

ПРОДУКТИВНОСТЬ ЗЕРНОВЫХ КУЛЬТУР В РОССИИ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ АГРОКЛИМАТИЧЕСКИХ РЕСУРСОВ В 20-21 ВЕКАХ

Павлова В. Н.

к. т. н., ведущий научный сотрудник ФГБУ «ВНИИСХМ»

E-mail: ynp2003@bk.ru

Последние публикации по теме доклада

1. **Павлова В. Н.**, Каланка П., Карачёноква А. А. Продуктивность зерновых культур на территории Европейской России при изменении климата за последние десятилетия // Метеорология и гидрология. 2020. № 1. С. 78–94.
2. **Pavlova V.**, Shkolnik I., Pikaleva A., Efimov S., Karachenkova A., Kattsov V. Future changes in spring wheat yield in the European Russia as inferred from a large ensemble of high-resolution climate projections // Environ. Res. Lett. 2019. Volume 14. Issue 3.
3. Романенков В. А., **Павлова В. Н.**, Беличенко М. В. Оценка климатических рисков при возделывании зерновых культур на основе региональных данных и результатов длительных опытов геосети // Агрехимия. 2018. № 1. С. 77–86.
4. **Павлова В. Н.**, Варчева С. Е. Оценки степени уязвимости территории и климатического риска крупных неурожаев зерновых культур в зерносеющих регионах России // Метеорология и гидрология. 2017. № 8. С. 39–49.
5. **Павлова В. Н.**, Карачёноква А. А. Наблюдаемые изменения климата и динамика агроклиматических ресурсов в XX–XXI столетиях на территории Приволжского федерального округа // Труды ГГО им. А. И. Воейкова. 2016. Вып. 583. С. 112–128.
6. **Pavlova V. N.**, Varcheva S. E., Bokusheva R., Calanca P. Modeling the effects of climate variability on spring wheat productivity in the steppe zone of Russia and Kazakhstan // J. Ecological Modeling. 2014. Vol. 277. P. 57–67.
7. **Павлова В. Н.** Агроклиматические ресурсы и продуктивность сельского хозяйства России при реализации новых климатических сценариев в XXI-ом веке // Труды ГГО им. А. И. Воейкова. 2013. Вып. 569. С. 20–37.

Цель

- 1) Оценить тенденции изменений агроклиматических ресурсов земледельческой зоны России и их влияние на продуктивность зерновых культур при современном климате с использованием метода имитационного моделирования.
- 2) Дать прогноз продуктивности основных зерновых культур в России в XXI веке.

Описание структуры имитационной модели, исходных данных

В качестве основного инструмента исследования используется разработанная в соавторстве с О. Д. Сиротенко и Е. В. Абашиной имитационная система «Климат-Почва-Урожай» (КПУ)

Динамическая модель «Погода-Урожай» (ядро имитационной системы КПУ) включает три взаимосвязанные субмодели: 1) рост и развитие растений, 2) влагозапасы почвы, 3) минеральное питание.

Расчёты динамики (1) фитомассы отдельных органов растений как результата моделирования процессов фотосинтеза, дыхания, роста, распада, развития и старения, (2) влагозапасов почвы как результата моделирования процессов инфильтрации, испарения, транспирации и корневого поглощения воды и (3) минерального азота почвы выполняется с суточным шагом по времени.

В субмодель роста и развития растений включён параметризованный блок для учёта прямого воздействия на растения CO_2 и тропосферного озона.

Входные данные:

1. географическая широта и долгота пункта;
2. агрогидрологические свойства почвы (полная влагоёмкость; влажность завядания по 10-см слоям до глубины 1 м, мм; относительная влажность на нижней границе расчётного слоя почвы, %);
3. агрохимические свойства почвы (содержание щелочногидролизуемого азота и нитратов в мг/см^2 и нитрификационная способность почвы по слоям 0–20, 20–50 и 50–100 см);
4. фенологические данные наблюдений (дата возобновления вегетации; даты колошения и восковой спелости; суммы эффективных температур для межфазных периодов);
5. влажность почвы на дату возобновления вегетации по 10-см слоям до глубины 1 м, мм;
6. сроки и дозы внесения минеральных и органических удобрений;
7. метеорологические данные: среднесуточная температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$; среднесуточный дефицит влажности воздуха, мб; число часов солнечного сияния за сутки, час; суточная сумма осадков, мм.

Выходные данные: запасы влаги в почве (по слоям 0–20, 0–50 и 0–100 см), фактическое и потенциальное испарение, дефицит испарения, биометрические показатели посева — площадь листьев, биомасса и высота растений, а также масса растений по органам и урожайность сельскохозяйственной культуры, и др.

Компоненты и режимы работы имитационной системы КПУ

Имитационная система КПУ включает следующие компоненты:

- 1) программная реализация динамической модели продуктивности агроэкосистем «Погода-Урожай»;
- 2) база данных, включающая гидрометеорологическую информацию более чем за столетний период, данные сценариев изменения климата, данные о физических и химических свойствах почвы, агроклиматические параметры (фенологические даты, запасы влаги в почве и др.);
- 3) программы «развертки» и/или детализации сценариев климата будущего;
- 4) средства визуализации входных данных и результатов моделирования.

Система КПУ может функционировать в трёх режимах: *ретроспективном* — по фактическим данным наблюдений с начала 50-х годов XX века до настоящего времени, *оперативном* — по ежедекадным данным и *прогностическом* — по ансамблю средне- и долгосрочных сценариев ожидаемых изменений климата.

Разработана и реализована стохастическая модель генерации временных рядов (по методу Монте-Карло) суточных данных по их среднемесячным значениям с учётом авто- и кросскорреляционных связей между ними. Годовой ход метеорологических величин аппроксимируется тригонометрическим полиномом вида:

$$\varphi(\tau) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \left[A_k \cos\left(\frac{2\pi k}{365} \tau\right) + B_k \sin\left(\frac{2\pi k}{365} \tau\right) \right],$$

где $\tau=0, 1, 2, \dots, 364$ — порядковый номер суток, A_0, A_k, B_k — коэффициенты, рассчитываемые на основании среднемесячных значений метеорологических величин.

