

УДК 633.15:551.58

Доктор с.-х. наук А.И. Белолобцев¹
Канд. геогр. наук Е.А. Дронова¹
И.Ф. Асауляк¹

АГРОКЛИМАТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ УРОЖАЯ КУКУРУЗЫ В СТЕПНОЙ ЗОНЕ УКРАИНЫ НА ПЕРИОД ДО 2050 ГОДА

Ключевые слова: климат, теплообеспеченность, влагообеспеченность, кукуруза, фотосинтез, продуктивность, урожай

Разработаны рекомендации по адаптации технологий выращивания кукурузы и улучшения условий формирования урожая при изменении климата.

Введение. Важным звеном проблемы изменения глобального климата является оценка изменения агроклиматических условий выращивания сельскохозяйственных культур и влияния этих изменений на их продуктивность. В связи с ожидаемым повышением температуры воздуха Северного полушария продовольственная безопасность любой страны в значительной степени будет зависеть от того, насколько эффективно адаптируется сельское хозяйство к этим изменениям. Это предполагает заблаговременную оценку влияния ожидаемых изменений климата на агроклиматические условия выращивания сельскохозяйственных культур.

Важным фактором повышения эффективности сельского хозяйства в условиях изменения климата является научно обоснованное размещение посевных площадей сельскохозяйственных культур, адаптация растениеводства к этим изменениям. Это позволит наиболее эффективно использовать природные ресурсы в новых климатических условиях, добиваться устойчивого роста величины и качества урожая, повышать отдачу сырьевых, энергетических и трудовых ресурсов [2, 3].

Материалы и методы исследований. Для оценки изменений агроклиматических ресурсов при возможных изменениях климата был использован сценарий изменения климата в Украине – А1В, как наиболее вероятный на период до 2050 года, региональная климатическая модель MPI-M-REMO, глобальная модель – ECHAM5-r3 [1, 3].

¹ ФГБОУ ВПО РГАУ МСХФ им. К.А. Тимирязева, г. Москва, Россия

Сценарий изменения климата А1В в данной работе реализован в региональной климатической модели REMO с шагом сетки 25×25 км, которая разработана в Институте метеорологии им. Макса Планка в Гамбурге. Особенностью REMO является моделирование не только годовых режимов осадков и температуры, но и изучение меж- и внутрисезонных характеристик. Наиболее точные результаты моделирования REMO показывает именно в пределах Европы, что делает эту модель наиболее приемлемой для использования в этом регионе.

В ходе выполнения работы авторами были проанализированы агроклиматические условия роста и развития кукурузы на территории степной зоны Украины за базовый период 1986...2005 гг. Анализ тенденции изменения климата выполнен путем сравнения данных по климатическим сценариям и средним многолетним характеристикам климатических и агроклиматических показателей за три периода: 1970...2010 гг. (базовый период), 2011...2030 гг. (первый сценарный период), 2031...2050 гг. (второй сценарный период). Для оценки продуктивности кукурузы на фоне изменения климатических условий за первый и второй периоды рассматривались следующие варианты:

- климатические условия периода;
- климатические условия периода + увеличение CO₂ в атмосфере (для первого периода с 380 до 470 ppm, для второго периода с 380 до 520 ppm);
- климатические условия периода + увеличение CO₂ + N₄₀;
- климатические условия периода + увеличение CO₂ + внесение удобрений в дозах N₈₀.

Как теоретическая основа для выполнения расчетов и сравнения результатов была использована модель формирования продуктивности агроэкосистемы, разработанная А.М. Полевым [2]. Идентификация модели формирования урожайности кукурузы выполнена на основе материалов агрометеорологических наблюдений метеостанций степной зоны и материалов средней по зоне урожайности кукурузы.

Результаты исследований и их анализ. Весь период вегетации кукурузы был разбит на два больших межфазных периода: всходы – выметывание метелки, выметывание метелки – восковая спелость. По данным сценария изменения климата А1В были определены даты наступления основных межфазных периодов кукурузы. За дату посева была взята дата перехода температуры воздуха через 10 °С. По данным Чиркова Ю.И. [4]

от посева до всходов накапливается сумма активных температур выше 10 °С, равная 83 °С. Таким образом, набирая необходимую сумму температур мы определяли дату всходов. Даты выметывания метелки и восковой спелости мы определяли по такой же методике, полагая, что основные биологические закономерности роста и развития культуры не изменятся.

