

Оценка мелиоративных управляющих воздействий на продуктивность озимой пшеницы при изменении агроклиматических ресурсов (на примере Ростовской области)

В. Н. Павлова^{*}, ^{**}, О. В. Чернова^{***}, И. О. Алябина^{**},
В. А. Романенков^{**}, ^{****}, А. А. Караченкова^{*}

Представлены результаты реализации метода оценки эффективности водной мелиорации и режима питания растений в 17 районах Ростовской области при разных типах условий погоды. Впервые с использованием цифровой версии Почвенной карты РФ (1988 г.) определены преобладающий тип почв под посевами озимой пшеницы в границах района и соответствующие ему почвенные характеристики в качестве входных данных для системы “Климат — почва — урожай”. Оценки ресурсов обеспеченности продукционного процесса влагой и минеральным питанием за период 2010—2020 гг. составляют от 40 до 69% в Миллеровском районе и от 73 до 85% в Зерноградском районе. В годы с относительно малой величиной потенциального урожая наблюдается высокий уровень ресурсов минерального питания, вызванный снижением потребностей растений, поскольку радиационно-термические факторы становятся лимитирующими для достижения максимума биомассы и, следовательно, максимума поглощения растениями минеральных веществ. На фоне неблагоприятных условий погоды отмечается прибавка урожая при комплексной мелиорации.

Ключевые слова: агроклиматические ресурсы, урожайность озимой пшеницы, почвенная карта, изменение климата, имитационная система “Климат — почва — урожай”, адаптация.

DOI: 10.52002/0130-2906-2024-6-74-87

1. Введение

Реализация Национального плана мероприятий первого этапа адаптации к изменению климата подразумевает разработку планов на уровне субъектов Российской Федерации. Обязательным элементом планирования адаптационных мероприятий в агросфере на федеральном и региональном уровнях должны стать научно обоснованные текущие и перспективные оценки изменений климата, приводящих к изменению агроклиматических и почвенных ресурсов [8, 15]. Следующий шаг в этом направлении — разработка методических подходов к оценке адаптационного потенциала территорий.

^{*} *Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии; e-mail: vnr2003@bk.ru (Павлова Вера Николаевна).*

^{**} *Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова.*

^{***} *Институт проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова Российской академии наук.*

^{****} *Всероссийский научно-исследовательский институт агрохимии им. Д. Н. Прянишникова.*

Имитационная система “Климат — почва — урожай” (КПУ) позволяет оценивать продуктивность сельскохозяйственных культур в широком диапазоне почвенно-климатических условий, что делает возможным ее использование для выбора стратегии адаптации к изменению климата. Получены сравнительные оценки эффективности мер адаптации, включающие обеспечение достаточного уровня увлажненности и минерального питания для посевов яровой пшеницы по отдельным федеральным округам [5, 7]. В данной работе продолжены ранее начатые исследования.

Для сельскохозяйственной практики особенно актуальны оценки адаптационного потенциала отдельных районов в составе субъектов Российской Федерации (областей, краев, республик). Естественное требование к подобным оценкам — их достоверность, которая обеспечивается адекватностью применяемого аппарата, а также полнотой используемых данных наблюдений.

Цель данного исследования — разработать и реализовать на уровне отдельных административных районов методику оценки управляющих воздействий на посевы зерновых культур на основе многомерной системы оценок продуктивности сельскохозяйственных культур для ряда уровней интенсификации земледелия — от современного до высокоинтенсивного.

Поставленная задача решается на примере озимой пшеницы для территории Ростовской области с использованием имитационной системы КПУ. На первом этапе оцениваются тенденции изменений агроклиматических ресурсов на основе базовых параметров системы КПУ. На втором этапе формируется информационная база данных — метеорологических, агрометеорологических и почвенных характеристик для отдельных районов области. Далее, на третьем этапе, проводятся настройка (идентификация) параметров и верификация системы КПУ с использованием сформированной информационной базы данных на районном уровне. На последнем этапе дается оценка обеспеченности влагой и минеральным питанием (азотом) территории района и потенциальной прибавки урожайности при достаточном (нелимитированном) уровне обеспеченности ресурсами.

Акцентируется внимание на почвенных ресурсах области, для этого определяются преобладающий тип почв под посевами озимой пшеницы в границах района и соответствующие почвенные характеристики в качестве входных данных для системы КПУ.

2. Материалы и методы исследования

Имитационную систему КПУ, ориентированную на обслуживание сельского хозяйства России, начали разрабатывать в Институте сельскохозяйственной метеорологии (ВНИИСХМ) с 1980 г. [12]. Задачи, решаемые с использованием этой системы, включают оценку текущих агрометеорологических условий, мониторинг состояния зерновых культур в основных зернопроизводящих регионах, оценку ожидаемой урожайности и расчет биоклиматического потенциала [6, 9, 18].

Ядро системы КПУ — динамическая модель “Погода — урожай”, состоящая из трех взаимосвязанных субмоделей: роста и развития растений (динамики фитомассы отдельных органов растений, площади их поверхности), влагозапасов почвы (запасов почвенной влаги по 10-сантиметро-

вым почвенным слоям, потенциальной и реальной эвапотранспирации) и минерального питания растений (динамики минерального азота). Расчеты выполняются с суточным шагом по времени в течение всего вегетационного периода — от даты возобновления вегетации для озимых и от всходов для яровых зерновых культур.