Процедура распознавания дней с осадками построена на основе соотношения правдоподобия:

$$\lambda = \frac{1 + \frac{N_2}{N_2 + 1} (\bar{x} - x^{(2)})^* C^{-1} (\bar{x} - x^{(2)})}{1 + \frac{N_1}{N_1 + 1} (\bar{x} - x^{(1)})^* C^{-1} (\bar{x} - x^{(1)})},$$

где $\bar{x} (x_1, x_2, x_3)$ — вектор, компонентами которого являются температура воздуха (x_1), дефицит влажности воздуха (x_2), число часов солнечного сияния (x_3); N_1 и N_2 — число дней с осадками и без осадков; $x^{(1)}$ и $x^{(2)}$ — векторы средних значений

предикторов для дней с осадками и без осадков соответственно; C — корреляционная матрица вектора \bar{x} .

Отношение правдоподобия λ интерпретируется как мера выпадения осадков в данные сутки.

Калибровка и валидация системы КПУ

Для калибровки системы КПУ и проверки её адекватности, была выполнена идентификация параметров модели подбором параметров, обеспечивающих минимизацию целевой функции, следующего вида:

$$F(\alpha, r_c, a_r) = \sum_{j=1, N} (Y_m - Y_f)^2,$$

где Y_m — рассчитанная по модели «Погода-Урожай» и Y_f — фактическая урожайность (Росстат), N — длина ряда наблюдений.

Ниже представлены отдельные результаты валидации (проверки адекватности) имитационной системы КПУ (рис. 1 и 2).

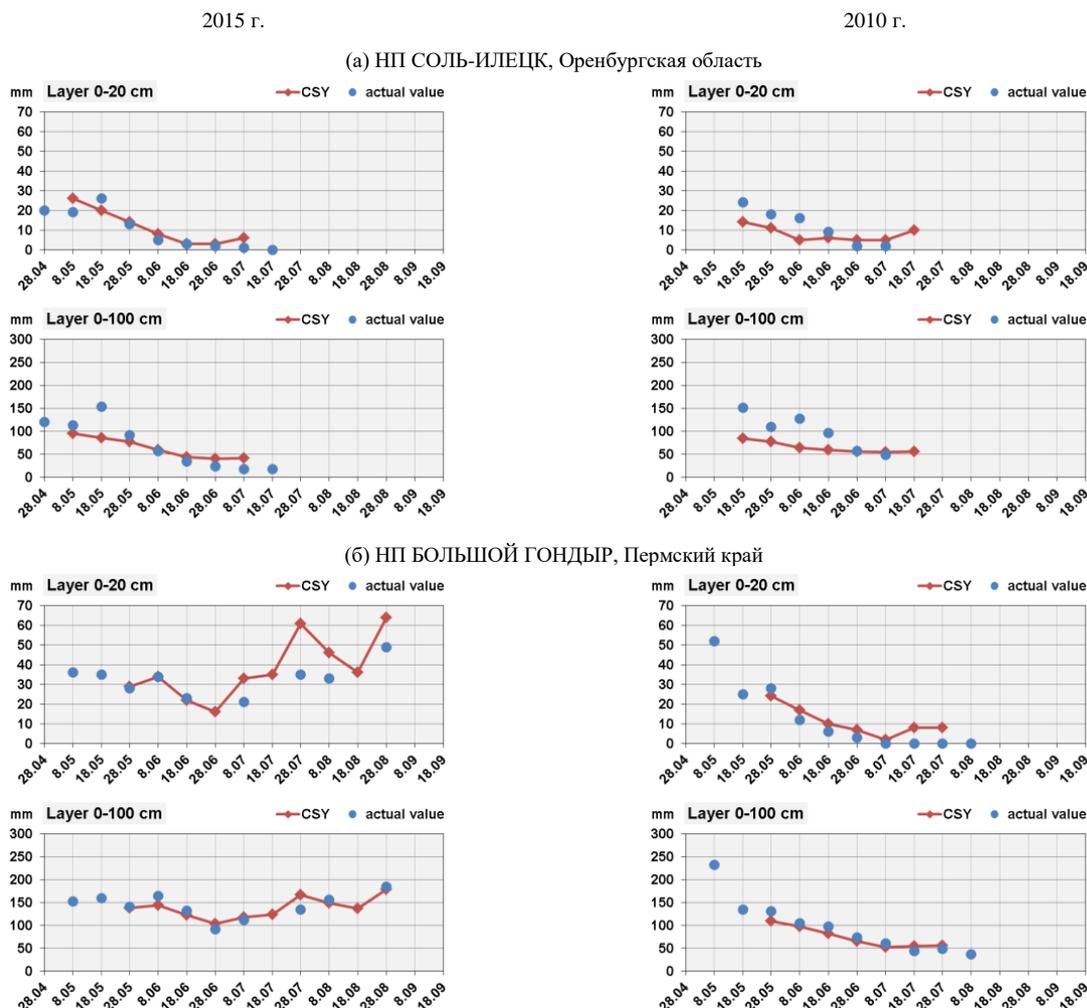


Рисунок 1. Запасы влаги в пахотном (0–20 см) и метровом (0–100 см) слоях почвы в 2015, 2010 гг. под яровой пшеницей: измеренные (синий цвет) и рассчитанные в имитационной системе КПУ (красный цвет)

