

**СЦЕНАРНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ
ВЛАГООБЕСПЕЧЕННОСТИ ПОСЕВОВ ПШЕНИЦЫ
В СТЕПНОМ КРЫМУ В XXI в. И РЯД МЕР ПО УВЕЛИЧЕНИЮ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ЕЕ ВОЗДЕЛЫВАНИЯ**

© 2021 г. Е. М. Гусев^{а, *}, Л. Я. Джоган^а, О. Н. Насонова^а, Е. Э. Ковалев^а

^аИнститут водных проблем РАН, ул. Губкина, 3, Москва, 119333 Россия

*e-mail: sowaso@yandex.ru

Поступила в редакцию 22.06.2020 г.

После доработки 07.10.2020 г.

Принята к публикации 24.10.2020 г.

На основе использования ранее разработанной авторами модели теплообмена в системе почва—мульчирующий покров—растительный покров—приземный слой атмосферы MULCH и прогнозов изменения метеорологических характеристик, полученных с помощью моделей общей циркуляции атмосферы и океана для сценариев изменения климата семейства RCP проанализировано, как изменится аридность (или влагообеспеченность) территории степного Крыма под посевами зерновых в XXI в., а также их урожайность. Показано, что в степном Крыму годовой ход климатических значений продуктивных влагозапасов, влагообеспеченность посевов зерновых и их урожайность к концу XXI в. практически не изменятся. Проанализированы причины такой ситуации, обусловленные прежде всего сохранением в XXI в. выпадающих в степном Крыму климатических осадков на современном уровне. В связи с этим в указанном регионе не потребуются дополнительные меры по адаптации земледелия к последствиям глобальных климатических изменений. В то же время отмечено, что влияние такого антропогенного фактора, как рост потребностей человеческой популяции в условиях ограниченности ресурсов биосферы, приведет в сельскохозяйственных экосистемах, в том числе и в агроценозах степного Крыма, к необходимости перехода к стратегии “зеленого земледелия”, основанной на природоподобных no-till технологиях.

Ключевые слова: засушливость, пшеница, урожайность, RCP-сценарии изменения климата, no-tillage технология

DOI: 10.31857/S0032180X21050105

ВВЕДЕНИЕ

В докладах МГЭИК [6, 16] констатируется односторонность потепления климатической системы Земли. Это ведет к изменениям различных характеристик климатической системы, в частности такой важной характеристики, как засушливость (или увлажненность) того или иного региона земного шара. Очевидно, что для оценки рисков возникновения негативных социально-экономических и других последствий, обусловленных такими экстремальными событиями, как засухи, необходимо уметь прогнозировать изменение характеристик засушливости территории в климатическом масштабе.

В настоящее время имеется целый ряд работ, посвященных этому вопросу [10, 12, 15, 16, 18, 19]. Тем не менее, в [6, с. 57] делается вывод, что пока еще “имеется низкая степень достоверности наблюдаемых в глобальном масштабе трендов засух”. В [16] также утверждается, что количество

имеющихся в литературе прогнозов изменения степени засушливости рассматриваемой территории пока ограничено как для регионального и континентального масштабов, так и для масштаба отдельного речного бассейна (особенно для регионов за пределами Европы и Северной Америки), к тому же надежность полученных прогнозов еще относительно низка. Вопрос о прогнозе степени засушливости в XXI в. крайне актуален и для такого региона России, как Крым.

Крым, недавно вернувшийся в Российскую Федерацию, играет важную геополитическую и экономическую роль в развитии государства. В экономике Крыма основными отраслями являются промышленность, сельское хозяйство, туризм, строительство, торговля, здравоохранение. Что касается сельского хозяйства, то равнинная степная часть Крыма представляет собой район по выращиванию различных сельскохозяйственных культур, в первую очередь зерновых. При

этом особенно важно значение Крыма в силу его специфических климатических условий для производства высококачественного зерна твердых сортов пшеницы, которой в РФ производится довольно мало.

Однако, несмотря на плодородные почвы (в основном, черноземные (Chernozems) и каштановые (Kastanozems)), обилие тепла и продолжительный вегетационный период, по условиям увлажнения степная часть Крыма относится к засушливой зоне рискованного земледелия. В настоящее время после перекрытия Украиной поступления днепровской воды в Северо-Крымский канал большая часть посевных площадей республики Крым находится на богаре, где без обеспечения растений достаточным количеством влаги трудно получать гарантированные урожаи сельскохозяйственных культур без внедрения нетрадиционных no-till агротехнологий [1, 3]. При этом возникает еще один вопрос: потребует ли в будущем изменение степени аридности территории Крыма в связи прогнозируемым глобальным потеплением климата дополнительных мер адаптации земледелия к подобным изменениям? Ответу на вопросы, каковы будут эти изменения в XXI в., как при этом изменится влагообеспеченность районов степного Крыма, занятых посевами зерновых (в частности, озимой пшеницей), и какие меры, обусловленные не только вызовами климатических изменений, но и другими факторами, связанными с деятельностью человека, могут повысить эффективность возделывания зерновых, и посвящена настоящая работа.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

В качестве основного методического инструмента исследования используется разработанная авторами модель тепло- и влагообмена агроэкосистем с атмосферой MULCH. Подробное описание модели MULCH, воспроизводящей процессы формирования водного режима на сельскохозяйственных полях, как покрытых слоем соломенной мульчи, так и в ее отсутствии, представлено в работе [2]. Модель MULCH применялась для расчетов водного режима агроценозов степного Крыма в базовый период 1970–1979 гг. (в англоязычной литературе известный как “reference period”), для которого при проведении расчетов в качестве исходной информации использовались имеющиеся данные непосредственных метеорологических измерений [3]. Поэтому здесь мы не будем подробно останавливаться на алгоритме модели и методах подготовки информационного обеспечения.

