

УДК 551.583: 631.559 (470)

НОВЫЙ ПОДХОД К ВЫЯВЛЕНИЮ ВЛИЯНИЯ ЭКСТРЕМАЛЬНОСТИ КЛИМАТА НА СНИЖЕНИЕ УРОЖАЙНОСТИ ПШЕНИЦЫ НА ЮГЕ ЕВРОПЕЙСКОЙ ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

© 2021 г. Е. А. Черенкова^{1,2,*}, член-корреспондент РАН В. А. Семенов^{1,2}

Поступило 20.04.2021 г.

После доработки 02.06.2021 г.

Принято к публикации 04.06.2021 г.

Исследовано изменение сезонных экстремальных климатических условий, приводящих к низкой урожайности пшеницы на юге Европейской территории России, в период 1991–2019 гг. по сравнению с 1961–1990 гг. Установлено, что экстремальные температурные режимы являются более важными с точки зрения оценки их влияния в целом за год на продуктивность пшеницы, чем экстремальные режимы осадков. Предложен новый интегральный показатель, учитывающий совокупное влияние сезонных экстремальных режимов температуры и осадков, наиболее часто сопровождающихся недобором пшеницы на исследуемой территории. Показано, что, несмотря на позитивные изменения зимой и весной, изменения экстремальных режимов температур и осадков в последние десятилетия были неблагоприятными для выращивания пшеницы на юге Европейской территории России за счет негативных статистически значимых их изменений, наблюдаемых летом и осенью.

Ключевые слова: экстремумы приземной температуры воздуха и атмосферных осадков, урожайность пшеницы, Европейская территория России

DOI: 10.31857/S2686739721090073

Глобальное потепление сопровождается увеличением повторяемости и интенсивности гидрометеорологических экстремумов во многих регионах. Задача обеспечения продовольствием населения Земли в условиях меняющегося климата является одним из важнейших современных вызовов, стоящих перед человечеством. В докладе Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) подчеркивается, что засухи наносят огромный ущерб сельскохозяйственной отрасли во многих странах [1]. Помимо засух, другие погодные факторы, в том числе экстремальные климатические события, наблюдаемые в различные фазы вегетации сельскохозяйственных растений (культур), а также вне их вегетации, играют немаловажную роль в агропроизводстве.

В конце XX века Россия стала крупным экспортером зерна на мировом рынке. По данным Международного совета по зерну, Россия занимает первое место среди стран мира по экспорту

пшеницы (<http://www.igc.int/>). Продолжающееся глобальное потепление может привести к пересмотру ключевых игроков на мировом зерновом рынке. В связи с этим при принятии управленческих решений, направленных на разработку мер по смягчению последствий изменений климата, повышается актуальность оценок сельскохозяйственных рисков, обусловленных этими изменениями.

Рост температуры воздуха на Европейской территории России (ЕТР) в 1976–2012 гг. составил 0.52°C/год, а наибольшим и статистически значимым он был летом и осенью [2]. В то же время на фоне незначительного роста осадков на ЕТР в тот же период существенное их увеличение отмечалось только весной. Наблюдаемые в последние несколько десятилетий изменения климата были позитивными для повышения продуктивности зерновых культур: потепление привело к росту теплообеспеченности посевов, повышению средней температуры холодного периода года, увеличению продолжительности вегетационного периода [3]. Вместе с тем отмечается, что агроклиматические изменения, связанные с засухами, не были одинаково благоприятными для всех регионов юга РФ [4]. Очевидно, что вариации урожайности не могут полностью определяться экстремальностью климата. Однако экс-

¹Институт географии Российской академии наук, Москва, Россия

²Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: cherenkova@igras.ru

тремальные погодные события часто сопровождаются недобором урожая. При наблюдении нескольких неблагоприятных экстремальных погодных событий, как в течение вегетационного сезона, так и вне его, их кумулятивное влияние на продуктивность агроценозов может быть усилено.

В данной работе исследуются связи сезонных экстремумов температурно-влажностного режима с низкой урожайностью пшеницы в регионах юга Европейской территории России. Предлагается новый подход к оценке изменений характеристик экстремального климата, чье совокупное влияние на сезонном и годовом масштабах связано с пониженной агро-продуктивностью.