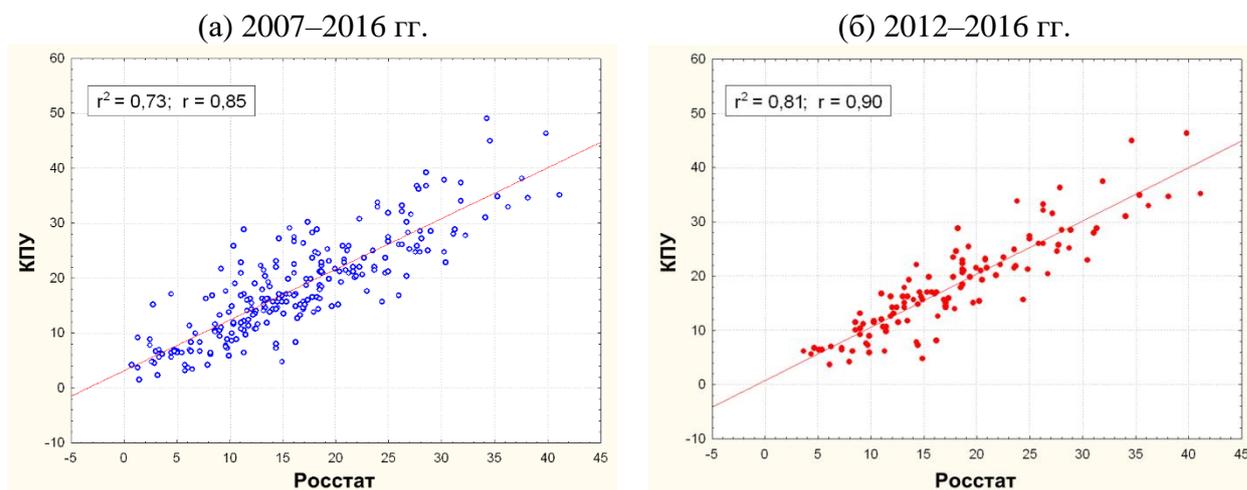


Рисунок 2. Фактическая (Росстат) и рассчитанная (КПУ) урожайность яровой пшеницы в Центральном (чернозёмные области), Приволжском и Южном ФО за периоды: а) 2007–2016 гг. и б) 2012–2016 гг.

Оценки наблюдаемых изменений тепло- и влагообеспеченности сельскохозяйственных культур и биоклиматического потенциала

Рассчитаны и проанализированы оценки трендов показателей теплообеспеченности и влагообеспеченности зерновых культур для земледельческой зоны России за период глобального потепления (1976–2017 гг.), последние двадцать лет (1998–2017 гг.) и базовый период (1961–1990 гг.).

Основные результаты. На ЕЧ России скорость роста основного агроклиматического показателя — суммы температуры воздуха за период с температурой выше 10 °С — за период глобального потепления изменяется от 100 °С/10 лет (Приволжский ФО) до 150 °С/10 лет (Южный ФО). В Сибирском и Дальневосточном ФО соответствующие оценки тренда не превышают 70 °С/10 лет. В среднем для территории России оценка линейной скорости роста сумм активных температур за этот период составляет ~90 °С/10 лет.

Анализ показателей влагообеспеченности показал, что преобладает положительная тенденция к росту весенних осадков практически на территории всей земледельческой зоны России. Тренды летних осадков отрицательны во всех ФО на территории Европейской части (ЕЧ) России, за исключением Северо-Западного ФО, и положительны на Азиатской части (АЧ) России: в Уральском, Сибирском и Дальневосточном ФО. Анализ расчётов показывает, что за последние двадцать лет на преобладающей части земледельческой зоны степень засушливости растёт во все сезоны, за исключением весны.

Тенденции запасов влаги в пахотном слое почвы весной носят разнонаправленный характер в разных природно-климатических зонах, но выделяются территории Северо-

Кавказского, Южного и Уральского ФО, где запасы влаги в почве в этот период растут. В среднем за вегетационный период на ЕЧ России наблюдаются тенденции к росту засушливости территории — более интенсивные в центральных областях, на востоке и юго-востоке и выраженные слабее на севере и юге (рис. 3).

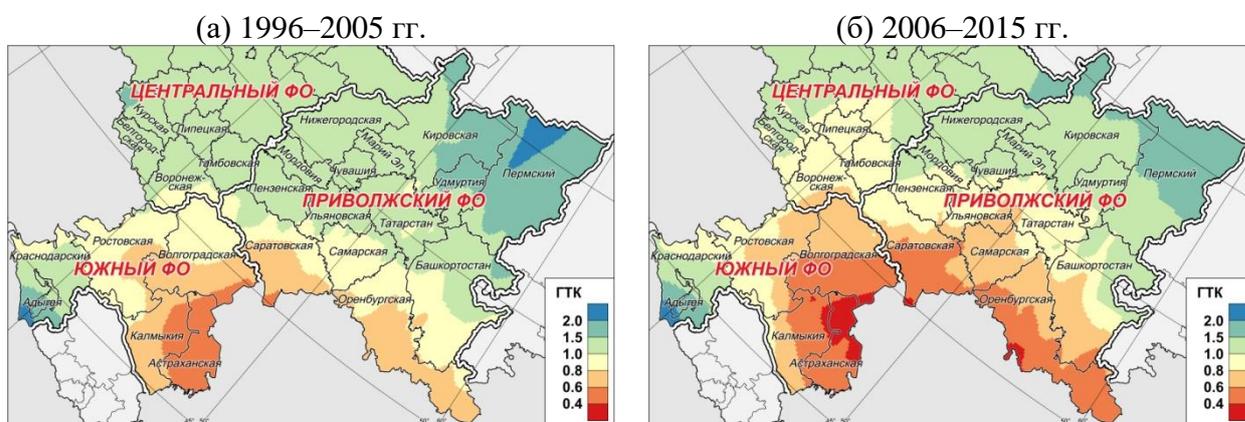


Рисунок 3. Средние значения ГТК за вегетационный период яровой пшеницы в Центральном, Приволжском и Южном ФО по данным за: (а) 1996–2005 гг. и (б) 2006–2015 гг.

Биоклиматический потенциал (БКП) в среднем в сельскохозяйственной зоне России за последние два десятилетия повысился в среднем на 4 % относительно базового периода (1961–1990 гг.). Снижение уровня БКП из-за роста степени засушливости отмечается в Южном и Северо-Кавказском ФО (~12 %). В одном из основных зерновых регионов, Приволжском ФО, БКП понизился на 8 %.

Пространственное распределение значений БКП за последнее 20-летие в основных зерновых регионах ЕЧ России представлено на рис. 4.

