

## ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТИЧЕСКИ ОБУСЛОВЛЕННОЙ УРОЖАЙНОСТИ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ В ЗЕМЛЕДЕЛЬЧЕСКОЙ ЗОНЕ РОССИИ

*B.N. Павлова<sup>\*</sup>, A.A. Карабёнкова*

Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии,  
Россия, 249030, г. Обнинск, пр. Ленина, д. 82;

\*адрес для переписки: [vnp2003@bk.ru](mailto:vnp2003@bk.ru)

**Реферат.** Агроклиматические ресурсы изменяются достаточно быстрыми темпами в основных сельскохозяйственных регионах России. Авторы исследуют влияние этих изменений на урожайность яровой пшеницы при исключённом технологическом тренде. Климатически обусловленная урожайность рассчитывалась с помощью имитационной системы Климат-Почва-Урожай (КПУ) по метеорологическим данным наблюдений 315 пунктов сети Росгидромета за период с 1976 по 2015 год. Приведены примеры, свидетельствующие об адекватности моделирования этой урожайности в системе КПУ на обширной территории земледельческой зоны России. Получены оценки тенденций изменения агроклиматических показателей и климатически обусловленной урожайности в основных зерновых регионах за последние четыре десятилетия. Показано, что рост температуры воздуха за вегетационный период яровой пшеницы в среднем за 2006-2015 гг. по сравнению с периодом 1976-1985 гг. составил от 1.6 до 2.3°C в северо-западных областях Европейской части России (ЕЧ) и от 1.0 до 1.3°C в центральных и южных областях. Дефицит доступной влаги был особенно выражен в основных районах выращивания яровой пшеницы в южных и юго-восточных областях на ЕЧ России. Анализ тенденций изменения климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы по десятилетиям указывает на различную реакцию урожайности на изменение агроклиматических ресурсов в северных и южных регионах её произрастания. Оцениваемые воздействия варьируют значительно. За период с 2006 по 2015 год относительно 1961-1990 гг. климатически обусловленная урожайность понизилась на 25-30% на юге и юго-востоке ЕЧ и на 10% в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке. На Урале и в Западной Сибири её снижение незначительное и составляет от 3 до 5%. В целом по России, тенденции потепления обусловили снижение климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы примерно на 12% с 1976 по 2015 гг., т. е. темпы её снижения составили ~3% за десятилетие.

**Ключевые слова.** Агроклиматические ресурсы, урожайность, яровая пшеница, изменение климата, имитационная система, Россия.

## Введение

Изменение агроклиматических ресурсов, вызванное устойчивой тенденцией климата к потеплению последних десятилетий, влияет на продуктивность сельскохозяйственных культур, а после экстремальных климатических условий в ключевых регионах-производителях наблюдалось несколько периодов быстрого роста цен на продовольствие и зерновые культуры (IPCC, 2013).

В течение следующих нескольких десятилетий тенденции потепления, вероятно, приведут к снижению урожайности в мире примерно на 1.5% в десятилетие без эффективной адаптации, с вероятным диапазоном от 0 до 4% (Lobell et al., 2011). В России, как одной из ведущих стран-производителей пшеницы в мире, последствия изменения климата в разных отраслях экономики, в том числе в сельском хозяйстве, вызывают обеспокоенность правительства, о чём свидетельствует принятие плана адаптации (Национальный план..., 2019).

На территории России продолжающее потепление вызывает изменения частоты и интенсивности экстремальных явлений погоды (засухи, засушливые явления и др.), и, как следствие, увеличение площадей сельскохозяйственных угодий, непригодных для возделывания зерновых культур (Второй оценочный доклад..., 2014).

В исследованиях последних лет анализируется динамика засушливости в земледельческой зоне России, в частности, в основных регионах производства зерновых (Второй оценочный доклад ..., 2014; Золотокрылин и др., 2014; Черенкова и др., 2015; Переведенцев и др., 2018; Вильфанд и др., 2016). В целом ряде исследований указывается, что температурные тренды важны для определения как прошлых, так и будущих последствий изменения климата на урожайность сельскохозяйственных культур в субконтинентальном и глобальном масштабах (средняя достоверность) (The Fifth Assessment ..., 2014).

В последних публикациях МГЭИК отмечается: «Для основных сельскохозяйственных культур (пшеницы, риса и кукурузы) в тропических и умеренных регионах изменение климата без адаптации негативно скажется на их производстве при локальном повышении температуры на 2°C или более по сравнению с уровнем конца 20-го века, хотя отдельные районы могут извлечь выгоду. В будущем изменение климата будет постоянно и негативно влиять на растениеводство в странах с низкими широтами, в то время как изменение климата может иметь положительные или отрицательные последствия в северных широтах (высокая степень достоверности)». В этой связи возникает вопрос, как прогнозные глобальные оценки МГЭИК можно соотнести с подобными оценками для сельскохозяйственной территории России, с учётом её протяженности и разнообразия природно-климатических зон.

Предыдущая работа была сфокусирована на оценках для Европейской части России (ЕЧ), где показано, что в основных зерновых регионах за период с 1998 по 2017 гг. отсутствовал рост климатически обусловленной урожайности (Павлова и др., 2020а).

Цель настоящей работы:

- оценить изменение климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы за весь период глобального потепления с 1976 г. по десятилетиям в масштабе всей земледельческой зоны и по её отдельным регионам;
- на основе полученных результатов дать вероятную оценку ожидаемых изменений продуктивности яровой пшеницы при повышении температуры в ближайшие десятилетия в северных и южных регионах земледельческой зоны.

На сегодняшний день наиболее распространенными культурами, рассматриваемыми в опубликованных исследованиях, являются пшеница, кукуруза, рис и соя (White et al., 2011). Мы будем рассматривать яровую пшеницу как основную зерновую культуру, возделываемую практически на всей территории земледельческой зоны.

## Материалы и методы

### Данные

*Гидрометеорологические данные.* В работе использовались архивы значений среднемесячной температуры воздуха и сумм осадков с января по декабрь за период с 1976 по 2015 гг., сформированные в Институте глобального климата и экологии (Груза, Ранькова, 2012). Также привлечены среднесуточные данные по температуре и дефициту влажности воздуха, солнечной радиации и суточным суммам осадков по отдельным реперным точкам на исследуемой территории за 1984-2015 гг.

*Территория.* Рассматривается земледельческая зона России, ограниченная по широте и долготе: южнее 66,5° с. ш. (до 90° в. д.), 60° с. ш. (до 130° в. д.) и 55° с. ш. Вся территория разделена с учётом административного деления на ФО, а также на крупные регионы в границах ФО (север-юг, запад-восток) (табл. 1).