Положительный тренд урожайности пшеницы на юге ЕТР в последние десятилетия XX—начале XXI века [5] был связан, прежде всего, с агротехническими изменениями. О тесной связи временных рядов средней для юга ЕТР урожайности пшеницы с количеством внесенных минеральных удобрений (рис. 1б) свидетельствует коэффициент корреляции, равный 0.84. В данной статье используется статистика урожайности яровой и озимой пшеницы Федеральной службы государственной статистики (Росстат) РФ (<https://rosstat.gov.ru/>) в период 1995–2019 гг. Связь экстремальных сезонных климатических показателей и низкой по сравнению с нормой урожайности яровой и озимой пшеницы анализируется в 12 административных субъектах юга ЕТР (рис. 1а). Разделить агротехническую и климатическую составляющие урожайности достаточно сложно. Согласно известной в агроклиматологии методике, рекомендуется оценивать урожайность, удалив из нее тренд [6]. Вклад линейного тренда в изменчивость урожайности в период 1995–2019 гг. был достаточно существенным и варьировался от 16 до 83% в зависимости от рассматриваемого региона. При удалении тренда из временных рядов урожайности для каждого региона исследуемой территории предполагалось, что в целом исключается влияние агротехнических факторов (внесение минеральных удобрений, использование новых прогрессивных технологий и новых сортов с более высоким потенциалом продуктивности). При отрицательных значениях нормированной урожайности она классифицировалась как низкая. Отметим, что экстремальные климатические условия вне сезона вегетации воздействуют на формирование урожая яровой пшеницы опосредованно через формирование запасов весенней почвенной влаги.

Вариативность дат старта посевной кампании и климатические особенности в регионах исследуемой территории приводят к отличиям год от года календарных дат критических периодов развития сельскохозяйственных растений. Что за-

трудняет выявление прочных связей между урожайностью и влагообеспеченностью, а также и теплообеспеченностью посевов. В некоторые годы уборка урожая во многих субъектах юга ЕТР затягивается до июля, а сев озимых может начаться в сентябре. Август был исключен из рассмотрения как месяц вне сезона вегетации.

В современной мировой гидрометеорологической практике широко используются предложенные группой экспертов по обнаружению изменений климата и индексам МГЭИК (Expert Team on Climate Change Detection and Indices, ETCCDI) количественные показатели, характеризующие экстремальные режимы температуры воздуха, а также суточного количества атмосферных осадков [7]. Одна часть экстремальных показателей определяется на основе 10-го и 90-го перцентилей – “хвостов” функции распределения вероятности случайной величины температуры воздуха или атмосферных осадков за базовый период. Другая часть показателей рассчитывается с помощью пороговых значений, основанных на эмпирических оценках. 26 экстремальных показателей, рекомендованных ETCCDI, были рассчитаны за каждый год каждого сезона по данным минимальных, средних и максимальных температур воздуха, а также суточных сумм осадков из архива ВНИИГМИ-МЦД с данными наблюдений на метеостанциях сети Российской Гидрометслужбы (<http://meteo.ru>). Использованы данные 45 метеостанций, расположенных на юге ЕТР, для которых пропущенные наблюдения составляли не более 10%. Анализ сезонных изменений экстремальных показателей выполнялся для периода 1991–2019 гг. по сравнению с 1961–1990 гг. В качестве базового периода для вычисления перцентилей использовался период 1961–1990 гг.

В данной статье предлагается новый интегральный индекс экстремумов температуры и осадков, созданный с учетом негативной реакции продуктивности пшеницы на совокупность таких экстремумов. Отбор рассмотренных экстремальных сезонных климатических показателей для включения в индекс осуществлялся на основе оценки влияния их изменений на областную урожайность на юге ЕТР (описание шести выбранных экстремальных показателей представлено в табл. 1). Показатель принимался во внимание, только если его влияние на урожайность было однонаправленным во всех рассмотренных субъектах, и нормированные отклонения показателя от среднего ассоциировались с пониженной урожайностью как озимой, так и яровой пшеницы на юге ЕТР не менее чем в 60% лет периода 1995–2019 гг. (табл. 2). Например, положительное отклонение от нормы показателя SU летом в 63 и 67% случаев приводило к низкой урожайности озимой (рис. 2а) и яровой пшеницы (рис. 2б) соответственно (табл. 2). Интегральный экстре-