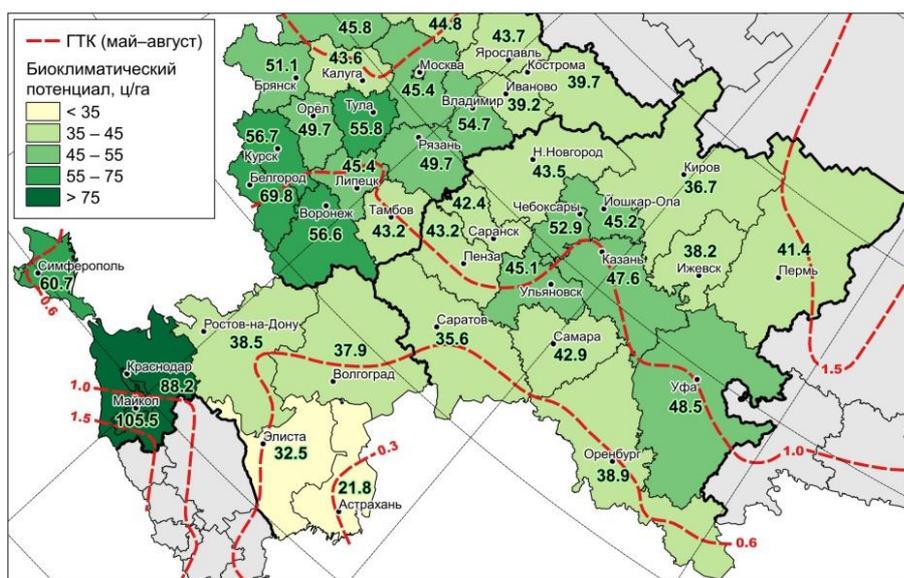


Рисунок 4. Средние значения БКП (ц/га) на территории Центрального, Приволжского и Южного ФО за период 1997–2016 гг.

Оценки трендов фактической и климатически обусловленной урожайности зерновых культур

Какое влияние оказывают наблюдаемые изменения агроклиматических ресурсов на продуктивность зерновых культур?

При анализе были использованы следующие данные:

- 1) ряды фактической урожайности основных зерновых культур (включают агротехнологическую и климатическую составляющую);
- 2) моделируемая расчетная урожайность с помощью системы КПУ (включает только климатическую составляющую).

Оценки трендов фактической урожайности основных зерновых культур

Анализ статистических характеристик рядов урожайности (табл. 1) основных зерновых культур: яровой пшеницы, ярового ячменя, озимой пшеницы, зерновых и зернобобовых культур в целом за периоды 1976–2017 и 1998–2017 гг. показал:

Яровая пшеница. Согласно расчётам за период 1998–2017 гг. в регионах с большим яровым клином (Приволжском, Уральском и Сибирском ФО) наблюдаются положительные невысокие тренды — от 2,0 до 3,2 ц/га за 10 лет. Оценки трендов статистически значимы, а вклад линейного тренда в дисперсию урожайности составляет от 22 % в Приволжском ФО до 33 % в Сибирском ФО. Максимальные положительные тренды урожайности яровой пшеницы наблюдаются в Центральном, Северо-Западном и Южном ФО — от 6,5 до 7,9 ц/га за 10 лет. Доля дисперсии, объясняемая трендом, для этих ФО достаточно высока и составляет от 51 до 77 %.

Озимая пшеница. Наблюдается положительный тренд урожайности озимой пшеницы и озимой ржи в основных регионах их возделывания (Южном, Приволжском ФО и в чернозёмных областях Центрального ФО) и за весь период глобального потепления (с 1976 г.), и за более короткий период (с 1998 г.) (табл. 1). По расчётам за период 1998–2017 гг. высокие оценки скорости роста отмечаются на территории Центрального и Южного ФО и составляют 8,2 и 7,7 ц/га/10 лет. Вклад линейного тренда в общую дисперсию урожайности здесь также высокий и составляет 66 и 49 % соответственно.

Оценки трендов климатически обусловленной урожайности основных зерновых культур

Представлены основные результаты расчётов климатически обусловленной урожайности зерновых культур и анализа её трендов.

Период 1998–2017 гг.

Тренды климатически обусловленной урожайности озимой и яровой пшеницы, как показывают расчёты в системе КПУ, отрицательны в большинстве регионов ЦЧО, Приволжского и Южного ФО. Это свидетельствует об определенном ухудшении агроклиматических условий возделывания зерновых культур за последние двадцать лет. Максимальные отрицательные оценки трендов урожайности озимой и яровой пшеницы наблюдаются на юге Центрального и в Южном ФО, а также в юго-восточных областях Приволжского ФО (рис. 5).

Таблица 1. Статистические характеристики рядов урожайности яровой и озимой пшеницы за периоды 1998–2017 и 1976–2017 гг.

Федеральный округ	Период, гг.									
	1998–2017					1976–2017				
	<i>m</i> , ц/га	<i>σ</i> , ц/га	<i>V</i> , %	<i>b</i> , ц/га/10 лет	<i>D</i> , %	<i>m</i> , ц/га	<i>σ</i> , ц/га	<i>V</i> , %	<i>b</i> , ц/га/10 лет	<i>D</i> , %
яровая пшеница										
Северо-Западный	17,5	5,3	30	7,8*	77	14,7	4,9	33	2,7*	47
Центральный	18,0	5,9	33	7,9*	63	15,8	5,0	32	2,5*	38
Приволжский	14,1	4,0	28	3,2*	22	13,6	3,4	25	0,8	8
Южный	13,4	5,4	40	6,5*	51	11,8	4,6	39	1,8*	25
Сев.-Кавказский	20,0	6,1	30	8,6*	71	18,0	6,9	38	4,5*	31
Уральский	14,4	3,0	21	2,4*	23	13,7	3,0	22	0,5	5
Сибирский	13,9	2,1	15	2,0*	33	13,1	2,1	16	0,9*	26
Дальневосточный	13,3	3,5	26	4,4*	56	12,2	3,1	25	1,1	18
Россия	15,4	4,3	28	5,3*	51	13,5	4,2	31	1,9*	30
озимая пшеница										
Северо-Западный	22,6	7,7	34	11,2*	75	18,5	6,8	37	4,0*	50
Центральный	23,9	6,0	25	8,2*	66	20,7	5,8	28	3,3*	47
Приволжский	18,9	5,3	28	3,1	12	18,1	5,2	29	1,2	8
Южный	27,5	6,5	24	7,7*	49	25,4	5,8	23	2,1	20
Сев.-Кавказский	28,1	5,2	19	6,9*	61	26,9	4,9	18	1,7	18
Уральский	16,1	4,6	29	3,6*	21	15,5	4,6	29	0,8	5
Сибирский	17,2	4,8	28	3,8*	21	16,6	4,7	29	0,5	2
Дальневосточный	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Россия	21,7	5,7	27	6,3	44	20,0	5,3	28	1,9	21
Примечание: * — 5 % уровень значимости; <i>m</i> — средняя урожайность, ц/га; <i>σ</i> — среднее квадратическое отклонение, ц/га; <i>V</i> — коэффициент вариации, %; <i>b</i> — коэффициент линейного тренда, ц/га/10 лет; <i>D</i> — доля дисперсии, обусловленная трендом, %.										