Таблица 1. Перечень федеральных округов (ФО) и крупных регионов в границах ФО

Table 1. The list of Federal districts (FD) and major regions within FDs

№	Регион	Сокращение	Природно-климатические зоны <sup>1)</sup>
1	Северо-Западный ФО	СЗФО	южно-таёжная лесная
2	Центральный ФО, север	ЦФО-С	южно-таёжная лесная и лесостепная
3	Центральный ФО, юг (чернозёмные области)	ЦФО-Ю	лесостепная и степная
4	Приволжский ФО, север	ПФО-С	южно-таёжная лесная и лесостепная
5	Приволжский ФО, юг	ПФО-Ю	лесостепная, степная и сухостепная
6	Южный ФО	ЮФО	степная и сухостепная
7	Уральский ФО	УФО	южно-таёжная лесная, лесостепная и степная
8	Сибирский ФО, запад	СФО-З	лесостепная, степная и сухостепная
9	Сибирский ФО, восток	СФО-В	южно-таёжная лесная, лесостепная и степная
10	Дальневосточный ФО	ДФО	южно-таёжная лесная и степная

**Примечания:** <sup>1)</sup> классификация приведена по «Природно-сельскохозяйственное районирование ...» (1983)

## *Имитационная система Климат-Почва-Урожай*

Имитационная система Климат-Почва-Урожай (КПУ) представляет собой набор программных модулей для моделирования динамики и роста сельскохозяйственных культур. Ядро системы – динамическая модель Погода-Урожай (Сиротенко, 1981; Сиротенко, Павлова, 2012). Система также включает модули предварительной обработки данных о погоде и климате, а также модули стохастической модели для дезагрегации данных, доступных за 10-дневные или месячные периоды. В настоящее время система КПУ служит основным инструментом для оценки воздействия изменения климата на продуктивность сельскохозяйственных культур в системе Росгидромета (Pavlova et al., 2018; Pavlova et al., 2020).

### *Агроклиматические показатели*

С помощью системы КПУ регулярно оценивается ряд агроклиматических индексов (Сиротенко, 2007), которые могут быть использованы для дальнейшего анализа (Павлова, Карабёнкова, 2016; Павлова и др., 2020б).

В данной работе рассматриваются следующие показатели.

*Фенологические даты и продолжительность вегетации.* Основные фенологические этапы соответствуют всходам, колошению и восковой спелости, и по соответствующим датам рассчитываются продолжительность вегетационного периода и суммы температур периодов межфазных периодов «всходы – колошение» и «колошение – восковая спелость».

*Температура и количество осадков.* Оценивается средняя температура ( $T$ ) и осадки ( $R$ ) как интеграл за вегетационный период.

*Гидротермический коэффициент Селянина (ГТК) и коэффициент увлажнённости.* Многие авторы в исследованиях, связанных с прогнозными оценками в сельском хозяйстве (Мещерская, 1988; Золотокрылин и др., 2014; Фролов, Страшная, 2011; Breustedt et al., 2008), часто использовали ГТК в качестве показателя засушливых условий, разработанного Селяниным (Селянинов, 1958). Коэффициент увлажнённости рассчитывается как отношение суммарного испарения за вегетационный период к потенциальному ( $E/E_0$ ).

### *Моделирование термического режима в системе КПУ*

Наиболее устойчивая тенденция глобального потепления в сельскохозяйственных районах будет заключаться в повышении температуры (IPCC, 2013; Lobell et al., 2011). Кратко перечислим включённые в систему КПУ основные механизмы, моделирующие воздействие температуры на физиологию сельскохозяйственных культур.

Прежде всего, более высокая температура определяет быстрое развитие сельскохозяйственных культур, и, следовательно, более короткий вегетационный период, что в большинстве случаев снижает урожай, как будет показано ниже. Суммы эффективных температур играют роль биологического времени. Биологическое время служит аргументом ростовых функций, расчёт которого

осуществляется для зерновых культур по двум периодам: «всходы – колошение» и «колошение – восковая спелость».

В модели также введена температурная зависимость скорости фотосинтеза и дыхания. При этом оптимальная температура фотосинтеза в вегетативный период ниже, чем в репродуктивный период (Сиротенко, 1981).

Существуют и исследованы другие каналы влияния температуры на растения, которые в явном виде не учитываются в модели. Например, при температурных экстремумах, появление которых становится при потеплении более вероятным, могут непосредственно повреждаться растительные клетки (Lobell et al., 2011). Повышение температуры в критические периоды, например, в период цветения, может привести к стерильности пыльцы, и, как следствие, к потерям урожая (Бараев и др., 1978). Повышение уровня температуры может способствовать росту и выживанию многих вредителей и болезней сельскохозяйственных растений (Попова, Попов, 2016).

### **Параметризация**

Калибровка системы КПУ выполнялась по данным наблюдений за 1976–1985 гг., что позволило воспроизвести текущие уровни урожайности и вариации этого периода. В табл. 2. приведены статистические метрики по результатам расчёта урожайности яровой пшеницы в регионах с большим яровым клином. Перечень регионов ранжирован с учётом доли посевых площадей. В качестве метрик для рядов рассчитанной климатически обусловленной урожайности ( $Y_{sim}$ , ц/га) и фактической урожайности ( $Y_{obs}$ , ц/га) (данные Росстата) рассматривались следующие: среднее отклонение ( $MD$ ), среднеквадратическое отклонение ( $RMSD$  – Root-mean-square deviation) и их нормализованные значения (Андерсон, 1963).

**Таблица 2.** Статистические метрики и их нормированные значения по результатам расчёта урожайности яровой пшеницы в системе КПУ в основных зерновых регионах за 1976–1985 гг.

**Table 2.** Statistical metrics and their normalized values based on simulated productivity of spring wheat in the CSY system in the main grain regions for 1976–1985

Область, край, республика (регион)	MD, ц/га	NMD	NSD <sub>obs</sub>	NSD <sub>sim</sub>	RMSD, ц/га	NRMSD
Саратовская (ПФО-Ю)	-0.8	-0.09	0.46	0.37	1.8	0.21
Алтайский (СФО-3)	1.3	0.13	0.23	0.19	1.7	0.17
Новосибирская (СФО-3)	-3.3	-0.30	0.29	0.30	3.5	0.32
Омская (СФО-3)	-1.3	-0.10	0.21	0.24	1.7	0.13
Башкортостан (ПФО-Ю)	-2.4	-0.16	0.18	0.25	3.0	0.20
Курганская (УФО)	-3.5	-0.23	0.18	0.24	3.9	0.26
Оренбургская (ПФО-Ю)	-1.6	-0.16	0.33	0.36	2.7	0.27
Челябинская (УФО)	0.9	0.08	0.27	0.15	2.8	0.24
Красноярский (СФО-В)	-1.7	-0.13	0.17	0.09	2.3	0.17
Татарстан (ПФО-Ю)	-1.3	-0.08	0.22	0.18	2.5	0.16
Тюменская (УФО)	-0.5	-0.03	0.12	0.17	2.1	0.14

**Примечание.** Условные обозначения:

MD – среднее отклонение

$NMD$  – нормированное среднее отклонение

$NSD_{obs}$  – нормированное стандартное отклонение наблюдаемой урожайности (Росстат)

$NSD_{sim}$  – нормированное стандартное отклонение климатически обусловленной урожайности (КПУ)

$RMSD$  – среднеквадратическое отклонение

$NRMSD$  – нормированное среднеквадратическое отклонение

**Note.** Convention:

$MD$  – average deviation

$NMD$  – normalized mean deviation

$NSD_{obs}$  – normalized standard deviation of observed productivity (Rosstat)

$NSD_{sim}$  – normalized standard deviation of climate-based productivity (CSY)

$RMSD$  – standard deviation

$NRMSD$  – normalized root mean square deviation

Как видно из табл. 2 для Алтайского края, Оренбургской и Омской областей, где яровой пшеницей занято более 1500 тыс. га,  $MD$  и  $RMSD$  составляли от 1.3 до 1.6 и от 1.7 до 2.7 ц/га соответственно. Соответствующие нормализованные значения  $MD$  и  $RMSD$  составляли ~17%, что указывает на удовлетворительные характеристики модели для этого региона. Для Новосибирской и Курганской области полученные результаты были менее убедительными, но всё же приемлемыми. Нормализованные  $MD$  и  $RMSD$  были 26-36%.