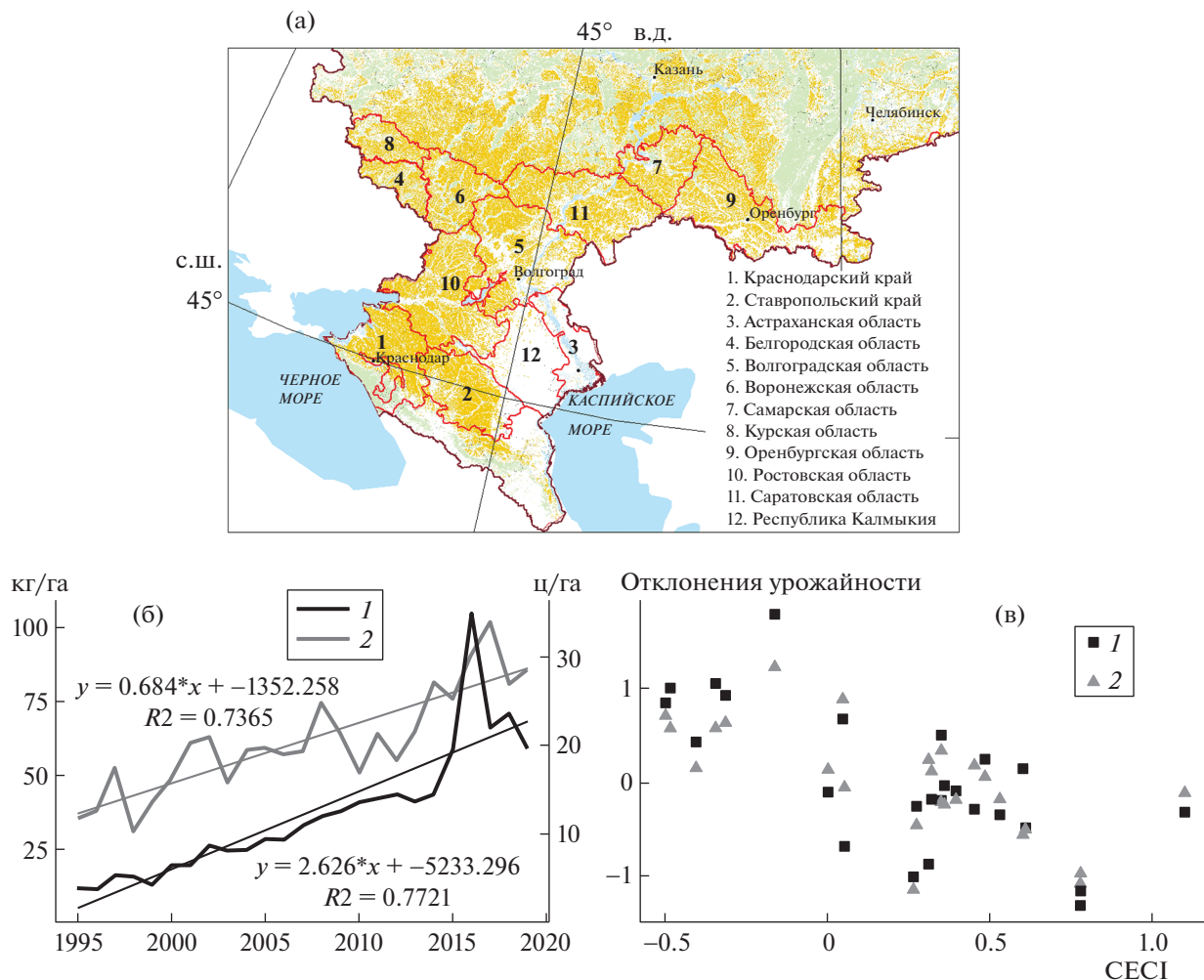


Рис. 1. Распределение пахотных земель в 2010 г. (заливка желтого цвета) по данным ИКИ РАН (http://smiswww.iki.rssi.ru/files/maps/croplands_of_russia_2010_ru_s.jpg) и расположение 12 субъектов на юге ЕТР (а); многолетние изменения количества (кг/га) внесенных сельскохозяйственными организациями минеральных удобрений в пересчете на 100% питательных веществ на 1 га посева (<https://rosstat.gov.ru/>) (1) и урожайности пшеницы (ц/га) (2) на юге ЕТР (б); связь индекса СЕСИ с нормированными отклонениями урожайности озимой (1) и яровой (2) пшеницы в среднем на исследуемой территории в 1995–2019 гг. (в).

