

УДК 632.1:551.58

## РЕАКЦИЯ СОРНОГО КОМПОНЕНТА АГРОФИТОЦЕНОЗОВ НА ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА

© 2020 г. Е. И. Кошкин<sup>1,\*</sup>, И. В. Андреева<sup>1</sup>, Г. Г. Гусейнов<sup>2</sup>,  
К. Г. Гусейнов<sup>3</sup>, Ф. С.-У. Джалилов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева  
127550 Москва, Тимирязевская ул., 49, Россия

<sup>2</sup> Группа компаний “НН group”  
AZ1102 Баку, шоссе Хырдалан-Бинагади 34Н, Азербайджанская Республика

<sup>3</sup> Институт защиты растений и технических культур  
AZ1100 Гянджа, ул. Азиза Алиева, 91, Азербайджанская Республика

\*E-mail: ekoshkin@rgau-msha.ru

Поступила в редакцию 22.04.2020 г.

После доработки 18.05.2020 г.

Принята к публикации 10.08.2020 г.

В обзоре рассмотрена реакция разных видов (жизненных форм) сорняков на повышение концентрации CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, доз УФ-В в разном сочетании на фоне возрастающей температуры, варьирующих влагообеспеченности и агрофона. Проанализированы эффекты указанных факторов на конкурентоспособность культурных и сорных растений в агрофитоценозе и возможные изменения использования гербицидов в целях защиты посевов от сорняков.

**Ключевые слова:** сорняки, конкуренция с культурой, защита посевов от сорняков, гербициды, изменения климата.

**DOI:** 10.31857/S000218812011006X

### ВВЕДЕНИЕ

Глобальные изменения климата, основной причиной которых называют повышение концентрации парниковых газов (CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>, NO, N<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub> и др.) в атмосфере, оказывают все более заметное воздействие на биосферу, трансформируя экосистемы и меняя привычный уклад жизни людей. По расчетным оценкам, повышение уровня приземной температуры воздуха достигнет величины в 1.5°C по сравнению с доиндустриальным уровнем уже в период между 2030 и 2052 гг. при сохранении текущих темпов роста на 0.2°C за десятилетие [1]. Основным итогом изменений климата и экономической глобализации в мире – повышенная непредсказуемость пространственно-временной взаимосвязи погоды, применяемой агротехники культур и вредных организмов в агрофитоценозе. В свою очередь, это может создать неопределенность в разработке мер и технологий их контроля.

Влияние факторов, ответственных за глобальные климатические изменения, на сельскохозяйственные культуры достаточно хорошо изучено [2]. Установлен широкий диапазон возможной реакции видов культур на повышение температуры, изменение количества осадков, увеличение

концентрации CO<sub>2</sub> в воздухе. В целом для регионов умеренного климата прогнозируется скорее позитивный эффект происходящих климатических изменений на урожайность полевых культур и скорость прохождения фаз развития, однако на этом фоне повышается их чувствительность к вредным организмам, что зачастую не учитывают в прогнозных оценках продуктивности агросистем.

Хотя системы защиты растений сыграли важную роль в увеличении производства сельскохозяйственной продукции за последние 50 лет [3], это было достигнуто зачастую благодаря избыточному использованию пестицидов, что противоречит последним нормативным актам, принятым, в частности, в ЕС по снижению пестицидной нагрузки на посевы [4]. Вместе с тем, увеличение влияния антропогенных факторов, в том числе глобальное перемещение людей и товаров (продуктов) растительного происхождения, повышает риски проникновения экзотических вредных организмов в новые регионы, которые ранее были непригодны для произрастания [5]. В результате в некоторых регионах, избыточно влажных, или, напротив, засушливых и жарких, это может существенно снизить урожайность и

вынудит пересмотреть практикуемые мероприятия по защите посевов в силу их неэффективности [5]. Кроме того, последнее может заметно увеличить концентрацию  $\text{CO}_2$  в воздухе из-за резкого снижения фотосинтеза и, соответственно, поглощения  $\text{CO}_2$  агрофитоценозом.

Имеющиеся сегодня модели изменения климата часто не учитывают его возможные эффекты на динамику и видовой состав сорного ценоза в посевах полевых культур. Это обусловлено отсутствием результатов длительных наблюдений или эмпирических подходов для их включения в указанные модели, что снижает точность прогнозов [6]. Цель работы – оценить реакцию разных видов (жизненных форм) сорняков на повышение концентрации  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_3$ , доз УФ-В в разном сочетании на фоне возрастающей температуры, варьирующих влагообеспеченности и агрофона и проанализировать эффекты указанных факторов на конкурентоспособность культурных и сорных растений в агрофитоценозе и возможные изменения использования гербицидов в целях защиты посевов от сорняков.

## СОРНЫЕ РАСТЕНИЯ В АГРОФИТОЦЕНОЗАХ

В глобальном смысле сорные растения вызывают наибольшие потери урожая (34%) в сравнении с вредителями (18%) и болезнями (16%) [3]. В США потери урожая только кукурузы изменялись от 10 до 83%, а в восточной Канаде за период с 2007 по 2013 г. они составили в среднем 51% [7]. Средние потери урожая зерновых колосовых культур от сорняков в Российской Федерации варьируют в диапазоне 15–22, пропашных культур – 35–45 и овощных – до 70% [8]. На сельскохозяйственных угодьях Центрального федерального округа РФ встречается более 35 видов сорных растений из более чем 20 ботанических семейств, при этом отмечен все возрастающий уровень встречаемости на полях злостных, трудно искореняемых видов (до 30% пула сорняков) при их общем количественном увеличении (до 250 шт./м<sup>2</sup> двудольных, в том числе до 40 шт./м<sup>2</sup> корнеотпрысковых). Причиной такого положения на фоне изменения климата может являться грубое нарушение агротехники, включая отход от принятых севооборотов и систем обработки почвы, а также снижение числа всех мероприятий по борьбе с сорняками. В Сибири известны более 300 видов сорных растений, из них распространены 67 видов, в том числе 37 наиболее вредоносных [9]. Сорные растения, как и теплолюбивые культуры, по мере потепления климата расширяют ареал своего распространения в северные широ-

ты, где могут служить в качестве растения-хозяина для новых вредителей и болезней.

Конкурентная способность культуры в посевах с сорной растительностью определяется прежде всего физиолого-биохимическими особенностями культурного и сорного растения (вид/форма, скорость начального роста, в том числе корней, фаза развития или этап органогенеза, тип фотосинтетического метаболизма углерода ( $\text{C}_3$ - и  $\text{C}_4$ -виды), аллелопатические взаимодействия, устойчивость к стрессорам и др.) [10, 11]. Заметное влияние на этот показатель оказывают почвенные (влажность, pH, плотность и способы обработки почвы, агрофон) и погодные условия, агротехника культуры (густота посева, ширина междурядий, севооборот), а также количество, соотношение и даже пространственное распределение отдельных сорных видов в агрофитоценозе. Что касается эффективности использования ресурсов (воды, солнечной радиации, элементов питания) у видов с одним и тем же циклом фотосинтетического метаболизма углерода ( $\text{C}_3$  или  $\text{C}_4$ ), она в силу большей устойчивости к стрессорам и пластичности преимущественно выше у сорных видов, что зачастую, хотя и не всегда, может определять их более высокую в сравнении с культурой конкурентоспособность в посевах.

Экстремальные климатические явления, такие как засухи, наводнения, ураганы, частота возникновения которых, как ожидается, в условиях климатических изменений будет возрастать, также могут усилить инвазию сорных растений, в том числе по причине ослабления биотической резистентности аборигенных природных видов.

Пристального внимания заслуживает конкуренция культурных и сорных растений в агрофитоценозе при повышенной концентрации  $\text{CO}_2$ . При этом нетто-фотосинтез, накопление биомассы и продуктивность  $\text{C}_3$ -культур увеличивается больше, чем  $\text{C}_4$ -видов [2]. Среди 15-ти наиболее важных полевых культур, за исключением кукурузы, сорго, сахарного тростника, 12 относятся к растениям с  $\text{C}_3$ -циклом. С другой стороны, 14 из 18 наиболее злостных сорняков в мире представлено  $\text{C}_4$ -видами. Среди них свинорой, сыть округлая, гумай, куриное просо, шетинник зеленый, сорго алеппское, ширица запрокинутая, ежовник обыкновенный, росичка гребневидная и др. [12]. В то же время 19 из 38 типичных сорняков в посевах кукурузы ( $\text{C}_4$ -вида) имеют  $\text{C}_3$ -цикл метаболизма углерода. Анализ показывает, что в посевах  $\text{C}_4$ -культур увеличение концентрации  $\text{CO}_2$  повышает конкурентоспособность как  $\text{C}_4$ -, так и  $\text{C}_3$ -сорных видов, в посевах  $\text{C}_3$ -видов –  $\text{C}_3$ -сорняков. Вместе с тем  $\text{C}_3$ -культуры в последнем случае получают преимущество над  $\text{C}_4$ -сорными вида-

ми. При этом особенно существенным может быть реакция многолетних инвазивных видов, в частности, бодяка полевого, биомасса которого увеличилась на 70% [13].

Вместе с тем зависимость конкурентоспособности растительных особей в агрофитоценозе от большого числа факторов и условий осложняет прогнозирование исхода их конкуренции только на основе типов углеродного метаболизма, как и обнаружение одного единственного показателя, ее лимитирующего.

### ПОВЫШЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

С повышением содержания парниковых газов в атмосфере и температуры воздуха ареал распространения многих сорных видов с  $C_4$ -типом метаболизма, таких как щирица запрокинутая (*Amaranthus retroflexus* L.), щетинник зеленый (*Setaria viridis*), росички (*Digitaria*), гумай (*Sorghum halepense* L.) может распространиться на север, что значительно расширит число сорных видов в Северной Европе [14–16]. Щетинник зеленый может стать серьезным конкурентом кукурузы при повышении температуры в период ее прорастания в условиях северной части Центральной Европы, где температуры пока ниже оптимальных для этой культуры [17]. В условиях повышенных температур и аридизации климата в районах интенсивного растениеводства  $C_4$ -сорные виды, в частности, щирица запрокинутая будут доминировать в посевах  $C_3$ -культур (сои), а подорожник малый (*Plantago minor*) с повышением концентрации  $CO_2$  – в посевах пшеницы [18, 19]. Вместе с тем, глобальное потепление климата повышает частоту наступления экстремальных погодных условий, в результате чего снижаются популяции видов сорных растений с недостаточной фенотипической пластичностью и меняется число видов и их соотношение и в агрофитоценозах [20, 21].

Показано, что поглощение корневой системой и восходящий транспорт почвенных гербицидов по ксилеме, как и их трансформация в почвах также будут зависеть от повышающейся температуры [22]. Температура оказывает существенное влияние на скорость деградации почвенных гербицидов, в частности, из группы сульфонилмочевины [23]. При послевсходовой обработке посевов испаряемость некоторых гербицидов, в частности, трифлуралина (trifluralin) с повышением температуры возрастает, что снижает его эффективность против сорняков [24]. Абсорбция глифосата листьями  $C_3$ -сорняка десмодиума извилистого (*Desmodium tortuosum* (Sw.) DC.) также зависела от температуры [25]. Вместе с тем увеличение температуры и относительной влажности воздуха способствовало трехкратному повышению эф-

фективности действия гербицида мезотрион (mesotrione) при защите от амброзии [26]. Именно относительная влажность воздуха, оказывая влияние на гидратацию кутикулы и высыхание капель рабочего раствора гербицида на поверхности листьев, определяла максимальный фитотоксичный эффект сульфонилмочевины [27]. Эффективность применения гербицида пиритиобак-натрия (pyrithiobac) против щирицы Палмера (*Amaranthus palmeri*) достигала максимума в диапазоне температур 20–34°C, снижаясь за его пределами [28]. Глюфосинат практически полностью подавлял рост редьки дикой при дневной/ночной температуре 20/15 и 25/20°C, но не при 10/5°C [29].

### ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА СОРНЫЕ РАСТЕНИЯ

Температура почвы играет ключевую роль в прорастании семян сорных растений и их выживании, особенно в условиях холодной почвы [30]. Установлен широкий диапазон температур для прорастания семян видов сорных растений. Например, звездчатка средняя (*Stellaria media* L.) хорошо выживает в холодном климате, в то время как некоторые из наиболее злостных сорных растений в посевах сои, кукурузы и хлопчатника реагируют на температурный градиент в несколько градусов. Ежовник обыкновенный (куриное просо), как и сида колючая, относится к достаточно теплолюбивым видам с высоким температурным оптимумом для роста и накопления сухой массы. Пространственное распространение гумая (*Sorghum halepense* L.) в относительно прохладном климате ограничивается чувствительностью ризом к температуре  $< -3^\circ C$ . Не отличается холодоустойчивостью также вьюнок полевой (*Convolvulus arvensis* L.) [31], однако он прорастает в достаточно широком диапазоне температур (15–35°C) с оптимальной температурой  $\approx 24^\circ C$ . Интересно, что в ответ на повышение температуры на 3°C биомасса и площадь листьев ротбеллии высокой (*Rottboellia cochinchinensis* (Lour.) W.D. Clayton) увеличились соответственно на 88 и 68% [32].

Большие потери урожая сои и кукурузы на среднем западе США обусловлены распространением ряда очень агрессивных видов сорных растений тропического и субтропического происхождения, например, гумая [33]. По мере повышения температуры прогнозируется дальнейшее перемещение подобных сорных видов в более северные широты, особенно  $C_4$ -видов, в частности, споробола индийского (*Sporobolus indicus* L.) [34]. Распространение сорных видов типично умеренной зоны – дикого проса (*Panicum millacum* L.) и бодяка полевого (*Canada thistle* L.), напротив, будет ограничиваться [35].

В России, согласно экспертным оценкам, потепление климата может привести к “осеврению” сельского хозяйства и оказать позитивное влияние на урожайность в умеренных и высоких широтах [36]. Хотя потепление на 1°C и продвигает экономически оправданную границу возделывания зерновых культур в России на 300 км в более высокие широты и, возможно, станет позитивным фактором для умеренных зон, это не сможет компенсировать потерь урожая в основных зерновых районах, где усилится аридизация. Последняя по мере дальнейшего потепления климата будет способствовать доминированию видов сорняков с глубоко проникающей мощной корневой системой. Кроме того, искомые условия содействуют более длительному, вплоть до 7 лет, сохранению жизнеспособности/всхожести семян сорных растений в сухой почве [37], что показано в частности для горца многоцветкового (*Polygonum cilinode Michx*). Интересно, что в условиях Австралии куманика (*Rubus fruticosus L.*) – типичный вид сорных растений в посевах сельскохозяйственных культур – смещается в более северные широты из-за чувствительности к повышенным температурам и засухе. Аналогичная тенденция отмечена для улекса европейского (*Ulex europaeus L.*) и лантаны сводчатой (*Lantana camara L.*), что обусловлено их повышенной требовательностью к обеспечению влагой. Засуха снижает конкурентоспособность щетинника [38], но повышает ее у гумая в посевах кукурузы [39].

Из-за общей тенденции потепления климата в Центральной России отмечено заметное повышение уровня засоренности посевов пропашных культур (кукурузы) позднелетними теплолюбивыми видами сорняков, в частности, ежовником обыкновенным и щирицей запрокинутой [8]. В последней работе выделена группа из 16-ти видов сорняков, численность и вредоносность которых во всех регионах России в последние десятилетия неуклонно растет. При этом сорный ценоз, в частности, в посевах озимой пшеницы, отличается по годам не только видовым разнообразием, но и биологическими группами и жизненными формами. Вследствие потепления климата и мягких условий перезимовки доля зимующих сорняков (ромашки непахучей, пастушьей сумки, звездчатки средней, фиалки полевой, осота полевого, ярутки полевой, мятлика однолетнего) в посевах озимой пшеницы составила в ценозе сорной растительности >70% и за последнее десятилетие увеличилась с 40 до 80%. При этом отмечена миграция в северные регионы России ряда южных видов сорняков – щирицы запрокинутой, ежовника обыкновенного, мальвы приземистой, бурчника лекарственного, латука компасного, молочая остроуго, паслена черного и льнянки обыкновенной.

Сумма эффективных температур (>5°C) в Азербайджанской Республике за последние 25–30 лет увеличилась в зависимости от региона на 5–8°C, причем особенно сильно на юге, западе и северо-западе страны на фоне заметного снижения количества осадков. Это привело к аридизации климата и существенному уменьшению гидротермического коэффициента, рассчитываемого как отношение суммарного количества осадков к сумме эффективных температур. Это не могло не сказаться на продуктивности полевых культур, поскольку >60% сельхозгодий уже находилось в полузасушливых районах страны.

Хотя в Азербайджане последние 20 лет посевные площади под орошением увеличились на 23%, это не затронуло предгорные и горные районы республики, что благодаря пластичности сорняков резко увеличило их вредоносность в посевах. Многие из видов сорных растений, характерных для этих полей в 1980-е гг., в связи с изменением климатических условий перестали расти в прежних агроценозах и мигрировали в северные районы республики. Причиной этого является уменьшение суммы осадков за последние годы. На орошаемых полях видовой состав сорных растений сохранился неизменным, как и на фермерских полях, где практикуют монокультуру, и для защиты от сорняков широко используют гербициды.

Потепление может ускорить развитие растений, в том числе сорных видов. Например, в опытах повышение температуры на 4°C (нереальное в природе) ускорило появление всходов мари белой и щетинника на 26 и 35 сут соответственно, цветение – на 50 и 31.5 сут [40]. Накопление биомассы у C<sub>3</sub>-растений оказалось более чувствительным к повышению температуры, что может нивелировать позитивный эффект углекислотной подкормки на накопление биомассы в репродуктивной фазе и семенную продуктивность сорных видов. Согласно модели, в Англии лисохвост мышехвостный (*Alopecurus myosuroides*) в посевах озимой пшеницы к 2046–2065 гг. в результате повышения температуры может распространиться в зависимости от типа и водоудерживающей способности почв далеко на север страны [41].

К вопросу о возможностях моделирования роста и развития сорных видов в посевах обращаются и российские исследователи [42]. Однако предлагаемая модель учитывает, во-первых, только агротехнические факторы (вспашку, сроки сева, удобрения) и физиологические особенности растений (банк семян, жизненную форму и др.), и, во-вторых, имеет жесткие условия, при которых модельный прогноз наиболее точен (например, только для участков со слабой, средней и сильной засоренностью). Эти особенности приводят к

ограниченному использованию математических зависимостей на практике, тем более что они не учитывают влияние изменяющихся факторов среды на конкурентоспособность культурных и сорных растений в агрофитоценозе.

### ПОВЫШЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ CO<sub>2</sub>

Повышенные концентрации CO<sub>2</sub> могут увеличить фотосинтез и продуктивность сельскохозяйственных культур [2], изменить морфологию растений, структуру и архитектуру посева, микроклимат и соотношение органов растений в ценозе и др. [43].

Как и полевые культуры, многие сорные растения реагируют положительно на данный фактор, причем в результате снижения устьичной апертуры продуктивность транспирации у них возрастает [35, 44]. C<sub>3</sub>-виды увеличивают площадь листьев и биомассу в большей мере, чем C<sub>4</sub>-виды [45]. При этом обнаружена достаточно широкая норма реакции на повышение концентрации CO<sub>2</sub> благодаря взаимодействию этого фактора с температурой, освещенностью, влагообеспеченностью и агрофоном. Искомый фактор стимулирует рост и накопление биомассы C<sub>3</sub>- (овсяница), C<sub>3</sub>/C<sub>4</sub>-переходного вида (просо) и C<sub>4</sub>-видов (амброзия). Углекислотная подкормка стимулировала образование пыльцы у щирицы и скорость развития овсяга (*Avena fatua* L.).

В этих условиях заметно повышается также репродуктивный потенциал сорняков. Например, многократно увеличилось количество цветков щирицы [46], что непосредственно коррелировало с накоплением большей биомассы и повышенной площадью листьев [47, 48]. Кроме того, в этих условиях увеличивается как биомасса, так и доля корней в биомассе растения, как это показано на примере бодяка полевого, что затрудняет контроль за многолетними сорными растениями [49] и расширяет ареал их распространения.

Установлено также, что сильнее на повышение концентрации CO<sub>2</sub> реагируют виды C<sub>3</sub>-сорняков, размножающиеся вегетативным способом [50]. Поэтому прогнозируют, что распространение многолетних сорняков, доминирующих, в частности, в посевах риса и сои, будет расширяться из-за стимулирования роста именно корневых систем [51].

Повышенная концентрация озона при выращивании сои и пшеницы в двупольном севообороте при нулевой обработке почвы не оказывала влияние на содержание азота в почве и ее микробиологическую активность, накопление биомассы, густоту стеблестоя и минерализацию азота в отличие от повышенной концентрации CO<sub>2</sub> при выращивании, стимулировавшей эти процессы

[2, 52]. Вместе с тем в другом опыте с соей повышение концентрации O<sub>3</sub> на 20% увеличило содержание азота и углерода в почве соответственно на 12 и 15% [53] на фоне повышения содержания N-NH<sub>4</sub>. Последнее могло быть обусловлено меньшей симбиотической азотфиксацией, что обнаружено также в посеве арахиса [54]. Потенциальное влияние повышенных концентраций озона как на конкурентоспособность культурных и сорных растений в агрофитоценозе, так и круговорот питательных веществ в почве до сих пор корректно не оценено в регионах высокоинтенсивного сельского хозяйства, в частности, в южной Калифорнии, Восточном Китае или на севере Индии, где влияние O<sub>3</sub> на полевые культуры в силу высокого содержания существенно [55]. Например, у сои с увеличением концентрации O<sub>3</sub> с 30 до 90 ppb, нереальных в природе и ожидаемых лишь в конце XXI столетия, эффективность утилизации солнечной энергии снизилась с 0.89 до 0.68 г сухой массы/МДж, а урожайность семян — с 450 до 320 г/м<sup>2</sup>. По имеющимся на сегодня данным, температура не играет такой значимой роли в определении чувствительности растений к O<sub>3</sub>.

Что касается сравнительных исследований действия повышенных концентраций CO<sub>2</sub> и O<sub>3</sub> в отдельности и в сочетании, проведенных на редиесе, оба газа снижали устьичную проводимость, а их сочетание снижало ее еще сильнее. Действие озона уменьшало эффективность использования влаги (ЭИВ), а CO<sub>2</sub>, напротив, повышало. Сочетание действия 2-х газов, не оказывая вначале заметного влияния на ЭИВ, существенно ее снижало с увеличением экспозиции по сравнению с действием данных газов в отдельности. Это связано с ускорением старения растения под действием озона. Подобных исследований на сорняках не проводили.

В опытах с пшеницей и овсягом — доминирующим сорным растением в посевах пшеницы повышенные дозы ультрафиолетовой радиации, коррелирующей отрицательно с содержанием тропосферного озона, не влияя на интенсивность фотосинтеза, увеличивали конкурентоспособность пшеницы за счет ингибирования роста стеблей растений овсяга (*Avena fatua* L.).

Вместе с тем опыты в фитотроне на растениях подсолнечника и кукурузы при разном сочетании повышенных температуры, концентрации CO<sub>2</sub> и доз УФ-В радиации показали, что температура и CO<sub>2</sub> гораздо сильнее влияли на рост и накопление биомассы, чем любое реалистичное повышение УФ-В излучения.

Ультрафиолетовая радиация, в отличие от озона, даже при очень высоком уровне излучения не вызывала заметного изменения интенсивности

фотосинтеза или урожайности сои, а взаимодействия УФ-В и  $O_3$  практически не было. Пока неясно, в какой мере подобные реакции видоспецифичны, особенно по отношению к сорнякам. Однако даже имеющиеся на сегодня отдельные данные свидетельствуют о том, что  $O_3$  представляет для полевых культур гораздо более серьезную проблему, чем увеличение доз УФ-В излучения.

Исследования совместного действия повышенной температуры и концентрации  $CO_2$  на конкурентоспособность культурных и сорных растений в агроценозах единичны [56]. В данной работе показано, что при повышении концентрации  $CO_2$  и температуре 27/21°C  $C_3$ -растения риса получают преимущество в урожайности над сорными растениями с  $C_4$ -типом фотосинтеза. Вместе с тем при одновременном повышении как концентрации  $CO_2$ , так и температуры преимущество переходит к сорному растению. Данное исследование показывает, что результат конкуренции культурного и сорного растения в посеве трудно предсказать на основе только знаний эндогенных механизмов регуляции фотосинтеза растений, принадлежности к  $C_3$ - или  $C_4$ -типу фотосинтеза, а также модели роста и развития  $C_4$ -сорного вида в посеве  $C_3$ -культуры. Что касается культур (риса, сои, пшеницы) зерновая продуктивность в опытах при обогащении  $CO_2$  и температуре  $>26^\circ C$  снижалась на 10% на каждый градус. В странах с жарким климатом температуры  $>35^\circ C$  приведут к существенному снижению урожайности из-за возросшей чувствительности цветения и закладки семян к высоким температурам, а также дефицита влаги вследствие повышенной эвапотранспирации. Ситуация осложняется еще больше при сочетании повышенной концентрации  $CO_2$  и засухи. Например, если доля биомассы сорных видов в посевах многолетних трав (культурные пастбища) увеличивалась с повышением содержания  $CO_2$  в воздухе при ограниченной и оптимальной влагообеспеченности примерно в равной мере [57], в аналогичном опыте с томатом ( $C_3$ -вид) и амарантом колосистым (*Amaranthus retroflexus* L.) в качестве сорного растения ( $C_4$ -вид) преимущество при оптимальной влагообеспеченности получал томат, а при засухе в сочетании с углекислотной подкормкой – сорное растение [58]. Это обусловлено большей продуктивностью транспирации и соответственно более эффективным использованием воды видом сорного растения [10, 59].

Ввиду высокой адаптивности сорного компонента агрофитоценоза видовой состав сорных растений существенно меняется не только в зависимости от агротехники культуры, но и погодноклиматических условий вегетационных сезонов.

Например, посевы озимой пшеницы в Центральной России в особо засушливые и жаркие сезоны были засорены зимующими сорняками на 89%, тогда как в дождливый сезон их доля снизилась до 59%. В последнем случае в Подмоскovie посевы яровых культур особенно сильно зарастали яровым сорняком марью белой, причем общая засоренность всех культур была в 2.5 раза больше, чем в засушливых условиях [8]. В засушливых условиях в сорном ценозе доминировала ромашка непахучая, достигая в отдельные годы 60–80% от общего количества сорняков. Это может свидетельствовать о высокой конкурентоспособности данного вида. Многолетние сорняки – осот полевой, бодяк полевой, чистец болотный, подорожник большой в этих условиях были немногочисленными.

С удвоением концентрации  $CO_2$  в атмосфере прогнозируется повышение температуры воздуха на 1–5°C, что вызовет аридизацию интенсивно используемых для целей растениеводства южных территорий [22, 36]. Такой сценарий в сочетании с повышенной вероятностью наступления засух может заметно осложнить защиту яровых культур от сорных растений [17], причем в засушливых условиях  $C_4$ -сорняки получают преимущество над  $C_3$ -видами. Подобное развитие событий особенно осложнит ситуацию в зонах интенсивного рисосеяния в Юго-Восточной Азии, где в условиях дефицита поливной воды фермеры вынуждены переходить на выращивание риса на богаре. Однако для этого необходимы засухоустойчивые сорта и гибриды риса. Вместе с тем в условиях засухи рис не может составить конкуренцию видам сорных растений с  $C_4$ -типом углеродного метаболизма, доминирующим в сорном ценозе [60, 61]. Переход с целью экономии воды от высадки рассады к прямому посеву семян риса в почву привел к дальнейшему повышению конкурентоспособности сорных видов над культурой и изменил динамику их роста и развития [62]. В результате засуха существенно снижала урожайность риса [63], не оказывая ощутимого влияния на накопление биомассы и развитие амаранта колючего (*Amaranthus spinosus*) и лептохлои китайской (*Lep-tochloa chinensis*) даже при минимальной влажности почвы.