В целом, для выбранных регионов диапазон изменений  $MD$  составляет от 0.5 до 3.5 ц/га и  $RMSD$  – от 1.7 до 3.9 ц/га, что свидетельствует о достаточном уровне адекватности имитационной системы КПУ для решения поставленной задачи.

Важно подчеркнуть, что полученные количественные оценки отражают широкий спектр агроклиматических условий возделывания яровой пшеницы в этом регионе. Хорошо воспроизводится вариабельность наблюдаемых урожаев по регионам: нормализованные значения  $SD_{obs}$  и  $SD_{sim}$  достаточно близки.

## Результаты

### Показатели агроклиматических ресурсов по десятилетиям с 1976 года

Показатели, характеризующие изменения агроклиматических ресурсов и климатически обусловленной урожайности, рассчитывались по ежегодным данным наблюдений отдельных метеорологических станций за период потепления с 1976 года с последующим осреднением по территории крупных регионов (табл. 1) за отдельные десятилетия: 1976-1985, 1986-1995, 1996-2005 и 2006-2015 гг. (далее по тексту: 1, 2, 3 и 4-е десятилетие).

Предлагаемую методику оценки представим на примере расчёта показателей агроклиматических ресурсов и продуктивности яровой пшеницы в реперных точках на территории областей с большими посевными площадями яровой пшеницы. Критерий отбора реперных точек для иллюстрации полученных результатов определялся географическим месторасположением точки – северные и южные регионы ЕЧ и Азиатской части (АЧ), относящи-

ется к разным природно-климатическим зонам (лесостепная, степная, сухостепная).

По данным наблюдательных пунктов (НП) Сорочинск, Мелеуз и Балашов температура вегетационного периода монотонно повышалась в среднем по десятилетиям (с 1976 г.), и её рост от первого к последнему десятилетию составляет от 0.9 до 1.3°C (табл. 3). В то же время, в северных районах, по данным наблюдений НП Чердынь, температура росла более быстрыми темпами и повысилась к 2006-2015 гг. на ~2.0°C. На территории Алтайского края и Новосибирской области (НП Барнаул и Купино) температура не повышалась, и даже понизилась на ~0.5°C в 2006-2015 гг. относительно 1976-1985 гг.

Продолжительность вегетационного периода яровой пшеницы (определенная здесь как период между всходами и восковой спелостью) для исследуемого региона составляет ~85-110 сут. (табл. 3), что соответствует оценкам, приведенным в монографии (Бараев и др., 1978) и в «Интерактивном сельскохозяйственном экологическом атласе России и соседних стран» (Afonin et al., 2008). Прослеживаются региональные различия с минимальными значениями от ~85 суток (НП Сорочинск, Мелеуз) до 110 суток (НП Чердынь).

Общее количество осадков, ГТК Селянинова и коэффициент увлажнённости, представленные в табл. 3, имеют четкую тенденцию к снижению от 1976-1985 к 2006-2015 гг. на ЕЧ. По данным НП Сорочинск, Мелеуз, Балашов количество выпавших осадков понизилось на ~25% и составляет в последнее десятилетие ~90-140 мм, в то время как в первом десятилетии ~120-180 мм. В динамике ГТК по десятилетиям также прослеживаются отрицательные тенденции. Так, в Сорочинске, например, среднее за последнее десятилетие величина ГТК (0.56) ниже границы критерия засухи ( $\text{ГТК} < 0.6$ ). В промежуточные периоды 1986-1995 и 1996-2005 гг. величина ГТК и общие за вегетацию осадки колеблются разнонаправленно, а минимальные их значения отмечаются в последнее десятилетие.

Пространственное распределение значений показателей агроклиматических ресурсов представлено на рис. 1-4.

Отмеченные тенденции изменения температуры вегетационного периода, как пространственные, так и временные, сохраняются для большей части земледельческой зоны России (рис. 2). Диапазон колебаний средней за вегетацию температуры в северо-западных областях ЕЧ составил от 1.6 до 2.3°C, достигая 3.0°C в некоторых локальных точках; в центральных и южных областях – от 1.0 до 1.3°C. В Западной и Восточной Сибири и на Дальнем Востоке изменения наблюдались в пределах её естественной изменчивости ~ -0.5...+0.5°C. Вегетационный период сократился на 5-10 суток или остался на уровне 1976-1985 гг.

---

**Таблица 3.** Изменение показателей агроклиматических ресурсов и климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы в 1976-2015 гг. по десятилетиям в реперных точках. Расчёты выполнены в имитационной системе КПУ

**Table 3.** Changes in indicators of agro-climatic resources and climate-based productivity of spring wheat in 1976-2015 by decade in reference points. Simulated in the CSY system

Период, гг.	$Y_{sim}$ , %	$D_{beg}$ , ДД.ММ	$D_{end}$ , ДД.ММ	N, сут.	T, °C	R, мм	ГТК	$E/E_0$
<b>НП Сорочинск (Оренбургская область, ПФО-Ю)</b>								
1976-1985	110	07.05	29.07	85	18.6	117	0.74	0.35
1986-1995	103	04.05	27.07	85	18.5	107	0.68	0.36
1996-2005	105	07.05	29.07	84	18.9	141	0.89	0.40
2006-2015	67	03.05	21.07	80	19.6	88	0.56	0.31
<b>НП Мелеуз (Республика Башкортостан, ПФО-Ю)</b>								
1976-1985	102	10.05	03.08	86	17.9	135	0.88	0.45
1986-1995	98	08.05	02.08	86	17.9	130	0.84	0.43
1996-2005	92	11.05	01.08	83	18.3	124	0.82	0.43
2006-2015	75	06.05	25.07	81	18.8	116	0.76	0.40
<b>НП Балашов (Саратовская область, ПФО-Ю)</b>								
1976-1985	116	30.04	04.08	97	17.6	179	1.05	0.46
1986-1995	97	26.04	30.07	95	17.7	160	0.95	0.44
1996-2005	99	27.04	30.07	95	17.9	179	1.05	0.47
2006-2015	64	26.04	23.07	89	18.8	142	0.85	0.39
<b>НП Чердынь (Пермский край, ПФО-С)</b>								
1976-1985	98	05.06	20.09	108	13.5	286	2.22	0.82
1986-1995	96	04.06	09.09	98	14.9	263	2.07	0.79
1996-2005	105	02.06	07.09	97	14.7	218	1.61	0.80
2006-2015	105	29.05	25.08	89	15.6	243	1.76	0.84
<b>НП Барнаул (Алтайский край, СФО-З)</b>								
1976-1985	104	21.05	11.08	83	17.8	144	0.97	0.51
1986-1995	106	18.05	08.08	83	17.8	149	1.00	0.54
1996-2005	105	16.05	04.08	82	18.1	146	0.98	0.52
2006-2015	98	11.05	03.08	85	17.4	142	0.96	0.49
<b>НП Купино (Новосибирская область, СФО-З)</b>								
1976-1985	97	20.05	12.08	86	17.9	113	0.73	0.44
1986-1995	98	17.05	09.08	85	18.0	115	0.75	0.46
1996-2005	100	16.05	07.08	84	18.1	113	0.74	0.46
2006-2015	109	11.05	08.08	90	17.4	152	0.97	0.50

**Примечание.** Условные обозначения:

$Y_{sim}$  – оценка средней климатически обусловленной урожайности относительно средних значений за 1961-1990 гг., %

$D_{beg}$  – дата всходов, ДД.ММ;  $D_{end}$  – дата восковой спелости, ДД.ММ

$N$  – продолжительность вегетационного периода, сут.