В среднем многолетнем дата всходов кукурузы на территории северной степи отмечается во второй декаде мая. Дата выметывания метелки – во второй декаде июля. Продолжительность периода всходы – выметывание метелки составляет 60 суток. Средняя за этот период температура воздуха составляет 18,9 °С. Сумма активных температур – 1135 °С, эффективных – 535 °С. Сумма осадков, которая выпадает за межфазный период всходы – выметывание метелки составляет 142 мм.

Период выметывание метелки – восковая спелость на территории северной степи длится около 38 суток, при средней температуре 20,6 °С. Он начинается в конце второй декады июля и заканчивается в середине третьей декады августа. Сумма активных температур, которая накапливается за этот период, составляет 785 °С, эффективных – 406 °С. Сумма осадков – 65 мм.

В первый расчетный период 2011...2030 гг. дата всходов может сместиться на конец первой декады мая, что на 9 суток раньше, чем в среднем многолетнем. Дата наступления фазы выметывания метелки, вероятно, может сдвинуться в сторону весны не существенно. Таким образом, период всходы – выметывание метелки может увеличиться, по сравнению с базовым, на 7 суток и составит 67. При этом температура воздуха в среднем за период уменьшится до 17,0 °С, а сумма осадков почти не изменится и составит 146 мм (142 мм за базовый период). Период выметывания метелки – восковая спелость в этот расчетный период также увеличится до 42 суток, что на 4 больше по сравнению с базовым. При этом на 2,2 °С уменьшится средняя температура воздуха за этот межфазный период и сумма осадков до 48 мм, что на 17 мм меньше, чем в базовый период.

Во втором расчетном периоде дата всходов может наблюдаться еще на 2 суток раньше, чем в период 2011...2030 гг., и на 11 суток раньше, чем в базовом периоде. Дата наступления фазы выметывания метелки может наблюдаться почти на неделю раньше по сравнению с базовым периодом – в начале первой декады июля. Таким образом, продолжительность периода всходы – восковая спелость также увеличится на 5 суток и может составлять 65 дней. Сумма осадков за этот период по сравнению с базовым периодом почти не изменится. Продолжительность второго межфазного периода выме-

тывание метелки – восковая спелость по сравнению с базовым почти не изменится и составит четыре декады, при этом температура воздуха может держаться на уровне 20,0 °С, а сумма осадков за этот период может увеличиться до 76 мм, что на 11 мм больше, чем за базовый период.

Сравнительная характеристика условий вегетации кукурузы на территории северостепной зоны представлена в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительная характеристика агроклиматических условий
вегетационного периода кукурузы на территории северной степи

Период	Всходы	Восковая спелость	N, сутки	\bar{T} , °С	Сумма температур, °С		Сумма осадков мм
					$\Sigma T_{\text{акт}}$, °С	$\Sigma T_{\text{эфф.}}$, °С	
всходы – восковая спелость							
1986...2005	18.05	24.08	98	19,8	1936	955	207
по сценарию изменения климата							
2011...2030	9.05	26.08	109	17,8	1924	834	194
Разница	-9	+2	+11	-2,0	-12	-121	-13
2031...2050	7.05	19.08	104	18,4	1914	874	220
Разница	-11	-5	+6	-1,4	-22	-81	+13

Весь вегетационный период от всходов до восковой спелости кукурузы может увеличиться до 109 суток в первый и до 104 суток во второй расчетные периоды соответственно. При этом может наблюдаться снижение средней за период вегетации температуры воздуха – в первый период до 17,8 °С, а во второй до 18,4 °С, базовая температура воздуха за весь вегетационный период кукурузы составляет 19,8 °С. Следует отметить, что можно ожидать незначительное снижение суммы осадков за первый расчетный период на 13 мм, а во второй, наоборот, увеличение на 13 мм.