Согласно официальной статистике (Росстат), в исследуемом регионе с 1996 г. по 2010 г. площадь, занятая озимой пшеницей, увеличилась с 6 до 10 млн га и уменьшилась с 6 до 4 млн га под яровой пшеницей. На этом фоне валовый сбор озимой пшеницы увеличился примерно с 10 до 20 млн т, а валовой сбор яровой пшеницы снизился с 9 до 6 млн т. Рассчитанные значения климатически обусловленной урожайности выявляют тот факт, что без технологических достижений и других улучшений производственной практики валовый сбор озимой пшеницы оставался бы примерно постоянным в течение 1998–2017 гг., несмотря на значительное расширение обрабатываемой площади. Что касается яровой пшеницы, то предполагаемое сокращение валового сбора могло бы быть ещё более существенным.

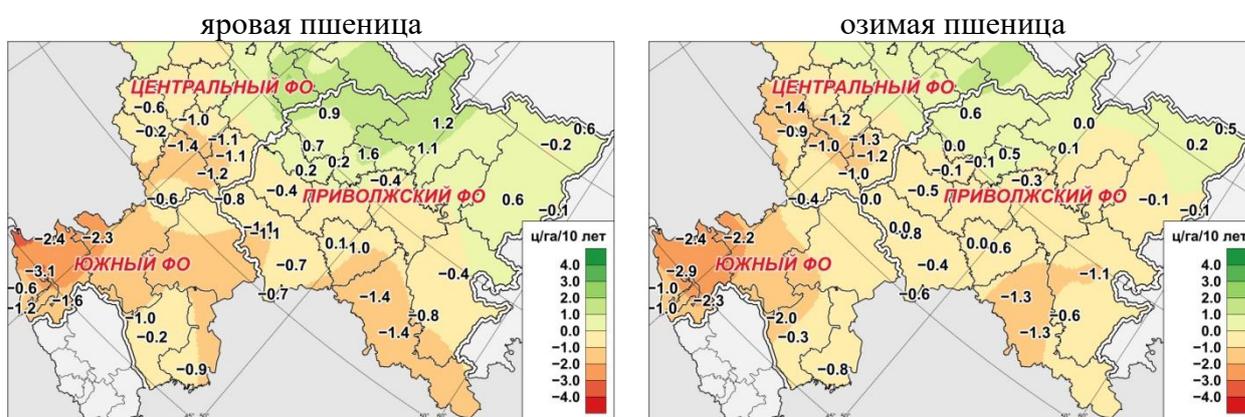


Рисунок 5. Пространственное распределение линейных трендов рядов климатически обусловленной урожайности яровой и озимой пшеницы по данным за период 1998–2017 гг. (в ц/га/10 лет)

Для выявления взаимосвязи трендов агроклиматических показателей и трендов климатически обусловленной урожайности были использованы оценки трендов климатически обусловленной урожайности в отдельных регионах и соответствующие им тренды инструментально наблюдаемых гидрометеорологических параметров.

Построены уравнения множественной регрессии, описывающие тренды климатически обусловленной урожайности яровой и озимой пшеницы в зависимости от трендов агроклиматических показателей для каждого из четырёх вышеназванных регионов. Доля дисперсии, объясняющей тренд урожайности уравнением множественной регрессии, достаточно высокая и составляет 75–78 % ($R^2=0,75-0,78$).

Как показали выполненные расчёты, можно констатировать, что на юге Приволжского ФО основной вклад в тренд климатически обусловленной урожайности яровой пшеницы вносят тренды температуры июня τ_{T_6} (нормированная оценка $\beta = -0,58$)

и осадки вегетационного периода $\tau_{R_{VEG}}$ ($\beta = 0,46$). В то же время, в Южном ФО на тренды климатически обусловленной урожайности озимой пшеницы значимо влияют тренды температуры мая τ_{T_5} ($\beta = -0,50$) и влажность почвы на дату возобновления вегетации весной $\tau_{W_{100}}$ ($\beta = 0,30$).

Таким образом, есть основание утверждать, что положительные тренды фактической урожайности за последние два десятилетия в значительной степени обусловлены адаптацией систем землепользования к изменению климата (использование засухоустойчивых сортов, средств защиты, минеральных удобрений, применение влагосберегающих технологий и др.) и выведением из оборота непродуктивных земель, а не улучшением агроклиматических условий за этот период.

Климатические риски

Разработан метод оценки уязвимости *территорий и климатических рисков при возделывании сельскохозяйственных культур* (Павлова, Варчева, 2017).

На рис. 6 представлено пространственное распределение оценок рисков недобора урожая яровой и озимой пшеницы, рассчитанных для субъектов РФ (республик, краев, областей), имеющих посевные площади под зерновыми и зернобобовыми культурами не менее 200 тыс. га.

На ЕЧ России зона высоких рисков неурожая яровой пшеницы охватывает бóльшую территорию, чем для озимой пшеницы. Анализ оценок климатических рисков позволяет выделить территории, благоприятные для выращивания как яровой так и озимой пшеницы. Это Орловская, Тульская и Курская области (Центральный ФО); Кировская и Нижегородская области, Республики Удмуртия и Чувашия (Приволжский ФО). По мере продвижения к югу риски недобора урожая возрастают из-за увеличения повторяемости засух.