мальный климатический показатель (Cumulative Extreme Climate Indicator, CECI) рассчитывался следующим образом:

$$CECI_s = \frac{1}{mn} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^{ns} \text{norm}(P_{ijs}), \quad (1)$$

где P_{ijs} – экстремальный показатель, $\text{norm}()$ – нормирование показателя вычитанием среднего и делением на стандартное отклонение за базовый период, n_s – количество показателей, включенных в данный сезон года s , m – количество метеостанций в данном регионе, s – сезон года.

Перед получением интегральных оценок СЕСИ на территории исследования сезонные областные показатели были усреднены для всех метеостанций в каждом из 12 рассмотренных регионов.

Учет знака экстремального показателя при расчете СЕСИ в формуле (1) осуществлялся на основе оценки наибольшей положительной (или отрицательной) его связи с урожайностью ниже нормы (табл. 2). Среди экстремальных сезонных климатических показателей, существенно коррелирующих друг с другом (т.е. если статистически значимые на уровне 0.05 коэффициенты корреляции по модулю превышали 0.6), отбирался только один показатель, наиболее часто сопровождающийся низкой урожайностью. Таким образом, положительные значения СЕСИ отражают неблагоприятные экстремальные климатические условия во все сезоны года, в 80% случаев приводящие к низкой урожайности пшеницы на юге ЕТР в период 1995–2019 гг. (рис. 1в).

Таблица 1. Количественные показатели, характеризующие экстремальные режимы приземной температуры воздуха и атмосферных осадков, наиболее часто сопровождающиеся низкой урожайностью пшеницы на юге ЕТР

Обозначение	Описание показателя	Ед. измерений
CDD	Наибольшая продолжительность периода, в течение которого каждый день выпадало менее 1 мм осадков	сут
CSDI	Продолжительность холодных периодов, представляющих последовательность из не менее 5 холодных ночей подряд. Ночь считалась холодной, если минимальная суточная температура была ниже 10-го перцентиля для соответствующего календарного дня	сут
FD	Количество суток с минимальной суточной температурой менее 0°C	сут
TN90p	Количество суток с минимальной суточной температурой выше 90-го перцентиля для соответствующего календарного дня. Перцентиль рассчитывался в скользящем 5-дневном окне в базовый период	%
SU	Количество суток с максимальной суточной температурой более 25°C	сут
WSDI	Продолжительность теплых периодов, представляющих последовательность из не менее 5 теплых дней подряд. День считался теплым, если максимальная суточная температура превышала 90-й перцентиль для соответствующего календарного дня	сут

Результаты исследования выявили сезонные особенности влияющих экстремумов. Так, зимой экстремумы минимальной температуры являются наиболее важными для урожайности в текущем году. Установлено, что урожайность пшеницы ниже нормы на юге ЕТР чаще всего ассоциировалась с высокой продолжительностью очень холодных периодов зимой (CSDI), а также небольшой долей экстремально теплых минимальных температур (TN90p) (описание показателей климатических экстремумов приведено в табл. 2). Наблюдаемые низкие температуры в сочетании с малоснежными зимами являются сильным стрессом для озимых и способны привести к их вымер-

занию. Поскольку даже кратковременное понижение температуры почвы на глубине узла кушения ниже критической, формирующейся под влиянием совместного действия температуры воздуха и снежного покрова, приводит к повреждению или в некоторых случаях даже гибели растений [8].

Весной повышается роль климатических экстремумов, связанных с осадками. Установлено, что низкая урожайность пшеницы на юге ЕТР чаще всего сопровождалась положительными отклонениями от нормы продолжительности очень сухих периодов (CDD) весной. С другой стороны, пшеница чувствительна как к “холодным”, так и к “теплым” весенним температурным экстремумам. Так, переизбыток как экстремально холодных дней (FD), так и жарких дней (SU) привел к низкой урожайности. Дефицит весенней почвенной влаги часто связан с существенным замерзанием почвы в особенно холодные зимы [9]. Кроме того, рост экстремально высоких температур весной вызывает бурное таяние снега, в результате чего из-за замерзшей почвы талая вода, не успевая просачиваться в почву, попадает в сток. Подобная ситуация сложилась весной в 2010 г. в южной половине ЕТР, что в дополнении к недостатку атмосферной влаги привело к формированию засушливых условий уже в мае [10]. Сильные атмосферные засухи с мая по июнь способны замедлить общую тенденцию роста зерновых культур вследствие повышения культуры земледелия, как это произошло в некоторых регионах Поволжья в 2005–2019 гг. по сравнению с 1990–2004 гг. [11]. Отмечается, что на фоне улучшения условий перезимовки озимой пшеницы, увеличения про-