Наиболее существенные изменения вегетационного периода кукурузы следует ожидать на территории сухой степи. Так, в среднем многолетнем дата всходов кукурузы на территории сухой степи наблюдается в начале третьей декады мая. В случае реализации сценария изменения климата А1В можно ожидать существенный сдвиг даты всходов в сторону весны. Почти на две недели в первый расчетный период и на три во второй по сравнению со средними многолетними значениями. Фаза выметывания метелки в период 2011...2030 гг. может наблюдаться на 5 суток раньше, чем в среднем многолетнем – в начале второй декады июля. А во второй расчетный период ее можно будет ожидать в первой декаде июля, что на

целую декаду раньше, чем в базовом периоде. Продолжительность этого межфазного периода увеличится до 63 суток вместо 56 в базовом периоде. При этом, за счет более низких температур в начале вегетации, можно ожидать снижения средней за этот период температуры воздуха – до 18,2 °С. Тогда как в базовом периоде она составляет 20,5 °С. Сумма активных температур, которая накапливается за этот период в среднем многолетнем составляет 1144 °С, сумма эффективных – 584 °С. Средняя многолетняя сумма осадков составляет 142 мм, но в последующие периоды следует ожидать ее существенного уменьшения – до 91 мм в период 2011...2030 гг. и до 62 мм в период 2031...2050 гг. Это на 51 мм и 80 мм меньше, чем по средним многолетним данным.

Дата наступления восковой спелости в среднем многолетнем наблюдается на территории сухой степи в середине третьей декады августа. В первый расчетный период она почти не претерпевает существенных изменений, может немного сдвинуться в сторону лета – на 4 суток. Но во второй расчетный период ее можно ожидать, на целую декаду раньше. При этом общая продолжительность этого межфазного периода не претерпит существенных изменений. При среднем многолетнем значении в 38 суток она может увеличиться до 40 суток в первый расчетный период и 39 суток во второй. Также не претерпит существенных изменений и температурный фон. Средняя температура воздуха за этот период составляет 22,4 °С, в расчетные периоды она может составлять 21,5 и 22,1 °С соответственно. Но, к сожалению, может наблюдаться значительное уменьшение количества осадков – с 65 мм в базовый период до 34 мм в период 2011...2030 гг. и до 24 мм в период 2031...2050 гг. В среднем многолетнем за этот межфазный период накапливается 851 °С сумм активных температур и 471 °С – сумм эффективных температур.

Продолжительность всего периода вегетации кукурузы на территории сухой степи в среднем многолетнем составляет 95 суток при температуре воздуха 21,2 °С (табл. 2).

В случае реализации сценария изменения климата А1В можно ожидать ее увеличения до 103 суток, при этом средняя за период вегетации температура воздуха может составлять 19,5 °С, что на 1,7 °С ниже, чем в базовый период. В среднем многолетнем на территории сухой степи за вегетационный период кукурузы накапливается 2014 °С сумм активных температур и 1064 °С сумм эффективных температур. Сумма осадков в среднем многолетнем составляет 207 мм, но она может претерпеть суще-

ственные изменения. В первый расчетный период в целом за вегетацию кукурузы она может снизиться до 125 мм, что на 82 мм меньше чем в базовом периоде. А во второй расчетный период может наблюдаться ее дальнейшее уменьшение – до 86 мм. Таким образом, наиболее негативные изменения агроклиматических условий вегетационного периода кукурузы может испытывать территория сухой степи. Под влиянием изменения агроклиматических условий выращивания кукурузы, произойдет смена показателей фотосинтетической продуктивности культуры, к которым в первую очередь относится площадь ассимилирующей поверхности посевов (рис. 1). На рисунке на оси x расположены декады вегетации, на оси y – площадь листовой поверхности m^2/m^2 .