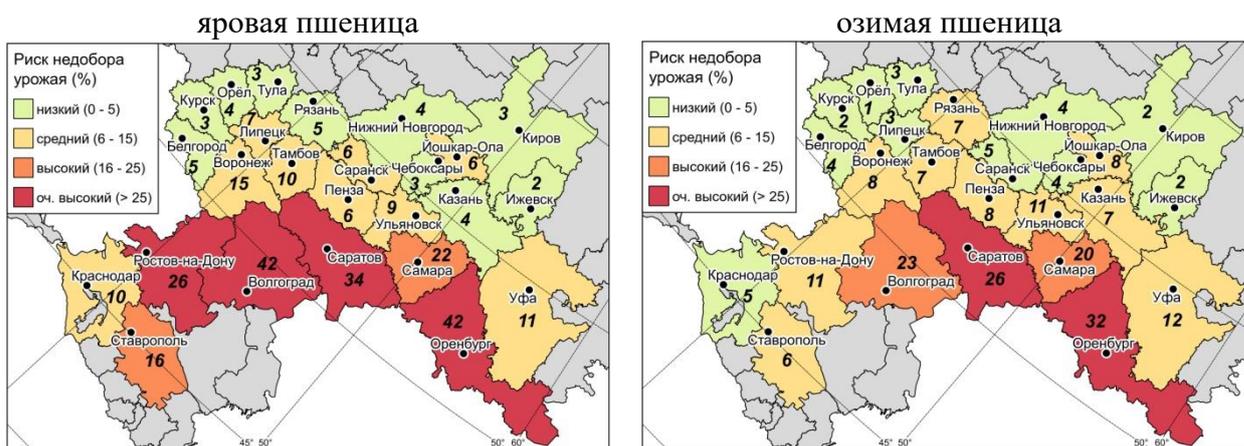


Рисунок 6. Картограмма распределения климатических рисков недобора урожая яровой и озимой пшеницы (по данным за 1994–2013 гг.)

Анализ оценок ущерба от неблагоприятных гидрометеорологических явлений

Важным показателем устойчивости производства является не только её средняя урожайность, но и её межгодовая изменчивость. Сравнительный анализ числа лет с крупными потерями климатически обусловленной урожайности показал, что число неурожайных лет за период 1995–2014 гг. выросло по сравнению с 1961–1980 гг. (табл. 2). В целом за последние двадцать лет практически на всей исследуемой территории (22 субъекта ЕЧ России с посевной площадью яровой пшеницы более 200 тыс. га) частота или вероятность неурожайных лет с потерями выше 40 % осталась либо практически без изменений, либо увеличилась (табл. 2).

Выполнена сравнительная оценка интенсивности засух и ущерба от них выбраны годы с локальными минимумами урожайности, начиная с 1951 г. по 2013 г. (табл. 3).

Таблица 2. Относительные посевные площади яровой пшеницы и число случаев со значительным недобором зерна (N_{cr}) по грациям потерь за периоды 1961–1980 и 1995–2014 гг.

Область, республика	Относительная посевная площадь S_{95-14}/S_{61-80} , %	Число неурожайных лет (N_{cr}) за период			
		1961–1980 гг.		1995–2014 гг.	
		градации потерь урожайности			
		20–40 %	>40 %	20–40 %	>40 %
Оренбургская	53	3	2	2	6
Башкортостан	52	1	1	3	2
Татарстан	67	3	2	3	2
Саратовская	24	3	2	4	4
Самарская	27	4	2	1	5
Пензенская	36	4	1	4	2

Таблица 3. Оценки потерь урожайности яровой пшеницы в засушливые годы в % относительно 2008 г.

Федеральный округ	Годы								
	1951	1972	1975	1981	1995	1998	2010	2012	2013
Северо-Западный	1	-40	2	-24	-10	-14	-36	-7	-21
Центральный	-16	-46	-36	-53	-26	-34	-51	-20	-35
Приволжский	-22	-36	-44	-58	-29	-60	-62	-28	-39
Южный	-18	-52	-49	-60	-30	-43	-55	-55	-62
ЕЧ России	-14	-43	-32	-49	-24	-38	-53	-26	-38

Система ежегодного агроклиматического мониторинга

Разработана система мониторинга тенденций изменения, изменчивости и экстремальности агроклиматических показателей тепло- и влагообеспеченности и продуктивности зерновых по субъектам в земледельческой зоне России с 1976 г.

Результаты мониторинга агроклиматических условий формирования урожайности зерновых культур, полученные для территории основных зерновых регионов ЕЧ России за период с 1 мая по 20 июля в 2018 и 2019 году (рис. 7) (Доклад об особенностях климата ..., 2018, 2019).