Модель MULCH позволяет рассчитывать для теплого периода года динамику продуктивных влагозапасов корнеобитаемого слоя почвы под посевами озимой пшеницы V (равных разности между влагозапасами в корнеобитаемом слое

почвы и влагозапасами, соответствующими влажности завядания), составляющие водного баланса агроценоза, критерий влагообеспеченности посевов η_w , равный [2, 3]

$$\eta_w = E_T / E_{PT}, \quad (1)$$

где E_T – транспирация растительного покрова за вегетационный период (продуктивное испарение), E_{PT} – потенциальная транспирация, а также оценивать урожайность пшеницы Y .

Как отмечено в [3], важным этапом является подготовка информационного обеспечения модели. Оно включает в себя 4 информационных блока: 1 – входные гидрометеорологические характеристики (количество осадков, скорость ветра, температуру и влажность воздуха, радиационный баланс и начальные (весенние) запасы почвенной влаги); 2 – гидрофизические параметры почвы; 3 – параметры мульчи и 4 – тип растительности [2]. Последние 3 блока информации были подготовлены в [3], поэтому в настоящей работе остановимся только на первом блоке и немного расскажем о подготовке гидрофизических параметров почвы.

Для осуществления моделирования на основе MULCH необходимо иметь традиционные гидрофизические характеристики: ОГХ (зависимость между капиллярно-сорбционным потенциалом почвы и ее влажностью) и связь коэффициента влагопроводности почвы с влажностью или ОГХ. Эти зависимости на агрометеорологических станциях не определяются. Но на них имеются данные по так называемым почвенным константам: полной влагоемкости (ПВ), полевой влагоемкости (НВ), влажности завядания (ВЗ), максимальной гигроскопичности (МГ \approx ВЗ/1.5). Наряду с тем, что эти константы и сами использовались в модельных расчетах, на их основе с помощью педотрансферных функций [2, 3] были получены параметры, описывающие указанные выше зависимости. При этом данные зависимости аппроксимировались на основе параметризации Клэппа и Хорнбергера [9].

Указанные характеристики были получены для почв трех агрометеорологических станций степного Крыма: Ишунь, Клепонино, Нижнегорск (рис. 1) – которые явились репрезентативными объектами данного региона при проведении расчетов динамики характеристик водного режима агроценозов (табл. 1).

Для описания переноса почвенной влаги во время ее физического испарения с поверхности почвы использовалась разработанная авторами модель формирования просыхающего слоя почвы [2, 3]. При расчетах влагопереноса на основе данной модели использовалась информация о пористости почвы и МГ, а также данные о коэф-



Рис. 1. Расположение агрометеорологических станций Крыма (серые кружки), данные наблюдений которых использованы в работе.

фициенте диффузии пара в поровом пространстве почвы, которые приведены в [2, 3].

При проведении расчетов динамики вышеуказанных характеристик агроценозов (посевов озимой пшеницы) за базовый период (1970–1979 гг.) использовались суточные значения метеорологических элементов, а также начальные продуктивные влагозапасы почвы $V_{нач}$ (после схода снежного покрова), измеренные на станциях Ишунь, Клепинино, Нижнегорск.

Для прогностических расчетов динамики характеристик водного режима агроценозов в XXI в. в районах расположения выбранных агрометеорологических станций использовались суточные значения метеорологических элементов за период с 1970 по 2099 гг., рассчитанные по пяти моделям общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО): HadGEM2-ES, IPSL-CM5A-LR, MIROC-ESM-CHEM, GFDL-ESM2M и NorESM1-M [18] – для четырех сценариев изменения климата семейства RCP (Representative Concentration Pathways): RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 и RCP8.5, использованных при подготовке пятого оценочного доклада IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Числа в аббревиатуре сценариев соответствуют приращению значений приходящей радиации ($Вт/м^2$) в 2100 г., вызванному увеличе-

нием эмиссии парниковых газов в атмосферу по сравнению с доиндустриальным периодом. Большие значения чисел соответствуют более агрессивным антропогенным сценариям, обусловленным повышенной эмиссией парниковых газов в атмосферу и слабыми мерами по ограничению их выбросов.

Указанные данные были предоставлены авторам статьи как участникам международного проекта ISI-MIP2 [21]. В данной работе использовались метеорологические ряды, рассчитанные с помощью вышеуказанных МОЦАО для географической ячейки регулярной сетки 45.0° – 45.5° с. ш. и 33.5° – 34.0° в. д., расположенной примерно в центре степного Крыма.

Необходимо отметить следующее обстоятельство. Результаты расчетов по МОЦАО в настоящее время демонстрируют систематические ошибки (смещение) из-за грубого пространственного разрешения, упрощенных параметризаций физических и термодинамических процессов, использования численных схем или неполного знания процессов климатической системы. В связи с этим полученные с помощью МОЦАО значения метеорологических элементов в районах расположения агрометеорологических станций были подвергнуты так называемой пост-процессинговой bias-коррекции с целью уменьшения возможных систематических ошибок расчета динамики влагозапасов почвы. Коррекция (для каждой МОЦАО своя) проводилась по данным соответствующих метеорологических измерений на агрометеорологических станциях в базовый период. При этом к рассчитанным по различным МОЦАО значениям температуры воздуха прибавлялось смещение (разное для разных месяцев), рассчитанное как разность среднемноголетних среднемесячных значений измеренной и смоделированной температуры воздуха в базовый период. Остальные метеорологические элементы корректировались с помощью поправочных множителей (также различных для разных месяцев), полученных как отношение среднемноголетних месячных значений измеренных характеристик к соответствующим смоделированным значениям.