Таблица 2

Сравнительная характеристика агроклиматических условий вегетационного периода кукурузы на территории сухой степи

Период	Всходы	Восковая спелость	N, сутки	\bar{T} , °C	Сумма температур, °C		Сумма осадков мм
					$\Sigma T_{акт.}$, °C	$\Sigma T_{эфф.}$, °C	
всходы – восковая спелость							
1986...2005	21.05	24.08	95	21,2	2014	1064	207
по сценарию изменения климата							
2011...2030	9.05	20.08	103	19,5	2007	977	125
Разница	-12	-4	+8	-1,7	-7	-87	-82
2031...2050	4.05	14.08	102	19,6	2003	983	86
Разница	-17	-10	+7	-1,6	-11	-81	-121

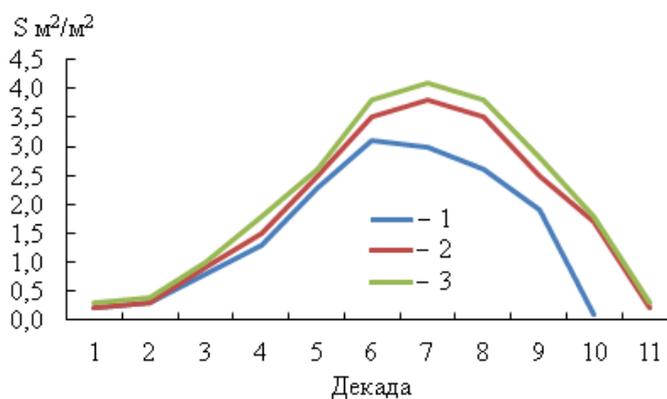


Рис. 1. Динамика относительной площади листовой поверхности кукурузы в условиях изменения климата по сравнению с базовым периодом по сценарию на 2011...2030 гг. 1 – базовый период; 2 – по сценарию изменения климата; 3 – сценарий + CO₂.

Как видно из данных рис. 1, в период 2011...2030 гг. площадь листовой поверхности наиболее интенсивно будет расти в 5...6 декаде вегетации, когда ее увеличение только за счет изменения климатических условий может достигать 0,9...1,1 м²/м² за декаду. Для 2-го периода уровень интенсивности фотосинтеза в начале вегетации за счет изменения климатических условий увеличится на 0,4...0,7 мг·СО₂/(дм²·ч) по сравнению с базовым периодом.

Рост содержания СО₂ в атмосфере до 470 ppm приведет к еще большим темпам формирования листовой поверхности. Площадь листовой поверхности за период максимального развития увеличится с 3,09 до 4,07 м²/м². Это свидетельствует о том, что улучшатся условия вегетации, на которые растения реагируют в первую очередь увеличением площади листьев. Так, внесение азотных удобрений в дозе 60 кг (д.в.)/га повлечет увеличение темпов роста листьев до 1,1...1,3 м²/м²·за-декаду в период максимального роста.

При внесении азотных удобрений в дозе 120 кг (д.в.)/га максимальная площадь листьев будет достигать 4,9 м²/м². Фотосинтетический потенциал посевов увеличится при внесении удобрений на 70...84 % по сравнению с базовым периодом.

Климатические условия периода 2031...2050 гг. обусловят несколько менее быстрый темп нарастания ассимилирующей поверхности посевов кукурузы по сравнению с базовым периодом. При повышении содержания СО₂ в атмосфере до 520 ppm будет происходить более стремительное нарастание листовой поверхности и в период максимального развития она составит 4,15 м²/м², что в 1,3 раза больше чем в базовый период.

Внесение азотных удобрений в дозах N₄₀ и N₁₂₀ приведет к существенному росту площади листьев, размеры которой могут достигать 4,6 и 5,0 м²/м². При этом значительно возрастет фотосинтетический потенциал посевов, который будет составлять соответственно 168 и 182 % от базового периода.

За счет изменения климатических условий в 1-ом периоде будет наблюдаться повышение фотосинтеза в первые пять декад вегетации по сравнению с базовым периодом на 0,2...0,4 мг·СО₂/(дм²·ч) (рис. 2).

Повышение СО₂ приведет к увеличению разницы в интенсивности фотосинтеза, которая будет на 0,6...0,8 мг·СО₂/(дм²·ч) превышать базовую. Внесение удобрений повысит уровень интенсивности фотосинтеза в период его максимальных значений до 8,7...8,9 мг·СО₂/(дм²·ч) по сравнению с базовым периодом.