Интересными представляются сравнительные исследования реакции риса и весьма вредоносного в посевах красного риса (сорняка), имеющих  $C_3$ -тип фотосинтеза и одинаковую анатомо-морфологическую структуру фотосинтетического аппарата, на повышенную концентрацию  $CO_2$  (варианты: 300 – контроль, 400 и 500 ммоль<sup>-1</sup>) при густоте посева 8 и 16 растений/м<sup>2</sup> [64]. Как биомасса, так и семенная продуктивность при обеих густотах посева оказались больше в опытных вариантах у сорного вида. Эта работа – одна из пер-

вых, где сравнили таксономически и биохимически одинаковые формы риса. В другом опыте яровой рапс в условиях глобального потепления на фоне одновременного увеличения концентрации  $O_3$ , хотя и снижал урожайность в сравнении с нормальными условиями, но благодаря лучшей антиоксидантной защите в меньшей мере, чем таксономически близкий сорный вид — дикая горчица [65]. При текущем климате конкуренция не оказала существенного влияния на оба вида.

Вместе с тем существуют специфические сорняки и для других культур — льна (плевел льняной, торица льняная и др.), проса (ежовник обыкновенный, щетинники). К произрастанию в соседстве с гречихой приспособились гречиха татарская и гречишка вьюнковая, с горохом — горох полевой, с овсом — овсюг и др. Данный факт существенно усугубляет проблему контроля сорняков, поскольку в этом случае наблюдается их максимальная приспособленность к выживанию в условиях контроля со стороны человека.

Вызывает серьезные опасения возможное снижение качества урожая риса при ожидаемом к концу столетия повышении концентрации  $CO_2$  в атмосфере до 500 ppm [66]. Снижение содержания белка, железа, цинка, а также витаминов В1, В2, В5 и В9 может заметно уменьшить питательную ценность риса, являющегося основным продуктом питания для более чем 2-х миллиардов человек [67].

#### РЕАКЦИЯ СОРНЯКОВ В АГРОФИТОЦЕНОЗЕ НА СОЧЕТАНИЕ ФАКТОРОВ СРЕДЫ

Известно, что стимуляция нетто-фотосинтеза при углекислотной подкормке выражена сильнее на растениях  $C_3$ -, чем  $C_4$ -видов, но характер реакции зависит в том числе от температуры, влагообеспеченности и агрофона [68]. Повышение температуры, частоты и интенсивности осадков [66] ускоряют выход семян сорняков из покоя и прорастание независимо от их реакции на  $CO_2$  [69, 70], оказывая влияние на пространственно-временное распределение разных вредных видов растений в агрофитоценозах. После прорастания прежде всего влагообеспеченность оказывает определяющее влияние на итоговую реакцию культуры и сорных видов на повышение концентрации  $CO_2$ . Она может быть иной, нежели реакция только нетто-фотосинтеза растений из-за принадлежности к разному типу углеродного метаболизма. При этом водный и минеральный стресс сильнее ограничивают реакцию  $C_3$ -, но не  $C_4$ -видов, что в свою очередь влияет на конкурентоспособность культуры и сорняков в посевах [71]. Что касается одновременного повышения

температуры и концентрации  $CO_2$ , реакция на подобное изменение условий по накоплению биомассы одних сорных видов может быть позитивной, других — негативной [72], как и водообеспеченности на фоне углекислотной подкормки [73]. В случае с температурой конкурентоспособность некоторых культур в сравнении с сорняками может оказаться меньше [74], что подтверждено, например, в полевых опытах с ячменем и щирцей запрокинутой (*Amaranthus retroflexus* L.) на юге Финляндии [75]. В литературе также мало сведений о результатах конкуренции культурных и сорных видов растений в посевах на отличающемся агрофоне при повышенной концентрации  $CO_2$ . В последнем случае как при сильном, так и умеренном дефиците элементов питания увеличение биомассы как культуры, так и сорного вида может быть минимальным [76]. Например, при совместном выращивании куриного проса ( $C_4$ -сорняк) и риса ( $C_3$ -культура) на фоне повышенной на 200 ppm от нормальной концентрации  $CO_2$  в воздухе, биомасса риса увеличилась сильнее, чем сорного вида только при достаточном азотном питании [77]. На низком агрофоне преимущество в накоплении биомассы переходило к куриному просу из-за снижения числа побегов риса.

Приведенные выше данные показывают, что опыты с углекислотными подкормками сорных растений необходимо проводить на фоне изменения температуры, влагообеспеченности и агрофона. Игнорирование данного факта может привести к некорректным прогнозным оценкам конкурентоспособности видов в посевах в разрабатываемых моделях и осложнить в перспективе реализацию мероприятий по защите культур от сорняков [78].

#### ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДЕЙСТВИЯ ГЕРБИЦИДОВ

Влияние концентрации  $CO_2$  и/или изменения климата на эффективность применения гербицидов определяется спецификой действия последних, видом сорняка и исходной конкурентоспособностью культурных и сорных видов в посевах. Например, если углекислотная подкормка не оказывает влияния на чувствительность амаранта колосистого (*Amaranthus retroflexus* L.) к глифосату, резистентность мари белой (*Chenopodium alba* L.) к последнему снижалась. Однако при некотором ингибировании роста ее полностью уничтожения отмечено не было [79]. Аналогичная тенденция отмечена также в опытах с бодяком полевым (*Cirsium arvense* L.), пыреем ползучим (*Elytrigia repens* L.) [80] и рядом экзотических  $C_4$ -трав [81]. В последней работе, по мнению авторов, устойчивость к глифосату сорных видов можно было бы объяснить индуцированным повышенной кон-

центрацией  $\text{CO}_2$  увеличением биомассы и площади листьев, следствием чего может быть эффект разбавления гербицида. Однако это предположение противоречит общей тенденции отсутствия прямой стимуляции роста  $\text{C}_4$ -растений в условиях обогащения воздуха двуокисью углерода. Вместе с тем не исключено, что сорные растения на подобные условия могут реагировать сильнее, чем культуры, что было показано ранее [82]. Другой гербицид — глюфосинат, действующий на клеточную мембрану, в аналогичной ситуации снижал эффективность действия против бодяка.

Одновременное повышение концентрации двуокиси углерода в атмосфере и температуры воздуха также может потенциально изменить эффективность действия гербицидов [83]. В подобных условиях ускоряется развитие сорняков, и время их нахождения в фазе проростков, наиболее чувствительной к действию гербицидов, сокращается. Например, цигалофоп-бутил (*Cyhalofop Butyl*) используют в качестве послевсходового селективного гербицида против куриного проса (*Echinochloa crusgalli* L.) в посевах риса. Данный гербицид поглощается листьями и, транспортируясь по флоэме в меристематические ткани, ингибирует синтез липидов. Дефицит последних в конечном итоге приводит к гибели всего растения. С повышением концентрации углекислоты до 700 ppm и температуры до 38/26°C, поглощение искомого гербицида и его транспорт из обработанного листа как у устойчивой, так и чувствительной формы сорняка, практически не изменились [84]. Эффективность действия гербицида, рассчитанная по степени влияния на накопление биомассы сорняком, снизилась у устойчивой формы в опытных вариантах на 50%. Это указывает на возможное увеличение гербицидоустойчивости куриного проса как ответной реакции на изменение условий выращивания [85].

Повышение концентрации  $\text{CO}_2$  и температуры одновременно косвенно может повлиять на обработку почвы: меньше времени остается для полевых работ, ускоряется зарастание почвы сорными видами, усиливается вегетативное размножение [87], что в результате ограничивает время для механической борьбы с сорняками.

Любой стрессор, действующий на культурное растение, усиливает его восприимчивость к вредителям и болезням, и снижает конкурентоспособность с сорными растениями в агрофитоценозах [88]. Например, засушливые условия стимулируют формирование толстой кутикулы листьев с меньшей плотностью устьиц и их проводимостью, что в сочетании с возросшей опушенностью листьев затрудняет проникновение гербицида в ткани листа и, соответственно, снижает эффективность его действия. Вместе с тем, она макси-

мальна на растениях с высокой скоростью обмена веществ, что достигается в благоприятных условиях выращивания.