Входные данные включают следующие сведения: географическую широту и долготу пункта; агрогидрологические свойства почвы (полную влагоемкость; влажность завядания по 10-сантиметровым слоям до глубины 1 м, мм; относительную влажность на нижней границе расчетного слоя почвы, %); агрохимические свойства почвы (содержание щелочногидролиземого азота и нитратов, мг/см², и нитрификационную способность почвы по слоям 0—20, 20—50 и 50—100 см); фенологические данные наблюдений (дату возобновления вегетации, даты колошения и восковой спелости), влажность почвы на дату возобновления вегетации по 10-сантиметровым слоям до глубины 1 м; сроки и дозы внесения минеральных и органических удобрений; метеорологические данные: температуру воздуха; дефицит влажности воздуха; число часов солнечного сияния; сумму осадков.

Из трех этапов жизнедеятельности озимой пшеницы (осень, зима, весна — лето) с суточным шагом моделируется только весенне-летний период от даты всходов весной до созревания культуры. Осенне-зимний период учитывается через параметры модели: задается начальная биомасса по органам растения на дату возобновления вегетации; рассчитываются запасы влаги в почве на дату возобновления вегетации с учетом метеорологических условий осенне-зимнего периода. Специфические параметры модели (по видам культур) для озимой пшеницы включают биологический ноль культуры, суммы температур по межфазным периодам, коэффициент перехода от репродуктивной массы органа к хозяйственному урожаю, а также константы для расчета биологических функций (ростовых, функций пожелтения, перераспределения ассимилянтов и др.).

Метеорологические данные. Используются ряды наблюдений за температурой воздуха и осадками в декадном и месячном разрешении на 17 наблюдательных пунктах Ростовской области за период с 1995 по 2020 г. (рис. 1). В среднем один наблюдательный пункт приходится на два-три района. Также используются осредненные по территории области среднемесячная температура воздуха и месячные суммы осадков с 1961 по 2020 г.

Урожайность и посевные площади. Главная зерновая культура в Ростовской области — озимая пшеница, обеспечивающая до 60—70% производимой в области валовой продукции зерна. По характеру сельскохозяйственного производства область подразделяется на шесть основных природно-сельскохозяйственных зон [14] (рис. 1): северо-западную — с развитым зернопроизводством; северо-восточную — скотоводческо-зерновую; центральную орошаемую — скотоводческо-овощеводческую с развитым виноградарством и рисосеянием; приазовскую — скотоводческо-зерновую; южную — зерно-скотоводческую с развитым свиноводством; восточную — овцеводческо-зерновую с развитым мясным скотоводством.

Для калибровки и верификации параметров системы КПУ использованы данные Росстата [3] об урожайности озимой пшеницы в районах Ростовской области за период 2009—2021 гг.



Рис. 1. Сеть наблюдательных пунктов Росгидромета (точки) по природно-сельскохозяйственным зонам Ростовской области.

Данные почвенного блока системы. Входной поток данных почвенного блока сформирован на основе фрагмента Почвенной карты РСФСР (1988 г.) [10] по территории Ростовской области, позволившей выделить преобладающий тип почвы в каждой расчетной точке (рисунок приведен на сайте журнала www.mig-journal.ru).

Почвенный покров в области разнообразен: представлен черноземами (~65%), каштановыми почвами, включая солонцеватые и солончаковатые (~13%), почвами пойм рек Дона, Маныча и их притоков (~9%), почвенными комплексами с участием солонцов, солонцеватых и засоленных разностей (~9%), а также песчаными почвами и песками (~3%) [10]. Черноземы и каштановые почвы давно повсеместно распаханы. Они обладают высоким естественным плодородием, но в результате нарушения агротехники, отсутствия ротации севооборотов везде наблюдаются истощение, снижение содержания гумуса, деградация структуры пахотных горизонтов [4].

Входные параметры почвенного блока модели содержат следующие характеристики: содержание легкогидролизуемого органического азота (HNG_i), возможная скорость минерализации (CN_i) и запасы гумуса (HN_i)

на начало вегетации по почвенным слоям (i): 0—20, 0—50 и 0—100 см. Алгоритм формирования входных параметров почвенного блока базировался на экспериментальных и литературных данных, а результатом его реализации явилась база данных усредненных параметров для территорий субъектов Российской Федерации [1]. Была опробована применимость системы КПУ для крупных регионов с учетом преобладающих почв, динамики почвенного плодородия и климатических изменений.

Корректировка входных данных почвенного блока модели для 17 наблюдательных пунктов проведена на основе базовых среднеобластных характеристик в соответствии с информацией Почвенной карты [10]. Динамика плодородия пахотных почв региона оценена на примере анализа большого массива данных почвенных и агрохимических обследований территорий Миллеровского и Зерноградского административных районов области. Почвенный покров данных районов типичен для соответствующих природно-сельскохозяйственных зон: в Миллеровском районе (северо-западная зона) основу пахотного фонда составляют южные и обыкновенные черноземы на желтых и красно-бурых структурных глинах и лесовидных суглинках; в Зерноградском районе (южная зона) преобладают мицелярно-карбонатные мощные и сверхмощные тяжелосуглинистые и глинистые черноземы. Тенденция изменения содержания и запасов гумуса в пахотных черноземах за последние десятилетия прослежена путем сравнения данных 1980—1990-х годов, полученных из отчетов почвенных обследований, проведенных НИИ ЮжГИПРОЗем в 1977—1995 гг., и информации, полученной при агрохимических обследованиях 2012—2017 гг.