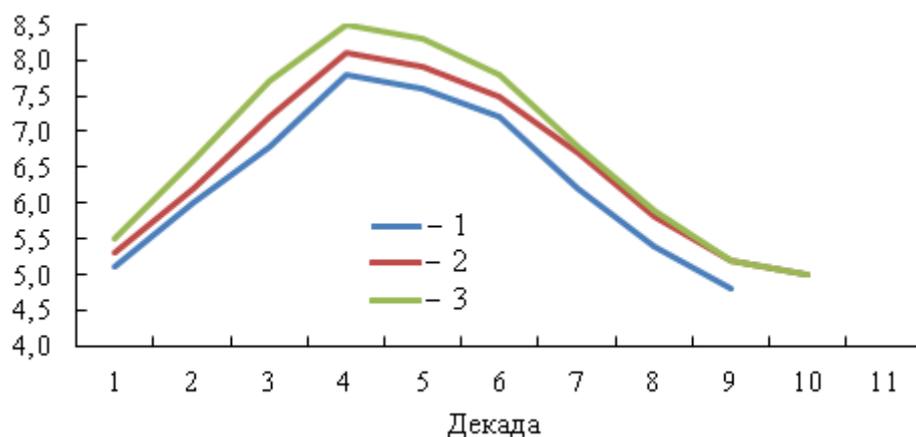


Рис. 2. Динамика интенсивности фотосинтеза кукурузы в условиях изменения климата по сравнению с базовым периодом по сценарию на 2011...2030 гг. Усл. обозн. см. рис. 1.

В условиях увеличения содержания CO_2 в атмосфере с 380 до 470 ppm, повысится уровень интенсивности фотосинтеза посевов в декаду с его максимальными значениями с 7,9 до 8,8 $\text{мг}\cdot\text{CO}_2/(\text{дм}^2\cdot\text{ч})$. При внесении удобрений уровень интенсивности фотосинтеза повысится до 9,1...9,4 $\text{мг}\cdot\text{CO}_2/(\text{дм}^2\cdot\text{ч})$.

Такая динамика площади ассимилирующей поверхности и интенсивности фотосинтеза приведет к соответствующему уровню динамики общей сухой биомассы посевов. При изменении климатических условий в 1-м периоде накопление общей биомассы будет происходить довольно быстрыми темпами. Наиболее высокие приросты общей биомассы будут наблюдаться в 7...8 декадах. Только за счет изменений климатических условий максимальный прирост увеличится от 17,8 до 19,0 $\text{г}/(\text{м}^2\cdot\text{сут})$. С учетом изменения содержания CO_2 в атмосфере с 380 до 470 ppm рост будет составлять 22 % по сравнению с базовым периодом. Внесение удобрений увеличит максимальные приросты биомассы до 23,8...25,7 $\text{г}/(\text{м}^2\cdot\text{сут})$. По сравнению с базовым периодом приросты увеличатся на 34...44 %. Во 2-й период не ожидается существенного увеличения прироста биомассы по сравнению с базовым периодом. Повышение содержания CO_2 в атмосфере до 520 ppm увеличит уровень приростов общей биомассы особенно в 7...8-ю декады вегетации. Приросты общей биомассы увеличатся с 17,8 до 22,6 $\text{г}/(\text{м}^2\cdot\text{сут})$ или на 27 %. Внесение удобрений приведет к дальнейшему увеличению максимальных приростов общей биомассы до 24,9...26,8 $\text{г}/(\text{м}^2\cdot\text{сут})$, что составит 140...151 % по сравнению с базовым периодом. Изменение и рост уровня показателей фотосинтетической про-

дуктивности посевов кукурузы в условиях изменения климата приведет и к увеличению урожая зерна. Наибольший эффект будет наблюдаться при внесении удобрений. В ожидаемых климатических условиях 1-го периода урожай зерна вырастет с 26,1 до 35,2 ц/га (на 27 %). Повышение концентрации CO₂ в атмосфере приведет к росту уровня урожая зерна на 44 %. Внесение удобрений в дозе N₆₀ 60 кг(д.в.)/га повысит этот эффект роста урожая на 59 %, а внесение дозы N₁₂₀ кг(д.в.)/га позволит получить урожай зерна на 70 % выше по сравнению с базовым периодом.