Таблица 1. Гидрофизические параметры почвы в районах расположения выбранных агрометеорологических станций степного Крыма

Агрометеорологическая станция	ВЗ	НВ	ПВ	Коэффициент фильтрации, см/сут	Параметры уравнений Клеппа и Хорнбергера [9]	
	мм				Ψ_0 , см	B
Ишунь	163	302	450	7.5	30	8.4
Нижнегорск	180	332	520	8.9	27	7.9
Клепинино	176	326	540	26.2	13	5.7

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ МОЦАО ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОГНОСТИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ

Скорректированные с помощью пост-процессинга для каждой МОЦАО ряды смоделированных метеорологических элементов использовались для воспроизведения суточных значений продуктивных влагозапасов метрового слоя почвы под посевами озимой пшеницы V для каждой станции за базовый период с помощью модели MULCH. Расчеты были проведены для традиционного способа обработки почвы – отвальной вспашки в отсутствие соломенной мульчи. На их основе был получен климатический (осредненный за базовый период) годовой ход суточных значений продуктивных влагозапасов почвы $V(t)$, где t – время (в сутках). Соответствие полученных климатических значений $V(t)$ измеренным оказалось различным для разных МОЦАО.

Это естественно, поскольку bias-коррекция входных для MULCH метеорологических данных (особенно если она не очень качественная, сделана по месячным значениям, не учитывает суточного хода радиации или температуры) не гарантирует высокой степени близости климатических смоделированных и измеренных $V(t)$. Она в среднем гарантирует соответствие климатических значений входных смоделированных и измеренных метеорологических элементов, а поскольку затем смоделированные данные проходят через сильно нелинейный оператор (в данном случае через модель MULCH), который отличается от “природного” оператора, то смоделированные климатические влагозапасы будут близки к измеренным, но степень их близости при использовании метеорологических данных, полученных на основе различных МОЦАО, может оказаться разной.

Поэтому после проведенных расчетов $V(t)$ для каждой агрометеорологической станции из пяти МОЦАО была выбрана одна оптимальная, при использовании которой климатический годовой ход рассчитанных $V_{GCM}(t)$ для базового периода (1970–1979 гг.) в наибольшей мере соответствовал климатическому годовому ходу измеренных $V_{obs}(t)$. Для ст. Клепинино и Нижнегорск такой МОЦАО оказалась NorESM1-M, а для ст. Ишунь – MIROC-ESM-CHEM. На рис. 2 приведена средняя для степного Крыма (усредненная по всем 3-м выбранным агрометеорологическим станциям) климатическая динамика V при использовании отвальной вспашки для базового периода, соответствующая измеренным влагозапасам, а также рассчитанная по измеренным значениям метеорологических характеристик и по метеорологическим характеристикам выбранных МОЦАО.

Рис. 2 показывает, что расчеты климатической динамики почвенных продуктивных влагозапасов под посевами пшеницы степного Крыма, ос-

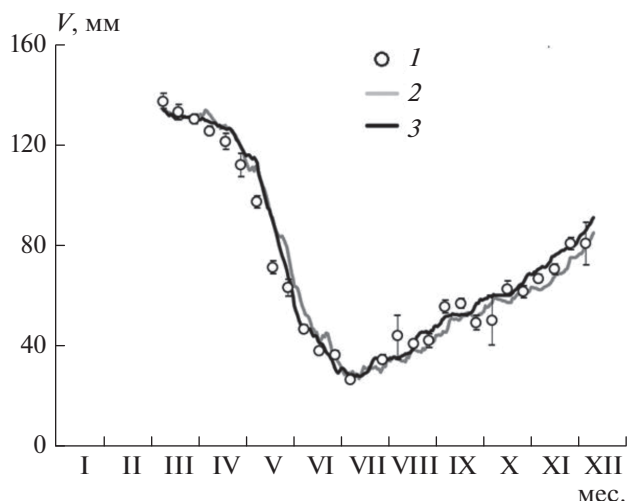


Рис. 2. Усредненная по трем выбранным в работе агрометеорологическим станциям степного Крыма среднегодовой (климатическая) годовая динамика продуктивных влагозапасов в метровом слое почвы V под посевами озимой пшеницы, измеренных на агрометеорологических станциях (с оценкой их неопределенностей) (1), а также рассчитанных по модели MULCH с использованием измеренных (2) и смоделированных различными МОЦАО (3) значений метеорологических элементов.

нованные на использовании метеорологических характеристик, полученных с помощью соответствующих МОЦАО V_{GCM} , вполне удовлетворительно воспроизводят как динамику измеренных значений влагозапасов V_{obs} , так и динамику влагозапасов, рассчитанную по реальным метеорологическим характеристикам базового периода V_{cal} . Этот вывод подтверждается высокими (близкими к 1.0) значениями критерия Нэша–Сатклиффа NS [20], определяющего эффективность соответствия двух рядов V , полученных различными способами: $NS = 0.96$ для V_{obs} и V_{GCM} и $NS = 0.98$ для V_{cal} и V_{GCM} .

Кроме того, близкими оказались и климатические (для базового периода) значения влагообеспеченности посевов пшеницы η_w (усредненные по ст. Клепинино, Нижнегорск и Ишунь) при использовании традиционной агротехнологии глубокой вспашки, рассчитанные по реальным метеорологическим данным ($\eta_w = 0.65$) и по метеорологическим данным, полученным на основе МОЦАО ($\eta_w = 0.66$). В случае применения no-till технологии обработки почвы с мульчированием растительными остатками эти показатели оказались фактически одинаковыми ($\eta_w = 0.70$) для обоих указанных вариантов метеорологического обеспечения.