Рост видов сорной растительности, происходящих из тропических регионов, отличается повышенной чувствительностью даже к незначительным изменениям температуры. Однако потенциальный синергический эффект одновременного повышения температуры и концентрации  $\text{CO}_2$  на них пока не установлен. На основании отдельных опытов предполагается отрицательное влияние искомым условий на тропические культуры, что, в частности, показано на примере луговых трав [89]. Это может оказать существенное влияние на конкурентоспособность культур и защиту посевов от сорных видов в результате отмеченных выше изменений анатомо-морфологических характеристик листьев, ведущих к снижению поступления в них гербицидов и, соответственно, эффективности их действия [90–92]. Повышение концентрации  $\text{CO}_2$  снижало эффективность действия глифосата на целый ряд ядовитых сорных растений с  $\text{C}_3$ - и  $\text{C}_4$ -типом фотосинтеза [93]. Вместе с тем она не зависела от концентрации  $\text{CO}_2$  у щирицы запрокинутой (*Amaranthus retroflexus* L.) и споробола индийского (*Sporobolus indicus* L.) с  $\text{C}_4$ -типом фотосинтеза, что должно привлечь внимание исследователей. Приведенные примеры с учетом резкого увеличения в последние годы числа видов сорняков с устойчивостью к гербицидам [94] вынуждают разрабатывать новые технологии защиты посевов. Однако это может привести к увеличению стоимости защитных мероприятий [95].

#### СЕЛЕКЦИЯ СОРТОВ С ПОВЫШЕННОЙ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬЮ С СОРНЫМИ ВИДАМИ

В отличие от селекции на устойчивость к вредителям и болезням, селекции на повышенную конкурентоспособность с сорняками в агрофитоценозах уделялось меньше внимания. Вместе с тем сорта некоторых культур отличаются подобным свойством: сорта фасоли [96], томата, устойчивого к повилке [97] или мелкосемянных зерновых культур [98], демонстрирующих отличающуюся конкурентоспособность при выращивании в монокультуре и в засоренных посевах. Немаловажную роль в подобном исходе играют аллелопатические свойства культур как, например, у риса сорта Рондо, выращиваемого в штате Техас (США) в системе органического земледелия [99]. В результате скрещивания шведского сорта яровой мягкой пшеницы с низкой аллелопатической активностью и туниского сорта — с высокой, методами классической селекции был создан сорт с



повышенной аллелопатической активностью [100]. В Юго-Восточной Азии, используя аналогичные подходы, были созданы сорта риса, способные подавлять сорняки в посевах [101–103]. Сорта риса с подобными свойствами были созданы также в США [104]. При этом быстрый начальный рост растений в сочетании с накоплением большей биомассы в результате интенсификации побегообразования и аллелопатической активности определяли повышенную конкурентоспособность сортов [105].

В условиях аридизации в связи с потеплением климата перспективна, в том числе для успешной конкуренции с сорной растительностью, селекция засухоустойчивых сортов. Однако они отличаются сравнительно низкой урожайностью, а поиск генетических доноров устойчивости идет в направлении совершенствования архитектоники растений, усиления мощности корневой системы, опущенности листьев и стеблей и др. Например, устойчивые к периодической засухе сорта сорго отличаются, в частности, глубоко проникающей корневой системой, высокой удельной длиной корней (см/см<sup>3</sup> почвы), толстой кутикулой листьев, активным отложением в них эпоксидных восков и эффективным функционированием устьичного аппарата [106, 107]. Генетические манипуляции позволили создать и коммерциализировать засухоустойчивую кукурузу Drought Grade™ (США) [108]. Однако засухоустойчивость далеко не всегда определяет исход конкуренции в посевах в пользу культуры, как, например, в посевах 2-х устойчивых сортов суходольного риса, засоренных спермакоце муточкастым (*Spermacoce verticillata* L.), в условиях как оптимальной, так и ограниченной влагообеспеченности [109]. Аналогичные данные получены также в другом опыте при выращивании сортов риса на богаре в присутствии в посевах 2-х видов сорных растений – щирицы колючей (*Amaranthus spinosus* L.) и лептохлои китайской (*Leptochloa chinensis* L.) с С<sub>4</sub>-типом фотосинтеза, которые, в отличие от риса, выжили и сформировали листья и побеги в условиях засухи [63].

#### ЗАЩИТНЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ В УСЛОВИЯХ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Возросший интерес к ресурсосберегающим технологиям в земледелии предполагал широкое использование глифосата для защиты посевов от сорняков. Однако это привело к резкому увеличению числа резистентных к гербицидам биотипов наиболее вредоносных сорняков. Нулевая обработка почвы при выращивании пшеницы, которую рассматривали в свое время как прорывную технологию, существенно увеличила количество и флористический состав сорных видов [110]. На-

пример, в посевах начал доминировать такой вредоносный сорняк, как щавель малый (*Rumex acetosella* L.) [111]. Повышенная толерантность к глифосату была отмечена как для сельскохозяйственных, так и инвазивных видов сорных растений, в частности, многолетнего сорняка пырея ползучего [112]. Однако подобная тенденция относится не ко всем видам сорных растений. Например, щирица зеленая, в отличие от мари белой и бодяка полевого, при углекислотной подкормке не проявляла устойчивость к глифосату [49]. Различная реакция на обработку глифосатом обнаружена также среди инвазивных травянистых форм с одинаковым типом углеродного метаболизма – С<sub>3</sub> или С<sub>4</sub> [81]. Однако глифосат при длительном применении может повысить восприимчивость культур к целому ряду болезней [113, 114]. Таким образом, защита устойчивых к глифосату культур от некоторых видов сорняков в ближайшем будущем может быть более проблематичной, особенно при минимальной обработке почвы. Другая сложность может заключаться в снижении эффективности обработок глифосатом против многолетних сорняков, поскольку по мере изменения климата происходит увеличение массы корневищ и ризом в растениях. Последнее, очевидно, вызовет повышение затрат на защитные мероприятия.

Непосредственное влияние изменений климата на физиологию, анатомию и морфологию сорных растений окажет косвенное воздействие на эффективность применения гербицидов в результате влияния на их поглощение, транспорт и метаболизм. Изменения погодных условий, включая время наступления засух или длительных интенсивных осадков, могут изменить сроки, а также сократить период (окно) максимального благоприятствования действия гербицидов и в конечном итоге также снизить эффективность их действия. Заметно осложняет ситуацию усиливающееся по мере изменения климата вегетативное размножение корневищных и корнеотпрысковых сорняков, достаточно толерантных к ограниченной влагообеспеченности почвы. Вышеизложенное предполагает изменение тактики защиты культур от сорных видов и ее адаптацию к изменившимся погодным условиям с учетом экологии и биологии сорняков. При этом особое внимание необходимо будет уделить синхронизации сроков защитных мероприятий с жизненным циклом развития сорных видов, также реагирующим на изменение параметров климата [112].

Большое значение в выборе стратегии борьбы с сорняками имеет тип засоренности почвы: малолетними сорняками с преобладанием однолетних и многолетних, выросших из семян (первый год жизни), корнеотпрысковыми корневищными или смешанным сорным ценозом.

Интегрированная защита от сорняков в Российской Федерации предполагает использование в первую очередь приемов агротехники как наиболее рациональных, экономичных и экологически безопасных. Среди агротехнических приемов ключевыми являются правильно подобранный севооборот, дифференцированная обработка почвы (сочетание отвальной и безотвальной) и использование явления аллелопатии некоторых видов растений (рапс, горчица, редька дикая и др.). В тех случаях, когда агротехническими методами невозможно подавить сорняки до безопасного уровня, целесообразно применить химическую прополку. С этой целью в различных почвенно-климатических зонах Российской Федерации используют комбинированные гербицидные препараты, имеющие в своем составе 2–3 действующих вещества, различающиеся механизмами действия и селективности и обеспечивающие снижение экотоксикантных нагрузок на окружающую среду.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Климатические изменения, оказывая влияние на конкурентоспособность культурных и сорных растений, могут заметно изменить методы борьбы против сорняков, включая химический метод с использованием смесевых гербицидов с повышенной биологической и хозяйственной эффективностью и сниженным экологическим риском. При этом особого внимания заслуживает как прямое влияние атмосферных факторов на растительные сообщества, так и косвенное – на эффективность применения гербицидов. Однако разработанные до настоящего времени модели роста и развития сорняков в агрофитоценозах весьма приблизительны и для их верификации используют данные влияния отдельных факторов изменения климата как на культуры, так и (на много реже) на сорные растения. Крайне мало исследований, включающих долгосрочные совместные действия указанных выше атмосферных факторов (загрязнителей), внутри- и межвидовую конкуренцию культуры и сорных растений, наличие вредителей и болезней на фоне изменяющихся температуры, агрофона и влагообеспеченности. Кроме того, многие исследования страдают серьезными методическими изъянами: либо воздействия неадекватно установлены, либо их дозы, в случае атмосферных факторов, неестественно высоки. Например, реакция растений на УФ-В на слабом свете в фитотронах выражена гораздо сильнее, чем при солнечном освещении. По этой причине полевые опыты более адекватно характеризуют влияние УФ-В на накопление биомассы и продуктивность растения. Однако даже в этом случае в поле растения длительное время подвергались воздействию концентрации тропо-