$T$  – средняя температура воздуха за вегетационный период, °C

$R$  – сумма осадков за вегетационный период, мм

$GTC$  – гидротермический коэффициент Селянинова за вегетационный период, ед.

$E/E_0$  – коэффициент увлажнённости за вегетационный период, ед.

**Note.** Convention:

$Y_{sim}$  – estimation of the average climate-based productivity relative to the average values for 1961-1990, %

$D_{beg}$  – date of germination, DD.MM;  $D_{end}$  – date of wax ripeness, DD.MM

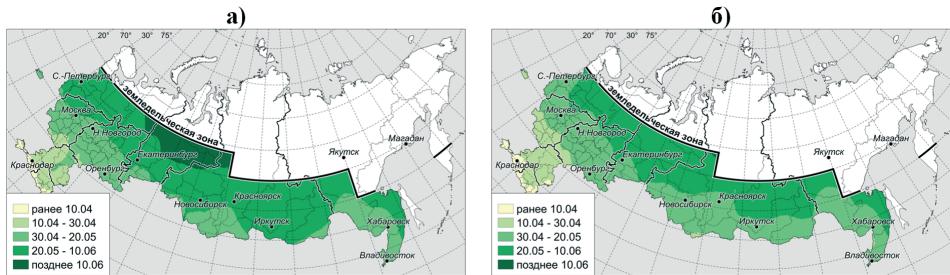
$N$  – duration of vegetation period, day.

$T$  – the average air temperature for the vegetation period, °C

$R$  – the total amount of precipitation for vegetation period, mm

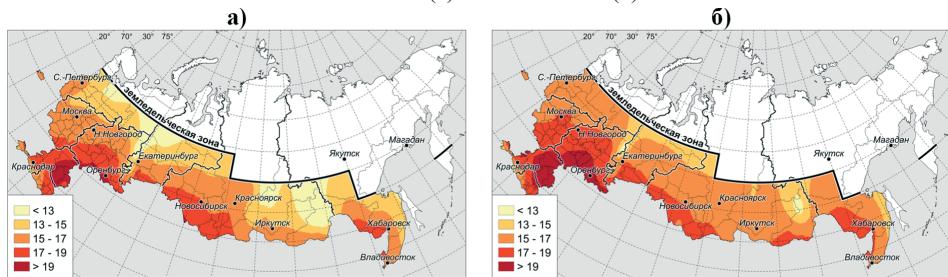
$GTC$  – Selyaninov hydrothermal coefficient for vegetation period, units

$E/E_0$  – moisture coefficient for vegetation period, units



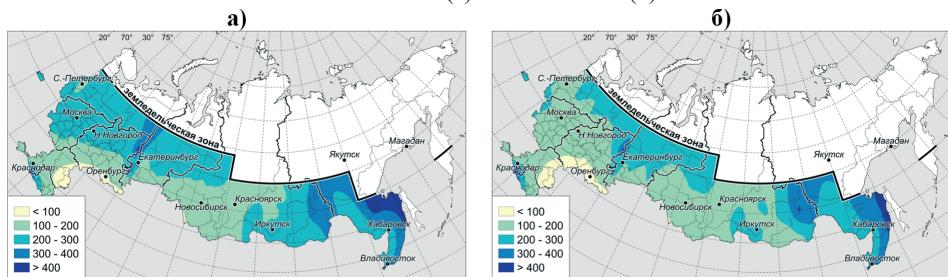
**Рисунок 1.** Средние значения (ДД.ММ) даты всходов яровой пшеницы за периоды 1976-1985 гг. (а) и 2006-2015 гг. (б)

**Figure 1.** Average values of spring wheat germination dates (DD.MM) for the periods 1976-1985 (a) and 2006-2015 (b)



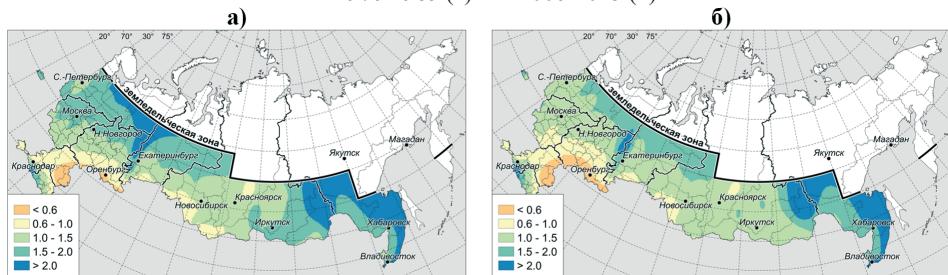
**Рисунок 2.** Средние значения (°С) средней температуры воздуха вегетационного периода яровой пшеницы за 1976-1985 гг. (а) и 2006-2015 гг. (б)

**Figure 2.** Average values (°C) of the average air temperature during vegetation period of spring wheat for 1976-1985 (a) and 2006-2015 (b)



**Рисунок 3.** Средние значения (мм) суммы осадков за вегетационный период яровой пшеницы за 1976-1985 гг. (а) и 2006-2015 гг. (б)

**Figure 3.** Average values (mm) of precipitation for vegetation period of spring wheat for 1976-1985 (a) and 2006-2015 (b)



**Рисунок 4.** Средние значения (ед.) гидротермического коэффициента Селянинова (ГТК) за вегетационный период яровой пшеницы за 1976-1985 гг. (а) и 2006-2015 гг. (б)

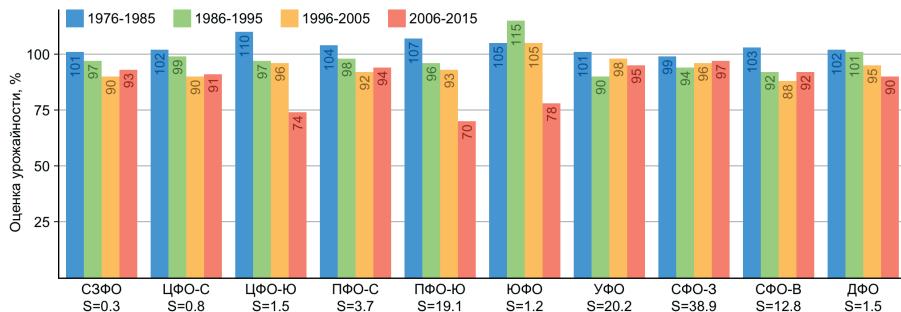
**Figure 4.** Average values (units) of the Selyaninov hydrothermal coefficient (HTC) for vegetation period of spring wheat for 1976-1985 (a) and 2006-2015 (b)

