–2021.

Fig. 6. Spatial variability of the agroclimatic parameters: a) the sum of temperatures for the active growing season (ΣT_{10}); b) the length of the active growing season (N_{10}); c) the amount of precipitation during the active growing season (P_{10}); d) hydrothermal coefficient (HTC); e) dryness index (DI). The dots indicate the regional centers.

References

1. Pörtner H.-O., Roberts D.C., Tignor M.M.B., Poloskanska E., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Löschke S., Möller V., Okem A., Rama B. (Eds.) *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, Cambridge Univ. Press, 2022. 3056 p. <https://doi.org/10.1017/9781009325844>.
2. 2021 Climate Report for the Russian Federation. Moscow, Rosgidromet, 2022. 104 p. (In Russian)
3. Ivanov A.L., Kiryushin V.I. *Global'nye izmeneniya klimata i prognoz riskov v sel'skom khozyaistve Rossii* [Global Climate Change and Risk Assessment for Russian Agriculture]. Moscow, Rossel'khozakademiya, 2009. 518 p. (In Russian)
4. Pavlova V.N. The potential of Russia's agroclimatic resources and agricultural productivity to adapt to new climate scenarios in the 21st century. *Tr. Gl. Geofiz. Obs. im. A.I. Voeikova*, 2013, no. 569, pp. 20–37. (In Russian)
5. A Report on Climate Risks in the Russian Federation. Katsov V.M. (Ed.). St. Petersburg, Gl. Geofiz. Obs. im. A.I. Voeikova, 2017. 106 p. (In Russian)
6. Global Climate and Russia's Soil Cover: Signs of Drought, Prevention, Control, Management of Consequences, and Adaptation (Agriculture and Forestry): A National Report. Vol. 3. Edel'geriev R.S.-Kh. (Ed.). Moscow, Izd. MBA, 2021. 700 p. <https://doi.org/10.52479/978-5-6045103-9-1>. (In Russian)
7. Zolotokrylin A.N., Cherenkova E.A., Titkova T.B. Aridization of drylands in the European part of Russia: Secular trends and links to droughts. *Izv. Ross. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2020, vol. 84, no. 2, pp. 207–217. <https://doi.org/10.31857/S258755662002017X>. (In Russian)
8. *Ustoichivost' zemledeliya i riski v usloviyakh izmeneniya klimata (rezyume kollektivnoi monografii)* [Agriculture's Sustainability and Its Resilience to Climate Change Risks (An Abstract of a Joint Monograph)]. Ivanov A.L., Uskov I.B. (Eds.). St. Petersburg, NOU NPO Salez. Tsentr “Don Bosko”, 2009. 95 p. (In Russian)
9. Chizhikova N., Yermolaev O., Golosov V., Mukharamova S., Saveliev A. Changes in the regime of erosive precipitation on the European part of Russia for the period 1966–2020. *Geosciences*, 2022, vol. 12, no. 7, art. 279. <https://doi.org/10.3390/geosciences12070279>.