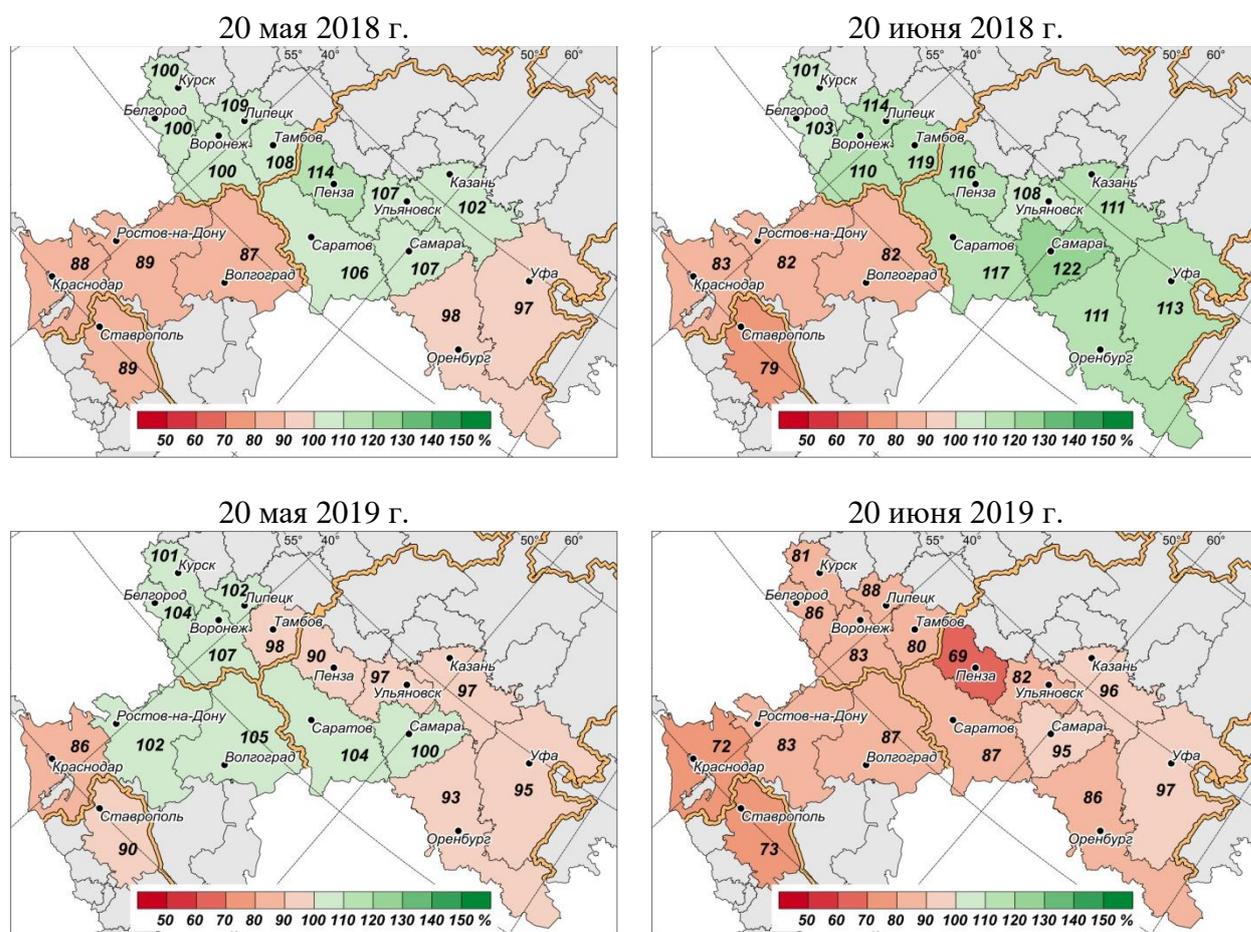


Рисунок 7. Оценки (%) ожидаемой урожайности озимой пшеницы в 2018 и 2019 гг. относительно среднего за предшествующие пять лет на 20 мая и 20 июня

Оценка влияния изменений климата на агроклиматические ресурсы и продуктивность сельскохозяйственных культур в XXI веке

В качестве исходных данных для расчётов в системе КПУ использовались результаты моделирования климата на основе МОЦАО из проектов сравнения климатических моделей CMIP3 (Meehl et al., 2007) и CMIP5 (Taylor et al., 2012) — **GFDL CM3** (US, Princeton, Geographical Dynamics Laboratory), **HAD CM3** (UK, Hadley Atmospheric Model) и **ANS 31** (ансамблевый сценарий, полученный усреднением результатов моделирования по 31 МОЦАО, ГГО им. А. И. Воейкова). Рассматривались четыре временных среза: 2011–2030 (S2), 2034–2053 (S3, RCP4.5) или 2028–2047 (S3, RCP8.5), 2041–2060 (S4), 2080–2099 гг. (S5). Также рассматривался сценарий, построенный на основе статистического анализа наблюдаемых тенденций параметров климатической системы (Ранькова, 2012).

Рассчитаны оценки прогнозируемых изменений условий теплообеспеченности сельскохозяйственных культур по основным агроклиматическим показателям. Оценки продуктивности зерновых и БКП территорий при ожидаемых изменениях климата, получены с использованием системы КПУ.

Полученные результаты позволяют утверждать:

1) Глобальное потепление по сценариям ANS 31, GFDL и HAD CM3 при умеренном антропогенном воздействии (RCP4.5) вызовет практически повсеместно рост БКП (10–12 %) всей территории России (табл. 4), за исключением Приволжского ФО, где в начале и середине столетия величина БКП может понизиться на 8–10 %. На достаточно увлажнённых территориях Дальневосточного и Северо-Западного ФО рост БКП будет ещё более значительным — от 25 до 40 %. Для земель с высоким уровнем плодородия в Южном ФО оценки роста БКП положительны: 5,8 % (ANS 31), 28,4 % (GFDL CM3) и 11,8 % (HAD CM3).

Таблица 4. Изменения БКП и урожайности зерновых культур в XXI веке по климатическим сценариям на территории России (сценарии эмиссии RCP4.5 и RCP8.5) (Второй оценочный доклад ..., 2014)

Сценарий изменения климата	Изменения, %							
	RCP4.5				RCP8.5			
	S2	S3	S4	S5	S2	S3	S4	S5
биоклиматический потенциал								
ANS 31	8,2	12,3	15,6	25,1	7,7	11,1	10,5	–0,8
GFDL CM3	7,3	10,2	9,0	23,9	3,9	7,2	3,4	–6,6
HAD CM3	10,4	11,0	15,0	15,1	16,9	22,7	24,0	–4,2
урожайность зерновых культур								
ANS 31	3,6	3,0	4,4	8,5	2,2	1,1	–2,4	–17,6
GFDL CM3	3,8	3,4	–0,2	12,0	–0,9	–4,5	–8,4	–16,4
HAD CM3	6,0	–1,1	1,1	–1,7	5,7	4,3	9,2	–19,7

2) Возможные негативные последствия: снижение урожайности зерновых культур в центрально-чернозёмных и степных районах земледельческой зоны из-за роста степени засушливости климата и ускорения наступления фазы созревания, вызванное повышенным температурным фоном вегетационного периода. Ожидаемое снижение продуктивности зерновых к концу столетия может достигнуть величины 16–20 % по сценариям ANS 31, GFDL и HAD CM3 (RCP8.5) (табл. 4).