Общее количество осадков в течение периода вегетации также имеет чёткую географическую структуру, которая хорошо объясняется основными климатическими градиентами в этом районе. С учётом распределения посевных площадей дефицит доступной влаги был особенно выражен в основных районах выращивания яровой пшеницы на ЕЧ, в южных и юго-восточных областях. Согласно данным (рис. 3), практически все области возделывания яровой пшеницы на юге ЕЧ России столкнулись с уменьшением количества осадков в течение вегетационного периода в 2006-2015 гг. по сравнению с тремя предшествующими десятилетиями. При этом наиболее выраженное снижение в широтном поясе простирается от Курской и Липецкой областей до Самарской и Оренбургской. На этой широте количество осадков уменьшилось на 40-100 мм за 40 лет, что является существенной величиной, учитывая, что в среднем выпадало только от 100 до 220 мм. Во многих случаях это было меньше, чем потребность в воде для оптимального роста, которая может быть оценена в порядке от 400 до 500 мм, принимая длину вегетационного периода ~100 дней и среднюю суточную суммарную эвапотранспирацию культуры, примерно, от 4 до 5 мм (Бараев и др., 1978).

### *Изменение климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы с 1976 г. по десятилетиям*

Для оценки изменений климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы при изменении агроклиматических ресурсов за весь период потепления (с 1976 г.) выполнен ретроспективный анализ рядов урожайности по десятилетиям за период с 1976 по 2015 гг. для территории земледельческой зоны.

На рис. 5 представлены результаты расчётов климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы (%) по десятилетиям 1976-1985, 1986-1995, 1996-2005 и 2006-2015 гг. относительно базового периода 1961-1990 гг. по крупным регионам в земледельческой зоне России.



**Рисунок 5.** Оценка средней климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы за периоды 1976-1985, 1986-1995, 1996-2005 и 2006-2015 гг. относительно средних значений за 1961-1990 гг. по отдельным регионам России

*S – доля посевной площади в регионе от общей по РФ за 1996-2015 гг., %.*

*Обозначения регионов – см. табл. 1*

**Figure 5.** Estimation of the average climate-based productivity of spring wheat for the periods 1976-1985, 1986-1995, 1996-2005 and 2006-2015 relative to the average values for 1961-1990 for specific FDs of Russia

*S – the share of sown area in the region from the total for the Russian Federation in 1996-2015, %.  
FD designations – see table 1*

Разброс полученных оценок очевиден: на ЕЧ и АЧ оценки климатически обусловленной урожайности различаются как в целом, так и по отдельным периодам. При этом следует выделить важный момент: оценки средней урожайности 2, 3, и 4-го десятилетий относительно 1961-1990 гг. практически не превышают 100% (за исключением Южного ФО в 1986-1995 гг.).

Уровень урожайности от первого к четвёртому десятилетию понижается на большей части рассматриваемой территории, но это снижение не является монотонным. В средних десятилетиях (1986-1995 и 1996-2005 гг.) урожайность колеблется в диапазоне, не превышающем 5-10%.

На ЕЧ диапазон колебаний средних оценок климатически обусловленной урожайности за последнее десятилетие значительный – примерно от 70% в южных и юго-восточных регионах ЕЧ (юг Приволжского ФО, Южный ФО и центрально-чернозёмные области) до 90-94% в северных и северо-западных регионах. В то же время, в Сибири, на Урале и Дальнем Востоке диапазон колебаний относительной урожайности от десятилетия к десятилетию практически на всей территории не превышает 10% (рис. 5).

## Обсуждение

Как показано выше (табл. 2, рис. 1-4), потепление последних десятилетий не вполне однородно по его воздействию на агроклиматические ресурсы и, как следствие, на продуктивность зерновых культур в сельскохозяйственных регионах ЕЧ и АЧ.

Отрицательные тенденции в рядах климатически обусловленной урожайности наиболее отчётливо проявляются в южных и юго-восточных регионах ЕЧ (Южный ФО, центрально-чернозёмные области, юго-восток Приволжского ФО). На этой территории в результате изменений агроклиматических ресурсов средняя урожайность за последнее десятилетие понизилась на 25-30% относительно базового периода 1961-1990 гг. Анализ показал, что одним из основных факторов, приводящих к снижению продуктивности яровой пшеницы в этом регионе, является рост температуры в период вегетации. С начала потепления средняя температура вегетационного периода в этом регионе повысилась на 1.0-1.5°C, что вызвало сокращение его продолжительности в среднем на 4-5 суток. Даты всходов яровой пшеницы ранее 30 апреля наблюдаются на ЕЧ южнее 55° с. ш. (по линии Брянск – Саратов) (рис. 1). Показатели увлажнения также претерпели существенные изменения. На территории ЕЧ, за исключением самых северных районов, сумма осадков вегетационного периода яровой пшеницы не превышает 200 мм, что ниже физиологической потребности яровой пшеницы (рис. 3). Изменение соотношения тепла и влаги, характеризуемое ГТК, также подтверждает факт усиления засушливости на этой территории (рис. 4).

Результатом изменения агроклиматических ресурсов явилось снижение степени благоприятности условий для произрастания яровой пшеницы территорий юга ЕЧ за последнее десятилетие. Максимальное относительное снижение климатически обусловленной урожайности последнего десятилетия

---

составляет 70 и 74% в южных областях Приволжского ФО и чернозёмных областях Центрального ФО, соответственно. На остальной европейской части территории значимого снижения урожайности за последние три десятилетия не наблюдается ( $\leq 10\%$ ).

В сельскохозяйственных регионах Восточной Сибири и на Дальнем Востоке изменения показателей агроклиматических ресурсов за период потепления менее значительные, чем на ЕЧ. Температура вегетационного периода здесь повысилась незначительно и в среднем превышает уровень первого десятилетия на 0.6-0.8°C. Изменение режима осадков также не претерпело существенных изменений. ГТК за вегетационный период изменяется в диапазоне от 1.5 до 2.5 на Дальнем Востоке, и от 1.0 до 1.3 в Восточной Сибири в среднем за последние четыре десятилетия. Как результат, изменения средней климатообусловленной урожайности по десятилетиям в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке не превышали 10%, т. е. находились в пределах её естественной изменчивости.

В Западной Сибири и на Урале колебания климатообусловленной урожайности от десятилетия к десятилетию в большинстве случаев не превышают 5%. В этих регионах не выявлено значимого понижения урожайности, связанного с долговременными изменениями температурного и влажностного режимов. Напротив, в отдельных регионах Новосибирской, Челябинской областей и в Алтайском крае во 2-е, 3-е и 4-е десятилетия климатообусловленная урожайность выше, чем в первое десятилетие периода потепления. Диапазон колебаний температуры вегетационного периода от десятилетия к десятилетию здесь составляет  $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ . При анализе показателей, характеризующих режим увлажнённости территории в среднем по десятилетиям, не выявлены их статистически значимые изменения.

Таким образом, агроклиматические условия начального периода потепления были самыми благоприятными для роста и развития яровой пшеницы на рассмотренном отрезке времени на ЕЧ. В среднем, на территории АЧ изменение агроклиматических ресурсов, по оценкам не такое значительное, как на ЕЧ, не повлияло значимо на продуктивность яровой пшеницы. Но это не означает, что локально в отдельных районах не наблюдалось существенного снижения урожайности культуры (или повышения), обусловленного изменением климата.