10. Trnka M., Eitzinger J., Semerádová D., Hlavinka P., Balek J., Dubrovský M., Kubu G., Štěpánek P., Thaler S., Možný M., Žalud Z. Expected changes in agroclimatic conditions in Central Europe. *Clim. Change*, 2011, vol. 108, nos. 1–2, pp. 261–289. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0025-9>.
11. Baier W. Agroclimatic modeling: An overview. Ch. 6. In: Cusack D.F. (Ed.) *Agroclimate Information for Development: Reviving the Green Revolution*. Pt. 2: The science and its use. Sect. A: Agroclimatic models and information systems. New York, NY, Routledge, 2022, pp. 57–82. <https://doi.org/10.4324/9780429049323-11>.
12. Izrael Yu.A., Sirotenko O.D. Modeling climate change impact on Russian agriculture productivity. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2003, no. 6, pp. 1–11.
13. Sirotenko O.D., Abashina E.V., Pavlova V.N. Dynamics of climate-induced changes in heat supply, humidity, and productivity of the Russian agricultural zone. In: *Trudy VNNISKhm* [Proceedings of the All-Russia Research Institute for Agricultural Microbiology]. St. Petersburg, Gidrometeoizdat, 2013, vol. 38, pp. 41–53. (In Russian)
14. Lemeshko N.A., Evstigneev V.P., Morozov A.P., Rusakov V.A. Using AOGCM data to evaluate the agroclimatic characteristics of individual areas. *Sist. Kontrol'ya Okruzh. Sredy*, 2021, vol. 3, no. 45, pp. 23–30. <https://doi.org/10.33075/2220-5861-2021-3-23-30>. (In Russian)
15. Li Z., Liu W., Ye T., Chen S., Shan H. Observed and CMIP6 simulated occurrence and intensity of compound agroclimatic extremes over maize harvested areas in China. *Weather Clim. Extremes*, 2022, vol. 38, art. 100503. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100503>.
16. Zhukov V.A., Svyatkina O.A. Stochastic modeling and forecasting of agroclimatic resources with adaptation of agriculture to regional climate changes in Russia. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2000, vol. 1, pp. 72–79.
17. Trouet V., Van Oldenborgh G.J. KNMI Climate Explorer: A web-based research tool for high-resolution paleoclimatology. *Tree-Ring Res.*, 2013, vol. 69, no. 1, pp. 3–13. <https://doi.org/10.3959/1536-1098-69.1.3>.
18. Fick S.E., Hijmans R.J. WorldClim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol.*, 2017, vol. 37, no. 12, pp. 4302–4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>.
19. Shaikhulmardanova L.V., Guryanov V.V., Perevedentsev Yu.P. Changes in the climate conditions of the Volga Federal District during the 19th–21st centuries. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2018, vol. 160, no. 3, pp. 531–541. (In Russian)
20. Pavlova V.N., Karachenkova A.A., Varcheva S.E. Monitoring the agroclimatic conditions of crop development at the regional level in the era of climate change. *Tr. Gl. Geofiz. Obs. im. A.I. Voeikova*, 2020, no. 596, pp. 55–77. (In Russian)
21. Buryak Z.A., Terekhin E.A. Geoinformation modeling of spatiotemporal variability of agroclimatic conditions. *Reg. Geosist.*, 2020, vol. 44, no. 3, pp. 333–342. (In Russian)
22. Bratkov V.V., Savinova S.V., Klyushin P.V., Kerimov I.A., Bekmurzaeva L.R. Mapping of the modern variability of agroclimatic conditions in the North Caucasus. *Yug Ross.: Ekol., Razvit.*, 2021, vol. 16, no. 4, pp. 173–181. <https://doi.org/10.18470/1992-1098-2021-4-173-181>. (In Russian)
23. *Regiony Rossii. Sotsial'no-ekonomicheskie pokazateli. 2022: Stat. sb.* [Regions of Russia. Socio-Economic Indicators. 2022: A Statistical Digest]. Moscow, Rosstat, 2022. 1122 p. (In Russian)
24. Golovin A.A., Kurasova I.I. Measuring the effectiveness of land management in the Central Black Earth Region. *Vestn. Kursk. Gos. S-kh. Akad.*, 2014, no. 5, pp. 20–24. (In Russian)
25. Kosolapov V.M., Trofimov I.A., Trofimova L.S., Yakovleva E.P. *Agrolandshafty Tsentral'nogo Chernozem'ya. Raionirovanie i upravlenie* [Agrolandscapes of the Central Black Earth Region. Zoning and Management]. Moscow, Nauka, 2015. 198 p. (In Russian)
26. Petin A.N., Lebedeva M.G., Krymskaya O.V., Chendev Y.G., Kornilov, A. G., Lupo A.R. Regional manifestations of changes in atmospheric circulation in the Central Black Earth region (by the example of Belgorod region). *Adv. Environ. Biol.*, 2014, vol. 8, no. 10, p. 544–547.
27. Specialized arrays for climate research. All-Russian Research Institute of Hydrometeorological Information – World Data Center, 2000, ver. 03.08.2023. URL: <http://aisori-m.meteo.ru/waisori/>. (In Russian)