Во 2-й период за счет только изменения климатических условий ожидается увеличение урожая зерна до 31,8 ц/га (на 22 %). Увеличение содержания CO₂ в атмосфере от 380 до 520 ppm обусловит увеличение урожая зерна до 38,7 ц/га (на 48 %). Внесение удобрений на фоне изменения климатических условий и существенное увеличение содержания CO₂ в атмосфере обеспечит дальнейшее повышение урожая зерна кукурузы. В зависимости от дозы вносимых удобрений N₆₀ и N₁₂₀ урожай зерна может составить при внесении удобрений в дозе N₆₀ – 42,5 ц/га, а при дозе N₁₂₀ – 45,9 ц/га, что соответственно на 63 и 76 % выше по сравнению с базовым периодом.

Следует отметить, что в последние годы внедряются в производство новые высокопродуктивные сорта и гибриды кукурузы. Методика проведенных расчетов также может быть применена при оценке возможных изменений производительности новых сортов и гибридов в условиях изменения климата.

Производство зерна кукурузы в степной зоне Украины обеспечивают благоприятные почвенно-климатические условия, высокоурожайные сорта и современная технология выращивания культуры. Агроклиматические условия выращивания кукурузы в целом по зоне достаточно благоприятны, но изменение климата повлечет необходимость адаптации к ним. Оценка агроклиматических условий вегетации кукурузы позволила установить, что несколько повышенный температурный режим в апреле даст возможность сдвинуть оптимальные сроки сева кукурузы на 10...15 суток раньше по сравнению с установленными оптимальными средними многолетними сроками. Это позволит уменьшить затраты влаги на испарение, сформировать дружные всходы и более продуктивно использовать влагу для формирования ассимиляционного аппарата и роста початков. Опоздание со сроками сева на 15...20 суток ставит формирование урожая в большую зависимость от условий увлажнения второй половины вегетации, которые могут быть достаточно напряженными, особенно на территории сухой степи.

В этих условиях следует отдавать предпочтение гибридам ранне-спелых и среднеранних групп кукурузы, которые имеют менее длительный вегетационный период по сравнению со среднеспелыми и средне-позднеспелыми группами и более продуктивно используют влагу для формирования урожая.

Оценка агроклиматических условий темпов развития и наступления спелости кукурузы позволила установить сроки наступления фазы восковой спелости, что также поможет несколько скорректировать сроки уборки урожая. Сроки спелости зерна определяют способы и начало уборки урожая кукурузы.

Учет сроков уборки урожая позволит заблаговременно подготовить уборочную технику в новых климатических условиях, чтобы избежать недобора урожая за счет осыпания, запала и щуплости зерна, подготовить предприятия и элеваторы для приемки, хранения и переработки зерна.

Выводы. Выращивание кукурузы в степной зоне в целом обусловлено благоприятными почвенно-климатическими условиями, применением высокоурожайных сортов и современными технологиями выращивания культуры. Но изменение климата приведет к изменению агроклиматических условий вегетационного периода кукурузы, что повлечет необходимость адаптации к этим изменениям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ЕАОС, ОБСЕ, ЮНЕП, ПРООН, ЕЭК ООН, РЭЦ, НАТО. Изменение климата и продовольственная безопасность в Восточной Европе / Отчет о проведении практического семинара по разработке сценариев. – Берлин. 2011. – 62 с.
2. Полевой А.Н. Моделирование фотосинтеза зеленого листа у растений типа С3 и С4 при изменении концентрации CO₂ в атмосфере / В сб. Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. – М.: ИГКЭ, Том XXIII. – 2010. – С. 297-315.
3. Польовий А.М., Божко Л.Ю., Дронова О.О. Зміна показників термічного режиму повітря в Україні на період до 2030 р. // Український Гідрометеорологічний Журнал – 2014. – № 14. – С. 35-43.
4. Чирков Ю.И. Агрометеорологические условия и продуктивность кукурузы // Под ред. акад. Ф.Ф. Давитая. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 251 с.

Поступила 7.06.2017