Исследование динамики гумусированности пахотных черноземов Ростовской области выявило более интенсивное снижение содержания гумуса в пахотном слое почв по сравнению с нижележащими [17]. Это позволило ориентировочно оценить актуальные запасы гумуса для слоя 0—100 см на основании данных последнего тура агрохимических обследований пахотного горизонта почвы и архивных данных профильных обследований (табл. 1).

Агрогидрологические характеристики почвенных разрезов для всех 17 наблюдательных пунктов определяются по данным сети наблюдений агрогидрологических свойств почвы за длительный период (с начала наблюдений в 1950—1960-е годы до года их последнего определения) [11].

Из имеющегося набора отобраны почвенные разрезы, совпадающие по генезису и гранулометрическому составу с преобладающими почвами соответствующего района на цифровой версии Почвенной карты. Как показал анализ, различие в характеристиках разрезов одного типа почв не является существенным для определения полевой влагоемкости и влажности завядания как входных данных для системы КПУ. Может быть выбран любой разрез, представляющий почву соответствующего типа (подтипа) и гранулометрического состава. Например, для пункта Миллерово из четырех разрезов, датированных 1983 г., выбран разрез “чернозем южный легкоглинистый”, а для пункта Зерноград — разрез “чернозем предкавказский легкоглинистый”.

Влажность завядания ($W_{вз}$, мм) и полная полевая влагоемкость ($W_{пв}$, мм) по 10-сантиметровым почвенным слоям до глубины 1 м являются рас-

Таблица 1
**Запасы гумуса в пахотных черноземах Миллеровского
и Зерноградского районов**

Объекты обследований (годы)	Количество разрезов (площадок)	Среднее арифметическое ± ошибка среднего			
		Содержание гумуса в пахотном слое, %	Запасы гумуса, <i>т/га</i> , по слоям		
			0—20 <i>см</i>	0—50 <i>см</i>	0—100 <i>см</i>
Миллеровский район					
Разрезы (1980—1990)	36	4,5 ± 0,195	104 ± 3,3	237 ± 3,2	319 ± 3,6
Агрохимическое обследование (2012—2017)	2832	3,6 ± 0,016	76*	202**	284**
Зерноградский район					
Разрезы (1980—1990)	74	4,3 ± 0,052	88 ± 1,3	214 ± 1,7	363 ± 6,3
Агрохимическое обследование (2012—2017)	2563	4,2 ± 0,007	89*	215**	364**
<i>Примечание.</i> *Запасы гумуса рассчитаны с использованием педотрансферной функции для вычисления объемной массы горизонтов почв с параметрами уравнения для степных почв [17]; **запасы гумуса в почвах для глубины более 25 <i>см</i> рассчитаны с использованием усредненных данных обследований 1980—1990 гг.					

четными характеристиками и определяются по данным о максимальной гигроскопической влажности, плотности почвы и полной полевой влагоемкости (%) (максимальной водоудерживающей способности почвы) также по 10-сантиметровым слоям из таблицы ТСХ-5 [11].

Средства вычисления и картографирования. При вычислениях использованы программное обеспечение Intel Visual Fortran и пакет STATISTICA. Картограммы построены с использованием пакета QGIS.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Настройка и проверка адекватности системы КПУ по районам области

Калибровка и верификация системы КПУ выполнены по данным о среднеобластной и среднерайонной урожайности озимой пшеницы.

К сожалению, данные о средней урожайности по районам представляют крайне разнородную временную и пространственную информацию. Максимальная длина непрерывного ряда урожайности озимой пшеницы для 17 рассматриваемых районов, имеющаяся в свободном доступе, составляет 13 лет — с 2009 по 2021 г.

Урожайность за этот период увеличивалась достаточно высокими темпами — коэффициент линейного тренда в среднем составил 1,2—1,3 *ц/га* за год. За 2009—2021 гг. диапазон изменения скорости роста по районам составляет от 0,8 *ц/га* в Чертковском районе до 2,1 *ц/га* в Мартыновском районе. В 14 районах из 17 (82% случаев) коэффициенты линейного тренда статистически значимы на 1—5%-ном уровне. Средняя урожайность за