Таблица 2. Доля (%) лет периода, когда положительные (I, II) и отрицательные (III, IV) отклонения от климатической нормы показателей, характеризующих экстремальные режимы температуры и осадков, наиболее часто сопровождалась низкой урожайностью озимой (I, II) и яровой (III, IV) пшеницы на юге ЕТР и при этом имели одинаковый знак во всех 12 субъектах юга ЕТР. Знак экстремального показателя в качестве слагаемого в формуле (1) расчета SECI приведен в (V)

Сезон	Показатель	I	II	III	IV	V
зима	TN90p	35.9	67.5	38.7	63.2	–
	CSDI	61.9	49.1	60.8	44.6	+
весна	CDD	61.8	47.0	61.6	44.5	+
	FD	67.2	39.4	61.8	41.9	+
	SU	66.5	42.7	63.3	41.7	+
лето	SU	63.7	41.6	68.1	32.3	+
осень	WSDI	60.3	47.9	62.1	43.2	+

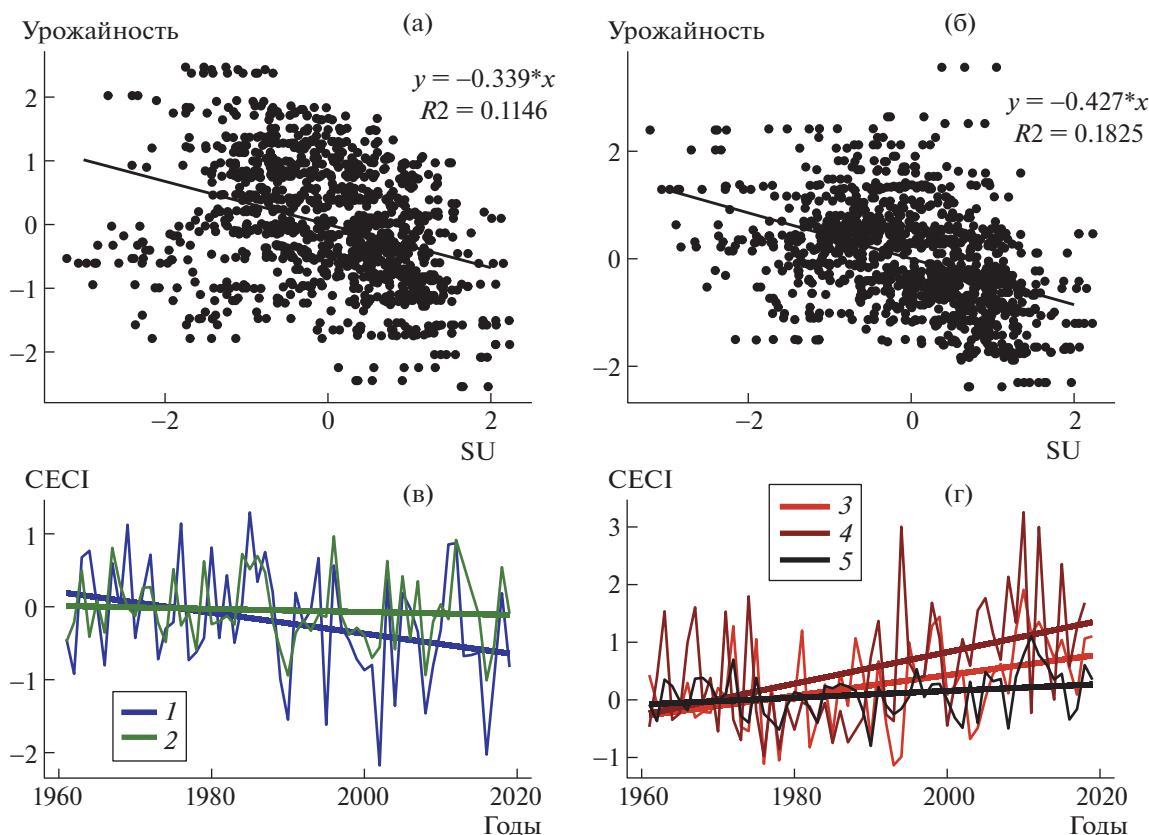


Рис. 2. Связь нормированных отклонений урожайности (ц/га) озимой пшеницы (а), а также яровой пшеницы (б) и количества дней (дни) с максимальной суточной температурой больше 25°C (SU) летом в период 1995–2019 гг., а также межгодовая изменчивость индекса CECI (тонкие линии) и его тренды (полужирные линии) зимой (1), весной (2) (в), летом (3), осенью (4) и за год (5) (г) в период 1961–2019 гг. на юге ЕТР.