сферного  $O_3$ , соответствующей 15–25% снижению  $O_3$  в стратосфере, что, свою очередь, может повысить дозу УФ-В на 30–59% по сравнению с естественным фоном. Это гораздо больше, чем может происходить в реальности, и соответствует по прогнозам параметрам истощения озона в стратосфере в зоне интенсивного сельскохозяйственного производства через 30 лет. В результате данные литературы для одной и той же культуры или вида сорного растения весьма противоречивы, что необходимо учитывать при анализе их конкурентоспособности и мероприятий по защите посевов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глобальное потепление на 1.5°C: Специальный доклад МГЭИК о последствиях глобального потепления на 1.5°C выше доиндустриальных уровней и о соответствующих траекториях глобальных выбросов парниковых газов в контексте укрепления глобального реагирования на угрозу изменения климата, а также устойчивого развития и усилий по искоренению нищеты / Под ред. Массон-Дельмотт В., Чжай П., Пёртнер Г.О., Робертс Д., Ски Д., Шукла П.Р., Пирани А., Муфума-Окия В., Пеан К., Пидкок Р., Коннорс С., Мэтьюз Д.Б.Р., Чжень Я., Чжоу С., Гомис М.И., Лонной Е., Мейкок Т., Тигнор М., Уотерфилд Т. Межправительственная группа экспертов по изменению климата, 2019. 94 с.
2. Кошкин Е.И., Андреева И.В., Гусейнов Г.Г. Влияние глобальных изменений климата на продуктивность и устойчивость сельскохозяйственных культур к стрессорам // Агротехника. 2019. № 12. С. 83–96.
3. Oerke E.-C. Crop losses to pests // J. Agricult. Sci. 2006. V. 144 (1). P. 31–43.
4. Hossard L., Philibert A., Bertrand M., Colnenne-David C., Debaeke P., Munier-Jolain N., Jeuffroy M.H., Richard G., Makowski D. Effects of halving pesticide use on wheat production // Sci. Rep. 2014. V. 4:4405. P. 1–7.
5. Chakraborty S., Newton A.C. Climate change, plant diseases and food security: an overview // Plant Pathol. 2011. V. 60. № 1. P. 2–14.
6. Shaw M.W., Osborne T.M. Geographic distribution of plant pathogens in response to climate change // Plant Pathol. 2011. V. 60. P. 31–43.
7. Soltani N., Dille J.A., Burke I.C., Everman W.J., Van-Gessel M.J., Davis V.M., Sikkema P.H. Potential corn yield losses due to weeds in North America // Weed Tech. 2016. V. 30. Iss. 4. P. 979–984.
8. Особенности формирования сорного ценоза в посевах сельскохозяйственных культур // Адаптивно-интегрированная защита растений / Под ред. Спиридонова Ю.Я., Соколова М.С., Глинушкина А.П. М.: Печатный город, 2019. 628 с.
9. Власенко Н.Г., Власенко А.Г., Садохина Т.П., Кудашкин П.И. Сорные растения и борьба с ними при возделывании зерновых культур в Сибири. Новосибирск: СибНИИ земледелия и химизации сельского хозяйства, 2007. 127 с.

10. Кошкин Е.И. К проблеме конкуренции культурных и сорных растений в агрофитоценозе // Изв. ТСХА. 2016. Вып. 4. С. 53–68.
11. Andrews I.K.S., Storkey J., Sparkes D.L. A review of the potential for competitive cereal cultivars as a tool in integrated weed management // Weed Res. 2015. V. 55. P. 239–248.
12. Korres N.E., Norsworthy J.K., Tehranchian P., Gitsopoulos T.K., Loka D.A., Oosterhuis D.M., Gealy D.R., Moss S.R., Burgos N.R., Miller M.R., Palhano M. Cultivars to face climate change effects on crops and weeds: a review // Agron. Sustain. Develop. 2016. V. 36. № 12. 22 p.
13. Ziska L.H., Blumenthal D.M., Runion G.B., Hunt E.R.J., Diaz-Soltero H. Invasive species and climate change: an agronomic perspective // Climat. Change. 2011. V. 105. P. 13–42.
14. Weber E., Gut D. A survey of weeds that are increasingly spreading in Europe // Agron. Sustain. Develop. 2005. V. 25. P. 109–121.
15. Hanzlik K., Gerowitz B. Occurrence and distribution of important weed species in German winter oilseed rape fields // J. Plant Dis. Prot. 2012. V. 119. P. 107–120.
16. Ramesh K., Matloob A., Aslam F., Florentine S.K., Chauhan B.S. Weeds in a changing climate: vulnerabilities, consequences, and implications for future weed management // Front. Plant Sci. 2017. V. 8. 95 p.
17. Peters K., Gerowitz B. Important maize weeds profit in growth and reproduction from climate change conditions represented by higher temperatures and reduced humidity // J. Appl. Bot. Food Qual. 2014. V. 87. P. 234–242.
18. McDonald A., Riha S., DiTommaso A., DeGaetano A. Climate change and the geography of weed damage: analysis of U.S. maize systems suggests the potential for significant range transformations // Agric. Ecosys. Environ. 2009. V. 130. P. 131–140.
19. Mahajan G., Singh S., Chauman B.S. Impact of climate change on weeds in the rice-wheat cropping system // Curr. Sci. 2012. V. 102. P. 1254–1255.
20. Das T.K., Sharma A.R., Pathak H. Crop-weed balance studies under climate change // Climate change impact, adaptation and mitigation in agriculture: methodology for assessment and application / Eds. H. Panhak, P.K. Aggarwal, S.D. Singh. New Delhi: Indian Agricultural Research Institute, 2012. P. 131–146.
21. Peters K., Breitsameter L., Gerowitz B. Impact of climate change on weeds in agriculture: A review // Agron. Sustain. Develop. 2014. V. 34. P. 707–721.
22. Rodenburg J., Meinke H., Johnson D.E. Challenges for weed management in African rice systems in a changing climate // J. Agric. Sci. 2011. V. 149. P. 427–435.
23. McDowell R.W., Condon L.M., Main B.E., Dastgheib F. Dissipation of imazapyr, flumetsulam and thifensulfuron in soil // Weed Res. 2008. V. 37. P. 381–389.
24. Kudsk P., Kristensen J.L. Effect of environmental factors on herbicide performance // Proceedings of the first international weed control congress, Melbourne, 1992. V. 4. P. 173–186.
25. Sharma S.D., Singh M. Environmental factors affecting absorption and bio-efficacy of glyphosate in Florida beggarweed (*Desmodium tortuosum*) // Crop Protect. 2001. V. 20. Iss. 6. P. 511–516.
26. Johnson B.C., Young B.G. Influence of temperature and relative humidity on the foliar activity of mesotrione // Weed Sci. 2002. V. 50. P. 157–161.
27. Ramsey R.J.L., Stephenson G.R., Hall J.C. A review of the effects of humidity, humectants, and surfactant composition on the absorption and efficacy of highly water-soluble herbicides // Pest. Biochem. Physiol. 2005. V. 82. P. 162–175.
28. Mahan J.R., Dotray P.A., Light G.G. Thermal dependence of enzyme function and inhibition; implications for herbicide efficacy and tolerance // Physiol. Plant. 2004. V. 20. P. 187–195.
29. Kumaratilake A.R., Preston C. Low temperature reduces glufosinate activity and translocation in wild radish (*Raphanus raphanistrum*) // Weed Sci. 2005. V. 53. P. 10–16.
30. Zimdahl R.L. Fundamentals of weed science. Academic Burlington, 2007. 655 p.
31. Halvorson W.L., Guertin P. Factsheet for *Ipomoea purpurea* (L.) Roth. USGS weeds in the west project: status of introduced plants in Southern Arizona parks. U.S. Geological Survey, Southwest Biological Science Center and University of Arizona, 2003.
32. Ziska L.H., Bunce J.A. Predicting the impact of changing CO<sub>2</sub> on crop yields: some thoughts on food // New Phytol. 2007. V. 175 (4). P. 607–618.
33. Riar D.S., Norsworthy J.K., Steckel L.E., Stephenson D.O., Eubank T.W., Scott R.C. Assessment of weed management practices and problem weeds in the mid-south United States – soybean: a consultant’s perspective // Weed Technol. 2013. V. 27. P. 612–622.
34. Dukes J.S., Mooney H.A. Does global change increase the success of biological invaders? // Trends Ecol. Evol. 1999. V. 14 (4). P. 135–139.
35. Ziska L.H., Runion G.B. Future weed, pest and disease problems for plants // Agroecosystems in a changing climate / Eds. Newton P.C.D., Carman A., Edwards G.R., Niklaus P.A. CRC: Boston, 2007. P. 262–287.
36. Жученко А.А. Экологическая генетика культурных растений и проблемы агросферы (теория и практика): Монография. М.: Изд-во “Агрорус”, 2004. Т. I. 690 с.
37. Storrer A., Cook T. What impact does drought have on weeds? // Primefact 430, State of New South Wales through NSW Department of Primary Industries, 2007. № 7322. P. 1–3.
38. McGiffen M.E.J., Forcella F., Lindstrom M.J., Reicosky D.C. Covariance of cropping systems and foxtail density as predictors of weed interference // Weed Sci. 1997. V. 45. P. 388–396.
39. Leguizamón E.S., Yanniccari M.E., Guaiamet J.J., Acciarresi H.A. Growth, gas exchange and competitive ability of *Sorghum halepense* populations under different soil water availability // Can. J. Plant Sci. 2011. V. 91. P. 1011–1025.