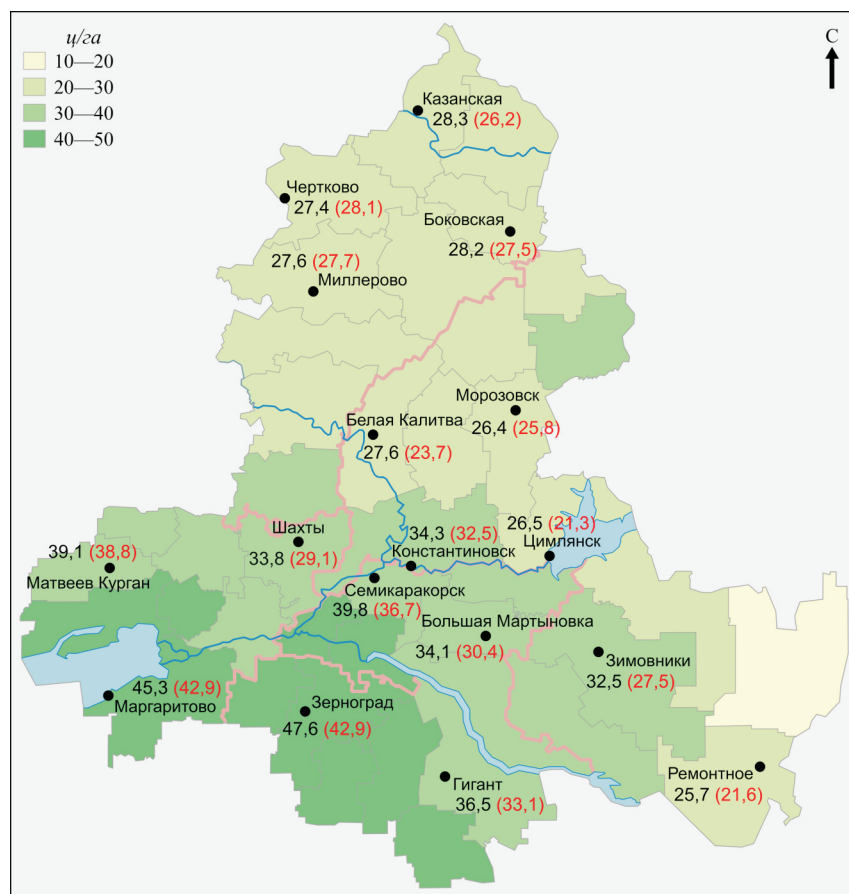


Рис. 2. Урожайность озимой пшеницы по данным Росстата и моделируемая урожайность (КПУ) (в скобках) по районам Ростовской области, осредненная за период 2013—2018 гг.

последние 5 лет (2017—2021 гг.) по районам Ростовской области колеблется в диапазоне от 29,5 ц/га в Ремонтненском районе (восточная зона) до 48,0 ц/га в Зерноградском районе (южная зона).

Для калибровки и настройки параметров модели на средний агротехнический уровень рассматриваемого периода использован ряд урожайности с 2013 по 2018 г., включающий годы с максимальной (2017 г.) и минимальной (2013 г.) урожайностью.

Результаты калибровки. На картосхеме (рис. 2) представлены средние значения урожайности озимой пшеницы по данным Росстата для 43 районов за период 2013—2018 гг., а также моделируемой урожайности для 17 районов за этот же период (значения выделены красным цветом). Схема включает границы природно-сельскохозяйственных зон и станции сети наблюдений Гидрометслужбы.

Пространственное распределение фактической урожайности озимой пшеницы (по данным Росстата) и моделируемой в системе КПУ в определенной степени соответствует границам природно-сельскохозяйственных зон и агроклиматическим условиям регионов. Прослеживается широтная

граница между северными и южными районами (примерно по 50° с. ш.). Севернее данной границы средняя урожайность изменяется в диапазоне от 25 до 30 ц/га, южнее находится полоса с урожайностью от 30 до 35 ц/га. В самых южных районах, в приазовской низменности, урожайность достигает 45—48 ц/га. В крайних юго-восточных районах урожаи не превышают 20 ц/га, что обусловлено жарким и очень сухим климатом и низкоплодородными почвами. За теплый период здесь выпадает всего 200—250 мм осадков.

Согласно агроклиматическому районированию [2], северные районы находятся в более неблагоприятных почвенно-климатических условиях, чем южные и юго-западные. По оценкам авторов, только изменением ресурсов тепла и влаги нельзя объяснить наблюдаемое различие в уровнях урожайности северных и южных районов области. Вероятно, что и на севере и северо-западе области могут быть созданы агротехнологические условия для более полной реализации биологического потенциала сортов озимой пшеницы.

Самая высокая урожайность озимой пшеницы в среднем за 2013—2018 гг. (47,6 ц/га — Росстат, 42,9 ц/га — КПУ) и самые большие посевные площади (более 130 тыс. га) отмечаются в зерноградском районе, расположенном в южной природно-сельскохозяйственной зоне. В южной и приазовской зонах исторически сформировался высокий агротехнический уровень производства озимой пшеницы. Ее возделывание ведется на основе современных интенсивных агротехнологий, обеспечивающих достаточное минеральное питание растений и их защиту от вредителей и болезней, соблюдение сроков сева и уборки, сортосмену и качественный семенной материал, применение влагосберегающих технологий и других мер, позволяющих поддерживать высокий уровень почвенного плодородия.

Результаты верификации. На рис. 3 представлены результаты верификации модели в четырех районах: Миллеровском (северо-западная зона), Ремонтненском (восточная зона), Зерноградском (южная зона) и Матвеево-Курганском (приазовская зона) за период 2009—2021 гг. Коэффициент корреляции между фактической и рассчитанной урожайностью составляет от 0,77 (Миллеровский район) до 0,55 (Зерноградский район). Относительная ошибка расчета средней урожайности за 2009—2021 гг. для четырех перечисленных районов составляет от 4,5 до 8,0%.