28. Koloskov P.I. The bioclimatic potential and how it varies across the territory of the USSR. *Tr. NIIAK*, 1963, vol. 23, pp. 90–111. (In Russian)
29. Shashko D.I. *Agroklimaticheskie resursy SSSR* [Agroclimatic Resources of the USSR]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1985. 248 p. (In Russian)
30. Sapozhnikova S.A. Integrated agricultural assessment of the climate situation in the European socialist countries. In: *Agroklimaticheskoe raionirovanie pyati osnovnykh sel'skokhozyaystvennykh kul'tur na territorii sotsialisticheskikh stran Evropy* [Agroclimatic Zoning of Five Primary Agricultural Crops in the European Socialist Countries]. Sofia, Izd. Bolg. Akad. Nauk, 1976, pp. 30–36. (In Russian)
31. Battalov F.Z. *Sel'skokhozyaystvennaya produktivnost' klimata dlya yarovykh zernovykh kul'tur* [Agricultural Productivity of the Climate for Spring Crops]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1980. 112 p. (In Russian)
32. Zoidze E.K., Ovcharenko L.I. *Sravnitel'naya otsenka sel'skokhozyaystvennogo potentsiala klimata territorii RF i stepeni ispol'zovaniya ee agroklimaticheskikh resursov sel'skokhozyaystvennymi kul'turami* [A Comparative Assessment of the Agricultural Potential of the Climate in the Russian Federation and the Degree to Which Its Agroclimatic Resources are Used by Agricultural Crops]. St. Petersburg, Gidrometeoizdat, 2000. 75 p. (In Russian)
33. Zoidze E.K., Ovcharenko L.I., Chub O.V. Methodology of assessing interannual dynamics of bioclimatic potential under climate change conditions. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2010, vol. 35, no. 1, pp. 68–77. <https://doi.org/10.3103/S1068373910010103>.
34. Budyko M.I. *Teplovoi balans zemnoi poverkhnosti* [Thermal Balance of the Earth Surface]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1956. 256 p. (In Russian)
35. Pavlova V.N., Calanca P., Karachenkova A.A. Grain crops productivity in the European part of Russia under recent climate change. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2020, vol. 45, no. 4, pp. 290–302. <https://doi.org/10.3103/S106837392004010X>.
36. Gordeev R.V., Pyzhev A.I., Zander E.V. Does climate change influence Russian agriculture? Evidence from panel data analysis. *Sustainability*, 2022, vol. 14, no. 2, art. 718. <https://doi.org/10.3390/su14020718>.
37. Trnka M., Rötter R., Ruiz-Ramos M., Kersebaum K.C., Olesen J.E., Žalud Z., Semenov M.A. Adverse weather conditions for European wheat production will become more frequent with climate change. *Nat. Clim. Change*, 2014, vol. 4, no. 7, pp. 637–643. <https://doi.org/10.1038/nclimate2242>.
38. Gureev I.I., Nitchenko L.B., Luk'yanov V.A., Pruschik I.A. Winter wheat yield and soil fertility under the conditions of the Central Chernozem Region. *Dostizh. Nauki Tekh. APK*, 2021, vol. 35, no. 5, pp. 22–27. <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2021-10503>. (In Russian)
39. Terekhin E.A. Changes in intrazonal differences in the natural vegetation cover of forest-steppe landscapes in the late 20th and early 21th century. *Sovrem. Probl. Distantionnogo Zondirovaniya Zemli Kosmosa*, 2022, vol. 19, no. 1, pp. 179–192. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2022-19-1-179-192>. (In Russian)
40. Chendev Y.G., Hubbart J.A., Terekhin E.A., Lupo A.R., Sauer T.J., Burras C.L. Recent afforestation in the Iowa River and Vorskla River basins: A comparative trends analysis. *Forests*, 2016, vol. 7, no. 11, art. 278. <https://doi.org/10.3390/f7110278>.

⟨ **Для цитирования:** Буряк Ж.А., Крымская О.В., Крымская А.А., Терехин Э.А. Пространственно-временная изменчивость биоклиматического потенциала Центрального Черноземья // Учен. зап. Казан. ун-та. Сер. Естеств. науки. 2024. Т. 166, кн. 1. С. 126–144. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2024.1.126-144>. ⟩

⟨ **For citation:** Buryak Zh.A., Krymskaya O.V., Krymskaya A.A., Terekhin E.A. Spatiotemporal variability of the bioclimatic potential in the Central Chernozem region. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2024, vol. 166, no. 1, pp. 126–144. <https://doi.org/10.26907/2542-064X.2024.1.126-144>. (In Russian) ⟩