Таким образом, близость результатов расчетов показателей водного режима в базовый пе-

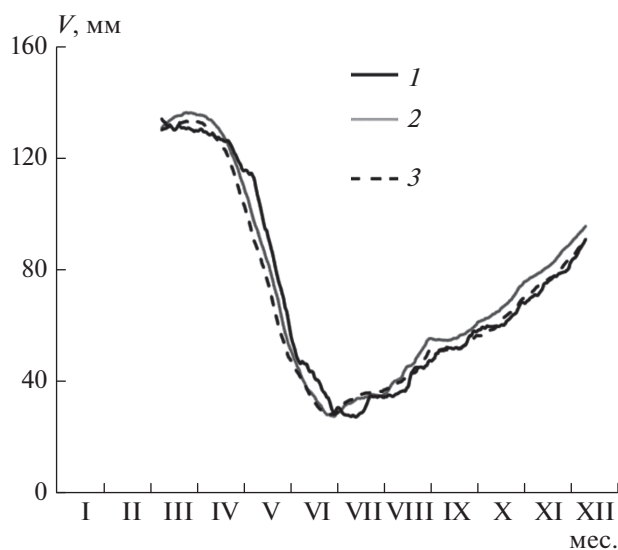


Рис. 3. Рассчитанная по модели MULCH климатическая динамика продуктивных влагозапасов метрового слоя почвы V под посевами озимой пшеницы в степном Крыму для трех климатических периодов: базового (1) и двух прогностических: 2035–2059 (2) и 2075–2099 гг. (3).

риод, полученных с использованием оптимальных МОЦАО, к соответствующим измеренным значениям или рассчитанным на основе реальных метеорологических данных, позволила сделать вывод, что разработанная методика расчетов динамики влажности почвы под посевами пшеницы позволяет провести сценарное прогнозирование климатической влагообеспеченности агроценозов степного Крыма до конца XXI в. с применением метеорологических данных, полученных с использованием соответствующих МОЦАО.

ПРОГНОСТИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ВЛАГООБЕСПЕЧЕННОСТИ ПОСЕВОВ ПШЕНИЦЫ В СТЕПНОМ КРЫМУ В XXI в.

Скорректированные в результате пост-процессинга ряды суточных значений метеорологических элементов, полученных на основе выбранной для каждой агрометеорологической станции МОЦАО, были использованы для проведения расчетов по модели MULCH различных характеристик водного режима посевов пшеницы в случае отвальной вспашки для двух прогностических периодов (2035–2059 гг. и 2075–2099 гг.) для каждого RCP-сценария.

Расчеты проводились в 2 этапа. На первом этапе в качестве начальных влагозапасов почвы для теплого расчетного периода $V_{\text{нач}}$ (после схода снежного покрова) использовались данные наблюдений за V в базовый период. Однако в прогностические периоды начальная влажность почвы, естественно,

должна отличаться от начальной влажности для базового периода по крайней мере по двум причинам. Первая связана с тем, что различие значений метеорологических характеристик в прогностический и базовый периоды приводит к различию осенних влагозапасов, что в конечном итоге сказывается на начальной (весенней) влажности почвы следующего года. Вторая причина обусловлена разницей в общей сумме осадков в холодный период года в базовом и прогностическом расчетных периодах, которая также приводит к различию начальных влагозапасов почвы.

Указанные возможные различия были оценены как по разнице рассчитанных с помощью MULCH осенних влагозапасов для разных климатических периодов, так и по разнице осадков в холодный период года для прогностического и базового периодов, рассчитанных по соответствующим МОЦАО. С учетом проведенных оценок начальные (весенние) значения продуктивной влажности почвы на начало расчетного (теплого) периода $V_{\text{нач}}$ были скорректированы для каждого из прогностических климатических периодов (следует отметить, что коррекция значений $V_{\text{нач}}$ оказалась относительно невелика). После этого был проведен второй (окончательный) вариант расчетов характеристик водного режима посевов пшеницы при использовании отвальной вспашки для двух прогностических периодов для каждого RCP-сценария.

Полученные значения характеристик водного режима агроценозов были усреднены по трем выбранным станциям и по четырем климатическим сценариям.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 приведена рассчитанная по модели MULCH климатическая динамика продуктивных влагозапасов метрового слоя почвы V под посевами озимой пшеницы в степном Крыму для трех климатических периодов: базового и двух прогностических (2035–2059 гг. и 2075–2099 гг.). Динамика V усреднена по трем выбранным агрометеорологическим станциям (Ишунь, Клепинино, Нижнегорск) и четырем климатическим сценариям семейства RCP. Как видно на рис. 3, динамика V практически одинакова для всех трех временных периодов. Среднеквадратическое отклонение значений V для обоих прогностических периодов от значений V для базового периода составляет 6–7 мм. Если сравнить эти значения с ошибкой расчетов средних по степному Крыму продуктивных влагозапасов (~6 мм), обусловленной различием в расположении агрометеорологических станций, а также разницей в климатических сценариях, то можно сделать вывод, что вли-