Отметим, что коэффициент корреляции фактической и моделируемой урожайности для всех 17 районов превышает 95%-ный порог статистической значимости, достигает максимальной величины $r = 0,80—0,82$ и не опускается ниже значений $r = 0,55—0,60$.

Учитывая, что модель продукционного процесса озимой пшеницы в КПУ не включает блока перезимовки и отсутствуют данные о ежегодных дозах и сроках внесения минеральных и органических удобрений, повреждении посевов вредителями и болезнями и др., следует признать полученный результат достаточно хорошим.

3.2. Результаты агроклиматического мониторинга

Обратимся к результатам агроклиматического мониторинга вегетационного периода озимой пшеницы в 2013—2018 гг. В табл. 2 представлены некоторые показатели тепло- и влагообеспеченности в 2013—2018 гг. в

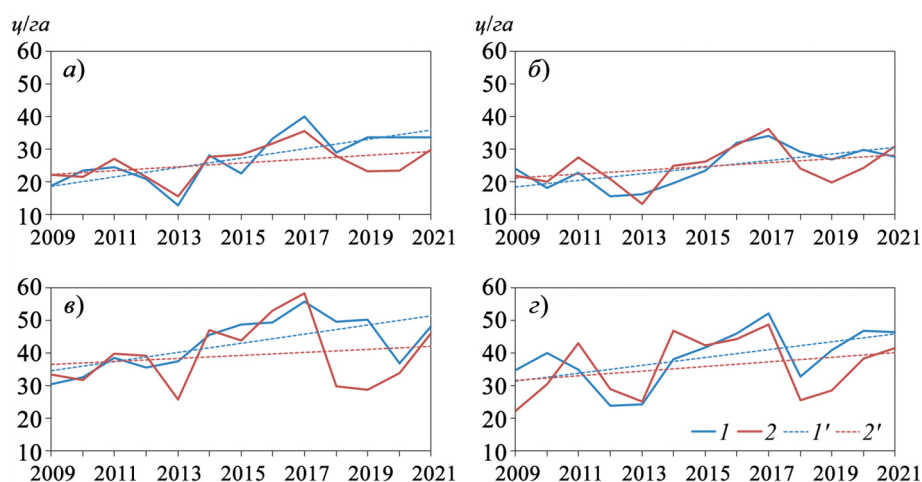


Рис. 3. Изменения фактической (1) и рассчитанной (2) урожайности озимой пшеницы за период 2009—2021 гг. в четырех районах: а) Миллеровском, б) Ремонтненском, в) Зерноградском, з) Матвеево-Курганском.

1, 2 — соответствующий линейный тренд: а) коэффициенты линейного тренда $b_1 = 1,4$ ц/га, $b_2 = 0,6$ ц/га, коэффициент корреляции (5%-ный уровень значимости) $r^* = 0,77$; б) $b_1 = 1,0$ ц/га, $b_2 = 0,6$ ц/га, $r^* = 0,74$; в) $b_1 = 1,4$ ц/га, $b_2 = 0,5$ ц/га, $r^* = 0,55$; з) $b_1 = 1,2$ ц/га, $b_2 = 0,7$ ц/га, $r^* = 0,67$.

Миллеровском (северо-западная зона) и Зерноградском (южная зона) районах. Выделяются два контрастных года по степени благоприятности для продукционного процесса озимой пшеницы — неурожайный 2013 г. и урожайный 2017 г.

Данные агроклиматического мониторинга показывают, что в Миллеровском районе в 2013 г. на фоне значительного дефицита влаги, когда за весь вегетационный период выпало лишь 94 мм осадков, и высокой температуры вегетационного периода сложились крайне неблагоприятные засушливые условия для роста и развития озимой пшеницы. Коэффициент увлажнения, рассчитанный как отношение испарения к испаряемости, составил 0,32, что свидетельствует о значительном дефиците влаги. Величина моделируемой урожайности составила 15,5 ц/га, или 55,7% от среднего за 2013—2018 гг. В Зерноградском районе 2013 г. также был неурожайным, а потери урожайности составили ~40% относительно среднего уровня за этот период.

В 2017 г. температура вегетационного периода в этих районах составляла 13,8 и 13,4°C, т. е. значительно ниже среднего за 2013—2017 гг. — на 1,5°C. Как следствие, вегетационный период длился примерно 120 дней, что является максимальной величиной за рассматриваемый период (для сравнения в 2013 г. — 90—97 дней). Количество выпавших осадков за вегетацию составило 218 и 245 мм, а коэффициент увлажнения — 0,58 и 0,61 в Миллеровском и Зерноградском районах соответственно, что в данных климатических условиях характеризует достаточный уровень влагообеспеченности.

Моделирование с помощью системы КПУ воспроизводит значительные различия вычисленных и фактических урожаев в контрастные по агрометеорологическим условиям годы.