40. Lee J. Combined effect of elevated CO<sub>2</sub> and temperature on the growth and phenology of two annual C<sub>3</sub> and C<sub>4</sub> weedy species // *Agric. Ecosys. Environ.* 2011. V. 140. P. 484–491.
41. Stratonovich P., Storkey J., Semenov M.A. A process-based approach to modelling impacts of climate change on the damage niche of an agricultural weed // *Glob. Change Biol.* 2012. V. 18. P. 2071–2080.
42. Бородуй С.А., Зубков А.Ф. Имитационно-статистическое моделирование биоценологических процессов в агроэкосистемах. СПб.: РАСХН–ВИЗР, 2001. 136 с.
43. Eastburn D.M., Degennaro M.M., Delucial E.H., Demody O., McElrone A.J. Elevated atmospheric carbon dioxide and ozone alter soybean diseases at SoyFACE // *Glob. Change Biol.* 2010. V. 16. P. 320–330.
44. Patterson D.T., Westbrook J.K., Joyce J.V., Lingren P.D., Rogasik J. Weeds, insects, and diseases // *Climate Change.* 1999. V. 43. P. 711–727.
45. Walthall C.J., Hatfield J., Backlund P. Climate change and agriculture in the United States: effects and adaptation // *USDA Tech. Bulletin.* 2012. № 1935. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, 186 p.
46. Naidu V.S.G.R., Paroha S. Growth and biomass partitioning in two weed species *Parthenium hysterophorus* (C<sub>3</sub>) and *Amaranthus viridis* (C<sub>4</sub>) under elevated CO<sub>2</sub> // *Ecol. Environ. Cons.* 2008. V. 14 (4). P. 9–12.
47. Korres N.E. Encyclopaedic dictionary of weed science: Theory and digest. Paris: Lavoisier SAS, 2005. 695 p.
48. Korres N.E., Norsworthy J.K. Influence of Palmer amaranth inter-row distance and emergence date on seed production in wide-row and drill-seeded soybean // *Proceedings of the Weed Science Society of America, Annual Meeting, Lexington, Kentucky, USA, February 9–12, 2015.*
49. Ziska L.H., Faulkner S., Lydon J. Changes in biomass and root: shoot ratio of field-grown Canada thistle (*Cirsium arvense*), a noxious, invasive weed, with elevated CO<sub>2</sub>: implications for control with glyphosate // *Weed Sci.* 2004. V. 52 (4). P. 584–588.
50. Ziska L.H., George K. Rising carbon dioxide and invasive, noxious plants: potential threats and consequences // *Water Resour. Rev.* 2004. V. 16. P. 427–446.
51. Chandrasena N. How will weed management change under climate change? Some perspectives // *J. Crop. Weed.* 2009. V. 5 (2). P. 95–105.
52. Cheng W., Inubushi K., Yagi K., Sakai H., Kobayashi K. Effects of elevated carbon dioxide concentration on biological nitrogen fixation, nitrogen mineralization and carbon decomposition in submerged rice soil // *Biol. Fertil. Soils.* 2001. V. 34 (1). P. 7–13.
53. Pujol Pereira E.I., Chung H., Scow K., Sadowsky M.J., van Kessel C., Six J. Soil nitrogen transformations under elevated atmospheric CO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> during the soybean growing season // *Environ. Pollut.* 2011. V. 159 (2). P. 401–407.
54. Tu C., Booker F.L., Burkey K.O., Hu S. Elevated atmospheric carbon dioxide and O<sub>3</sub> differentially alter nitrogen acquisition in peanut // *Crop Sci.* 2009. V. 49. Iss. 5. P. 1827–1836.
55. Booker F., Muntifering R., McGrath M. The ozone components of global change: potential effects on agriculture and horticulture plant yield, product quality and interactions with invasive species // *J. Integrat. Plant Biol.* 2009. V. 51 (4). P. 337–351.
56. Alberto A., Ziska L., Cervancia C., Manalo P. The influence of increasing carbon dioxide and temperature on competitive interactions between a C<sub>3</sub> crop, rice (*Oryza sativa*) and a C<sub>4</sub> weed (*Echinochloa glabrescens*) // *Funct. Plant Biol.* 1996. V. 23 (6). P. 795–802.
57. Newton P.C.D., Clark H., Bell C.C., Glasgow E.M. Interaction of soil moisture and elevated CO<sub>2</sub> on the above-ground growth rate, root length density and gas exchange of turves from temperate pasture // *J. Exp. Bot.* 1996. V. 47 (6). P. 771–779.
58. Valerio M.M., Tomecek B., Lovelli S., Ziska L.H. Quantifying the effect of drought on carbon dioxide-induced changes in competition between a C<sub>3</sub> crop (tomato) and a C<sub>4</sub> weed (*Amaranthus retroflexus*) // *Weed Res.* 2011. V. 51. P. 591–600.
59. Knapp A.K., Hamerlyn C.K., Owensby C.E. Photosynthetic and water relations response to elevated CO<sub>2</sub> in the C<sub>4</sub> grass, *Andropogon gerardii* // *Int. J. Plant Sci.* 1993. V. 154. P. 459–466.
60. Saito K. Weed pressure level and the correlation between weed competitiveness and rice yield without weed competition: An analysis of empirical data // *Field Crops Res.* 2010. V. 117 (1). P. 1–8.
61. Caton B.P., Mortimer M., Hill J.E., Johnson D.E. A Practical field guide to weeds of rice in Asia / 2<sup>nd</sup> Edn. Los Baños: International Rice Research Institute, 2010. 118 p.
62. Matloob A., Khaliq A., Tanveer A., Hussain S., Aslam F., Chauhan B.S. Weed dynamics in dry direct-seeded fine rice as influenced by tillage system, sowing time and weed competition duration // *Crop Protect.* 2015. V. 71. P. 25–38.
63. Chauhan B.S., Abugho S.B. Effect of water stress on the growth and development of *Amaranthus spinosus*, *Lepidochloa chinensis*, and rice // *Am. J. Plant Sci.* 2013. V. 4. P. 989–998.
64. Ziska L.H., Tomecek M.B., Gealy D.R. Competitive interactions between cultivated and red rice as a function of recent and projected increases in atmospheric carbon dioxide // *Agron. J.* 2010. V. 102. P. 118–123.
65. Kacienė G., Miškelytė D., AbdElgawad H., Beemster G., Asard H., Dikšaitytė A., Žaltauskaitė J., Sujetovienė G., Januškaitienė I., Juknys R. O<sub>3</sub> pollution on a future climate increases the competition between summer rape and wild mustard // *Plant Physiol. Biochem.* 2019. V. 135. P. 194–205.
66. IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, 2014.
67. Zhu C., Kobayashi K., Loladze I., Zhu J., Jiang Q., Xu X., Liu G., Seneweera S., Ebi K.L., Drewnowski A., Fukagawa N.K., Ziska L.H. Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) levels this century will alter the protein, micronutrients, and vitamin content of rice grains with potential health consequences for the poorest rice-dependent countries // *Sci. Adv.* 2018. V. 4. 8 p.