На основании полученных результатов можно утверждать, что сельскохозяйственные регионы ЕЧ более чувствительны к современному потеплению, и реакция климатически обусловленной урожайности на изменение агроклиматических ресурсов существенно острее, чем на АЧ. Действительно, средняя за 2006-2015 гг. климатически обусловленная урожайность яровой пшеницы на ЕЧ составляет 75% от уровня 1961-1990 гг., в то время как на АЧ – 95% (табл. 4).

В среднем климатически обусловленная урожайность яровой пшеницы понизилась на  $\sim 12\%$  с 1976 по 2015 год, т. е. скорость снижения составляет  $\sim 3\%$  за десятилетие.

**Таблица 4.** Оценка средней климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы за периоды 1976-1985, 1986-1995, 1996-2005 и 2006-2015 гг. относительно средних значений за 1961-1990 гг.

**Table 4.** Estimation of the average climate-based productivity of spring wheat for the periods 1976-1985, 1986-1995, 1996-2005 and 2006-2015 relative to the average values for 1961-1990

Регион	$S$ , %	Оценка урожайности, %			
		1976-1985	1986-1995	1996-2005	2006-2015
Европейская часть	26.6	106	97	93	75
Азиатская часть	73.4	100	93	95	95
Россия	100.0	102	94	95	90

**Примечание:**  $S$  – доля посевной площади в регионе от общей по РФ за 1996-2015 гг., %

## Заключение

Как отмечается в гл. 7 5-ого оценочного доклада (IPCC, 2013), «... в будущем изменение климата будет постоянно и негативно влиять на растениеводство в странах с низкими широтами, в то время как изменение климата может иметь положительные или отрицательные последствия в северных широтах (высокая степень достоверности). Прогнозируемые воздействия варьируются в зависимости от сельскохозяйственной культуры, региона и сценария адаптации: около 10% прогнозов на период 2030-2049 годов показывают прирост урожайности более чем на 10 и около 10% прогнозов показывают потери урожайности более чем на 25% по сравнению с концом 20 века».

Большинство климатических моделей прогнозируют, что ожидаемые темпы потепления будут аналогичны предыдущим темпам. Расчёты показывают, что за последние четыре десятилетия средняя температура вегетационного периода яровой пшеницы повысилась на юге и юго-востоке ЕЧ примерно на 1.0°C; на севере и северо-западе ЕЧ – ~ 2.5°C и менее чем на 1.0°C на Урале и в Сибири.

Рассчитанные оценки изменения продуктивности яровой пшеницы в основных регионах её произрастания позволяют дать ответ на вопрос – как наблюдаемый рост температуры и её вероятное повышение в ближайшие десятилетия влияет и влияет на урожайность яровой пшеницы в южных и северных регионах её произрастания в России.

Полученные результаты достаточно убедительно указывают на различную реакцию зерновых (на примере яровой пшеницы) северных и южных регионов земледельческой зоны России на изменение агроклиматических ресурсов. Оцениваемые воздействия варьируют значительно. На юге и юго-востоке ЕЧ повышение температуры вегетационного периода в сочетании с наблюдаемыми тенденциями к усилению степени засушливости территории обуславливает снижение урожайности яровой пшеницы.

Действительно, продуктивность яровой пшеницы в 2006-2015 гг. на юге и юго-востоке ЕЧ составляет ~70% от её уровня в 1961-1990 гг., в то время как на АЧ – 95%, где значимого снижения урожайности не выявлено – колебания урожайности по десятилетиям остаются на уровне её естественной изменчи-

вости. В целом же по России климатически обусловленная урожайность яровой пшеницы понизилась на ~12% с 1976 по 2015 год. Темпы снижения урожайности на уровне 3% за десятилетие нельзя считать незначимыми, принимая во внимание, что внутри десятилетия эти оценки могут варьировать значительно.

Полученные оценки важны для прогнозирования будущей реакции продуктивности яровой пшеницы на изменение агроклиматических ресурсов, принимая во внимание сравнительно близкие оценки тенденций прошлого и будущего климата на ближайшие десятилетия.

## Благодарности

Авторы признательны за поддержку данного исследования со стороны следующих проектов:

– Тема 3.1 «Развитие методов и технологий климатического обслуживания, включая совершенствование моделей прогнозирования климата, методов оценки последствий изменения климата, климатического обоснования национальных адаптационных планов и мониторинга эффективности адаптаций» Плана НИТР Росгидромета на 2020 г., утверждённого приказом № 745 от 31.12.2019;

– Тема 3.2 «Мониторинг глобального климата и климата Российской Федерации и её регионов, включая Арктику. Развитие и модернизация технологий мониторинга» Плана НИТР Росгидромета на 2020 г., утверждённого приказом № 745 от 31.12.2019.

## Список литературы

Андерсон Т. 1963. Введение в многомерный статистический анализ. – М., 500 с.

Бараев А.И., Бакаев Н.М., Веденеева М.Л. 1978. Яровая пшеница /под общ. ред. А.И. Бараева. – М., Колос, 429 с.

Вильфанд Р.М., Страшная А.И., Береза О.В. 2016. О динамике агроклиматических показателей условий сева, зимовки и формирования урожая основных зерновых культур. – Труды Гидрометцентра России, вып. 360, с. 45-78.

Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. 2014. – М., Росгидромет, 1008 с.

Груда Г.В., Ранькова Э.Я. 2012. Наблюдаемые и ожидаемые изменения климата России: температура воздуха. – Обнинск, ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 194 с.

Золотокрылин А.Н., Титкова Т.Б., Черенкова Е.А. 2014. Увлажнение засушливых земель Европейской территории России: настоящее и будущее. – Аридные экосистемы, т. 20, № 2 (59), с. 5-12.

Мещерская А.В. 1988. О показателе засух и урожайности зерновых культур. – Метеорология и гидрология, № 2, с. 91-98.

Национальный план мероприятий первого этапа адаптации к изменениям климата на период до 2022 года. 2019. – Электронный ресурс. URL: <http://static.government.ru/media/files/OTrFMr1Z1sORh5NIx4gLUsdgGHyWIAqy.pdf> (дата обращения 10 октября 2020).

Павлова В.Н., Каланка П., Карабёнкова А.А. 2020а. Продуктивность зерновых культур на территории Европейской России при изменении климата за последние десятилетия. – Метеорология и гидрология, № 1, с. 78-94.

Павлова В.Н., Богданович А.Ю., Семёнов С.М. 2020б. Об оценке степени благоприятности климата для зерновых исходя из частоты засух. - Метеорология и гидрология, № 12. с.96-101.

Павлова В.Н., Карабенкова А.А. 2016. Наблюдаемые изменения климата и динамика агроклиматических ресурсов в XX-XXI столетиях на территории Приволжского федерального округа. – Труды ГГО им. А.И. Воейкова, вып. 583, с. 112-128. URL: <http://voeikovmgo.ru/images/stories/publications/2016/583.pdf> (дата обращения 10 октября 2020).