Таблица 2

Показатели агроклиматических ресурсов вегетационного периода озимой пшеницы в 2013—2018 гг. в Миллеровском и Зерноградском районах (расчеты в системе КПУ)

Год	Y_m , ц/га	D_{beg}	D_{end}	N , сут	T , °С	R , мм	РЕТ, мм	E/E_0
Миллерово								
2013	15,5	1 IV	29 VI	90	17,5	94	123	0,32
2014	27,6	30 III	7 VII	100	16,0	140	194	0,46
2015	28,3	29 III	10 VII	104	15,6	248	255	0,61
2016	31,7	21 III	6 VII	108	15,1	190	223	0,51
2017	35,4	19 III	12 VII	116	13,8	218	260	0,58
2018	27,8	5 IV	6 VII	93	17,4	149	204	0,47
Зерноград								
2013	25,8	23 III	27 VI	97	16,1	115	166	0,39
2014	46,9	18 III	6 VII	111	14,6	191	261	0,55
2015	43,8	20 III	9 VII	112	14,6	297	307	0,67
2016	52,9	13 III	5 VII	115	14,4	234	273	0,56
2017	58,2	12 III	11 VII	122	13,4	245	304	0,61
2018	29,8	28 III	4 VII	99	16,1	52	145	0,33

Примечание. Y_m — моделируемая урожайность; D_{beg} — дата всходов; D_{end} — дата восковой спелости; N — продолжительность вегетационного периода; T — средняя температура воздуха за вегетационный период; R — сумма осадков за вегетационный период; РЕТ — потенциальная эвапотранспирация; E и E_0 — испарение и испаряемость, мм.

При оценке результатов моделирования следует иметь в виду, что модель не может отразить все многообразие факторов формирования урожая реального посева. В отдельные годы ошибка расчета может быть большой (>30%). Не учитываются влияние болезней и вредителей, повреждения растений в результате таких опасных явлений, как вымерзание, заморозки, полегание посевов и др. Но для решения поставленной задачи (не задачи прогноза) система КПУ обеспечивает достаточную точность расчетов. Наличие локальных почвенных, агрогидрологических характеристик, наряду с метеорологической информацией и данными о фактической урожайности, информацией об основных агротехнических показателях (удобрения, сроки сева, сорта), позволяет настроить систему КПУ на реальные условия возделывания культуры.

3.3. Оценка эффективности водной и химической мелиорации почв

Динамическая модель продукционного процесса сельскохозяйственных культур, являющаяся ядром системы КПУ, включает развитые водный и азотный блоки [1]. Процессы переноса влаги и минерального азота, а также их связь с процессами роста и развития растений позволяют моделировать уровни обеспеченности влагой и элементами минерального питания на любом отрезке вегетационного периода. Одним из случаев такого моде-

лирования внешних условий может быть задание оптимальной обеспеченности этими ресурсами или их сочетаниями. Под нелимитированной обеспеченностью понимается такой ее уровень, при котором физиологические процессы в растениях не ограничиваются данными факторами. В реальных условиях полученные результаты следует рассматривать как оценку потенциального воздействия рассматриваемых факторов на продуктивность.

Рассмотрены следующие уровни урожайности: моделируемая урожайность при реальной обеспеченности влагой и минеральным питанием (Y_m); урожайность при достаточном минеральном (азотном) питании (Y_N); урожайность при достаточном увлажнении почвы (Y_W); урожайность при достаточном минеральном питании и увлажнении почвы (Y_{NW}). Очевидно, что наибольшее значение среди этого ряда урожаев имеет Y_{NW} , так как снимается ограничение двух главных лимитирующих факторов внешней среды, при этом уровень урожайности определяется воздействием радиационно-термических факторов.

Для оценки ресурсов влаги и минерального питания введем следующие оценочные коэффициенты [13]:

$$O_N = (Y_m/Y_N) \quad 100\%, \quad (1)$$

$$O_W = (Y_m/Y_W) \quad 100\%, \quad (2)$$

$$O_{NW} = (Y_m/Y_{NW}) \quad 100\%, \quad (3)$$

где O_N — оценка ресурсов минерального (азотного) питания растений, %; O_W — оценка ресурсов влаги, %; O_{NW} — комплексная оценка ресурсов влаги и минерального питания растений, %.

В табл. 3 представлены результаты моделирования четырех уровней урожайности озимой пшеницы, а также оценки ресурсов обеспеченности влагой и минеральным питанием продукционного процесса. В таблице выделены два контрастных по агрометеорологическим условиям года: 2013 г. — засушливый, с крупным недобором урожая и 2017 г., когда собрали максимальный урожай за рассматриваемый период. Межгодовая изменчивость Y_m составляет 21 и 27% в Миллеровском и Зерноградском районах соответственно. Меньшая изменчивость потенциальной урожайности Y_{NW} в этих районах на уровне 17% ожидаема, так как снимаются ограничения по обеспеченности растений влагой и питанием одновременно.

Полученный согласно уравнениям (1)—(3) комплекс оценок обеспеченности потребностей культуры факторами внешней среды показывает, что большей межгодовой изменчивостью, как можно было ожидать, обладают оценки обеспеченности влагой. Величина O_W изменяется от 41 до 69% в Миллеровском районе и от 40 до 66% в Зерноградском, что согласуется с агроклиматической оценкой территории этих районов как засушливых с неустойчивым режимом увлажнения. В самые засушливые годы (2013, 2018 гг.) оценка влагообеспеченности опускается до 40%.