должительности вегетационного сезона, засухи в сезон вегетации стали играть более существенную роль в формировании урожая на юге ЕТР [3]. Установлено, что среди летних экстремумов наибольший негативный отклик урожайности наблюдался на изменение числа жарких дней (SU). Значительные положительные отклонения продолжительности экстремально теплых периодов (WSDI) от нормы осенью, как правило, приводили к низкой урожайности пшеницы в следующем году. Экстремально теплый температурный режим может способствовать образованию сухого слоя почвы и формированию осенней почвенной засухи, что не позволяет получить полноценные всходы озимых и затрудняет их развитие осенью.

Отрицательные тренды CECI зимой и весной в период 1961–2019 гг. на рис. 2в свидетельствуют о том, что изменения экстремальных условий, наиболее важных для формирования урожайности пшеницы на юге ЕТР, были в целом благоприятными в последние десятилетия по сравнению с началом периода исследования. Полученные результаты согласуются с выводами, сделанными в [12, 13] о том, что повторяемость дней с экстре-

мально высокими суточными температурами в зимний период в начале XXI века в регионах южной части ЕТР заметно выросла. С другой стороны, результаты анализа экстремальных сезонных температур свидетельствуют об увеличении с середины 1970-х годов абсолютных значений температуры и самых холодных, и самых теплых аномалий на большей части территории России (в том числе, на ЕТР) в соответствии с общим ростом средней сезонной температуры [14].

Как показано на графике на рис. 2г, тенденции изменений рассмотренных экстремальных показателей летом и осенью в последние десятилетия были неблагоприятными для продуктивности пшеницы на территории. Это согласуется с результатами, полученными в предыдущих работах авторов. В [15] установлено, что, начиная с середины 1990-х годов, сильные летние засухи на юге ЕТР стали наблюдаться чаще из-за увеличения повторяемости атмосферных блокировок при ослаблении зональной региональной циркуляции в Атлантико-Европейском секторе [16]. Тренды изменений CECI были статистически значимыми во все сезоны года, кроме весны.

На том же рис. 2г показано, что положительный значимый тренд годового СЕСИ свидетельствует о негативных изменениях экстремальных режимов в среднем за год в последние десятилетия. Наиболее отчетливо выделяется период 2006–2013 гг., в течение которого наблюдалась группировка следующих друг за другом лет (прервавшаяся лишь в 2008 г.) с неблагоприятными для продуктивности пшеницы экстремальными режимами температуры и осадков в течение нескольких сезонов (рис. 2г). В этот период сельскохозяйственная отрасль на исследуемой территории испытывала наибольшее давление меняющегося климата: практически во все года периода наблюдались отрицательные отклонения урожайности (в среднем -0.52 ц/га) как озимой, так и яровой пшеницы от тренда.