68. *Hikosaka K., Onoda Y., Kinugasa T., Nagashima H., Anten N.P.R., Hirose T.* Plant responses to elevated CO<sub>2</sub> concentration at different scales: leaf, whole plant, canopy, and population // *Ecol. Res.* 2005. V. 20. P. 243–253.
69. *Ooi M.K.J., Denham A.J., Santana V.M., Auld T.D.* Temperature threshold of physically dormant seeds and plant functional response to fire: variation among species and relative impact of climate change // *Ecol. Evolut.* 2014. V. 4. P. 656–671.
70. *Jaganathan G.K., Liu B.* Role of seed sowing time and microclimate on germination and seedling establishment of *Dodonaea viscosa* (Sapindaceae) in a seasonal dry tropical environment – an insight into restoration efforts // *Botany.* 2015. V. 93 (1). P. 23–29.
71. *Belote R.T., Weltzina J.F., Norby R.J.* Response of an understory plant community to elevated CO<sub>2</sub> depends on differential responses of dominant invasive species and is mediated by soil water availability // *New Phytol.* 2003. V. 161. P. 827–835.
72. *Tremmel D.C., Patterson D.T.* Responses of soybean and five weeds to CO<sub>2</sub> enrichment under two temperature regimes // *Can. J. Plant Sci.* 1993. V. 73. P. 1249–1260.
73. *Springer C.J., Ward J.K.* Flowering time and elevated atmospheric CO<sub>2</sub> // *New Phytol.* 2007. V. 176. P. 243–255.
74. *Wolfe D.W., Ziska L., Petzoldt C., Seaman A., Chase L., Hayhoe K.* Projected change in climate thresholds in the North eastern U.S.: implications for crops, pests, livestock, and farmers // *Mitigat. Adapt. Strat. Glob. Change.* 2008. V. 13. P. 555–575.
75. *Hyvonen T.* Impact of temperature and germination time on the success of a C<sub>4</sub> weed in a C<sub>3</sub> crop: *Amaranthus retroflexus* and spring barley // *Agric. Food Sci.* 2011. V. 20. P. 183–190.
76. *Seneweera S., Milham P., Conroy J.* Influence of elevated CO<sub>2</sub> and phosphorus nutrition on the growth and yield of a short-duration rice (*Oryza sativa* L. cv. Jarrah) // *Aust. J. Plant Physiol.* 1994. V. 21. P. 281–292.
77. *Zhu C., Zeng Q., Ziska L.H., Zhu J., Xie Z., Liu G.* Effect of nitrogen supply on carbon dioxide induced changes in competition between rice and barnyard grass (*Echinochloa crus-galli*) // *Weed Sci.* 2008. V. 56. P. 66–71.
78. *Lima M., Navarrete L., Gonzalez-Andujar J.L.* Climate effects and feedback structure determining weed population dynamics in a long-term experiment // *PLoS ONE.* 2012. V. 7:e30569.
79. *Ziska L.H., Teasdale J.R., Bunce J.A.* Future atmospheric carbon dioxide may increase tolerance to glyphosate // *Weed Sci.* 1999. V. 47. P. 608–615.
80. *Ziska L.H., Teasdale J.R.* Sustained growth and increased tolerance to glyphosate observed in a C<sub>3</sub> perennial weed, quackgrass (*Elytrigia repens*), grown at elevated carbon dioxide // *Aust. J. Plant Physiol.* 2000. V. 27. P. 159–164.
81. *Manea A., Leishman M.R., Downey P.O.* Exotic C<sub>4</sub> grasses have increased tolerance to glyphosate under elevated carbon dioxide // *Weed Sci.* 2011. V. 59. P. 28–36.
82. *Ziska L.H., Bunce J.A.* Influence of increasing carbon dioxide concentration on the photosynthetic and growth stimulation of selected C<sub>4</sub> crop and weeds // *Photosynth. Res.* 1997. V. 54. P. 199–208.
83. *Varanasi A., Prasad P.V.V., Jugulam M.* Impact of climate change factors on weeds and herbicide efficacy // *Adv. Agron.* 2015. V. 135. P. 107–146.
84. *Refatti J.P., Avila L.A., Camargo E.R., Ziska L.H., Oliveira C., Salas-Perez R., Rouse C.E., Roma-Burgos N.* High [CO<sub>2</sub>] and temperature increase resistance to Cyhalofop-Butyl in multiple-resistant *Echinochloa colona* // *Front. Plant Sci.* 2019. V. 10. Art. 529. P. 1–11.
85. *Rouse C.E., Burgos N.R., Norsworthy J.K., Tseng T.M., Starkey C.E., Scott R.C.* *Echinochloa* resistance to herbicides continues to increase in Arkansas rice fields // *Weed Technol.* 2018. V. 32. P. 34–44.
86. *Roma-Burgos N., Heap I.M., Rouse C.E., Lawton-Rauh A.L.* Evolution of herbicide-resistant weeds / Eds. Korres N.E., Burgos N.R., Duke S.O. Boca Raton, FL: CRC Press, 2019. P. 92–132.
87. *Ziska L.H.* Rising carbon dioxide and weed ecology // *Weed Biology and Management.* Dordrecht: Kluwer Publishing, 2004. P. 159–176.
88. *Patterson D.T.* Weeds in a changing climate // *Weed Sci.* 1995. V. 43. P. 685–701.
89. *Scott J.K., Murphy H., Kriticos D.J., Webber B.L., Ota N., Loebel B.* Weeds and climate change: supporting weed management adaptation. CSIRO: Australia, 2014. 73 p.
90. *Coakley S.M., Scherm H., Chakabotho S.* Climate change and plant disease management // *Ann. Rev. Phytopathol.* 1999. V. 37. P. 399–426.
91. *Poorter H., Navas M.L.* Plant growth and competition at elevated CO<sub>2</sub>: on winners, losers and functional groups // *New Phytol.* 2003. V. 157 (2). P. 175–198.
92. *Dukes J.C., Pontius J., Orwig D., Garnas J.R., Rodgers V.L., Brazee N., Cooke B., Theoharides K.A., Stange E.E., Harrington R., Ehrenfeld J., Gurevitch J., Lerdau M., Stinson K., Wick R., Ayres M.* Responses of insect pests, pathogens, and invasive plant species to climate change in the forests of northeastern North America: What can we predict? // *Can. J. For. Res.* 2009. V. 39. P. 231–248.
93. *Ziska L.H.* Climate, CO<sub>2</sub> and invasive weed management // *Invasive species and global climate change* / Eds. Ziska L.H., Dukes J.S. CABI Invasive Series, Boston: Wallingfort, 2014. P. 293–305.
94. *Heap I.* The international survey of herbicide resistant weeds. [Электр. ресурс] [www.weedscience.org](http://www.weedscience.org)
95. *Karl T.R., Melillo J.M., Peterson T.C.* Global climate change impacts in the United States. A state of knowledge report from the U.S. Global Change Research program. N.Y.: Cambridge University Press, 2009. 196 p.
96. *Malik V.S., Swanton C.J., Michaels T.E.* Interaction of white bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars, row spacing, and seeding density with annual weeds // *Weed Sci.* 1993. V. 41. P. 62–68.
97. *Goldwasser Y., Lanini W.T., Wrobel R.L.* Tolerance of tomato varieties to *Lespedeza dodder* // *Weed Sci.* 2001. V. 49. P. 520–523.
98. *Juskiw P.E., Helm J.H., Salmon D.F.* Competitive ability in mixtures of small grain cereals // *Crop Sci.* 2000. V. 40. P. 159–164.

99. *Gealy D.R., Yan V.* Weed suppression potential of 'Rondo' and other indica rice germplasm lines // *Weed Techn.* 2012. V. 26. P. 517–524.
100. *Bertholdsson N.O.* Breeding spring wheat for improved allelopathic potential // *Weed Res.* 2010. V. 50. P. 49–57.
101. *Chen X.H., Hu F., Kong C.H.* Varietal improvement in rice allelopathy // *Allelopathy J.* 2008. V. 22. P. 379–384.
102. *Pheng S., Olofsdotter M., Jahn G., Nesbitt H., Adkins S.* Potential allelopathic rice lines for weed management in Cambodian rice production // *Weed Biol. Manag.* 2009. V. 9. P. 259–266.
103. *Kong C.H., Chen X.H., Hu F., Zhang S.Z.* Breeding of commercially acceptable allelopathic rice cultivars in China // *Pest. Manag. Sci.* 2011. V. 67. P. 1100–1106.
104. *Gealy D.R., Moldenhauer K.A., Jia M.H.* Field performance of STG06L-35-061, a new genetic resource developed from crosses between weed-suppressive indica rice and commercial southern U.S. long-grains // *Plant Soil.* 2013. V. 370. P. 277–293.
105. *Worthington M., Reberg-Horton S.C.* Breeding cereal crops for enhanced weed suppression: optimizing allelopathy and competitive ability // *J. Chem. Ecol.* 2013. V. 39. P. 213–231.
106. *Assefa Y., Staggenborg S.A., Prasad V.P.V.* Grain sorghum water requirement and responses to drought stress: a review // *Online. Crop Manag.* 2010. V. 9 (1). <https://doi.org/10.1094/CM-2010-1109-01-RV>
107. *Schittenhelm S., Schroetter S.* Comparison of drought tolerance of sweet sorghum and sorghum-sudangrass hybrids // *J. Agron. Crop Sci.* 2014. V. 200. P. 46–53.
108. *Waltz E.* Beating the heat // *Nat. Biotechnol.* 2014. V. 32. P. 610–613.
109. *Cerqueira F.B., Erasmo E.A.L., Silva J.I.C., Nunes T.V., Carvalho G.P., Silva A.A.* Competition between drought-tolerant upland rice cultivars and weeds under water stress condition // *Planta Daninha.* 2013. V. 31 (2). P. 291–302.
110. *Matloob A., Khaliq A., Chauhan B.S.* Weeds of rice in Asia: problems and opportunities // *Adv. Agron.* 2015. V. 130. P. 291–336.
111. *Chauhan B.S., Prabhjot-Kaur M.G., Randhawa R.J., Singh H., Kang M.S.* Global warming and its possible impact on agriculture in India // *Adv. Agron.* 2014. V. 123. P. 65–121.
112. *Ziska L.H., McConnell L.L.* Climate change, carbon dioxide, and pest biology: monitor, mitigate, management // *J. Agric. Food Chem.* 2015. V. 64. P. 6–12.
113. *Кошкин Е.И., Гусейнов Г.Г.* Экологическая физиология сельскохозяйственных культур. М.: Изд-во "Проспект", 2020. 576 с.
114. *Martinez D.A., Loening U.E., Graham M.C.* Impacts of glyphosate-based herbicides on disease resistance and health of crops: a review // *Environ. Sci. Europe.* 2018. V. 30. № 2. 14 p.

## Response of Weeds in the Canopy to Climate Change

**E. I. Koshkin<sup>a,#</sup>, I. V. Andreeva<sup>a</sup>, G. G. Guseinov<sup>b</sup>,  
K.G. Guseinov<sup>c</sup>, and F. S.-U. Dzhaliyov<sup>a</sup>**

<sup>a</sup> *Russian State Agrarian University—Moscow Timiryazev Agricultural Academy  
Timiryazevskaya ul. 49, Moscow 127550, Russia*

<sup>b</sup> *Group of Companies HH group  
shosse Khyrdalan-Binagadi 34N, AZ1102 Baku, Republic of Azerbaijan*

<sup>c</sup> *Institute of Crop Protection and Industrial Crops  
Aziza Alieva str. 91, AZ1100 Gyanja, Republic of Azerbaijan*

<sup>#</sup> *E-mail: ekoshkin@rgau-msha.ru*

Response of different species (life forms) of weeds in a canopy to elevated concentrations of CO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, rates UV-B in a combination with increased air temperatures as well as water and mineral nutrition supply is discussed in the review. Effects of the above factors on crop – weed competitiveness and its relationship to possible changes in herbicides use efficiency against weeds are analyzed.

*Key words:* weeds, weed – crop competitiveness, crop protection against weeds, herbicides, climate change.