Значительно более сложный и неоднозначный характер изменений по складывающимся агроклиматическим условиям имеет оценка O_N . В целом можно отметить ее тенденцию к увеличению в годы со снижением потенциального урожая. В годы, когда радиационно-термические факторы являются лимитирующими для достижения максимума биомассы, определяя

Таблица 3

Урожайность озимой пшеницы при современной агротехнике (Y_m) и при управляющих воздействиях (Y_N , Y_W , Y_{NW}) и оценки ресурсов влаги и минерального питания в Миллеровском и Зерноградском районах в 2010—2020 гг. (расчеты в системе КПУ)

Год, параметр	Y_m , ц/га	Управляющие воздействия			Приращение, Y_{NW} , ц/га	Оценка ресурсов, %		
		Y_N , ц/га	Y_W , ц/га	Y_{NW} , ц/га		O_N	O_W	O_{NW}
Миллерово								
2010	21,4	24,7	35,8	42,5	21	87	67	50
2011	27,0	33,4	47,1	59,2	32	81	64	46
2012	21,4	25,5	40,4	49,6	28	84	60	43
2013	15,5	18,3	42,5	51,7	36	85	41	30
2014	27,6	33,9	56,0	70,6	43	81	56	39
2015	28,3	35,1	45,0	54,3	26	81	71	52
2016	31,7	38,9	53,9	68,4	37	81	67	46
2017	35,4	43,6	58,2	72,3	37	81	68	49
2018	27,8	33,6	50,1	62,9	35	83	63	44
2019	23,1	28,7	37,7	45,8	23	80	69	50
2020	23,5	27,1	45,9	54,6	31	87	57	43
Среднее	25,7	31,2	41,3	57,4	32	83	62	45
V , %	21,3	23,0	16,0	17,5	21	3	14	14
Зерноград								
2010	31,6	32,6	54,4	56,0	24	79	58	56
2011	39,7	41,8	73,3	76,5	37	73	54	52
2012	39,2	40,4	61,8	64,0	25	77	63	61
2013	25,8	26,5	64,5	66,3	41	80	40	39
2014	46,9	48,6	82,9	86,5	40	77	57	54
2015	43,8	45,6	66,4	68,6	25	77	66	64
2016	52,9	54,9	83,7	87,7	35	74	63	60
2017	58,2	60,4	92,3	96,4	38	75	63	60
2018	29,8	31,2	76,0	79,1	49	77	39	38
2019	28,7	29,3	57,1	58,2	30	81	50	49
2020	33,9	35,5	70,1	56,0	24	79	48	46
Среднее	39,1	40,6	71,0	73,8	35	77	64	61
V , %	27,0	27,0	17,0	17,0	23	3	17	17

Примечание. V — коэффициент вариации.

поглощение минеральных веществ растениями, условия азотного питания оказываются ближе к оптимальным. Колебание величины O_N можно рассматривать в первом приближении как изменение величины оптимума потребности растений в питательных веществах в зависимости от других жизненно важных факторов внешней среды.

Третья оценка, O_{NW} , отражает степень совместной обеспеченности растений элементами минерального питания и влагой. Абсолютные значения оценки оказываются самыми низкими по сравнению с двумя предыдущими. Главная особенность оценки состоит в том, что хотя она и аккумулирует две предыдущие, но не может быть прямо из них получена, поскольку отражает взаимодействие указанных факторов. Из приведенных в табл. 3 оценок видно, что уровень колебаний составляет от 30 до 40% в

неблагоприятные по агрометеорологическим условиям годы и до 50% в годы с благоприятным гидрометеорологическим режимом.

Другой достаточно важный результат, который может быть получен из приведенных в табл. 3 данных, заключается в определении потенциальной эффективности мероприятий по улучшению водного и питательного режимов растений при разных условиях погоды в Ростовской области. Так, в неблагоприятных агрометеорологических условиях улучшение режима увлажнения дает большие прибавки урожая, чем улучшение режима минерального питания. И напротив, при благоприятном типе погоды эффективность управления азотным режимом оказывается более высокой. Важно отметить, что на фоне неблагоприятных условий погоды отмечается прибавка урожая от комплексной мелиорации, которая превышает ее среднее значение за рассматриваемый период.

4. Заключение

Эффективный способ уменьшить зависимость от изменяющихся климатических условий — это адаптация, для этого необходимы методы адекватной оценки наблюдаемых изменений применительно к современным агротехнологиям. Перспективные оценки изменений климата и климатических воздействий, а также связанные с ними аспекты управления, обработки и интерпретации данных наблюдений и моделирования представляют собой основу планирования адаптации и последующего мониторинга ее эффективности [5].

Впервые определяется преобладающий тип почв под посевами озимой пшеницы в границах районов Ростовской области с использованием цифровой версии Почвенной карты РФ (1988 г.) и соответствующие ему почвенные характеристики для субмодели минерального питания системы “Климат — почва — урожай”. Показано, что привлечение детализированной метеорологической, почвенной и агрогидрологической информации на уровне районов, различающихся по почвенно-климатическим условиям, позволяет с достаточной точностью оценить районную урожайность при реальном агротехническом уровне с помощью системы “Климат — почва — урожай”.

Получены количественные оценки ресурсов обеспеченности продукционного процесса озимой пшеницы влагой и минеральным питанием за период 2010—2020 гг., составляющие от ~40 до 70% в северных районах и от ~70 до 85% в юго-западных районах области.