Продолжающееся антропогенное потепление заставляет, и будет далее вынуждать отрасль существовать и развиваться в условиях постоянного приспособления к изменениям климата, в первую очередь, продолжая улучшать культуру земледелия, разрабатывать новые селекционные программы и внедрять устойчивые к погодным экстремумам новые сорта пшеницы. Разработанная методика будет полезна как при заблаговременном прогнозировании урожайности на следующий год, так и при получении перспективных оценок на более длительные периоды с использованием численных экспериментов с климатическими моделями.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование аномалий характеристик экстремального климата выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 19-17-00242), анализ связи урожайности с климатическими экстремумами проведен в рамках научной темы 0148-2019-0009.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.) // IPCC, Geneva, Switzerland, 2014. 151 p.
2. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. М.: Росгидромет, 2014. 1008 с.
3. Вильфанд Р.М., Страшная А.И., Береза О.В. О динамике агроклиматических показателей условий сева, зимовки и формирования урожая основных зерновых культур // Труды Гидрометцентра РФ. 2016. Вып. 360. С. 45–78.
4. Клещенко А.Д., Лебедева В.М., Гончарова Т.А., Найдина Т.А., Шкляева Н.М. Оценка потерь урожайности от засухи с помощью динамико-статистической модели прогнозирования продуктивности сельскохозяйственных культур // Метеорология и гидрология. 2016. № 4. С. 94–102.
5. Павлова В.Н. Анализ и оценка влияния климатических условий последних десятилетий на урожайность зерновых культур в земледельческой зоне России // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем, М.: ИГКЭ, 2010. Т. XXIII. С. 215–230.
6. Пасов И.М. Изменчивость урожаев и оценка ожидаемой продуктивности зерновых культур. Л.: Гидрометеоздат, 1986. 152 с.
7. Zhang X., Alexander L., Hegerl G.C., Jones P., Klein Tank A., Peterson T.C., Trewin B., Zwiers F.W. Indices for Monitoring Changes in Extremes Based on Daily Temperature and Precipitation Data // WIREs Clim. Chang. 2011. V. 2. P. 851–870.
8. Куперман Ф.М., Пономарев В.И. Диагностика зимостойкости озимых зерновых культур. М.: ВНИИТЭИСХ МСХ СССР, 1971. 133 с.
9. Страшная А.И., Богомолова Н.А. О каталоге сильных почвенных засух под ранними яровыми зерновыми культурами в черноземной зоне России // Труды Гидрометцентра России. 2005. Вып. 340. С. 35–47.
10. Черенкова Е.А., Кононова Н.К. Анализ опасных атмосферных засух 1972 и 2010 гг. и макроциркуляционных условий их формирования на территории Европейской части России // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2012. № 565. С. 165–187.
11. Страшная А.И., Береза О.В., Павлова А.А. Агрометеорологические условия и прогнозирование урожайности зерновых и зернобобовых культур на основе комплексирования наземных и спутниковых данных в субъектах Приволжского федерального округа // Труды Гидрометцентра России. 2020. Вып. 377. С. 71–91.
12. Коваленко О.Ю., Бардин М.Ю., Воскресенская Е.Н. Изменения характеристик экстремальности температуры воздуха в причерноморском регионе и их изменчивость в связи с крупномасштабными климатическими процессами межгодового масштаба // Фундаментальная и прикладная климатология. 2017. № 2. С. 42–62.
13. Титкова Т.Б., Черенкова Е.А., Семенов В.А. Региональные особенности изменения зимних экстремальных температур и осадков на территории России в 1970–2015 гг. // Лед и снег. 2018. Т. 58. № 4. С. 486–497.
14. Бардин М.Ю., Платова Т.В. Изменения порогов экстремальных значений температур и осадков на территории России в период глобального потепления // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем // Проблемы экологи-

- ческого мониторинга и моделирования экосистем. 2013. № 25. С. 71–93.
15. Черенкова Е.А., Бардин М.Ю., Платова Т.В., Семенов В.А. Влияние долгопериодной изменчивости температуры поверхности океана в Северной Атлантике и изменений атмосферной циркуляции на повторяемость сильных атмосферных засух летом на юге Восточно-Европейской равнины // Метеорология и гидрология. 2020. № 12. С. 5–19.
16. Семенов В.А., Черенкова Е.А. Оценка влияния атлантической мультидекадной осцилляции на крупномасштабную атмосферную циркуляцию в атлантическом секторе в летний сезон // ДАН. 2018. Т. 478. № 6. С. 697–701.

A NEW APPROACH TO IDENTIFYING THE INFLUENCE OF CLIMATE EXTREME ON THE REDUCTION OF WHEAT YIELD IN THE SOUTH OF EUROPEAN RUSSIA

E. A. Cherenkova^{a,b,#} and Corresponding Member of the RAS V. A. Semenov^{a,b}

^a *Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

^b *A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

[#] *E-mail: cherenkova@igras.ru*

The change in seasonal extreme climatic conditions driving to low wheat yields in the south of European Russia in the period 1991–2019 compared to 1961–1990 was investigated. It was revealed that extreme temperature regimes are more important from the point of view of assessing their total yearly impact on wheat productivity than extreme precipitation regimes. A new integral indicator has been proposed that takes into account the cumulative effect of seasonal extreme temperature and precipitation regimes, most often accompanied by a shortage of wheat yield in the south of European Russia. It is shown that, despite positive changes in winter and spring, changes in extreme temperature and precipitation regimes in recent decades were unfavorable for growing wheat in the study area due to negative statistically significant changes observed in summer and autumn.

Keywords: extremes of surface air temperature and precipitation, wheat yield, European Russia