Ожидаемые изменения продуктивности зерновых культур — расчёты в имитационной системе КПУ на основе прогнозируемых оценок региональной климатической модели (РКМ) (Pavlova et al., 2019)

Полученные результаты указывают на усиление в XXI веке неблагоприятных погодно-климатических условий для выращивания зерновых. Основная причина этого — ожидаемый рост аридности климата на фоне роста температуры и прогнозируемого усиления дефицита влаги из-за тенденции к уменьшению, либо незначительному изменению осадков. К середине XXI века потепление на территории России может привести к снижению продуктивности зерновых культур на $10,3 \pm 3,2$ % по сравнению с базовым периодом (табл. 5). В тот же период наибольшие потери продуктивности могут составить $-15,8 \pm 5,1$ % в чернозёмных областях Центрального ФО, наименьшие ($-6,7 \pm 3,0$ %) — в Приволжском ФО. К концу века урожайность зерновых здесь может сократиться на треть при отсутствии адаптационных мер.

Таблица 5. Средние (из 50 реализаций РКМ) оценки изменения урожайности яровой пшеницы и соответствующие 95 % доверительные интервалы ($Y \pm \Delta Y$, %) на территории Центрального (чернозёмные области), Приволжского и Южного ФО

Федеральный округ	Среднее изменение по ансамблю, $Y \pm \Delta Y$, %		
	2030–2039 гг.	2050–2059 гг.	2090–2099 гг.
Центральный	$-11,7 \pm 3,0$	$-15,8 \pm 5,1$	$-32,9 \pm 3,4$
Приволжский	$-5,7 \pm 2,4$	$-6,7 \pm 3,0$	$-21,5 \pm 3,1$
Южный	$-9,9 \pm 2,3$	$-8,2 \pm 3,0$	$-2,6 \pm 3,4$
Вся территория	$-9,1 \pm 2,3$	$-10,3 \pm 3,2$	$-18,9 \pm 2,8$

В результате выполненных исследований:

1. Разработана имитационная система «Климат-Почва-Урожай» на основе современного поколения динамических моделей продукционного процесса, позволяющая получать комплекс климатических и агроклиматических показателей в земледельческой зоне России для разных масштабов пространственного разрешения (федеральный округ,

регион, муниципальный район) по данным инструментальных наблюдений за климатом, почвами и зерновыми культурами и данным климатических сценариев.

2. Получены комплексные оценки изменений агроклиматических условий и продуктивности зерновых культур в земледельческой зоне России на основе сценариев изменения климата: GFDL CM3 (US, Princeton, Geographical Dynamics Laboratory), HAD CM3 (UK, Hadley Atmospheric Model) и ANS 31 (ансамблевый сценарий ГГО) на начало, середину и конец XXI века по сценариям эмиссии парниковых газов RCP4.5 и RCP8.5.

3. Получены вероятностные оценки влияния изменений климата на продуктивность зерновых культур и агроклиматические ресурсы в XXI веке на основании прогноза региональной климатической модели. Проведённые численные эксперименты указывают на усиление в XXI веке неблагоприятных погодно-климатических условий для возделывания зерновых культур на фоне прогнозируемого роста засушливости климата. К середине XXI века можно ожидать снижение продуктивности зерновых культур на $10,3 \pm 3,2$ % по сравнению с базовым периодом. Использование ансамблей реализаций высокоразрешающей РКМ снижает неопределенность оценок отклика продуктивности зерновых культур на изменение климата.

4. Выявлена разнонаправленная тенденция изменений БКП и климатически обусловленной урожайности. Установлено отсутствие роста климатически обусловленной урожайности вследствие аридизации и роста напряженности термического режима в период вегетации зерновых культур в основных зерновых регионах ЕЧ России с 1998 г. по 2017 г. Рост БКП за этот период, обусловлен увеличением термических ресурсов и продолжительности вегетационного периода.

5. Разработан и реализован метод оценки климатических рисков при возделывании зерновых культур с учётом частоты неблагоприятных метеорологических явлений и степени уязвимости территории. Получены оценки средних по России климатических рисков недобора урожая яровой и озимой пшеницы, рассчитанные с учётом посевных площадей, составляют 12,5 и 10,6 % соответственно. Максимальные риски получения низких урожаев яровой пшеницы при засухах определены для Южного (37,9 %) и Приволжского (23,0 %) ФО.

6. Оценена эффективность адаптации производства зерновых культур к изменениям/колебаниям климата методом ежегодной корректировки посевных площадей по данным агрометеорологических прогнозов урожайности до сева, а также путём их пространственного перераспределения в многолетней перспективе. Приращение среднемноголетней валовой урожайности яровых зерновых за счёт ежегодной

корректировки посевных площадей может составлять в Приволжском и Центральном ФО — 5–9 % , в Северо-Западном ФО — 7–12 % и в Южном ФО — 6–16 %. Соответствующие оценки адаптационного потенциала для озимой пшеницы в Центральном, Приволжском и Южном ФО составляют от 4 до 6 %.

7. Разработана стохастическая модель генерации суточного хода метеорологических элементов с учётом кросскорреляционных связей между ними. Программная реализация модели преобразует агрегированные месячные погодные и климатические данные в детализированные суточные для агроклиматических расчётов с суточным шагом.

8. Ежегодные оценки тенденций изменения, изменчивости и экстремальности агроклиматических показателей тепло- и влагообеспеченности и продуктивности зерновых по субъектам в земледельческой зоне России с 1976 г. по настоящее время могут быть использованы для принятия решений на различных уровнях — от непосредственного производителя до органов управления АПК. Разработаны и программно реализованы алгоритмы для проведения ретроспективных, оперативных и сценарных расчётов значений моделируемой системы климатических и агроклиматических показателей.

9. Предложен метод оценки адаптационного потенциала зернового сектора к изменениям климата, детализированный по субъектам РФ и базирующийся на оценках последствий изменений климата в сельском хозяйстве с использованием имитационной системы «Климат-Почва-Урожай» и современных климатических сценариев.