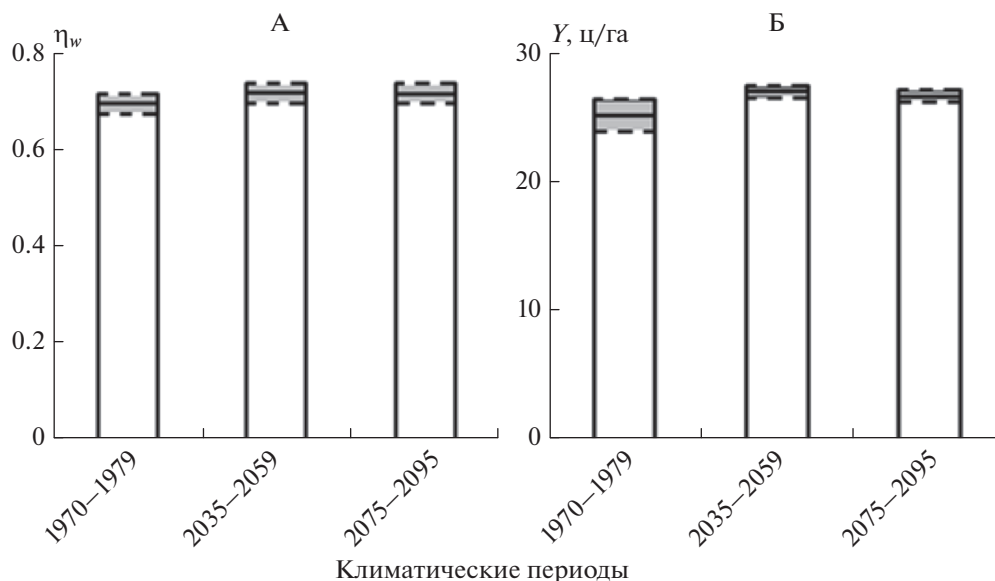


Рис. 4. Рассчитанные по модели MULCH климатические значения влагообеспеченности η_w посевов пшеницы и ее урожайности Y , соответствующие традиционной технологии отвальной вспашки без мульчирования в степном Крыму для трех климатических периодов: базового и двух прогностических. Серым цветом показан диапазон неопределенностей оценок η_w и Y .

яние возможных глобальных климатических изменений, соответствующих RCP-сценариям, в XXI в. мало скажется на климатической динамике продуктивных влагозапасов под посевами пшеницы в районе Степного Крыма.

Рассмотрим рассчитанные по описанной методике изменения в XXI в. другой важной характеристики водного режима агроценозов – влагообеспеченности посевов пшеницы η_w , соответствующей использованию традиционной технологии отвальной вспашки без мульчирования. На рис. 4, А для степного Крыма для базового и двух прогностических сценариев показаны климатические значения указанной характеристики с оценкой их неопределенности, также обусловленной разным расположением агрометеорологических станций и различием климатических RCP-сценариев. Как видно, климатическая влагообеспеченность η_w посевов пшеницы при отвальной вспашке с учетом точности ее оценки (~ 0.02) мало меняется в течение XXI в. (возрастает на ~ 0.04). Статистическая значимость отличий климатических значений η_w , полученных для обоих прогностических периодов, от влагообеспеченности базового периода была проверена с помощью t -критерия Стьюдента. Было получено, что при использованных объемах выборок и уровне значимости $p = 0.05$ полученные различия статистически незначимы.

Рассмотрим также изменение урожайности пшеницы Y для базового и двух прогностических периодов. На рис. 4, Б показаны рассчитанные по модели MULCH климатические значения Y и их неопределенности, обусловленные теми же фак-

торами, что и для η_w . Как видно, климатические значения урожайности в XXI в. имеют малозаметную тенденцию к увеличению (на 6–7% по сравнению с базовым периодом), оставаясь в пределах неопределенности оценки (4–8%). Согласно t -критерию Стьюдента, отличие полученных средних прогностических значений урожайности от урожайности базового периода при $p = 0.05$ статистически незначимо. Таким образом, и влагообеспеченность, и урожайность пшеницы в степях Крыма в XXI в. имеют малозначимую тенденцию к увеличению в соответствии с климатическими RCP-сценариями.

Попробуем разобраться в причинах такой ситуации. Возможное глобальное потепление климата, обусловленное ростом выбросов парниковых газов в атмосферу, ведет к весьма дифференцированному изменению климата в различных регионах планеты. Оценим изменения в XXI в. в степном Крыму основных климатических характеристик. Ими являются осадки и температура приземного слоя воздуха (отражающая энергетические ресурсы региона). В работе они получены с помощью МОЦАО для климатических сценариев семейства RCP.

На рис. 5 показаны усредненные по трем агрометеорологическим станциям и четырем RCP-сценариям климатические значения годовых сумм осадков Pr и среднегодовой температуры воздуха T степного Крыма для использованных в работе базового и двух прогностических периодов. Как видно на рис. 5, А, климатические осадки в XXI в. в степном Крыму, как и рассмотрен-

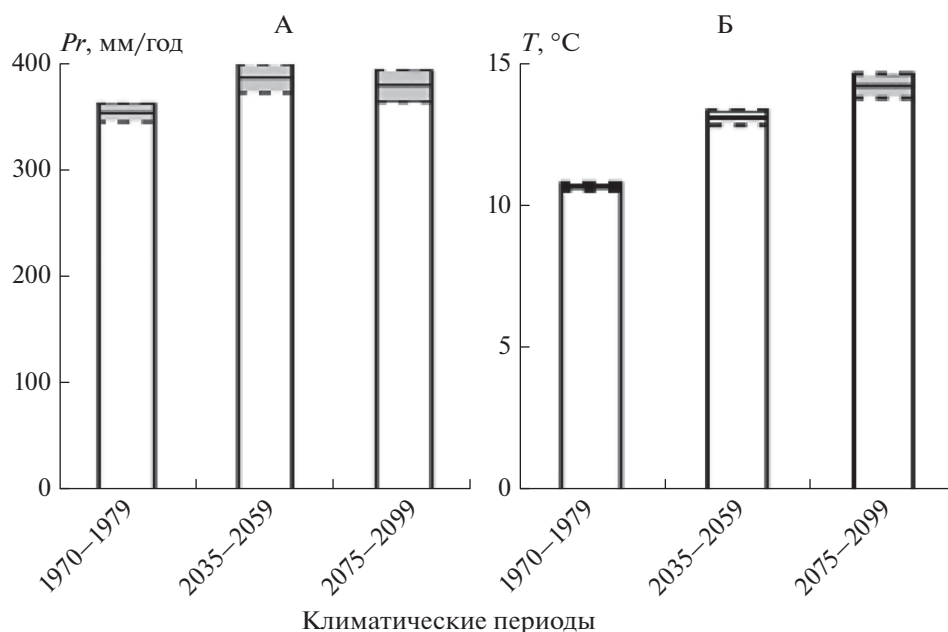


Рис. 5. Климатические значения годовых сумм осадков Pr (А) и среднегодовой температуры воздуха T (Б) на территории степного Крыма для трех климатических периодов: базового и двух прогностических. Серым цветом показан диапазон неопределенностей при оценке Pr и T .