Переведенцев Ю.П., Вильфанд Р.М., Шанталинский К.М., Гурьянов В.В., Николаев А.А., Исмагилов Н.В. 2018. Мониторинг и прогнозирование климатической изменчивости на территории Приволжского федерального округа. – Труды Гидрометцентра России, вып. 371, с. 67-94.

Попова Е.Н., Попов И.О. 2016. Прогноз изменений климатического ареала колорадского жука на территории России и соседних стран при различных сценариях антропогенного воздействия на климат. – Известия Российской академии наук. Серия географическая, № 2, с. 67-73.

Природно-сельскохозяйственное районирование и использование земельного фонда СССР. 1983. /Под ред. А.Н. Каштанова. – М., Колос, 335 с.

Селянинов Г.Т. 1958. Принципы агроклиматического районирования территории СССР. – В кн.: Вопросы агроклиматического районирования СССР. – М., Издательство Минсельхоза СССР, с. 7-14.

Сиротенко О.Д. 1981. Математическое моделирование водно-теплового режима и продуктивности агроэкосистем. – Л., Гидрометеоиздат, 167 с.

Сиротенко О.Д. 2007. Методы оценки изменений климата для сельского хозяйства и землепользования: методическое пособие. – М., Росгидромет, 77 с.

Сиротенко О.Д., Павлова В.Н. 2012. Методы оценки влияния изменений климата на продуктивность сельского хозяйства. – В кн.: Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем / под ред. С.М. Семенова. – М., Росгидромет, с. 165-189.

Фролов А.В., Страшная А.И. 2011. О засухе 2010 года и её влиянии на урожайность зерновых культур. – В сб.: Анализ условий аномальной погоды на территории России летом 2010 г. – М., Триада ЛТД, с. 22-31.

---

Черенкова Е.А., Бардин М.Ю., Золотокрылин А.Н. 2015. Статистика осадков и засух в противоположные фазы квазидвухлетней цикличности атмосферных процессов и её связь с урожайностью на европейской территории России. – Метеорология и гидрология, № 3, с. 23-35.

Afonin A.N., Greene S.L., Dzyubenko N.I., Frolov A.N. 2008. Interactive Agricultural Ecological Atlas of Russia and Neighboring Countries. Economic Plants and their Diseases, Pests and Weeds. – Available at: <http://www.agroatlas.ru> (accessed 10 October 2020).

Breustedt G., Bokusheva R., Heidelbach O. 2008. Evaluating the potential of index insurance schemes to reduce crop yield risk in an arid region. – Journal of Agricultural Economics, vol. 59, issue 2, pp. 312-328.

IPCC 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change /Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V. and Midgley P.M. (eds.). – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p. – Available at: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/> (accessed 10 October 2020).

Lobell D.B., Schlenker W., Roberts J.C. 2011. Climate trends and global crop production since 1980. – Science, vol. 333, issue 6042, pp. 616-620. DOI: 10.1126/science.1204531.

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: Landscape Modelling and Decision Support / W. Mirschel, V.V. Terleev, K.-O. Wenkel (eds.). – Springer, Cham, pp. 363-382. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-37421-1\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-030-37421-1_19).

Pavlova V., Shkolnik I., Pikaleva A., Efimov S., Karachenkova A., Kattsov V. 2018. Future changes in spring wheat yield in the European Russia as inferred from a large ensemble of high-resolution climate projections. – Environmental Research Letters, vol. 14 (3). DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaf8be>.

The Fifth Assessment Report (AR5) of the United Nations Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Chapter 7 Food Security and Food Production Systems. – Available at: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/> (accessed 10 October 2020).

White J.W., Hoogenboom G., Kimball B.A., Wall G.W. 2011. Methodologies for simulating impacts of climate change on crop production. – Field Crops Research, vol. 124, issue 3, pp. 357-368.

---

# ASSESSMENT OF CHANGES IN CLIMATE-BASED PRODUCTIVITY OF SUMMER WHEAT IN THE MAIN REGIONS OF ITS CULTIVATION IN RUSSIA

V.N. Pavlova\*, A.A. Karachenkova

National Research Institute of Agricultural Meteorology,  
82, Lenina st., 249030, Öbninsk, Russia;  
\*corresponding author: vnp2003@bk.ru

**Abstract.** Agroclimatic resources in the main agricultural regions of Russia are changing at a substantial pace. The authors analyze the impact of these changes on the productivity of spring wheat with the technological trend excluded. This climate-based productivity was calculated via the Climate-Soil-Yield (CSY) simulation system with use of meteorological data from 315 observation points in the Roshydromet network for the period from 1976 to 2015. Provided evidence indicates the adequacy of this productivity modeling in the CSY system over a vast territory of the agricultural zone of Russia. Estimates of trends in agroclimatic indicators and climate-based productivity in the main grain-producing regions over the past four decades have been obtained. It is demonstrated that the average increase in air temperature during the vegetation period of spring wheat in 2006–2015 compared to 1976–1985 was from 1.6 to 2.3°C in the North-Western regions of the European part (EP) of Russia and from 1.0 to 1.3°C in the central and southern regions. The deficit of available water resources was especially pronounced in the main areas of spring wheat cultivation in the southern and South-Eastern regions of the EP of Russia. Analysis of trends in climate-based productivity of spring wheat by decades indicates different productivity responses to changes in agroclimatic resources in northern and southern regions of its growth. Over the period from 2006 to 2015, relative to 1961–1990, climate-based productivity decreased by 25–30% in southern and south-eastern parts of European part of Russia and by 10% in Eastern Siberia and the Far East. In the Urals and Western Siberia, the decrease of climate-based productivity is minor and ranges from 3 to 5%. In Russia as a whole, trends towards warming caused a drop in the climate-based productivity of spring wheat by approximately 12% from 1976 to 2015, i. e. the rate of its decline amounted to ~3% per decade.

**Keywords.** Agroclimatic resources, productivity, spring wheat, climate change, imitation system, Russia.

## References

- Anderson T. 1963. *Vvedenie v mnogomernyj statisticheskij analiz* [Introduction to multivariate statistical analysis]. Moscow, 500 p.
- Baraev A.I., Bakaev N.M., Vedeneeva M.L. 1978. *Yarovaya pshenitsa. Pod obshh. red. A.I. Baraeva* [Spring wheat. Under the general editorship of A.I. Baraev]. Moscow, 429 p.
-

---

Vil'fand R.M., Strashnaya A.I., Bereza O.V. 2016. O dinamike agroklimaticheskikh pokazatelej uslovij seva, zimovki i formirovaniya urozhaya osnovnykh zernovykh kul'tur [On the dynamics of agroclimatic indicators of sowing conditions, wintering and crop formation of the main grain crops]. *Trudy Gidrometsentra Rossii – Proceedings of the Hydrometeorological Center of Russia*, issue 360, pp. 45-78.

*Vtoroj otsenochnyj doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossijskoj Federatsii* [Second assessment report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation]. 2014. Moscow, 1008 p.

Gruza G.V., Ran'kova E.Y. 2012. *Nablyudaemye i ozhidaemye izmeneniya klimata Rossii: temperatura vozdukha* [Observed and expected climate changes in Russia: air temperature]. Obninsk, 194 p.

Zolotokrylin A.N., Titkova T.B., Cherenkova E.A. 2014. Uvlazhnenie zasushlivykh zemel' Evropejskoj territorii Rossii: nastoyashhee i budushhee [Humidification of dry lands in the European territory of Russia: present and future]. *Aridnye ekosistemy – Arid ecosystems*, vol. 20, no. 2(59), pp. 5-12.