Оценки управляющих воздействий на основе предлагаемого метода получены для всех районов Ростовской области. Первоочередной мерой по стабилизации зернового производства, как показывают результаты оценивания, должно стать внедрение влагосберегающих технологий. Конечно, эти меры могут быть дорогостоящими, поэтому должны присутствовать оценки экономической целесообразности и эффективности, позволяющие выбрать оптимальные способы их реализации. Эффективной мерой на фоне наблюдающейся дегумификации почв и критически низкого содержания гумуса для пахотных почв всей территории Ростовской области [16] является внесение высоких доз органических удобрений.

Принимая во внимание локализацию оценок эффективности водной и химической мелиорации на уровне районов, они могут быть востребованы

на начальном этапе реализации планов адаптации к изменению климата и агроклиматических ресурсов.

Статья подготовлена при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-14-00107. Агроклиматический мониторинг и подготовка данных почвенного блока осуществлялись в рамках проекта 3.2 Росгидромета и темы № 1376-р Аграрного центра Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова.

Литература

- 1. Абашина Е. В.** Метод учета азотного питания растений в динамических моделях, предназначенных для оценки формирования урожая яровых зерновых культур. — Труды ИЭМ, 1979, вып. 13(91), с. 101—119.
- 2. Агроклиматические ресурсы Ростовской области.** /Справочник. — Л., Гидрометеоздат, 1972, 251 с.
- 3. База данных показателей муниципальных образований.** /Федеральная служба государственной статистики (Росстат); <https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Munst.htm>.
- 4. Безуглова О. С., Назаренко О. Г., Ильинская И. Н.** Динамика деградации земель в Ростовской области. — Аридные экосистемы, 2020, т. 26, № 2(83), с. 10—15.
- 5. Доклад о научно-методических основах для разработки стратегий адаптации к изменениям климата в Российской Федерации (в области компетенции Росгидромета).** /Под ред. В. М. Катцова и Б. Н. Порфирьева. — СПб, Саратов, Амирит, 2020, 120 с.; <https://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2020/dokladRGM.pdf>.
- 6. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год.** — М., 2021, 104 с.; https://www.meteorf.gov.ru/upload/pdf_download/doklad_klimat2020.pdf.
- 7. Катцов В. М., Школьник И. М., Павлова В. Н., Хлебникова Е. И., Ефимов С. В., Константинов А. В., Павлова Т. В., Пикалева А. А., Рудакова Ю. А., Салль И. А., Байдин А. В., Задворных В. А.** Развитие технологии вероятностного прогнозирования регионального климата на территории России и построение на ее основе сценарных прогнозов изменения климатических воздействий на секторы экономики. Часть 2: Оценки климатических воздействий. — Труды ГГО, 2019, вып. 593, с. 6—52.
- 8. Национальный план мероприятий первого этапа адаптации к изменениям климата на период до 2022 года,** утв. Распоряжением Правительства Российской Федерации от 25.12.2019 № 3183-п; <http://static.government.ru/media/files/OTrFMr1Z1sORh5N1x4gLUsdgGHyWIAcy.pdf>.
- 9. Павлова В. Н., Каланка П., Караченкова А. А.** Продуктивность зерновых культур на территории Европейской России при изменении климата за последние десятилетия. — Метеорология и гидрология, 2020, № 1, с. 78—94.
- 10. Почвенная карта РСФСР.** /Под ред. В. М. Фридланда. Масштаб 1:2 500 000. — М., ГУГК, 1988 (Скорректированная цифровая версия, 2007).
- 11. РД 52.33.219-2002.** Руководство по определению агрогидрологических свойств почвы. — СПб, Гидрометеоздат, 2002, 150 с.
- 12. Сиротенко О. Д.** Математическое моделирование водно-теплового режима и продуктивности агроэкосистем. — Л., Гидрометеоздат, 1981, 167 с.
- 13. Сиротенко О. Д.** Методы оценки изменений климата для сельского хозяйства и землепользования. /Методическое пособие. — М., Росгидромет, 2007, 77 с.
- 14. Схема территориального размещения сельскохозяйственного производства.** /Министерство сельского хозяйства и продовольствия Ростовской области; <https://don-agro.ru/index.php/finance/investitsii-v-apk/investitsionnyj-potentsial-apk-rostovskoj-oblasti?id=122>.
- 15. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации.** Общее резюме. — СПб, Научное издание технологий, 2022, 124 с.; <http://cc.voeikovmgo.ru/images/dokumenty/2022/od3or.pdf>.
- 16. Чернова О. В., Алябина И. О., Безуглова О. С., Литвинов Ю. А.** Современное состояние гумусированности пахотных черноземов настоящих степей (на примере Ростовской области). — Юг России: экология, развитие, 2020, т. 15, № 4, с. 99—113.
- 17. Чернова О. В., Голозубов О. М., Алябина И. О., Щепашенко Д. Г.** Комплексный подход к картографической оценке запасов органического углерода в почвах России. — Почвоведение, 2021, № 3, с. 273—286.
- 18. Pavlova V. N., Karachenkova A. A., Varcheva S. E., and Sinitsyn N. M.** 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, and K.-O. Wenkel (eds.). — Springer Nature, 2020, pp. 363—382.