ные перед этим характеристики агроценозов, имеют слабую, сопоставимую с неопределенностью их оценки (~6–7%), тенденцию к увеличению на 6–8% по сравнению с базовым периодом, что согласно t -критерию Стьюдента при уровне значимости $p = 0.05$ является статистически незначимым. Таким образом, в соответствии с RCP-сценариями, климатические осадки в Крыму в XXI в. не уменьшатся, а скорее всего останутся примерно такими же, как и для базового периода. Это согласуется, в частности, с [7], где показано, что в XX в. в Крыму, наряду с ростом температуры, произошло даже небольшое увеличение осадков. Что касается изменения осадков в будущем, то их прогностические оценки к концу XXI в., полученные на основе ансамбля МОЦАО, участвовавших в подготовке данных для 5-го оценочного доклада IPCC [17], и климатических RCP-сценариев, показали, что годовые климатические осадки в Крыму по сравнению с периодом 1981–2000 г., оцененные с точностью $\pm(35-40)$ мм/год практически не изменятся [5].

В отличие от осадков, приведенные на рис. 5, Б данные о климатических значениях среднегодовой температуры воздуха T (достаточно хорошо соответствующие результатам [5]), которые демонстрируют прирост климатической среднегодовой температуры к концу XXI в. $\approx 3.4^\circ\text{C}$ показывают ее вполне значимый (согласно t -критерию Стьюдента) заметный рост на 3.5°C . Однако, по нашим расчетам, несмотря на рост климатической среднегодовой температуры воздуха, климатические годовые суммы таких составляющих

суммарного испарения, как транспирация E_T и испарение воды оголенной почвой E_S в различные климатические периоды XXI в. практически не изменятся по сравнению с базовым периодом. Это неудивительно, поскольку в степных регионах почти все поступающие осадки, независимо от имеющихся энергетических ресурсов (коррелирующих с температурой воздуха), расходуются на испарение (по нашим расчетам, доля таких составляющих водного баланса, как поверхностный и подповерхностный сток, составляет в степном Крыму $<1\%$). Увеличение температуры в теплый период немного сокращает период вегетации до сбора урожая, оставляя общее за вегетацию климатическое значение E_T в прогностические периоды почти таким же, как и в базовый. По этой же причине мало меняется и потенциальная транспирация E_{pT} за период вегетации. В результате, согласно (1), климатические значения влагообеспеченности η_w посевов и их урожайность тоже должны изменяться лишь незначительно.

Таким образом, можно сделать окончательный вывод, что в соответствии с RCP-сценариями степень влагообеспеченности посевов пшеницы в степном Крыму в XXI в. не уменьшится и условия ее выращивания в данном регионе останутся прежними (хотя и достаточно напряженными). Поэтому применение мер адаптации к меняющимся климатическим условиям при выращивании зерновых именно на территории степного Крыма скорее всего не потребуется.

Следует отметить, что такой вывод может показаться неожиданным, поскольку, в литературе встречается мнение, что к концу настоящего столетия засушливость в современных аридных регионах со средней степенью достоверности возрастет [6] и “в гумидной зоне станет еще влажнее и теплее, в аридной – теплее и суше” [8, с. 34]. Однако, по-видимому, такой вывод слишком категоричен. В частности, данный в [15] анализ составляющих водного баланса крупных речных бассейнов, проведенный на основе результатов МОЦАО MIROC, показывает более сложную картину изменений гумидности и аридности регионов. Тренд изменения степени засушливости может зависеть от географического положения региона [6] и даже от определения понятия засушливости [22].

Использованный в данной работе критерий засушливости (влагообеспеченности) вытекает из физико-экологической концепции ресурсов почвенных вод [2, 4]. Этот критерий был использован нами для расчетов степени влагообеспеченности растительного покрова 11-ти регионов земного шара, находящихся в разных природных условиях [4]. Оказалось, что для аридных и полуаридных регионов влагообеспеченность растительного покрова к концу XXI в. действительно может еще больше уменьшиться (например, в бассейнах рек Тагус и Дарлинг, повышение засушливости территории которых отмечается уже и в настоящее время [11, 13]), но может и сохраниться на современном уровне (например, в бассейнах рек Нигер и Ганг). Как показало проведенное в настоящей работе исследование, климатическая система Крыма демонстрирует пример последней ситуации. В Крыму действительно к концу XXI в. станет теплее, а вот, как было отмечено выше, количество осадков не уменьшится, что сохранит влагообеспеченность зерновых на прежнем уровне.

Тем не менее, неизбежно развитие других адаптационных мероприятий в земледелии степного Крыма (как и во многих других регионах планеты), которые обусловлены не глобальным потеплением, а определяются необходимостью приспособления человека к условиям ограниченности использования свободной энергии и других ресурсов планеты. Так, в программном докладе ООН о состоянии водных ресурсов планеты [23] утверждается, что в целях компенсации угроз экологической безопасности человеческой цивилизации из-за невозможности удовлетворения ее постоянно растущих потребностей в условиях ограниченности ресурсов биосферы нужны новые стратегии для управления водными и другими ресурсами планеты.

Примером одной из таких стратегий, в частности, является “ресурсосберегающее земледелие”. В [23] утверждается, что, хотя природоподобные

технологии предполагают значительные достижения и в ирригации, основным направлением должно стать увеличение урожайности в богарных системах, не нарушающих естественную циркуляцию гидрологического цикла.

По существу, в настоящее время начался новый этап в развитии агротехнологии, связанный с переходом от “серых” экстенсивных технологий управления природными ресурсами, ориентированными только на быструю экономическую прибыль и приводящими при этом к деградации почвенного покрова, на нетрадиционные (природоподобные – “nature-based”, no-till, “green”) технологии земледелия [1, 14]. Человечество закономерно движется по траектории перехода от технологий, основанных на принципе максимума производства энтропии Г. Циглера, к технологиям, базирующимся на принципе минимума производства энтропии И. Пригожина, в основе которого лежит рационализация использования доступных для человечества ресурсов планеты [1].