Meshcherskaya A.V. 1988. O pokazatele zasukh i urozhajnosti zernovykh kul'tur [On the indicator of droughts and grain crops.]. *Meteorologiya i gidrologiya – Russian Meteorology and Hydrology*, no. 2, pp. 91-98.

*Natsional'nyj plan meropriyatij pervogo ehtapa adaptatsii k izmeneniyam klimata na period do 2022 goda* [National action plan for the first stage of adaptation to climate change for the period up to 2022]. 2019. URL: <http://static.government.ru/media/files/OTrFMr1Z1sORh5NIx4gLUsdgGHyWIAqy.pdf> (accessed 10 October 2020).

Pavlova V.N., Kalanka P., Karachyonkova A.A. 2020a. Produktivnost' zernovykh kul'tur na territorii Evropejskoj Rossii pri izmenenii klimata za poslednie desyatiletija [Productivity of grain crops on the territory of European Russia under climate change in recent decades]. *Meteorologiya i hidrologiya – Russian Meteorology and Hydrology*, no. 1, pp. 78-94.

Pavlova V.N., Bogdanovich A.Yu., Semenov S.M. 2020b. Ob otsenke stepeni blagopriyatnosti klimata dlya zernovykh iskhodya iz chastoty zasukh [About the assessment of the degree of favorableness of the climate for grain based on the frequency of droughts]. *Meteorologiya i hidrologiya – Russian Meteorology and Hydrology*, no 12. pp. 96-101.

Pavlova V.N., Karachenkova A.A. 2016. Nablyudaemye izmeneniya klimata i dinamika agroklimaticheskikh resursov v XX-XXI stoletiyakh na territorii Privolzhskogo federal'nogo okruga [Observed climate changes and dynamics of agro-climatic resources in the XX-XXI centuries in the Volga Federal district]. *Trudy GGO im. A.I. Voejkova – Proceeding of Voeikov Main Geophysical Observatory*, issue 583, pp. 112-128. URL: <http://voeikovmgo.ru/images/stories/publications/2016/583.pdf> (accessed 10 October 2020).

---

Perevedentsev Y.U.P., Vil'fand R.M., SHantalinskij K.M., Gur'yanov V.V., Nikolaev A.A., Ismagilov N.V. 2018. Monitoring i prognozirovaniye klimaticheskoy izmenchivosti na territorii Privolzhskogo federal'nogo okruga [Monitoring and forecasting of climate variability in the Volga Federal district]. *Trudy Gidromettsentra Rossii – Proceedings of the Hydrometeorological Center of Russia*, issue 371, pp. 67-94.

Popova E.N., Popov I.O. 2016. Prognoz izmenenij klimaticheskogo areala koloradskogo zhuka na territorii Rossii i sosednikh stran pri razlichnykh stsenariyakh antropogenного vozdejstviya na klimat [Forecast of changes in the climatic range of the Colorado potato beetle in Russia and neighboring countries under various scenarios of anthropogenic impact on the climate]. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Seriya geograficheskaya – Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Geographical series*, no. 2, pp. 67-73.

*Prirodno-sel'skokhozyajstvennoe rajonirovanie i ispol'zovanie zemel'nogo fonda SSSR. Pod red. A.N. Kashtanova* [Natural and agricultural zoning and use of the land Fund of the USSR. Edited by A.N. Kashtanov]. 1983. Moscow, 335 p.

Selyaninov G.T. 1958. Printsipy agroklimaticheskogo rajonirovaniya territorii SSSR. V kn.: *Voprosy agroklimaticheskogo rajonirovaniya SSSR* [Principles of agroclimatic zoning of the USSR territory. In the book: Questions of agroclimatic zoning of the USSR]. Moscow, pp. 7-14.

Sirotenko O.D. 1981. *Matematicheskoe modelirovanie vodno-teplovogo rezhima i produktivnosti agroekosistem* [Mathematical modeling of water-heat regime and productivity of agroecosystems]. Leningrad, 167 p.

Sirotenko O.D., Pavlova V.N. 2012. Metody otsenki vliyanija izmenenij klimata na produktivnost' sel'skogo khozyajstva. V kn.: *Metody otsenki posledstvij izmeneniya klimata dlya fizicheskikh i biologicheskikh system*. Pod red. S.M. Semenova [Methods for assessing the impact of climate change on agricultural productivity. In the book.: Methods for assessing the effects of climate change on physical and biological systems, edited by S.M. Semenov]. Moscow. pp. 165-189.

Frolov A.V., Strashnaya A.I. 2011. O zasukhe 2010 goda i eyo vliyanii na urozhajnost' zernovykh kul'tur. V sb.: *Analiz usloviy anomal'noj pogody na territorii Rossii letom 2010* [On the 2010 drought and its impact on grain crop yields. In the collection: analysis of abnormal weather conditions in Russia in the summer of 2010]. Moscow, pp. 22-31.

Cherenkova E.A., Bardin M.YU., Zolotokrylin A.N. 2015. Statistika osadkov i zasukh v protivopolozhnye fazy kvazidvukhletnej tsiklichnosti atmosfernykh protsessov i eyo svyaz' s urozhajnost'yu na evropejskoj territorii Rossii [Statistics of precipitation and droughts in opposite phases of the quasi-two-year cycle of atmospheric processes and its relation to yield in the European territory of Russia.]. *Meteorologiya i hidrologiya – Russian Meteorology and Hydrology*, no. 3, pp. 23-35.

---

Afonin A.N., Greene S.L., Dzyubenko N.I., Frolov A.N. 2008. Interactive Agricultural Ecological Atlas of Russia and Neighboring Countries. Economic Plants and their Diseases, Pests and Weeds. – Available at: <http://www.agroatlas.ru> (accessed 10 October 2020).

Breustedt G., Bokusheva R., Heidelbach O. 2008. Evaluating the potential of index insurance schemes to reduce crop yield risk in an arid region. *Journal of Agricultural Economics*, vol. 59, issue 2, pp. 312-328.

IPCC 2013. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change /Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V. and Midgley P.M. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 p. Available at: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/> (accessed 10 October 2020).

Lobell D.B., Schlenker W., Roberts J.C. 2011. Climate trends and global crop production since 1980. *Science*, vol. 333, issue 6042, pp. 616-620. DOI: 10.1126/science.1204531.

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: *Landscape Modelling and Decision Support* / W. Mirschel, V.V. Terleev, K.-O. Wenkel (eds.). Springer, Cham, pp. 363-382. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-37421-1\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-030-37421-1_19).

Pavlova V., Shkolnik I., Pikaleva A., Efimov S., Karachenkova A., Kattsov V. 2018. Future changes in spring wheat yield in the European Russia as inferred from a large ensemble of high-resolution climate projections. *Environmental Research Letters*, vol. 14 (3). DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaf8be>.

The Fifth Assessment Report (AR5) of the United Nations Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Chapter 7 Food Security and Food Production Systems. Available at: <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2/> (accessed 10 October 2020).

White J.W., Hoogenboom G., Kimball B.A., Wall G.W. 2011. Methodologies for simulating impacts of climate change on crop production. *Field Crops Research*, vol. 124, issue 3, pp. 357-368.