В [3] установлено, что при использовании no-till технологии с долговременным мульчированием поверхности почвы растительными остатками влагообеспеченность посевов пшеницы на богарных полях степных районов Крыма в базовый период увеличивается на ~13%. При этом урожайность пшеницы (с учетом повышения содержания гумуса в почве) возрастает по сравнению с использованием традиционной технологии глубокой пахоты в среднем на 12% (на 5.3 ц/га). Здесь мы коснемся еще одного важного показателя, характеризующего эффективность различных агротехнологий.

В основу данного показателя положен разработанный авторами энергетический подход и описанный в [1, 2]. При этом принимается во внимание не только полученный урожай сельскохозяйственной продукции в рассматриваемый год, но и возможности анализируемой технологии для сохранения плодородия почвы. Указанный критерий оценки эффективности соответствующей агротехнологии K выглядит следующим образом [2]:

$$K = \frac{E_{out} + \Delta E_S}{E_{in}}, \quad (2)$$

где E_{in} – совокупная затраченная для проведения сельскохозяйственных работ антропогенная энергия, E_{out} – энергия, полученная на выходе в форме химической энергии полученного урожая или органического сырья, ΔE_S – изменение за соответствующий временной период (например, за год) энергии почвенного покрова.

В [1] данный критерий был рассчитан для базового периода для двух агротехнологий, применяемых при производстве пшеницы на богаре (глубокой отвальной вспашке и no-till технологии

с мульчированием поверхности почвы растительными остатками). Расчеты были проведены для агрометеорологических ст. Клепинино, Нижегородск и Ишунь. Анализ результатов проведенных расчетов привел к следующим выводам.

При использовании no-till технологии с мульчированием антропогенные затраты энергии оказались в среднем на треть ниже антропогенных затрат при использовании традиционной вспашки. При минимальной обработке почвы полезный выход энергии с урожаем зерна также в среднем на ~10% больше. Значительно отличается для двух технологий и изменение за год энергии почвенного покрова. Если при использовании традиционной вспашки плодородие почвы уменьшается (прежде всего за счет эрозионных потерь), при no-till технологии, наоборот, немного увеличивается. В итоге для степных районов Крыма энергетическая эффективность K no-till обработки почвы с мульчированием в 1.8 ± 0.2 раза выше энергетической эффективности использования традиционной вспашки.

Таким образом, обобщая полученные результаты, можно сделать вывод, что при стратегическом планировании развития “зеленого” зернового земледелия в рассмотренном регионе no-till обработка почвы с мульчированием может рассматриваться в качестве наиболее перспективной агротехнологии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По условиям увлажнения степная часть Крыма относится к засушливой зоне рискованного земледелия. Усугубляется данная ситуация еще и тем, что в XXI в. перед человеческой популяцией достаточно остро встала проблема нахождения новых путей в области методов природопользования, включая и сельское хозяйство, а также создания соответствующих инфраструктур для компенсации растущих вызовов экологической безопасности человека на планете. В частности, к таким вызовам относятся две крупные проблемы, причем обе обусловлены деятельностью человека на планете. Первая связана с глобальным потеплением климата, вторая с ограниченностью использования человечеством свободной энергии и других ресурсов биосферы Земли.

Рассмотренные в работе последствия воздействия возможного изменения климата на степень аридности степного Крыма позволяют сделать вывод о том, что, в соответствии с климатическими сценариями семейства RCP, как влагообеспеченность посевов зерновых, так и их урожайность к концу XXI в. практически не изменятся. Потому дополнительных мер по адаптации земледелия в степном Крыму, по-видимому, предпринимать не придется.

Что касается второй проблемы, то ее решение связано с неизбежностью перехода от традиционных “серых” (“gray”) технологий управления природными ресурсами, жестко ориентированных только на сиюминутную экономическую прибыль, на нетрадиционные природоподобные технологии. В сельском хозяйстве этот переход связан с развитием “зеленого земледелия”, актуального прежде всего в аридных и полуаридных регионах, к которым, в частности, относится Крым. Показано, что применение технологий “зеленого земледелия” в Крыму ведет к рационализации использования энергетических, почвенных и, что особенно важно, водных ресурсов, ситуация с которыми в данном регионе достаточно напряженная.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках темы № 0147-2018-0001 (№ государственной регистрации АААА-А18-118022090056-0) государственного задания ИВП РАН (разделы “Прогностические расчеты влагообеспеченности посевов пшеницы в степном Крыму в XXI в.” и “Полученные результаты и их обсуждение”) и при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-17-10039) (разделы “Методика исследования”, “Выбор оптимальных МОЦАО для проведения прогностических расчетов”).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев Е.М. Перспективы использования принципов “зеленой экономики” в сельском хозяйстве // Международный научно-исследовательский ж. 2020. № 1(91). Ч. 1. С. 87–99.
2. Гусев Е.М. Ресурсы почвенных вод и экология наземного растительного покрова. Концепции, эксперимент, расчеты // Palmarium Academic Publishing: Saarbrücken, 2012. 116 p.
3. Гусев Е.М., Джоган Л.Я. Мульчирование как важный элемент стратегии использования ресурсов естественного увлажнения в агроэкосистемах степного Крыма // Почвоведение. 2019. № 3. С. 348–354.
4. Гусев Е.М., Насонова О.Н., Ковалев Е.Э. Изменение влагообеспеченности территории речных бассейнов, расположенных в различных регионах земного шара, в связи с возможными изменениями климата // Аридные экосистемы. 2021. № 3.
5. Климатический центр Росгидромета. Изменение климата России в 21-м в. 2013–2020. Главная геофизическая обсерватория имени А.И. Воейкова. <https://cc.voeikovmgo.ru/ru/klimat/izmenenie-klimata-rossii-v-21-veke>. (дата обращения 21.05.2020).
6. МГЭИК, 2014: Изменение климата, 2014 г.: Обобщающий доклад. Вклад Рабочих групп I, II и III в Пятый оценочный доклад Межправительственной

- группы экспертов по изменению климата / Под ред.: Р.К. Пачаури, Л.А. Мейер. Женева, Швейцария: МГЭИК, 2014. 163 с.
7. *Парубец О.В.* Изменение климата в Крыму // Ученые записки Таврического национального университета им. В.И. Вернадского. Сер. География. 2009. Т. 22(61). № 2. С. 88–96.
 8. *Сергиенко В.Г., Константинов А.В.* Прогноз влияния изменения климата на разнообразие природных экосистем и видов флористических и фаунистических комплексов биоты России // Тр. С.-Пб. научно-исследовательского ин-та лесного хозяйства. 2016. № 2. С. 29–44.
 9. *Clapp R.B., Hornberger G.M.* Empirical equations for some soil hydraulic properties // *Water Resour. Res.* 1978. V. 14. P. 601–604.
 10. *Dai A.* Increasing drought under global warming in observations and models // *Nature Climate Change.* 2013. V. 3. P. 52–58.
<https://doi.org/10.1038/nclimate1633>
 11. Electronic resource <http://www.globalwaterforum.org/2019/04/23/climate-risks-plague-murray-darling-basin-reforms/> / Ed. A. Jason. Climate risks plague Murray Darling Basin reforms. RMIT Universit. Australia. 2019 (Accessed June: 4, 2019).
 12. *Eriyagama N., Smakhtin V., Gamage N.* Mapping Drought Patterns and Impacts: A Global Perspective. IWMI Research Report. Colombo, International Water Management Institute (IWMI). 2009. № 133. 25 p. www.iwmi.cgiar.org/publications/iwmi-research-reports/iwmi-research-report-133/
 13. *Fernández A.M.* River Basins and Water Management in Spain. Tagus and Ebro River Basin District: an account of their current situation and main problems. Study for the PETI Committee. European Parliament: Policy Department C: citizen's rights and constitutional affairs. Publications office. Brussel, 2016. 70 p.
 14. Green Economy Opportunities for Rural Europe. EU Rural Review. No 23. European Network for Rural Development. Luxembourg: Publications Office of the European Union. Brussel, 2017. 41 p.
 15. *Hirabayashi Y., Kanae S., Emori S., Oki T., Kimoto M.* Global projections of changing risks of floods and droughts in a changing climate // *Hydrological Sciences J.* 2008. V. 53. № 4. P. 754–772.
<https://doi.org/10.1623/hysj.53.4.754>
 16. IPCC. 2012. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds.: C.B. Field, V. Barros, T.F. Stocker et al. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA. 2012. 582 p.
 17. 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 / Eds.: T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2013. 1535 p.
 18. *Liang Y., Wang Y., Yan X., Liu W., Jin S., Han M.* Projection of drought hazards in China during twenty-first century // *Theor. Appl. Climatol.* 2018. V. 133. P. 331–341.
<https://doi.org/10.1007/s00704-017-2189-3>
 19. Literature Synthesis on Climate Change Implications for Water and Environmental Resources. 2013. Third Edition. Technical Service Center Water Resources Planning and Operations Support Group Water and Environmental Resources Division. U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation Research and Development Office Denver. Colorado. 227 p.
 20. *Nash J.E., Sutcliffe J.V.* River flow forecasting through conceptual models: 1 A discussion of principles // *J. Hydrol.* 1970. V. 10. № 3. P. 282–290.
 21. *Warszawski L., Frieler K., Huber V., Piontek F., Serdeczny O., Schewe J.* The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISI-MIP): Project framework // *Proc. Nat. Acad. Soc.* 2014. V. 111. № 9. P. 3228–3232.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1312330110>
 22. *Wilhite D.A., Glantz M.H.* Understanding the Drought Phenomenon: The Role of Definitions // *Water International.* 1985. V. 10. № 3. P. 111–120.
 23. WWAP (United Nations World Water Assessment Programme)/UN-Water. 2018. The United Nations World Water Development Report 2018: Nature-Based Solutions for Water. Paris. UNESCO. 2018. 139 p.

Scenario Projections of Changes in Water Availability for Wheat Crops in the Steppe Crimea in the 21st Century and a Number of Measures for Increasing the Efficiency of Its Cultivation

Ye. M. Gusev^{1,*}, L. Ya. Dzhogan¹, O. N. Nasonova¹, and E. E. Kovalev¹

¹*Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119333 Russia*

^{*}*e-mail: sowaso@yandex.ru*

An analysis of possible changes of aridity (or water availability) for grain crops and crop yields in 21st century in the Crimean steppe was performed based on the MULCH model, which was previously developed by the authors and simulates heat and water exchange in the soil – mulch cover – vegetation – near-surface atmosphere system, as well as projections of changes in meteorological characteristics simulated by general atmo-

spheric and ocean circulation models for the climate change scenarios of RCP family. It is shown that in the Crimean steppe, the annual course of climatic values of productive soil water reserves, water availability for grain crops and their productivity practically will not change by the end of the 21st century. The causes of this situation are analyzed; the main cause is that precipitation in the 21st century will be nearly the same as now. In this regard, in this region, additional measures for adaptation of agriculture to the consequences of global climate change will be not required. At the same time, it was noted that the influence of such an anthropogenic factor as growth of the needs of the human population under limited biosphere resources will lead to the need for a transition of agriculture of the Crimean steppe to a “green farming” strategy based on nature-like no-till technology.

Keywords: aridity, wheat, crop yield, RCP-scenarios of climate change, no-till technology